

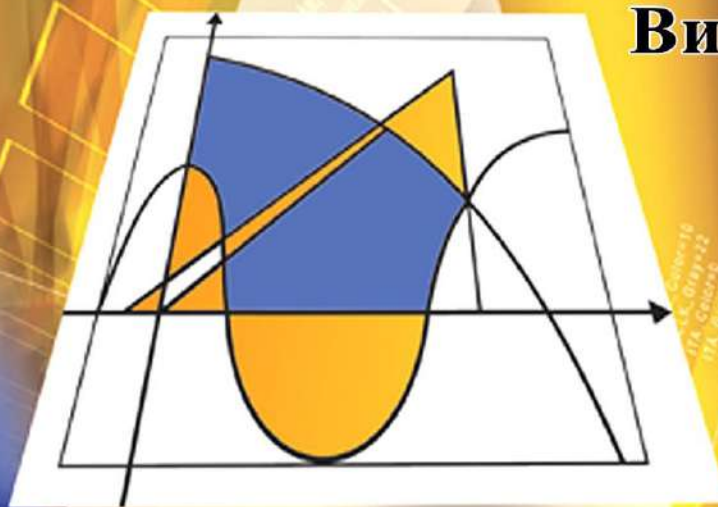
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



ЛУЦЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ
ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

НАУКОВІ НОТАТКИ

Випуск 65



ЛУЦЬК - 2019

НАУКОВІ НОТАТКИ

**Міжвузівський збірник
(за галузями знань «Технічні науки»)**

**Випуск 65
2019**

Луцьк 2019

РЕДАКЦІЙНА РАДА

Пустюльга С.І., декан МБФ, Луцький НТУ, д.т.н, професор; Рудь В.Д., Луцький НТУ, д.т.н., професор; Савчук П.П., ректор, Луцький НТУ, д.т.н., професор; Шваб'юк В.І., Луцький НТУ, д.т.н., професор; Заболотний О.В., декан ТФ, Луцький НТУ, к.т.н., доцент.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Рудь В.Д., д.т.н., професор, Луцький НТУ (відповідальний редактор); Пустюльга С.І., д.т.н., професор, Луцький НТУ (заступник відповідального редактора); Заболотний О.В., к.т.н., доц., Луцький НТУ (заступник відповідального редактора); Савчук І.В., асистент, Луцький НТУ (відповідальний секретар); Бобир М.І., д.т.н., професор, НТУ України "КПІ"; Гевко Б.М., д.т.н., професор, Тернопільський НТУ; Дядюра К.О., д.т.н., професор, Сумський державний університет; Жигуц Ю.Ю., д.т.н., професор, ДВНЗ Ужгородський національний університет; Кіндрачук М.В., д.т.н., професор, Національний Авіаційний університет; Лотиш В.В., к.т.н., доц., Луцький НТУ; Майстренко А.Л., д.т.н., член-кореспондент НАН України, Інститут надтвердих матеріалів; Максимович В.М., д.ф.-м.н., професор, Луцький НТУ; Пальчевський Б.О., д.т.н., професор, Луцький НТУ; Петраков Ю.В., д.т.н., професор, НТУ України "КПІ"; Петровський В.Я., д.т.н., професор, інститут проблем матеріалознавства НАН України; Повстяной О.Ю., к.т.н., доц., Луцький НТУ; Савчук П.П., д.т.н., професор, Луцький НТУ; Струтинський В.Б., д.т.н., професор, НТУ України "КПІ"; Студеняк І.П., д.т.н., професор, ДВНЗ Ужгородський національний університет; Шваб'юк В.І., д.т.н., професор, Луцький НТУ; Штерн М.Б., д.т.н., професор, Інститут проблем матеріалознавства НАН України; Ярошевич М.П., д.т.н., професор, Луцький НТУ; Allison Macmillan, професор, доктор PhD, Глїндворський університет (Уельс, Великобританія); Драган О.В., к.т.н., доцент, Брестський державний технічний університет (Білорусь); Патер Збігнев, д.т.н., професор, Люблінська політехніка (Польща); Геворк Петросян, д.т.н., професор, Вірменський державний університет (Вірменія); Дімітер Ставнев, д.т.н., професор, Технічний університет м. Варні (Болгарія); Дешка Маркова, д.т.н., професор, Технічний університет м. Габрово (Болгарія)

Рекомендовано до друку Вченою радою Луцького національного технічного університету, протокол № 8 від 26.03.2019 р.

Свідоцтво Міністерства юстиції України про державну реєстрацію:

Серія КВ №15901-4373ПР від 13.11.2009 р.

Включено до Переліку наукових фахових видань України наказ МОН України № 528 від 12.02.2015 року та в наукометричну базу РИНЦ.

ISSN: 24-15-39-66

© Луцький національний технічний університет, 2019 р.

ШАНОВНІ ДОПISУВАЧІ, КОЛЕГИ!

Згідно наказу МОН України № 528 від 12.02.2015 р. затверджено Міжвузівський збірник наукових праць «НАУКОВІ НОТАТКИ», що видається Луцьким національним технічним університетом як наукове фахове видання України.

В збірнику публікуються результати теоретичних та експериментальних досліджень, які раніше не висвітлювались в друці. Враховуючи, що збірник є фаховим виданням, в ньому корисно друкувати результати дисертаційних досліджень на здобуття наукового ступеня кандидата та доктора технічних наук за галузями знань "Технічні науки"

Статті друкуються українською, англійською або російською мовами.

Довідки за тел. (0332) 26-25-19 e-mail: notatki@ukr.net

Наша адреса:

43018, м. Луцьк, вул. Потебні, 56

Луцький національний технічний університет,
редакція міжвузівського збірника "Наукові нотатки"

Веб-сайт збірника: <http://notatki.com.ua>

З повагою,

*Відповідальний редактор,
професор Луцького НТУ*

В.Д. Рудь

ЗМІСТ

Зміст	4
Андрущак І.Є., Матвійв Ю.Я., Андрущук І.В., Ящук А.А., Марценюк В.П. Особливості алгоритмів реалізації Data Mining в базах даних.....	8
Бандура І.О., Романюк М.В. Аналіз існуючих методів та засоби випробування шунтових реакторів.....	15
Бандура І.О., Романюк М.В. Дослідження методів випробування шунтових реакторів високою напругою.....	19
Безбах О.М. Дослідження фізико-механічних властивостей модифікованих 4,4'-метиленбіс (2-метоксианіліном) епоксидних композитів.....	23
Букетов А.В., Негруца Р.Ю., Яцюк В.М. Вплив модифікатора 2,4-діаміноазобензол-4'-карбонової кислоти на адгезійні властивості та залишкові напруження захисних полімерних покриттів.....	30
Волков В.П., Грищук І.В., Володарець М.В., Погорлецький Д.С., Симоненко Р.В. Особливості дослідження теплоенергетичних характеристик теплоакмулюючого матеріалу для здійснення комбінованого прогріву гібридного транспортного засобу.....	39
Ганзюк А.Я., Стремецький О.І. Дослідження основних показників вуглеводневих сумішей, очищених гідрофобними сорбційними матеріалами.....	47
Дегтяр М.В., Галкіна О.П. Екологічний моніторинг стану довкілля об'єктів складування відходів.....	55
Дробот О.С., Підгайчук С.Я., Бабак О.П., Яворська Н.М. Аналіз дефектів елементів деталей сучасних систем водопостачання.....	61
Дудник В.Ю. Використання системного аналізу для розв'язку анафори природомовних текстів для української мови.....	67
Дудніков А.А., Дудник В.В., Канівець О.В., Дрожжана О.У. Зміцнення деталей вібраційним пластичним деформуванням.....	74
Засідко І.Б., Полупренко М.С., Мандрик О.М. Використання цеоліту і антрациту для очищення природних та стічних вод від йонів важких металів.....	80
Іванюк О.В., Осьмук М.П. Утилізація промислових відходів в технології синтезу неорганічних пігментів у різних оксидних системах.....	87
Клец Д.М., Назаров О.І., Шпінда Є.М., Калашніков Є.Є. Оцінка реалізації гальмових моментів на осях легкового автомобіля з урахуванням аеродинамічного опору руху.....	93
Ковальов В.Д., Мельник М.С., Антоненко Я.С. Адаптивна система управління похибками обробки виробу з урахуванням геометричних відхилень несучої системи та температурних деформацій.....	101
Ковальчук С.Б., Горик О.В. Природна система координат для криволінійних композитних брусків із незмінними лінійними розмірами поперечних перерізів.....	106
Кулініч В.Г. Адгезійні властивості модифікованої 4,4-діамінодифенілметаном епоксидної матриці.....	118
Кухар В.З. Поширення плоскої тріщини високотемпературної повзучості.....	124
Лежнюк П.Д., Комар В.О., Кравчук С.В., Бандура І.О. Фотоелектрична станція з накопичувачем як елемент балансування режиму в локальній електричній системі.....	129
Лежнюк П.Д., Комар В.О., Кравчук С.В., Бандура І.О. Фотоелектричні станції як засіб регулювання перетоків реактивної потужності в електричній системі.....	137
Лобашов О.О., Прасоленко О.В., Бурко Д.Л. Закономірності зміни часу реакції водія у темну пору доби.....	142
Мазін С.П., Маренко Г.М., Страшний І.Л. Пропозиції з удосконалення конструкції приводу робочих гальмівних систем автобронетанкової техніки.....	148
Мармут І.А. До питання вибору обладнання для діагностування гібридних автомобілів та електромобілів.....	153
Мастепан С.М. Оцінка ефективності витрат на підвищення якості послуг автосервісу.....	159
Мащенко В.А. Визначення модулів пружності конструкційних та гетерогенних матеріалів ультразвуковим методом.....	165

<i>Мисюра М.І., Шпінда Є.М., Цибульський В.А.</i> Вибір раціонального варіанту розподілугальмівних сил між осями легкового автомобіля Lanos Sens.....	170
<i>Мікуліч О.А.</i> Дослідження взаємовпливу дефектів у пластинчастих елементах за нестационарного навантаження.....	177
<i>Міницький А.В., Сосновський Л.О., Лобода П.І., Бесарабець Ю.Й.</i> Вплив технологічних параметрів на процес вільної осадки порошкових матеріалів на основі заліза.....	183
<i>Недашківський Є.А.</i> Програмна реалізація інформаційної технології для аналізу та прогнозування фінансових часових рядів на основі лінгвістичного моделювання.....	189
<i>Неміш В.М., Березька К.М.</i> Розтяг-стиск ізотропного середовища з неканонічними порожнинами.....	198
<i>Новицький Ю.Л., Шевчук Г.Я., Топилко Н.І., Топилко С.В.</i> Оптимізація технологічного та економічного ефектів при виготовленні тонкостінних залізобетонних виробів шляхом використання добавок модифікаторів.....	205
<i>Окрепкий Б.С., Хома Н.Г.</i> Визначення температурного поля в шарі з урахуванням теплообміну через тонкий проміжковий шар.....	212
<i>Романюк М.В., Волинець В.І., Бандура І.О., Лишук В.В.</i> Теоретичне обґрунтування методу селективного захисного вимкнення в двопровідних мережах постійного струму.....	217
<i>Росул Р.В., Садовнікова Т.М., Рейс Т.Т.</i> Стан та методи підвищення виготовлення комфортного взуття.....	225
<i>Сапронов О.О., Шарко О.В., Круглий Д.Г., Клевцов К.М., Аппазов Е.С.</i> Епоксидні композити для підвищення ресурсу роботи деталей засобів транспорту.....	233
<i>Скідан В.В., Єфімчук Г.В.</i> Інноваційні освітні підходи при викладанні технічних дисциплін у закладах вищої освіти.....	238
<i>Сорокіна К.Б.</i> Аналіз можливості застосування багатоступеневого анаеробного зброджування осадів стічних вод.....	243
<i>Терешкевич Л.Б., Бандура І.О., Хоменко О.О.</i> Метод розрахунку внутрішнього симетрування однофазних електроприймачів у вузлах чотирипровідної мережі.....	249
<i>Терлецький Т.В., Любитовець В.В., Ткачук А.А., Кайдик О.Л., Мороз С.А.</i> Особливості побудови шлейфів пожежної сигналізації.....	254
<i>Тимошук В.М., Гануліч Б.К., Лісковець С.М., Гуда О.В.</i> Застосування методів теорії наближення бігармонічних функцій до дослідження граничної поведінки розв'язків деяких крайових задач.....	261
<i>Юрженко М.В.</i> Аналіз особливостей формування та використання багатошарових армованих композитних труб на основі поліпропілену та проблеми їх зварювання (огляд).....	266
<i>Чигвінцева О.П., Рула І.В., Бойко Ю.В.</i> Вивчення термічних і трибологічних властивостей ароматичних поліамідів.....	274

CONTENT

<i>Contents</i>	4
<i>Andrushchak I.Ye., Matviiv Yu.Ya., Androshchuk I.V., Yashchuk A.A., Marceniyk V.P.</i> Peculiarities of Data Mining realizations in data bases.....	8
<i>Bandura I., Romanyuk M.</i> Analysis of existing methods and methods of protection of shutter reactors.....	15
<i>Bandura I., Romanyuk M.</i> Research of methods of test of shunt reactors with high voltage.....	19
<i>Bezbakh O.M.</i> Investigation of physicomechanical properties of epoxy composites modified with 4,4'-methylenebis (2-methoxyaniline).....	23
<i>Buketov A.V., Negrutsa R.Yu., Yatsyuk V.M.</i> 2,4-diaminoazobenzene-4'-carboxylic acid modifier effect on adhesive properties and protective polymer coatings residual stresses.....	30
<i>Volkov V., Gritsuk I., Volodarets M., Pohorletskyi D., Symonenko R.</i> Features of the study of thermal and energy characteristics of the heat-accumulating material for the combined heating of a hybrid vehicle.....	39
<i>Hansyuk A., Stremetsky O.</i> The adsorption of petroleum products on saponite clays modified by polyorganosiloxanes was investigated.....	47
<i>Degtyar M., Galkina O.</i> Ecological monitoring of the environmental state of waste concrete objects.....	55
<i>Drobot O.C., Pidgaychik C.J., Babak O.P., Yavorskaya N.M.</i> Defect analysis of the elements of a modern water supply system's parts.....	61
<i>Dudnik V.Y.</i> Use of system analysis for the solution of the anaphor for natural language texts for the ukrainian language.....	67
<i>Dudnikov A., Dudnyk V., Kanivets V., Drozhchana O.</i> Strengthening details by virband plastic deformation.....	74
<i>Zasidko I., Polutrenko M., Mandryk O.</i> Use of zeolite and anthracite for natural water and effluents cleaning from heavy metals ions.....	80
<i>Ivanyuk E.V., Osmuk M.P.</i> Utilization of industrial waste in the technology of synthesis of inorganic pigments in different oxide systems.....	87
<i>Klets D.M., Nazarov A.I., Spinda E.M., Kalashnikov E.E.</i> Evaluation of the realization of brake moments on the axis of a passenger car taking into account aerodynamic resistance to movement.....	93
<i>Kovalov V., Melnik M., Antonenko Y.</i> Adaptive control system of processing errors of details taking into account geometric differences of the carrier system and temperature deformation.....	101
<i>Kovalchuk S., Goryk O.</i> Natural coordinate system for curvilinear composite bars with stationary linear dimensions of cross sections.....	106
<i>Kulinich V.G.</i> Epoxy matrix's adhesive properties alteration of after adding the modifier 4,4-diaminodiphenylmethane.....	118
<i>Koukhar V.Z.</i> High temperature flat creep crack propagation.....	124
<i>Lezhnyuk P., Komar V., Kravchuk S., Bandura I.</i> Photoelectric station with accelerator as a element of balancing the mode in the local electronic system.....	129
<i>Lezhnyuk P., Komar V., Kravchuk S., Bandura I.</i> Photoelectric station as a means of regulation of reactive power connections in the electrical system.....	137
<i>Lobashov O., Prasolenko O., Burko D.</i> Regularities of changing the time of the driver's reaction during the dark time of the day.....	142
<i>Mazin S.P., Marenko G.M., Strashnyi I.L.</i> Proposals for the design of the water cannon special machine for units for the protection of public order.....	148
<i>Marmut I.</i> To the question of the selection of equipment for the diagnosis of hybrid cars and electric cars.....	153
<i>Mastepan S.</i> The evaluation of cost efficiency to quality improvement of the car-care center.....	159
<i>Mashchenko V.</i> Determination of elasticity modules of constructional and heterogeneous materials by ultrasonic method.....	165
<i>Mysjura M.I., Spinda E.M., Tsybulsky V.A.</i> Rational arbitrium genera divisae copiae braking inter subter basi una cars Lanos Sens.....	170
<i>Mikulich O.A.</i> Investigation of defect interaction in plate elements under non-stationary load.....	177
<i>Minitsky A.V., Sosnovsky L.A., Loboda P.I., Besarabec Y.I.</i> Effect of technological parameters on the process of free draft of powder materials on the basis of iron.....	183

<i>Nedashkivskiy Y.A.</i> Software implementation of information technology for analyzing and forecasting financial time series based on linguistic modeling.....	189
<i>Nemish V.N., Berezka K.M.</i> Stretching-compression of the isotropic medium with non-canonical cavities.....	198
<i>Novyckiy Y.L., Shevchuk H.Ya., Topylko N.I., Topylko S.V.</i> Manufacturing of small-ferrous concrete products by the use of added modifiers.....	205
<i>Okrepkiy B.S., Khoma N.H.</i> Determination of a temperature field in the layer with thermal exchange through an intermediate layer.....	212
<i>Romanyuk M., Volynets V., Bandura I., Lyshuk V.</i> Theoretical grounds for a selective security change method in two-direct networks of a permanent structure.....	217
<i>Rosul R., Sadovnikova T., Rejs T.</i> State and methods of improving production comfortable footwear.....	225
<i>Sapronov O.O., Sharko O.V., Krugliy D.G., Klevtsov K.M., Appazov E.S.</i> Epoxy composites for improving resource work of details vehicles of transport.....	233
<i>Skidan V., Yefimchuk H.</i> Innovative educational approaches for teaching technical disciplines in higher education institutions.....	238
<i>Sorokina K.</i> Analysis of use possibility of sewage sludge multistage anaerobic digestion.....	243
<i>Tereshkevich L., Bandura I., Khomenko O.</i> Method of calculation of internal symbolization of one-phase electric pipes in high-pointing network networks.....	249
<i>Terletskiy T., Lyubitovets V., Tkachuk A., Kaidyk O., Moroz S.</i> Features of construction of the plume fire alarm.....	254
<i>Tymoshchuk V., Ganulich B., Liskovets S., Guda O.</i> Application of the methods of the approximation theory of biharmonic functions to investigation the limiting behavior of the solutions of some boundary-value problems.....	261
<i>Iurzenko M.V.</i> Analysis of the peculiarities of formation and use of multilayer reinforced composite pipes based on polypropylene and problems of their welding (review).....	266
<i>Chigvintseva O.P., Rula I.V., Boyko Yu.V.</i> Study of the thermal and tribological properties of aromatic polyamides phenylone.....	274

УДК 004.8; 681.3.06-519.852.6

І.С. Андрушак¹, Ю.Я. Матвійв, І.В. Андрушук, А.А. Яшук, В.П. Марценюк²¹Луцький національний технічний університет, Україна²Академія технічно-гуманістична в Бяльско-Бялі, Польща**ОСОБЛИВОСТІ АЛГОРИТМІВ РЕАЛІЗАЦІЇ DATA MINING В БАЗАХ ДАНИХ**

У статті розглядаються і аналізуються особливості технології Data Mining. Детально описуються завдання, які вирішує дана технологія, перераховуються методи вирішення цих завдань. Прیدілено окрему увагу нечіткій логіці, генетичним алгоритмам і нейронним мережам, продемонстровано процес вирішення завдання методами Data Mining.

Ключові слова: Data Mining, аналіз даних, нейронні мережі, генетичні алгоритми, статистичні методи.

И.Е. Андрушак¹, Ю.Я. Матвиив, И.В. Андрушук, А.А. Яшук, В.П. Марценюк²¹Луцкий национальный технический университет, Украина²Академия техническо-гуманитарическая в Бяльско-Бялей, Польша**ОСОБЕННОСТИ АЛГОРИТМОВ РЕАЛІЗАЦІЇ DATA MINING В БАЗАХ ДАННЫХ**

В статье рассматриваются и анализируются особенности технологии Data Mining. Подробно описываются задачи, которые решает данная технология, перечисляются методы решения этих задач. Уделено особое внимание нечеткой логике, генетическим алгоритмам и нейронным сетям, продемонстрировано процесс решения задачи методами Data Mining.

Ключевые слова: Data Mining, анализ данных, нейронные сети, генетические алгоритмы, статистические методы.

I.Ye. Andrushchak¹, Yu.Ya. Matviiv, I.V. Androshchuk, A.A. Yashchuk, V.P. Marcenuyk²¹Lutsk National Technical University, Ukraine²Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Bialej, Poland**PECULIARITIES OF DATA MINING REALIZATIONS IN DATA BASES**

In the article the features of the Data Mining technology are considered and analyzed. Detailed description of the problem, which solves this technology, are listed methods for solving these problems. Special attention is paid to fuzzy logic, genetic algorithms and neural networks, and demonstrated the process of solving the problem by Data Mining methods.

Key words: Data Mining, Data Analysis, Neural Networks, Genetic Algorithms, Statistical Methods.

Formulation of the problem. In today's business, when companies accumulated huge amounts of data, which are often rather chaotic in their work years, standard reporting tools are no longer sufficient. There is a well-known paradox: the more information about the subject area of business accumulates, the more difficult it is to analyze them more effectively and get meaningful conclusions and results. Nevertheless, this information contains a lot of useful information that can and should be used to optimize business processes and improve the quality of the company's work. To do this, it is necessary to generalize past experience, find regularities, extract rules and apply this knowledge in the management process. Therefore, here we need the mechanisms of constructing analytical models capable of finding non-trivial and, at first glance, non-obvious regularities in large volumes of data. In short, Data Mining (DM) systems are required.

Data Mining is a process of searching for correlations, trends, interconnections and regularities through various mathematical and statistical algorithms: clustering, sub-selection, regression, correlation analysis, time series analysis. The purpose of this search is to present data in a form that clearly reflects business processes, as well as to construct a model by which it is possible to predict the processes critical for business planning (for example, the dynamics of demand for certain goods or services, the dependence of their acquisition on the characteristics of the consumer etc.). The use of DM makes sense in the presence of a fairly large amount of data in the corporate storage (QCD). Data in QCD is a constantly replenished set, unified and uniform for the entire enterprise and allows you to reproduce the picture of its activities at any time.

The DM system "sift" the data ("sifts" through the data), revealing the previously hidden information. However, the market offers Data Mining tools that are able to search for regularities, correlations and trends not only in traditional QCDs, but also in other sets of pre-processed statistics. The dedication of using the Data Mining tool for solving business tasks becomes noticeable fairly soon, with the cost of implementing it can pay off fairly quickly. The main areas in which DM is applied are finance, insurance, manufacturing, telecommunications, e-commerce. Note that it is advisable to use Data Mining

wherever there is a large amount of data. In this article, we do not strive to cover all possible spheres, let's dwell only on several life examples.

Setting up tasks. As you know, the main idea of Data Mining reflects the concept of patterns that reflect the fragments of the multidimensional relationships inherent in the data and the employee in order to identify the dependencies and patterns inherent in the sub-samples of data that are suitable for presentation in a convenient, understandable form. Various methods are used to find these patterns, and their peculiarity is that they are not limited to representations about the structure of the sample and the form of distribution of the values of its indicators.

The cornerstones of Data Mining are classification, modeling and forecasting, based on the use of such methods as decision trees, neural networks, genetic algorithms, evolutionary programming, fuzzy logic, etc. Data Mining methods also often include some statistical methods, such as descriptive analysis, correlation and regression analysis, factor analysis, dispersion analysis, component analysis, discriminant analysis, time series analysis, survival analysis, link analysis, and others.

The following standard types of regularities have been adopted that make it possible to identify Data Mining methods:

- association;
- sequence;
- classification;
- clustering;
- forecasting.

The association determines the degree of interconnection of several events among themselves. The sequence defines the relationship between the events by the principle of determination, i.e. what event precedes to what. Classification is the identification of a certain set of characteristics defining the group to which the object belongs, by learning from the example of the previous stage of classification of objects and determining the rules for such groups. Clustering, unlike the classification, involves not attributing to groups but forming new ones. Forecasting involves the discovery or development of templates that adequately reflect the dynamics of the behavior of the targets over time in order to predict their values in the future on their basis [1].

Analysis of recent researches and publications. Numerous firms accumulate a large amount of data over a long period of time, counting that all of them will undoubtedly help them in making the right decisions. Suppose to find out that at that or another definite period, the consumer acquired some product at the mall 123 - it's not so difficult. But here you need knowledge - knowledge about the fact that, for example, retail outlets 123 and 130 implement product X several times faster than other trading outlets. In this case, we can use different algorithms, analyze data and receive results that will have a beneficial effect on the company's profits. Thus, in Data Mining (DM) there is a necessary set of procedures for detecting such clusters of necessary information about the commercial side.

Let's consider the application of Data Mining. This analysis helps to improve the work of the enterprise, since when applying this analysis, researchers can give a more accurate assessment of the results of events occurring in the firm. Data Mining is widely used in various areas of human activity, such as wholesale and retail trade, healthcare, education, industrial production. [1,2,7].

Recall that Data Mining technology is based on the concept of patterns, which are patterns. As a result of the discovery of these laws hidden from the naked eye, Data Mining problems are solved. Certain types of Data Mining correspond to different types of patterns that can be expressed in a form that is understandable to man.

There is no consensus on what tasks should be assigned to Data Mining. Most authoritative sources list the following: classification, clustering, forecasting, association, visualization, analysis and detection, deviations, estimation, link analysis, summing up.

The purpose of the description, which follows, is to give a general idea of the tasks of Data Mining, to compare some of them, and also to present some of the methods by which these problems are solved. The most common tasks of Data Mining are classification, clustering, association, forecasting and visualization. Thus, tasks are divided into types of information produced; this is the most general classification of Data Mining tasks.

Basic material presentation. The approach to research embedded in Data mining is a very popular data processing method and is used mainly in the processing of large data arrays, for example, in the web environment. For students of specialties and areas of study related to information technology and information processing, the concept of Data mining should be familiar, and it is better to form a basic level of knowledge on this subject, especially when it comes to undergraduates or graduate students. For

this reason, it makes sense to consider the possibilities for using the concept of Data mining as a methodology for educational research.

The development of methods for recording and storing data has led to a rapid growth in the volume of information collected and analyzed. The data volumes are so impressive that it is simply impossible for a person to analyze them independently, although the need for such an analysis is quite obvious, because these raw data contain knowledge that can be used when making decisions. In order to conduct automatic data analysis, Data Mining is used [3].

Data mining is the process of discovering previously unknown nontrivial, practically useful and accessible interpretations of knowledge necessary for making decisions in various spheres of human activity in "raw" data. Data mining is one of the steps of Knowledge Discovery in Databases.

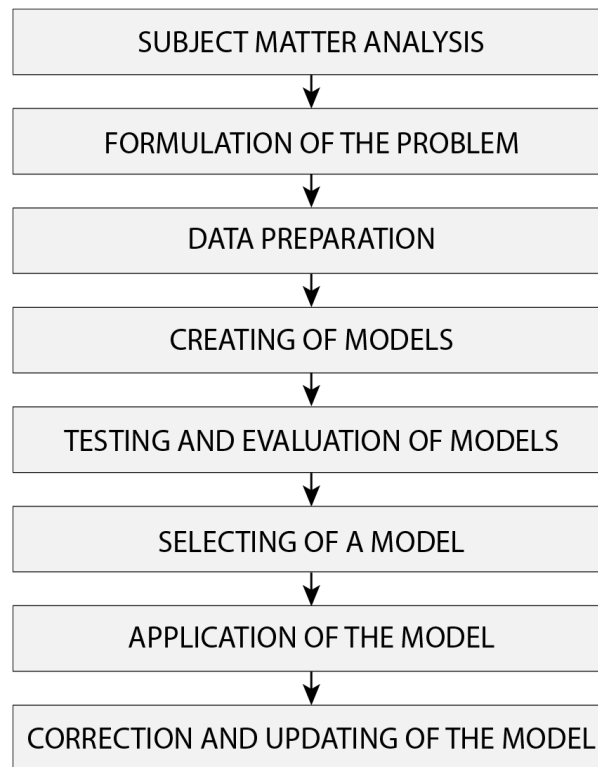
Information found in the process of applying Data Mining methods should be non-trivial and previously unknown, for example, average sales are not. Knowledge should describe new relationships between properties, predict the values of some attributes based on others, etc. Found knowledge should be applicable to new data with some degree of reliability. The usefulness lies in the fact that this knowledge can bring certain benefits in their application. Knowledge should be clear to the user in the form of math. For example, it is easiest for a person to perceive logical constructions "if ... then ...". Moreover, such rules can be used in various SQL queries. In the case when the extracted knowledge is opaque to the user, post-processing methods should exist that allow them to be brought to an interpreted form. Algorithms used in Data Mining require a large amount of computation. Previously, this was a deterrent to the wide practical application of Data Mining, but today's growth in the performance of modern processors has alleviated this problem. Now, in a reasonable time, you can conduct a qualitative analysis of hundreds of thousands and millions of records. Consider approaches to the organization of research activities of students based on the concept of Data Mining.

The task of dividing a set of objects or observations into a priori defined groups, called classes, within each of which they are assumed to be similar to each other, having approximately the same properties and characteristics. In this case, the solution is obtained based on the analysis of attribute values (attributes). Classification is one of the most important tasks of Data Mining. It is used in marketing in assessing the creditworthiness of borrowers, determining customer loyalty, pattern recognition, medical diagnostics, and many other applications. If the analyst knows the properties of objects of each class, then when a new observation belongs to a certain class, these properties are automatically distributed to it.

If the number of classes is limited to two, then a binary classification takes place, to which many more complex problems can be reduced. For example, instead of defining such credit risks as "High", "Medium" or "Low", you can use only two - "Issue" or "Refuse".

Genetic algorithms can be attributed to the universal methods of solving problems of various types. In the field of Data Mining, this is the search for the most optimal model and the determination of significant parameters of the operational basis. The integration of genetic algorithms and neural networks is very effective. This approach allows us to solve the problem of finding the optimal values of the weights of the inputs of neurons. The integration of genetic algorithms and fuzzy logic provides a more optimized system of production rules that are used to control the operators of genetic algorithms.

Consider the process of solving a problem using Data Mining methods. It includes certain steps, which are illustrated in Pic. 1. Data mining process can be both successful and unsuccessful. If the problem solving process was completed unsuccessfully, it may be worth trying to solve the problem using other methods or to change the model parameters.



Pic. 1. Data Mining Process

For classification, Data Mining uses many different models: neural networks, decision trees, support vector machines, the k-nearest neighbors method, coverage algorithms, etc., which are built using training with a teacher, when the output variable (class label) is set for each observation. Formally, the classification is based on the division of feature space into regions, within each of which multidimensional vectors are treated as identical. In other words, if an object falls into the area of space associated with a particular class, it is related to it.

The development in the Data Mining sector of the global software market employs both world-renowned leaders and emerging companies. Data Mining tools can be presented either as a standalone application or as additions to the main product. The latter option is implemented by many leaders of the software market. So, it has already become a tradition that the developers of universal statistical packages, in addition to the traditional methods of statistical analysis, include in the package a certain set of Data Mining methods [4-6].

The problems of business analysis are formulated differently, but the solution of most of them comes down to one or another Data Mining task or a combination of them. For example, risk assessment is a solution to a regression or classification problem, market segmentation is clustering, and demand stimulation is an association rule. In fact, Data Mining tasks are elements from which you can assemble a solution to the vast majority of real business problems.

To solve the above problems, various methods and algorithms of Data Mining are used. Due to the fact that Data Mining developed and develops at the intersection of such disciplines as statistics, information theory, machine learning, database theory, it is quite natural that most of the algorithms and methods of Data Mining were developed on the basis of various methods from these disciplines. For example, the k-means clustering procedure was simply borrowed from statistics. The following Data Mining methods have gained much popularity: neural networks, decision trees, clustering algorithms, including scalable ones, algorithms for detecting associative connections between events.

Deductor is an analytical platform that includes a complete set of tools for solving Data Mining problems: linear regression, neural networks with a teacher, neural networks without a teacher, decision trees, search for associative rules and many others. For many mechanisms, specialized visualizers are provided that greatly facilitate the use of the resulting model and the interpretation of results. The strength of the platform is not only the implementation of modern analysis algorithms, but also the provision of the ability to arbitrarily combine various analysis mechanisms [5].

The first one is C4.5 - one of the most popular decision tree generation algorithms. This method processes the input data to determine their class membership. More specifically, in the input data, each object must have a set of attributes, on the basis of which the algorithm determines to which class it can be attributed.

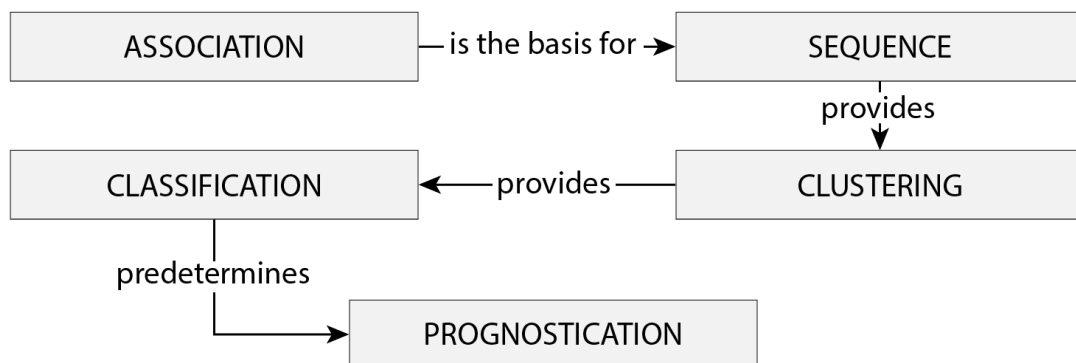
The algorithm, based on the training sample of examples, C4.5 builds a tree, gradually dividing the set into subsets with different values of attributes. Then the resulting subsets are divided further, but the difference of a different attribute is already checked. The procedure continues until the generated set contains examples from the same class, or it is empty. Such a system can be used for decision-making, if each class is assigned a decision, the action that will be applied to each object in it. The disadvantages of the algorithm are that it is inapplicable to fuzzy logic (when examples belong to a class with a certain probability), and also that it needs an initial sample of examples. But nevertheless, decision trees are simply interpreted and have great speed.

Creates k-groups from a data set in such a way that the group objects are the most homogeneous. This is a widely used cluster analysis technique for examining the data set provided. First, let's look at what cluster analysis is. Cluster analysis is a set of algorithms designed to form groups in such a way that the objects of the group are most similar to each other and differ from the elements that are not included in the group. Cluster (the union of several similar elements, which can be considered as a separate unit, possessing certain properties and a group - are synonymous with cluster analysis issues.

Consider a step-by-step (Pic. 2) algorithm for performing the k-means method [8-9]:

1. The k-means method selects positions from the multidimensional space that will represent k-clusters. These elements are called centers of gravity.
2. We will locate each element at the closest distance to one of the points. Through this iteration, several groups are created.
3. Now we have k-clusters, and each object is a member of one of them.
4. The k-means method, taking into account the position of the cluster elements, finds the center of each of the k-clusters.
5. The calculated center becomes the new center of gravity of the cluster.
6. As the center of gravity has moved, the elements can probably shift to be closer to other centers of gravity. Thus, a cluster change may occur.
7. Steps 2-6 are repeated until the center of gravity ceases to change and the groups stabilize. This is called convergence.

The Apriori algorithm finds associative links and applies to each element of a database that contains a large number of different transactions.



Pic. 2. Data Mining Steps

Associative rules is a technique used in data mining to study the relationships and relationships between database elements. Let us give an example of the use of associative rules. Suppose we have a database of transactions made daily in the supermarket. Alternatively, such a base is a large table, in it each row is the number of a specific transaction, and each bar is a separate purchase.

Through the use of the Apriori method, we can determine the products purchased together - that is, establish association rules. In this way, we can identify products that are often bought together. The main goal of marketing is to make buyers choose and buy more units of goods. Related units are called sets.

Apriori is usually considered as a self-learning algorithm, so it is often used to detect important elements and required relationships. Currently, a modification of the Apriori method, which is capable of classifying tagged elements, is often used. Apriori is good because it is simple to implement, understandable in explanation and has a large number of modifications.

A significant disadvantage of the algorithm is that in the process of implementation, the algorithm spends a large amount of resources and, as a result, the iterations performed can be performed for a long time. This method is widely applicable. There are a large number of implementations of Apriori. The most commonly used are: ARtool, Weka and Orange.

The support vector machine (SVM - Support vector machine) method is also an algorithm used for classification tasks, but unlike C4.5, it uses hyperplanes instead of trees [10]. Thus, if the initial set of examples can be divided into 2 classes by a certain line, the subsequent objects will be divided into classes, respectively, on one and the other side of this line. In this case, the dividing line must be such that the distance from it to each object is maximum, then the line will be optimal. But it is not always possible to build a reference line, in this case they do this: the elements of the set are placed in a space of higher dimension so that they are separable there, then they search for the optimal hyperplane in the new space. By transferring this method to multidimensional sets, it is possible to distribute data to more classes.

SVM also requires an initial set of examples, moreover, it is poorly interpreted, but the advantage may be that it is a fairly quick method and quite accurate [11].

Algorithm for creating an application that performs Data Mining. Naturally, in our age of modern technology, I would like to automate this algorithm. Next, we describe how to create an application that implements Data Mining. In order to create this product, you should step by step execute the following algorithm:

- find out the scope of the project, describing what information should be obtained as a result. It is important that the plan be focused on the implementation of the necessary entrepreneurial tasks;

- develop a database for Data Mining. The necessary information can be located in several bases, sometimes some of the information is not stored in electronic form. Data from different databases must be consolidated and corrected. In fact, the development of database technology no longer requires the application of DM algorithms to a separate data mart. In fact, effective analysis requires a corporate data warehouse, which, in terms of investment, is cheaper than using separate storefronts. It should be noted that as the introduction of DM projects across the enterprise increases, the number of users grows, and more and more often there is a need for access to large data infrastructures. Modern Storage provides not only an efficient way to store all corporate data and eliminates the need to use other windows and sources, but also becomes an ideal basis for data mining projects. Enterprise repository provides consistent and up-to-date customer data. By implementing the Data Mining functions in the Warehouse, companies reduce costs in two ways. In this case, firstly, it is no longer necessary to acquire and maintain additional equipment for Data Mining. Secondly, the company does not need to transfer data from the Warehouse to special sources for DM projects, while saving time and material resources. Another important point is data cleansing. This means checking integrity and handling missing values. The accuracy of Data Mining methods depends on the quality of the underlying information. Note that the first two stages may take half (or even more) of the time allotted for the entire project;

- give quantitative estimates to data elements. Collaboration with domain experts will help resolve such issues and highlight the data elements that carry the maximum sense from a business perspective.

- apply data mining algorithms to determine the relationship between data. And it is possible that to identify the necessary dependencies will have to use several different algorithms. Some of them will be suitable at the first stages of the process, others at later stages. In certain cases, it makes sense to run several algorithms in parallel in order to analyze data from different points of view.

- explore the relationships identified in the previous stages for applicability across the project. At this stage, you may need the help of an expert in the subject area. He will determine if these or other relationships are too specific or too general, and indicate in which areas the analysis should be continued.

- present the results in the form of a report in which all interpreted relations will be listed. Such a report will bring only one-time benefit, while an application that allows an expert to creatively identify relationships is much more useful. Therefore, the supplier company should not only teach the client how to find dependencies in the data, but also pay special attention to training in working with the program itself [12].

Conclusion. So, Data Mining is a decision support process that is based on the search for hidden data in large volumes of data. This technology has its advantages and disadvantages, but it obviously has prospects for development. At the moment, the most serious drawback is the price. Data Mining facilities

are very expensive software tools and the main consumers are large trading enterprises, banks, insurance and financial companies. However, the gradual popularization of technology should lead to the emergence of more budget software tools that everyone can use. Despite the abundance of Data Mining methods, the priority is gradually shifting more and more towards logical search algorithms in the data if-then rules. With their help, the tasks of forecasting, classification, pattern recognition, database segmentation, extraction of "hidden" knowledge, data interpretation, establishment of associations in the database, etc. are solved. The results of such algorithms are effective and easily interpreted.

At the same time, the main problem of logical methods for detecting patterns is the problem of sorting options in a reasonable time. Known methods either artificially limit such sorting (KORA, WizWhy algorithms), or build decision trees (algorithms CART, CHAID, ID3, See5, Sipina, etc.) that have fundamental limitations on the effectiveness of the if-then rules search. Other problems are related to the fact that the known methods of searching for logical rules do not support the function of generalizing the found rules and the function of finding the optimal composition of such rules. A successful solution to these problems can be the subject of new competitive developments.

References

1. Barseghyan F. Methods and models of data analysis of OLAP and DataMining. / Barseghyan F., Kupriyanov M., Stepanenko V., Kholod I. - SPb BHV-Petersburg, 2010. – 384 с.
2. Chubukova I.A. Data Mining: a Manual. - M.: Internet University of Information Technologies: BINOM: Knowledge Lab, 2006. - 382 p.
3. Data Mining and Image Processing Toolkit. - <http://datamining.itsc.uah.edu/adam/>.
4. Dyuk V. Data Mining: the course (+ CD) / Dyuk V., Samoilenko A. - St. Petersburg: Izd. Peter, 2001. - 368 pp.
5. Ian H. Witten, Eibe Frank, Mark A. Hall, Morgan Kaufmann, Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques (Third Edition), ISBN 978-0-12-374856-0
6. Knowledge Discovery Through Data Mining: What Is Knowledge Discovery? - Tandem Computers Inc., 1996.
7. Krechetov N. Products for the analysis of data. - // Market of Software, N14-15_97, с. 32-39
8. Kiselev M. Means of obtaining knowledge in business and finance / Kiselev M., Solomatin E. - // Open Systems, No. 4, 1997, p. 41-44.
9. Pertrenko A.I. Grid and intelligent data mining. / A.I. Pertrenko // System Research & Information Technologies, 2008, No. 4 97-110.
10. Petrushin V.A., Khan L., Multimedia Data Mining and Knowledge Discovery
11. Methods and models for data analysis OLAP and Data Mining / F. Barseghyan, M. Kupriyanov, V. Stepanenko, I. Kholod. - SPb.: BHV. - 2008 - 267 pp.
12. Six of the Best Open Source Data Mining Tools // The New Stack. URL: <http://thenewstack.io/six-of-the-best-open-source-data-mining-tools/> (дата обращения: 2.05.2016).

Стаття надійшла до редакції 11.03.2019

УДК 621.311.001.18

І.О. Бандура, М.В. Романюк*Луцький національний технічний університет***АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБИ ВИПРОБУВАННЯ ШУНТОВИХ РЕАКТОРІВ**

Наведено детальний аналіз існуючих методів випробувань шунтових реакторів, вказані переваги та недоліки різних випробувальних схем, визначені основні методи випробувань шунтових реакторів в умовах експлуатації.

Ключові слова: ізоляція обладнання, випробування шунтових реакторів.

И.А. Бандура, М.В. Романюк**АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВА ИСПЫТАНИЯ ШУНТОВ РЕАКТОРОВ**

Приведен подробный анализ существующих методов испытаний шунтирующих реакторов, указанные преимущества и недостатки различных испытательных схем, определены основные методы испытаний шунтирующих реакторов в условиях эксплуатации.

Ключевые слова: изоляция оборудования, испытания шунтирующих реакторов..

I. Bandura, M. Romanyuk**ANALYSIS OF EXISTING METHODS AND METHODS OF PROTECTION OF SHUTTER REACTORS**

The detailed analysis of existing methods of tests of shunt reactors is given, the advantages and disadvantages of different test schemes are specified, the basic methods of tests of shunt reactors in the conditions of operation are determined..

Keywords: isolation of equipment, testing of shunt reactors..

Постановка проблеми. Випробування електричної міцності ізоляції напругою промислової частоти має за мету перевірити безвідмовну роботу ізоляції трансформаторів та олієнаповненого обладнання в експлуатації як при робочих напругах, так і при комутаційних(внутрішніх) перенапругах.

Випробування поділяються на кваліфікаційні(для кожного нового розробленого обладнання до випуску з заводу першого екземпляру обладнання відповідного типу), періодичні(для забезпечення відповідності обладнання вимогам стандарту), приймально-здавальні(усе обладнання, яке виготовляється).

Ізоляція обладнання під час експлуатації підвладна різноманітним та багаторазовим електричним впливам, починаючи з впливу робочої напруги з необмеженою тривалістю та закінчуючи впливом при атмосферних перенапругах(грозовим імпульсам) з тривалістю, яка вимірюється мікросекундами. Проміжне положення займають впливи при комутаційних(внутрішніх) перенапругах. При грозових імпульсах вплив на ізоляцію внаслідок виникаючих коливань всередині обмоткового обладнання може мати різноманітний характер як по формі, так і по тривалості. Факторами, які визначають вибір розмірів ізоляції, а, відповідно і випробувальних напруг, є амплітуда та тривалість цих впливів.

При випробування шунтових реакторів виникають серйозні труднощі. Для збудження реактора до номінальної напруги в умовах заводу необхідно мати джерело цієї напруги потужністю не менше повної потужності реактора і проміжний трансформатор, розрахований на цю потужність і напругу реактора. В цьому випадку джерело живлення-синхронний генератор 50 Гц та проміжний підвищувальний трансформатор повинні мати однофазну потужність, рівну 5-10 % повної потужності випробувального реактора.

Вимірювання втрат в реакторі теж є складним, так як коефіцієнт потужності при цьому досить малий (менший 0,004). Тому ватметровий метод вимірювання втрат не є придатний. Особливо важко проводити випробування ізоляції реактора нормованою ГОСТ 1516.1-76 випробувальною напругою промислової частоти. Для цього необхідна спеціальна конденсаторна батарея на повну випробувальну напругу реактора при підвищеній частоті, що є дуже складним. Тому це випробування замінюють впливом грозових та комутаційних імпульсів(ГОСТ 1516.1-76). Згідно ГОСТ в програму кваліфікаційних та приймально-здавальних випробувань зібраного шунтового реактора класу напруги 110 кВ та вище входять: а) зовнішній(візуальний) огляд; б)перевірка електричного опору обмоток постійному струму; в) вимірювання параметрів ізоляції(,

С та ; г) випробування проби масла з визначенням пробивної напруги та по ГОСТ 6581-75; д) випробування баку реактора на масло щільність; е) перевірка потужності реактора при номінальній напрузі методом падіння напруги із застосуванням приладів класу точності по [13] для вимірювання потужності; є) вимірювання втрат в реакторі мостовим методом з накладанням номінальної напруги між лінійними та нейтральними вводами реактора (допускається вимірювання при пониженої напрузі); ж) випробування ізоляції нейтралі реактора напругою промислової частоти по ГОСТ 1516.1-76; з) випробування ізоляції реактора повним грозовим імпульсом по ГОСТ 1516.1-76; и) випробування ізоляції реактора зрізаним грозовим імпульсом по ГОСТ 1516.1-76; і) випробування на нагрів при номінальній напрузі на вводах реактора з вимірюванням температур по [13]; к) випробування бака реактора на механічну міцність при вакуумі по ГОСТ 11677-75; л) випробування бака реактора на механічну міцність при вакуумі по ГОСТ 11677-75, при підвищеному внутрішньому тиску; м) вимірювання вібрацій по ГОСТ 19469-74; н) вимірювання рівня звуку по ГОСТ 19469-74; м) вимірювання часткових розрядів в ізоляції реактора для класів напруги 220 кВ та вище.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При внутрішніх перенапругах з'являються випадки виходу з ладу високовольтних реакторів. Зниження рівня ізоляції призводить до збільшення впливів на ізоляцію робочого режиму. Якщо вплив при імпульсних випробуваннях відповідає атмосферним перенапругам, то відповідність випробування однохвилинною напругою промислової частоти експлуатаційним впливам є сумнівною. Є сумнівним також положення, що успішне випробування реактора однохвилинною напругою у всіх випадках є достатньою гарантією стійкості його ізоляції по відношенню до впливу робочої напруги та внутрішніх перенапруг. Тому більш доцільним є розробка методів випробувань ізоляції, які забезпечують імітацію впливів внутрішніх перенапруг та робочої напруги. Застосування цих методів дозволяє створити ізоляцію, яка має оптимальні розміри при підвищеній експлуатаційній надійності. На сьогодні до таких методів відносять: випробування з застосуванням схем, що використовують принцип розряду конденсатора на обмотку реактора, що випробовується. Такі схеми застосовують для збудження в обладнанні коливального імпульсу з частотою, близькою до власної частоти коливаний обладнання, для збудження швидко затухаючого імпульсу максимально можливої тривалості. Такі схеми використовують Wright та Saunders. Але випробування по таких схемах вимагає застосування генераторів імпульсних напруг що в умовах заводу реально виконати а в умовах експлуатації є неможливим.

Схеми, які базуються на принципі обриву постійного струму, що протікає по обмотці обладнання, яке випробовується є більш придатним для випробування потужного обладнання на місці експлуатації, хоч теж має ряд недоліків.

Схеми, що ґрунтуються на принципі ударного збудження обладнання, знову ж вимагають застосування імпульсного генератора. Схеми з використанням коливальних контурів ґрунтуються на використанні тиратронів і використовуються для збудження випробувальних трансформаторів.

Особливе місце для випробування обладнання високих та надвисоких класів напруги займають схеми, що забезпечують накладання випробувальної хвилі на напругу, близьку до робочої. При таких випробуваннях часткове ушкодження ізоляції під час перенапруги може перерости у «скользящий» розряд, який розвивається при робочій напрузі, тобто відбудеться «підхват» дії часткового розряду. При випробуванні без накладання на робочу напругу, такому частковому розряду не надається значна увага, так як при одиночних імпульсних впливах ушкодження, яке ним завдається незначне.

Викладення основного матеріалу. ефективно, ніж просто випробування при тривалому впливі напруги, воно ближче всього по структурі до найбільш небезпечних реальних експлуатаційних впливів.

Найбільш цікавими для випробувань реакторів є схеми випробувань індуктивною напругою. Випробування в режимі резонансу напруг не вимагає застосування дорогого випробувального трансформатора, розрахованого на повну потужність та повну випробувальну напругу реактора. Ця схема полегшує реєстрацію часткових розрядів, але потребує стабілізації мереженої напруги (зміна частоти мереженої напруги призводить до різких коливаний випробувальної напруги). Випробування в режимі резонансу струмів вимагає високовольтного випробувального трансформатора, що є її недоліком, в той же час вона не має залежності впливу зміни частоти мереженої напруги на коливання випробувальної напруги.

З наведених вище методів випробування, найбільш оптимальними в умовах експлуатації будуть методи випробування реакторів індуктивною напругою.

Вдосконалення випробувальних схем по цих методах дасть можливість виконати основні умови діагностування: оцінка функціональної справності; оцінка ступеня зношення устаткування; визначення об'єму ремонту; оцінка залишкового терміну служби, а головне визначення можливості продовження експлуатації без ремонту, оцінювання можливості і умови продовження роботи устаткування, яке має дефекти та розробка заходів, які забезпечують реалізацію ресурсу, що залишився. Станом на сьогодні це є вкрай необхідним, адже стан зношеності силового електрообладнання «великої» енергетики складає 80%.

Випробування високовольтної ізоляції проводяться для рішення різних наукових та практичних задач. За цією ознакою випробування поділяють на дослідницькі та контрольні. Перші проводять для отримання нової інформації про процеси в ізоляції, про характеристики або властивості нових конструкцій. Контрольні випробування мають за мету перевірку відповідності характеристик ізоляційної конструкції встановленим технічним вимогам (нормам). Контрольні випробування є засобом підвищення експлуатаційної надійності високовольтного обладнання. Надійність електричної ізоляції, яка вимагається, досягається перш за все з допомогою раціональної конструкції та використання в ній високоякісних матеріалів, застосування вдосконаленої технології виробництва та строгого дотримання технологічної дисципліни, чіткого виконання вимог правил монтажу та експлуатації.

При контролі якості ізоляції високовольтного обладнання використовують:

- випробування прикладеною високою напругою, еквівалентною очікуваними в експлуатації перенапругами, для перевірки рівнів короткочасної електричної міцності ізоляції; вимірювання характеристик ізоляції (інтенсивність часткових розрядів, значення α) та випробування при підвищених в порівнянні з робочою напругами для оцінки тривалої електричної міцності ізоляції; нерозрушаючі електричні та неелектричні методи випробування з метою опосередкованої оцінки стану ізоляції та її придатності до тривалої експлуатації.

- випробування високою напругою - це один з головних засобів контролю якості ізоляції високовольтного обладнання. Вони є прямою перевіркою рівня коротко часової електричної міцності ізоляції, тобто її здатності витримувати грозові та внутрішні перенапруги. В зв'язку з тим, що електрична міцність високовольтної ізоляційної конструкції складним чином залежить від тривалості та форми напруги, яка впливає на неї, а також від великої кількості різного роду факторів, випробування ізоляції високою напругою проводять в строго регламентованих умовах, які відображають в тій чи іншій мірі характерні умови експлуатації.

На жаль, чітко досягнути таких умов не завжди є реальним. Це не дає можливості отримати співставні та достовірні дані, не зважаючи на те, що електрична міцність при впливі грозових перенапруг перевіряється прикладенням до ізоляції грозових імпульсів стандартної форми, а міцність по відношенню до внутрішніх перенапруг - короткочасною прикладеною напругою промислової частоти або комутаційним імпульсом стандартної форми. Ще складнішою виявляється ситуація при випробуваннях високовольтного обладнання для проведення діагностики їх стану в умовах експлуатації. Перш за все, це стосується технічного стану (і ізоляції в тому числі, як основної параметричної характеристики) високовольтних трансформаторів та шунтових реакторів. Діагностика стану високовольтного обладнання має за мету своєчасне виявлення дефектів ізоляції, які виникають внаслідок різноманітних впливів в процесі експлуатації та скорочують ресурс обладнання, а також дефектів, які розвиваються внаслідок нормального старіння ізоляції. Випробування високою напругою обмежується можливостями створення транспортабельних джерел високої напруги необхідної потужності та безпекою неконтрольованого ушкодження ізоляції високою випробувальною напругою. До нерозрушаючих електричних методів випробувань відносяться вимірювання значень α при напругах значно менших від робочої, а також методи, в яких використовується явище абсорбції зарядів. Норми на значення α ізоляції встановлюються для кожного виду обладнання окремо. Важливим є не тільки абсолютне значення α , але й його стабільність в часі. По значенню даного показника вдається виявити розподілені дефекти, зокрема зволоження ізоляції.

Нерозрушаючі неелектричні методи контролю ізоляції (акустичні, оптичні, хімічні) найбільш широкое застосування отримали методи контролю ізоляції олієнаповненого обладнання, які ґрунтуються на аналізі проб масла. Ці методи застосовуються і для шунтуючих реакторів. Важлива перевага таких методів полягає в тому, що вони не потребують виводу з роботи обладнання, яке перевіряється.

Однак вони придатні для виявлення вже наявних достатньо грубих дефектів ізоляції. Більш досконалим є контроль по складу та концентрації газів, розчинених в маслі. По складу та концентрації газів, розчинених в маслі, можна достатньо достовірно судити про характер дефекту, а по динаміці зміни концентрації – про ступінь небезпеки даного дефекту.

Усі розглянуті вище методи придатні для організації тільки періодичного контролю ізоляції, ефективність якого значно знижується при збільшенні інтервалу часу між випробуваннями, а скорочення цих інтервалів часу обмежується можливостями виводу обладнання з роботи та ростом трудозатрат на проведення випробувань. В зв'язку з цим є доцільним розробка методів та апаратури для проведення постійного контролю ізоляції під робочою напругою. Основу цих методів складають вимірювання діелектричних характеристик та реєстрація часткових розрядів.

На нашу думку це стає можливим за рахунок розробки та обґрунтування методів випробувань шунтових реакторів підвищеною напругою в умовах експлуатації на основі розробленого діагностичного комплексу діагностики шунтових реакторів для підвищення надійності та якості електропостачання.

Висновки. Моделювання процесів в шунтових реакторах при випробуваннях, адаптація методів випробування з застосуванням підвищеної напруги, до умов експлуатації шунтових реакторів; дослідження та врахування впливів зовнішніх факторів на результати випробувань шунтових реакторів в умовах експлуатації; розробка діагностичного комплексу для діагностики шунтових реакторів дає можливість продовження терміну експлуатації обладнання, яке за діагностичними характеристиками може залишатись в роботі.

Список використаних джерел:

1. Испытания мощных трансформаторов и реакторов. Г.В. Алексеенко., М., Энергоатомиздат. 1978;
2. Изоляция установок высокого напряжения., Кучинский Г.С., М., Энергоатомиздат, 1987.

Стаття надійшла до редакції 18.03.2019

УДК 621.311.001.18

І.О. Бандура, М.В. Романюк*Луцький національний технічний університет***ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ВИПРОБУВАННЯ ШУНТОВИХ РЕАКТОРІВ ВИСОКОЮ НАПРУГОЮ***Наведено детальний аналіз існуючих методів випробувань шунтових реакторів високою напругою, вказані переваги та недоліки різних випробувальних схем.**Ключові слова: ізоляція обладнання, випробування шунтових реакторів.***И.А. Бандура, М.В. Романюк****ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЯ ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ ВЫСОКИМ НАПРЯЖЕНИЕМ***Приведен подробный анализ существующих методов испытаний шунтирующих реакторов высоким напряжением, указанные преимущества и недостатки различных испытательных схем.**Ключевые слова: изоляция оборудования, испытания шунтирующих реакторов.***I. Bandura, M. Romanyuk****RESEARCH OF METHODS OF TEST OF SHUNT REACTORS WITH HIGH VOLTAGE***The detailed analysis of existing methods of tests of shunt reactors with high voltage is given, the advantages and disadvantages of different test schemes are given.**Keywords: isolation of equipment, testing of shunt reactors.***Постановка проблеми.**

На сьогодні робота енергосистеми України характеризується складними умовами експлуатації, що зумовлено зниженням запасів електричної міцності електрообладнання високої та надвисокої напруги. Це є причиною виникнення аварій, які несуть за собою не тільки економічні втрати, але й людські жертви. Парк трансформаторів та реакторів потужністю більше 80 МВА, які знаходяться в експлуатації складає біля 5500 одиниць. Середня кількість аварій за період з 2004 по 2007 рік склала 17 аварій в рік. Основна частина відмов(55%) – це обладнання з напрацюванням більше 20 років, ще 28% пошкоджень – реактори з напрацюванням більше 30 років. На рисунку 1 зображено результати комплексних обстежень реакторів з виявлення дефектів.

Систематизувавши результати обстежень, було встановлено наступні причини відмови реакторів (таблиця 1).

Таблиця 1.

Характеристики пошкоджуваності реакторів

Причина пошкодження реактора	Кількість аварій
Пробій ізоляції уздовж обмоток дискової конструкції з розвитком розрядів по циліндрах	9
Порушення електричного кола в обмотках переплетеного типу з виникненням виткових замикань	3
Газовиділення через конструктивні недоліки реакторів	3
Пошкодження високовольтних ввідів	2

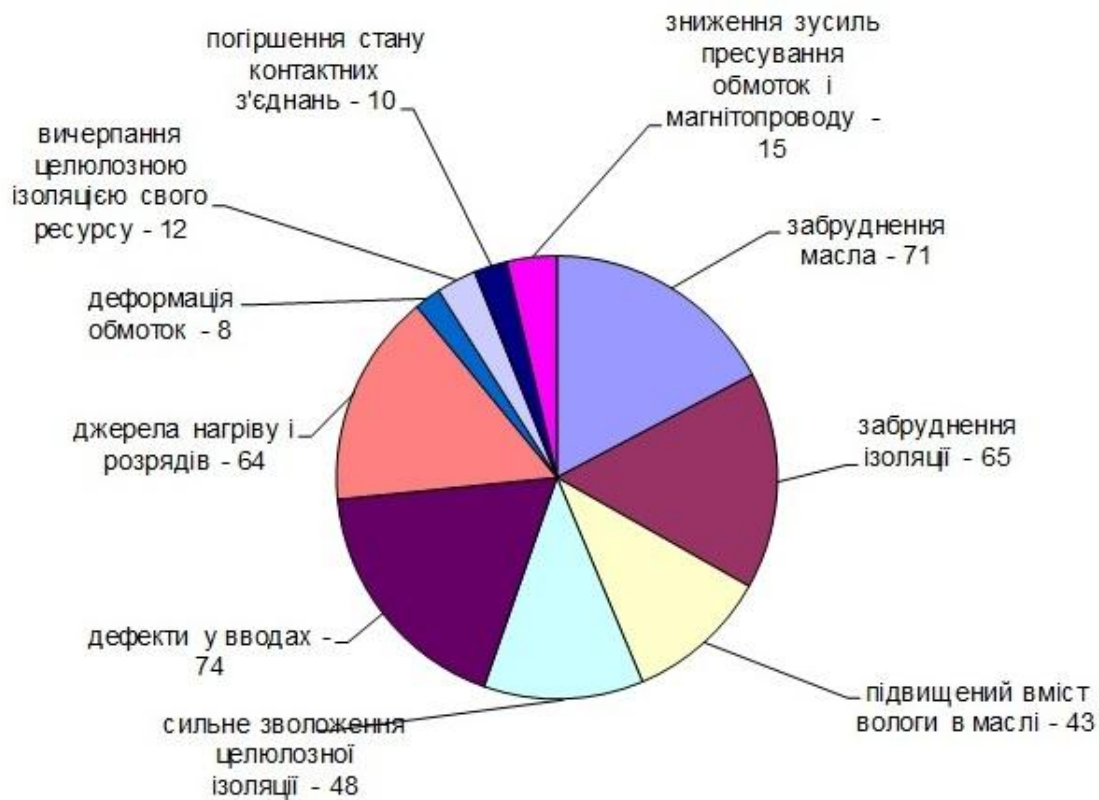


Рис 1. Дефекти реакторів

Випробування електричної міцності ізоляції напругою промислової частоти має за мету перевірити безвідмовну роботу ізоляції оливонаповненого трансформаторного обладнання в експлуатації, як при робочих напругах, так і при комутаційних (внутрішніх) та грозових перенапругах.

Випробування поділяються на кваліфікаційні (для кожного нового розробленого обладнання до випуску з заводу першого екземпляру обладнання відповідного типу), періодичні (для забезпечення відповідності обладнання вимогам стандарту), приймально-здавальні (усе обладнання, яке виготовляється).

Під час експлуатації на ізоляцію впливає робоча напруга з різною тривалістю, атмосферні перенапруги (грозові імпульси) з тривалістю, яка вимірюється мікросекундами, впливають комутаційні (внутрішні) перенапруги. При грозових імпульсах виникають коливання всередині обмоткового обладнання. Вони різноманітні як за формою, так і за тривалістю. Факторами, які визначають вибір розмірів ізоляції, а, відповідно і величин випробувальних напруг, є амплітуда та тривалість цих впливів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Велика частка трансформаторного обладнання відпрацювала свій паспортний ресурс – 25 років. Таке обладнання потребує більш ретельного догляду, нових, інформативніших методів перевірки технічного стану. Визначення технічного стану відноситься до задач діагностування. Визначають технічний шляхом постійного моніторингу за параметрами обладнання та періодичними руйнівними або неруйнівними випробуваннями.

З метою підтримання справного стану обладнання підприємства проводять ремонтні роботи. Враховуючі значні проблеми з фінансуванням ремонтів сторонніми організаціями та з транспортуванням такого обладнання, як трансформатори 330кВ і вище та шунтові реактори в Південно-західній електроенергетичній системі створена потужна служба ремонтів. Однак не всі види випробувань, що виконуються на підприємствах - виробниках, можуть бути виконані в умовах експлуатації.

Тому актуальною на сьогодні є задача розробки, вдосконалення методів та засобів перевірки стану обладнання, відремонтованого в умовах експлуатації, методів, які відтворюють реальні умови, в яких відремонтованому обладнанню доведеться працювати.

З цією метою потрібно дослідити існуючі методи та засоби випробувань високовольтного трансформаторного обладнання.

Викладення основного матеріалу. При випробуванні шунтових реакторів високою напругою виникають певні труднощі. Для збудження реактора до номінальної напруги в умовах заводу використовується джерело високої напруги потужністю не менше повної потужності реактора і проміжний трансформатор, розрахований на цю потужність і напругу реактора. Тому джерело живлення - синхронний генератор 50 Гц та проміжний підвищувальний трансформатор повинні мати однофазну потужність, яка дорівнює 5-10 % повної потужності випробувального реактора.

Вимірювання втрат в реакторі теж є складним, так як коефіцієнт потужності при цьому досить малий (менший 0,004). Тому ватметровий метод вимірювання втрат не застосовують. Не просто проводити випробування ізоляції реактора нормованою ГОСТ 1516.1-76 випробувальною напругою промислової частоти. Для цього необхідна спеціальна конденсаторна батарея на повну випробувальну напругу реактора при підвищеній частоті, що складно реалізувати. Тому це випробування замінюють впливом грозових та комутаційних імпульсів (ГОСТ 1516.1-76). Згідно до ГОСТ в програму кваліфікаційних та приймально-здавальних випробувань зібраного шунтового реактора класу напруги 110 кВ та вище входять: а) зовнішній (візуальний) огляд; б) перевірка електричного опору обмоток постійному струму; в) вимірювання параметрів ізоляції (, С та ; г) випробування проби масла з визначенням пробивної напруги та по ГОСТ 6581-75; д) випробування баку реактора на масло щільність; е) перевірка потужності реактора при номінальній нарузі методом падіння напруги із застосуванням приладів класу точності по [13] для вимірювання потужності; є) вимірювання втрат в реакторі мостовим методом з накладанням номінальної напруги між лінійними та нейтральними вводами реактора (допускається вимірювання при пониженої нарузі); ж) випробування ізоляції нейтралі реактора напругою промислової частоти по ГОСТ 1516.1-76; з) випробування ізоляції реактора повним грозовим імпульсом по ГОСТ 1516.1-76; и) випробування ізоляції реактора зрізаним грозовим імпульсом по ГОСТ 1516.1-76; і) випробування на нагрів при номінальній нарузі на вводах реактора з вимірюванням температур по [13]; к) випробування бака реактора на механічну міцність при вакуумі по ГОСТ 11677-75; л) випробування бака реактора на механічну міцність при вакуумі по ГОСТ 11677-75, при підвищеному внутрішньому тиску; м) вимірювання вібрацій по ГОСТ 19469-74; н) вимірювання рівня звуку по ГОСТ 19469-74; м) вимірювання часткових розрядів в ізоляції реактора для класів напруги 220 кВ та вище.

При внутрішніх перенапругах відомі випадки виходу з ладу високовольтних реакторів. Природний процес старіння ізоляції призводить до зростання впливу параметрів робочого режиму на термін її експлуатації. Не зважаючи на широко вживані в експлуатації заходи по захисту від перенапруг, повністю виключити їх вплив на обладнання сьогодні не можливо. Якщо вплив при імпульсних випробуваннях відповідає атмосферним перенапругам, то відповідність випробування однохвилинною напругою промислової частоти експлуатаційним впливам є сумнівною. Є сумнівним також положення, що успішне випробування реактора однохвилинною напругою у всіх випадках є достатньою гарантією стійкості його ізоляції по відношенню до впливу робочої напруги та внутрішніх перенапруг. Тому більш доцільним є розробка методів випробувань ізоляції, які забезпечують імітацію впливів внутрішніх перенапруг та робочої напруги. Застосування цих методів дозволяє не лише створити ізоляцію, яка має оптимальні розміри при підвищеній експлуатаційній надійності, але і переконатися у можливості роботи відремонтованого обладнання в реальних умовах.

На сьогодні до таких методів відносять: випробування з застосуванням схем, що використовують принцип розряду конденсатора на обмотку випробовуваного реактора. Такі схеми застосовують для збудження в обладнанні коливального імпульсу з частотою, близькою до власної частоти коливаний обладнання, для збудження швидко затухаючого імпульсу максимально можливої тривалості. Такі схеми використовують Wright та Saunders. Але випробування по таких схемах вимагає застосування генераторів імпульсних напруг, які в умовах заводу реально виконати, а в умовах експлуатації є неможливим.

Схеми, які базуються на принципі обриву постійного струму, який протікає по обмотці випробовуваного обладнання, є більш придатним для випробування потужного обладнання на місці експлуатації, хоч теж має ряд недоліків.

Схеми, що ґрунтуються на принципі ударного збудження обладнання, знову ж вимагають застосування імпульсного генератора.

Схеми з використанням коливальних контурів ґрунтуються на використанні тиратронів і використовуються для збудження випробувальних трансформаторів.

Особливе місце для випробування обладнання високих та надвисоких класів напруги займають схеми, які забезпечують накладання випробувальної хвилі на напругу, близьку до робочої. За таких випробувань часткове ушкодження ізоляції під час перенапруги може перерости у ковзний розряд, який розвивається при робочій напрузі, тобто відбудеться «підхват» дії часткового розряду. При випробуванні без накладання на робочу напругу, такому частковому розряду не надається значна увага, так як при одиночних імпульсних впливах ушкодження, яке ним завдається незначне.

Випробування з накладанням перенапруг на робочу напругу більш ефективно, ніж просто випробування при тривалому впливі напруги, воно ближче всього по структурі до найбільш небезпечних реальних експлуатаційних впливів.

Найбільш цікавими для випробувань реакторів є схеми випробувань індуктивною напругою. Випробування в режимі резонансу напруг не вимагає застосування вартісного випробувального трансформатора, розрахованого на повну потужність та на повну випробувальну напругу реактора. Ця схема полегшує реєстрацію часткових розрядів, але потребує стабілізації напруги мережі живлення (зміна частоти цієї напруги призводить до різких коливань випробувальної напруги). Випробування в режимі резонансу струмів вимагає високовольтного випробувального трансформатора, що є її недоліком, в той же час вона не має залежності впливу зміни частоти цієї напруги на коливання випробувальної напруги.

З наведених вище методів випробування, найбільш оптимальними в умовах експлуатації будуть методи випробування реакторів індуктивною напругою.

Висновки. Вдосконалення методів випробувань схем шунтових реакторів, які використовують індуктовану напругу, явища резонансу струмів та напруг дасть можливість визначити функціональну справність; оцінити ступень зношення устаткування; визначити об'єм ремонту; оцінити залишковий ресурс, а головне визначення можливості продовження експлуатації без ремонту, оцінювання можливості і умови продовження роботи устаткування, яке має дефекти та розробити заходи, які забезпечують реалізацію ресурсу, що залишився.

Список використаних джерел:

1. Испытания мощных трансформаторов и реакторов. Г.В. Алексеенко., М., Энергоатомиздат. 1978;
2. Изоляция установок высокого напряжения., Кучинский Г.С.,М., Энергоатомиздат, 1987.

Стаття надійшла до редакції 19.03.2019

УДК 667.64:678.026

О.М. Безбах*Херсонська державна морська академія***ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МОДИФІКОВАНИХ 4,4'-МЕТИЛЕНБІС(2-МЕТОКСИАНИЛІНОМ) ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТІВ**

У роботі для формування композитних матеріалів використано епоксидний діановий олігомер ЕД-20, твердник поліетиленполіамін ПЕПА і модифікатор. Досліджено залежність вмісту модифікатора на фізико-механічні властивості епоксидних композитів. Доведено, що для формування композитного матеріалу чи захисного покриття з полішеними когезійними властивостями оптимальний вміст модифікатора 4,4'-метиленбіс(2-метоксаниліну) становить $q = 0,25 \dots 0,50$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20. Такі матеріали характеризуються підвищеною механічною міцністю і здатністю чинити опір статичним, динамічним, а також навантаженням ударного характеру, позаяк показники їх властивостей становлять: руйнівні напруження при згинанні – $\sigma_{32} = 51,2 \dots 54,4$ МПа, модуль пружності при згинанні – $E = 3,0 \dots 3,2$ ГПа, ударна в'язкість – $W = 8,8 \dots 9,0$ кДж/м². Отримані результати експериментальних досліджень фізико-механічних властивостей композитних матеріалів добре узгоджуються з результатами випробувань зразків методом оптичної мікроскопії, що свідчить про їх достовірність.

Ключові слова: епоксидний композит, модуль пружності, ударна в'язкість, руйнівні напруження при згинанні.

О.М. Безбах*Херсонская государственная морская академия***ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННЫХ 4,4'-МЕТИЛЕНБИС(2-МЕТОКСИАНИЛИНОМ) ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ**

В работе для формирования композитных материалов использован эпоксидный диановый олигомер ЭД-20, отвердитель полиэтиленполиамин ПЕПА и модификатор. Исследована зависимость содержания модификатора на физико-механические свойства эпоксидных композитов. Доказано, что для формирования композитного материала или защитного покрытия с улучшенными когезионными свойствами оптимальное содержание модификатора 4,4'-метиленбис(2-метоксанилина) составляет $q = 0,25 \dots 0,50$ масс.ч. на 100 масс.ч. эпоксидного олигомера ЭД-20. Такие материалы характеризуются повышенной механической прочностью и способностью сопротивляться статическим, динамическим напряжениям, а также нагрузке ударного характера, поскольку значения показателей свойств составляет: разрушающие напряжения при изгибе – $\sigma_{32} = 51,2 \dots 54,4$ МПа, модуль упругости при изгибе – $E = 3,0 \dots 3,2$ ГПа, ударная вязкость – $W = 8,8 \dots 9,0$ кДж/м². Полученные результаты экспериментальных исследований физико-механических свойств композитных материалов хорошо согласуются с результатами испытаний образцов методом оптической микроскопии, что свидетельствует об их достоверности.

Ключевые слова: эпоксидный композит, модуль упругости, ударная вязкость, разрушающие напряжения при изгибе.

О.М. Bezbakh*Kherson State Maritime Academy***INVESTIGATION OF PHYSICOMECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY COMPOSITES MODIFIED WITH 4,4'-METHYLENEBIS (2-METHOXYANILINE)**

In the work for the formation of composite materials, an epoxy diane oligomer ED-20, a hardener polyethylene polyamine PEPA and a modifier were used. The dependence of the modifier content on the physico-mechanical properties of epoxy composites was studied. It is proved that for the formation of a composite material or protective coating with improved cohesive properties, the optimum content of the 4,4'-methylenebis (2-methoxyaniline) modifier is $q = 0,25 \dots 0,50$ mass parts by 100 parts by mass epoxy oligomer ED-20. Such materials are characterized by increased mechanical strength and the ability to withstand static, dynamic stresses, as well as impact loads, since the values of the properties are: bending stresses at bending – $\sigma = \sigma_{32} = 51.2 \dots 54.4$ MPa, modulus of elasticity at bending – $E = 3.0 \dots 3.2$ GPa, impact toughness is $W = 8.8 \dots 9.0$ kJ/m². The obtained results of experimental studies of the physico-mechanical properties of composite materials are in good agreement with the results of testing samples by optical microscopy, which indicates their reliability.

Key words: epoxy composite, modulus of elasticity, impact strength, breaking stresses in bending.

Постановка проблеми. З розвитком науково-технічного прогресу, особливо у останні десятиліття, гостро стоїть проблема енерго- і ресурсозбереження. Важливе місце у вирішенні цієї проблеми займають полімерні композитні матеріали (КМ) і захисні покриття на їх основі. Полімерні покриття, особливо на епоксидній основі, застосовують у різних галузях промисловості, у тому числі і у транспорті, для захисту металевих деталей від корозії, що суттєво збільшує їх довговічність. При цьому захисні покриття повинні у комплексі відзначатися підвищеними показниками фізико-механічних властивостей. Лише останні визначають антикорозійні характеристики адгезивів, які, у свою чергу, забезпечують ресурсозбереження технологічного устаткування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Загальновідомо [1-6], що захисні покриття повинні бути багатофункціональними. З одного боку вони повинні відзначатися підвищеними показниками адгезійної і когезійної міцності, з іншого боку – усадка і залишкові напруження у них мають бути мінімальними. Виходячи з цього, автори [7-16] стверджують, що для поліпшення властивостей полімерних матеріалів у комплексі у епоксидний зв'язувач необхідно вводити модифікатори за незначного вмісту. При цьому добавки повинні бути активними до фізичної і хімічної міжфазової взаємодії з епоксидним олігомером при зшиванні композицій. Лише такий підхід дозволить отримати матеріали з високим вмістом гель-фракції, що, у свою чергу, забезпечить максимальне підвищення показників когезійної міцності захисних покриттів.

Враховуючи наведене вище запропоновано у епоксидний зв'язувач вводити модифікатор 4,4'-метиленбіс(2-метоксианілін) за гомеопатичного вмісту. Дана добавка містить активні групи, що на наш погляд, активізує перебіг фізико-хімічних процесів зшивання і забезпечить підвищення фізико-механічних характеристик досліджуваних матеріалів.

Мета роботи – дослідити вплив вмісту модифікатора 4,4'-метиленбіс(2-метоксианіліну) на фізико-механічні властивості епоксикомпозитних матеріалів.

Матеріали та методика дослідження. Як основний компонент для зв'язувача при формуванні епоксидних КМ вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84), який характеризується високою адгезійною та когезійною міцністю, незначною усадкою і технологічністю при нанесенні на поверхні складного профілю.

Як модифікатор використано 4,4'-метиленбіс(2-метоксианілін) (МБМА). Модифікатор вводили у зв'язувач за вмісту від 0,10 до 2,00 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 (тут і далі за текстом мас. ч. наводять на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20). Молекулярна маса 4,4'-метиленбіс(2-метоксианіліну) – 258,3. Хімічна формула – $C_{15}H_{18}N_2O_2$. Модифікатор розчинний у бензолі, етанолі, ацетоні, малорозчинний у воді.

Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін ПЕПА (ТУ 6-05-241-202-78), що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. Відомо [4, 5], що ПЕПА є низькомолекулярною речовиною, яка складається з таких взаємозв'язаних компонентів: $[-CH_2-CH_2-NH-]_n$. Зшивали КМ, вводячи твердник у композицію при стехіометричному співвідношенні компонентів за вмісту (мас.ч.) – ЕД-20 : ПЕПА – 100 : 10.

Епоксидні композити формували за такою технологією: підігрівання смоли до температури $T = 353 \pm 2$ К і витримка при даній температурі впродовж часу $\tau = 20 \pm 0,1$ хв; гідродинамічне суміщення олігомеру і модифікатора впродовж часу $\tau = 1 \pm 0,1$ хв; ультразвукова обробка (УЗО) композиції впродовж часу $\tau = 1,5 \pm 0,1$ хв; охолодження композиції до кімнатної температури впродовж часу $\tau = 60 \pm 5$ хв; введення твердника і перемішування композиції впродовж часу $\tau = 5 \pm 0,1$ хв. Затверджували КМ за режимом: формування зразків та їх витримання впродовж часу $\tau = 12,0 \pm 0,1$ год за температури $T = 293 \pm 2$ К, нагрівання зі швидкістю $v = 3$ К/хв до температури $T = 393 \pm 2$ К, витримання впродовж часу $\tau = 2,0 \pm 0,05$ год, повільне охолодження до температури $T = 293 \pm 2$ К. З метою стабілізації структурних процесів у матриці зразки витримували впродовж часу $\tau = 24$ год на повітрі за температури $T = 293 \pm 2$ К з наступним проведенням експериментальних випробувань.

У роботі досліджували наступні властивості КМ: руйнівні напруження та модуль пружності при згинанні, ударну в'язкість.

Руйнівні напруження і модуль пружності при згинанні визначали згідно з ГОСТ 4648-71 і ГОСТ 9550-81 відповідно. Параметри зразків: довжина $l = 120 \pm 2$ мм, ширина $b = 15 \pm 0,5$ мм, висота $h = 10 \pm 0,5$ мм.

Ударну в'язкість визначали за методом Шарпі відповідно до ГОСТ 4647-80 на маятниковому копрі МК-30 при температурі $T = 298 \pm 2$ К і відносній вологості $d = 50 \pm 5$ %. Використовували зразки з такими параметрами: $(63,5 \times 12,7 \times 12,7) \pm 0,5$ мм. Відстань між опорами $40 \pm 0,5$ мм.

Відхилення значень при дослідженнях показників фізико-механічних властивостей КМ становило 4...6 % від номінального.

Результати досліджень та їх обговорення. Попередньо експериментально досліджено фізико-механічні властивості модифікованої ультразвуковою обробкою вихідної епоксидної матриці. Доведено (рис. 1), що показники її характеристик є наступними: модуль пружності при згинанні – $E = 2,8$ ГПа, руйнівні напруження при згинанні – $\sigma_{32} = 48,0$ МПа, ударна в'язкість – $W = 7,4$ кДж/м².

Експериментально встановлено (рис. 1, а), що введення модифікатора за незначного вмісту ($q = 0,25$ мас.ч.) забезпечує підвищення модуля пружності КМ від $E = 2,8$ ГПа (для вихідної, але модифікованої ультразвуком епоксидної матриці) до $E = 3,2$ ГПа. Такі результати дослідження можна пояснити наступним.

По-перше. Слід зазначити, що на попередньому етапі приготування композицій (епоксидний олігомер + модифікатор) після перемішування інгредієнтів проводили ультразвукову обробку (УЗО) компаунду. У першу чергу це забезпечує рівномірне перемішування компонентів і дегазацію композицій. З іншого боку спостерігали утворення вільних радикалів [7] в результаті УЗО. При цьому як з боку модифікатора, так і з боку епоксидної смоли відокремлюються вільні іони водню і NH- , $\text{NH}_2\text{-}$ чи -CH- груп (у модифікаторі) та іони водню і OH- груп (у епоксидному олігомері). Такі іони та радикали є досить активними до хімічної взаємодії при зшиванні епоксидних композицій, що забезпечує підвищення ступеня зшивання модифікованої матриці.

По-друге. Після УЗО значний відсоток макромолекул як епоксидних макромолекул, так і молекул модифікатора залишаються у початковому стані. Однак, наявність у структурі добавки метильної $\text{CH}_3\text{-C}$, метиленової $\text{-CH}_2\text{-}$ груп і, особливо, первинних амінів -NH_2 забезпечує утворення додаткових хімічних зв'язків із боковими гідроксильними та епоксидними групами макромолекул смоли.

Враховуючи наведене вище, а також додаткову фізичну взаємодію макромолекул епоксидної смоли між собою та з модифікатором, вважали, що такий механізм структуроутворення модифікованих епоксидних композицій є найбільш ймовірним, внаслідок чого забезпечується поліпшення показників когезійних характеристик КМ.

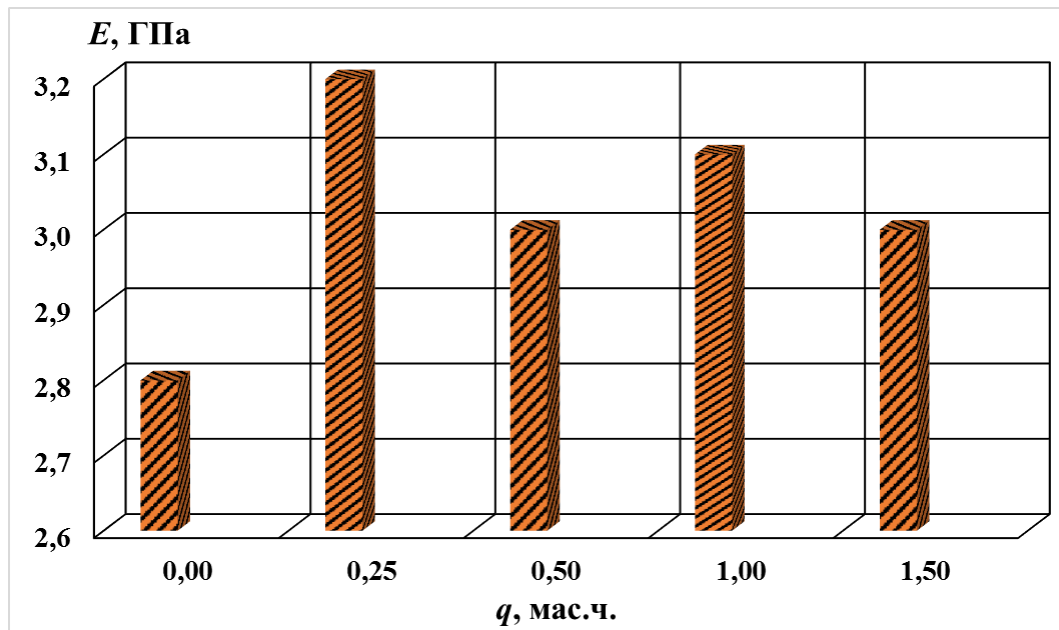
Доведено (рис. 1, а), що збільшення вмісту модифікатора не приводить до підвищення модуля пружності епоксидної матриці. Навпаки, введення у зв'язувач добавки у кількості $q = 0,50 \dots 1,50$ мас.ч. призводить до зменшення модуля пружності до $3,0 \dots 3,1$ мас.ч. в усьому досліджуваному діапазоні концентрацій. Це свідчить про те, що концентрація модифікатора – $q = 0,25$ мас.ч. для даної досліджуваної характеристики є критичною, а подальше його збільшення у зв'язувачі призводить до неповного зшивання матриці при полімеризації. На наш погляд, це зумовлено надмірною кількістю молекул модифікатора у композиціях, тому такі матеріали відзначаються підвищеним вмістом золь-фракції, що призводить до зниження показників фізико-механічних характеристик розроблених матриць.

Наступним етапом було дослідження залежності руйнівних напружень при згинанні КМ від вмісту модифікатора МБМА. Експериментально встановлено (рис. 1, б), що введення у зв'язувач добавки за незначного вмісту ($q = 0,25$ мас.ч.) забезпечує підвищення показників руйнівних напружень при згинанні модифікованої матриці порівняно з вихідною від $\sigma_{32} = 48,0$ МПа до $\sigma_{32} = 54,4$ МПа. Надалі введення МБМА у кількості $q = 0,50 \dots 1,50$ мас.ч. призводить до погіршення когезійних властивостей композитів, позаяк значення руйнівних напружень знаходяться в межах $\sigma_{32} = 50,5 \dots 51,6$ МПа. Отримані показники властивостей в результаті дослідження практично не відрізняються і знаходяться в межах похибки експерименту, тому надалі проведення випробувань з метою підвищення характеристик матеріалів за рахунок збільшення вмісту добавки не є доцільним. Водночас слід зазначити, що отримані дані корелюють з аналогічною залежністю модуля пружності при згинанні від вмісту модифікатора (рис. 1, крива 1), де аналогічно виявлено максимальні показники E за такої ж кількості введеної добавки. Виходячи з цього можна констатувати про критичний вміст модифікатора у епоксидному зв'язувачі, який становить $q = 0,25$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20.

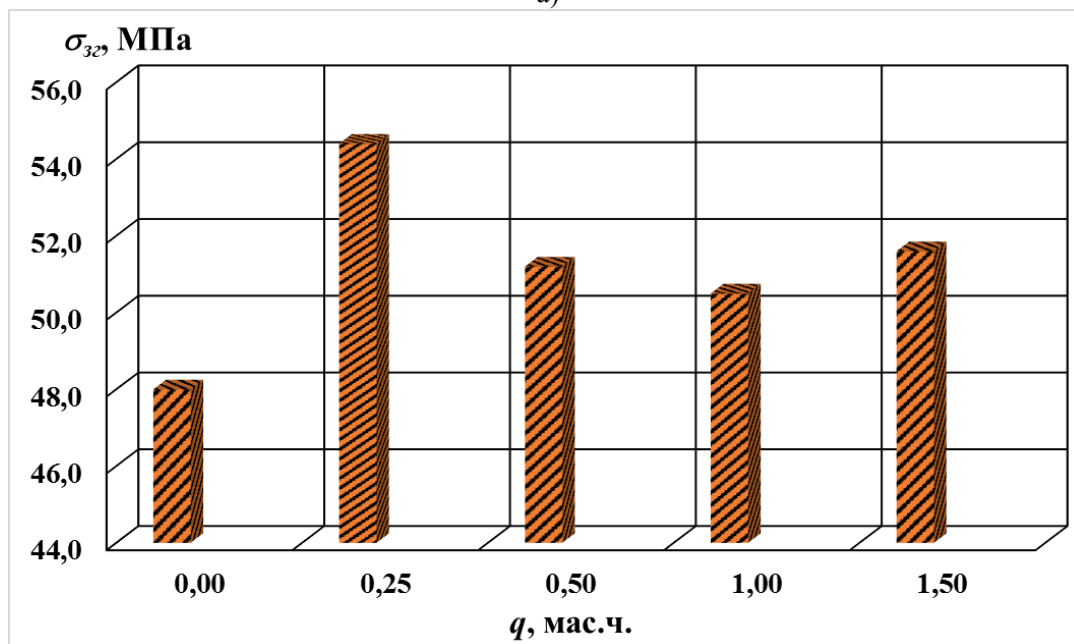
Авторами [7, 8] показано, що важливою з практичної точки зору під час експлуатації устаткування при динамічних навантаженнях є стійкість захисних покриттів до удару. Виходячи з цього, у роботі проведено дослідження ударної в'язкості розроблених матеріалів залежно від вмісту модифікатора МБМА. Показано (рис. 1, в), що максимум на кривій залежності «ударна в'язкість – вміст модифікатора» спостерігали для КМ, який містить МБМА у кількості $q = 0,25$ мас.ч. Для такого матеріалу показники ударної в'язкості порівняно з вихідною матрицею збільшуються від $W = 7,4$ кДж/м² до $W = 9,0$ кДж/м². Надалі збільшення вмісту модифікатора від $q = 0,50$ мас.ч. до $q = 1,50$ мас.ч. призводить до монотонного зменшення показників ударної в'язкості розроблених КМ. Отримані дані корелюють і добре узгоджуються з результатами дослідження залежності модуля пружності та руйнівних напружень при згинанні, що свідчить про достовірність отриманих показників в результаті проведених випробувань комплексу фізико-механічних властивостей матеріалів.

Додатково для підтвердження наведених вище результатів дослідження фізико-механічних властивостей КМ проводили аналіз поверхні їх руйнування після випробувань на маятниковому копрі методом оптичної мікроскопії. Показано (рис. 2, а), що поверхня зламу зразка на основі вихідної епоксидної матриці має неоднорідний характер. Фронт поширення тріщин зміщується під час ударних навантажень, що свідчить про існування напруженого стану у полімеризованому матеріалі.

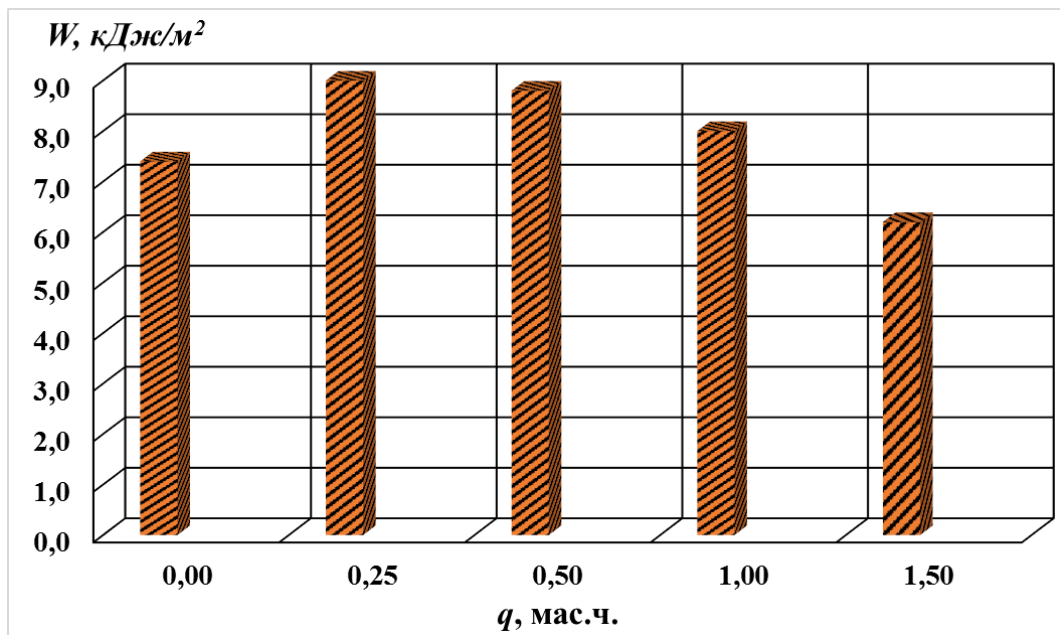
Аналіз світлини зламу КМ, наповненого модифікатором у кількості $q = 0,25$ мас.ч. (рис. 2, б) свідчить про наступне. Траєкторія поширення тріщини під час удару має зигзагоподібний характер. Можна стверджувати про формування матеріалу з високими залишковими напруженнями з одного боку, а також про підвищені когезійні властивості з іншого боку. Тобто, достатня кількість фізичних і, особливо, хімічних зв'язків у матеріалі чинить опір поширенню тріщин. У результаті фронт їх поширення змінюється у напрямі найменшого опору. Виходячи з цього, можна констатувати про формування у процесі полімеризації тривимірної сітки полімеру з високим міжмолекулярним розподілом за об'ємом, що передбачає високий ступінь зшивання даного матеріалу.



а)



б)



в)

Рис. 1. Залежність фізико-механічних властивостей і ударної в'язкості епоксидної матриці від вмісту модифікатора 4,4'-метиленбіс(2-метоксианіліну):

- а) модуль пружності при згинанні (E);
 б) руйнівні напруження при згинанні ($\sigma_{\text{сг}}$);
 в) ударна в'язкість (W , кДж/м²)

Показано (рис. 2, в, г), що характер зламу зразків з КМ, наповнених модифікатором у кількості $q = 0,50$ мас.ч. і $q = 1,00$ мас.ч. мають приблизно однаковий характер. Траєкторія поширення тріщин є прямою, однак область руйнування КМ на кінцевому етапі є дещо зміщеною від точки удару. Це є свідченням наявності у КМ сітки з достатньо високим ступенем зшивання і густиною фізико-хімічних зв'язків, хоча не у такій кількості як у матеріалі, що містить модифікатор у кількості $q = 0,25$ мас.ч. Можна стверджувати, що такі КМ мають дещо нижчі показники когезійної міцності. Отримані дані добре узгоджуються з результатами дослідження фізико-механічних властивостей матеріалів, де доведено, що максимальними показниками модуля пружності, руйнівних напружень при згинанні і ударної в'язкості відзначається матриця з модифікатором у кількості $q = 0,25$ мас.ч.



а)



б)



в)

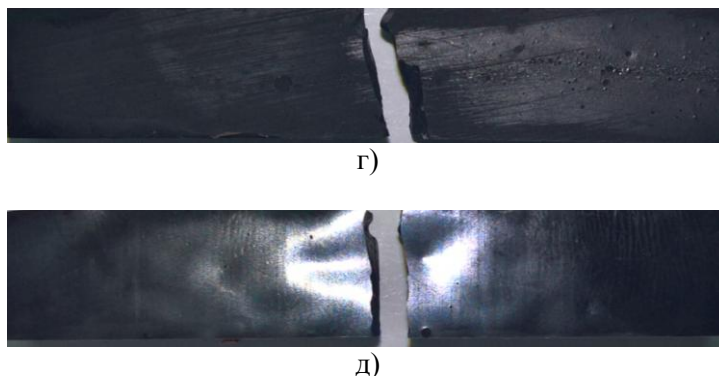


Рис. 2. Мікросвітлини зламу вихідної і модифікованих 4,4'-метиленбіс(2-метоксианіліном) епоксидних матриць: а) вихідна епоксидна матриця (контрольний зразок); б) $q = 0,25$ мас.ч. модифікатора; в) $q = 0,50$ мас.ч. модифікатора; г) $q = 1,00$ мас.ч. модифікатора; д) $q = 1,50$ мас.ч. модифікатора.

Макроаналіз зразків, що містять модифікатор у кількості $q = 1,50$ мас.ч. дозволяє стверджувати наступне. Спостерігали траєкторію поширення тріщин, яка перпендикулярна до поздовжньої осі зразка (рис. 2, д). Можна констатувати про невеликий міжмолекулярний розподіл фізико-хімічних зв'язків у об'ємі модифікованої матриці з одного боку і значний вміст золь-фракції у КМ за рахунок надмірної кількості добавки з іншого боку. Можна констатувати, що в таких КМ формується сіткова структура з рівномірним розподілом хімічних зв'язків, але із невеликою їх густиною у об'ємі матеріалу, що не дозволяє чинити достатній опір руйнуванню під час ударних навантажень.

Висновки. У роботі встановлено наступне.

1. Експериментально доведено, що для формування матеріалів з поліпшеними когезійними властивостями необхідно використовувати композицію наступного складу: епоксидний олігомер марки ЕД-20 ($q = 100$ мас.ч.), твердник поліетиленполіамін ПЕПА ($q = 10$ мас.ч.), модифікатор 4,4'-метиленбіс(2-метоксианілін) ($q = 0,25$ мас.ч.). Формування такого матеріалу забезпечує порівняно з вихідною модифікованою ультразвуком епоксидною матрицею підвищення наступних показників фізико-механічних властивостей композитів:

- модуля пружності при згинанні – від $E = 2,8$ ГПа до $E = 3,2$ ГПа;
- руйнівних напружень при згинанні – від $\sigma_{3z} = 48,0$ МПа до $\sigma_{3z} = 54,4$ МПа;
- ударної в'язкості – від $W = 7,4$ кДж/м² до $W = 9,0$ кДж/м².

2. Методом оптичної мікроскопії доведено, що поверхня зламу вихідної матриці має неоднорідний характер. Фронт поширення тріщин зміщується під час ударних навантажень, що свідчить про існування напруженого стану у полімеризованому матеріалі. Аналіз світлини зламу композиту, наповненого модифікатором у кількості $q = 0,25$ мас.ч. свідчить про те, що траєкторія поширення тріщини під час удару має зигзагоподібний характер. Можна стверджувати про формування матеріалу з високими залишковими напруженнями з одного боку, а також про підвищені когезійні властивості з іншого боку. Тобто, достатня кількість фізичних і, особливо, хімічних зв'язків у матеріалі чинить опір поширенню тріщин. Стосовно зразків з композитів, наповнених модифікатором у кількості $q = 0,50$ мас.ч. і $q = 1,00$ мас.ч. слід зазначити, що траєкторія поширення тріщин є прямою, однак область руйнування матеріалів на кінцевому етапі є дещо зміщеною від точки удару. Це є свідченням наявності у композитах сітки з достатньо високим ступенем зшивання і густиною фізико-хімічних зв'язків, хоча не у такій кількості як у матеріалі, що містить модифікатор у кількості $q = 0,25$ мас.ч.

Література

1. Юрженко М.В., Шестопа А.М., Гохфельд В.Л., Кораб М.Г., Васильев Ю.С., Шадрін А.О., Демченко В.Л., Гусакова К.Г. Словник-довідник зі зварювання та склеювання пластмас / За ред. Б.Є.Патона. – Київ : Наукова думка, 2018 . – 368 с.
Iurzhenko M., Shestopal A., Gokhfel'd V., Korab M., Vasiljev Yu., Shadrin A., Demchenko V., Gusakova K. Dictionary-handbook on welding and glueing of plastics / Ed. B. Paton. – Kyiv: Naukova dumka, 2018. – 368 p.
2. Юрженко М.В. Зварювання високотехнологічних пластмас / М.В.Юрженко, М.Г. Кораб. - Суми: Університетська книга. – 2016. – 319 с.

- Iurzhenko M. Welding of high-tech plastics / M.Iurzhenko, M.Korab. - Sumy: University book, 2016, 319 p.
3. Mamunya Ye. Electroactive polymer materials / Ye.Mamunya, M.Iurzhenko, E.Lebedev, V.Levchenko, O.Chervakov, O.Matkovska, O.Sverdlikovska, 2013, Kyiv: Alpha-Reklama, 402 p.
4. Демченко В.Л., Юрженко М.В. (Demchenko V.L., Iurzhenko M.V.) Особливості наноструктурної організації, властивості та релаксаційна поведінка зварних з'єднань поліетиленів (Features of nanostructural organization, properties, and relaxation behaviour of welded joints of polyethylenes) / В.Л. Демченко, М.В. Юрженко // Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології: Зб. наук. пр. (Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii). - К.: ПВВ ІМФ, 2017. - Т. 15, № 3. - С. 535-546.
5. Demchenko V.L. Structure and properties of the welded joints of single-type polyethylenes formed under the action of constant magnetic fields / V.L.Demchenko, M.V.Yurzhenko // Materials Science. – 2017. – Vol. 53, I. 2. – P. 186-193.
6. Demchenko V.L. Peculiarities of constant magnetic field effect on the nanostructural organization and properties of hard-to-weld polyethylene polypropylene joints / V.L.Demchenko, M.V.Yurzhenko // 2017 IEEE Nanomaterials: Applications and Properties, 2017, P. 03NNSA10-1 - 03NNSA10-3. <http://ieeexplore.ieee.org/document/8190258/>
7. Buketov A.V. Nanomodified dispersed particles- and synthetic fibers-filled epoxy composite materials for the metal-polymer tribosystems of transport vehicles / A.V. Buketov, D.O. Zinchenko, S.O. Smetankin // Nanomechanics Science and Technology: An International Journal. – 2017. – Vol. 8. – P. 41-54.
8. Buketov A. Enhancing performance characteristics of equipment of sea and river transport by using epoxy composites / A. Buketov, P. Maruschak, O. Sapronov, D. Zinchenko, V. Yatsyuk, S. Panin // Transport. – 2016. – Vol. 31(3). – P. 333-342.
9. Сапронов О.О. Дослідження адгезійних і фізико-механічних властивостей епоксикомпозитів, наповнених нанотрубками / О.О. Сапронов, О.С. Рожков, О.В. Лещенко, О.С. Голотенко // Науковий вісник ХДМА, 2014. – №2(11). – С. 197-202.
10. Zhai Yu-Jun, Wang Zhi-Cai, Huang Wei et al. Improved mechanical properties of epoxy reinforced by low content nanodiamond powder // Materials Science and Engineering A. - 2011. - V.528, N 24. - P. 7295-7300.
11. Справочник по композиционным материалам / Под ред. Дж. Любина. Москва: Машиностроение, 1988. 446 с.
12. Nakamura Y., Okabe S., Iida T. Effects of particle shape, size and interfacial adhesion on the fracture strength of silica-filled epoxy resin. Polymers and Polymer Composites. - 1999. - V.7, N 3. - P. 177-186.
13. Buketov A. Investigation of thermophysical properties of epoxy Nanocomposites / A.Buketov, P.Maruschak, O.Sapronov, M.Brailo, O.Leshchenko, L.Bencheikh, A.Menou // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 2016. – Vol. – 628. – P. 167-179.
14. Akimov A.V. Development of polymer composites with improved thermophysical properties for shipbuilding and ship repair / A.V. Akimov, A.V. Buketov, O.O. Sapronov, M.V. Brailo, S.V. Yakushchenko, S.A. Smetankin // Composites: Mechanics, Computations, Applications: An International Journal. – Vol. 10. – № 2. – 2019. – P. 117–134.
15. Buketov A.V. Optimization of components in development of polymeric coatings for restoration of transport vehicles / A.V. Buketov, M.V. Brailo, D.P. Stukhlyak, S.V. Yakushchenko, O.O. Sapronov, V.V. Cherniavskiy, V.M. Husiev, D.A. Dmitriev, V.M. Yatsyuk, O.M. Bezbakh, R.Yu. Negrutsa // Весник КарГУ. – 2018. - № 4(92). – P. 119-131.
16. Buketov A.V. Adhesive pull and shear strength of epoxy nanocomposite coatings filled with ultradispersed diamond / A.V. Buketov, N.A. Dolgov, A.A. Sapronov, V.D. Nigalatii // Strength of Materials. – 2018. – V. 50, N 3. – P. 425-431.

Стаття надійшла до редакції 15.03.2019

УДК 667.64:678.026

А.В. Букетов, Р.Ю. Негруца, В.М. Яцюк

Херсонська державна морська академія

ВПЛИВ МОДИФІКАТОРА 2,4-ДИАМІНОАЗОБЕНЗОЛ-4'-КАРБОНОВОЇ КИСЛОТИ НА АДГЕЗІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ ЗАХИСНИХ ПОЛІМЕРНИХ ПОКРИТТІВ

Показано, що одним з основних засобів регулювання структури та властивостей полімерних композитів є їх фізична модифікація. Обґрунтовано, що додатково поліпшити властивості епоксидних композитів можна введенням у зв'язувач на попередній стадії формування модифікаторів за гомеопатичного вмісту. У цьому плані перспективним є використання як модифікатора 2,4-діаміноазобензол-4'-карбонової кислоти, що містить аміні групи. Останнє передбачає взаємодію з твердником ПЕПА і у подальшому створення комплексних сполук з епоксидним олігомером.

У роботі досліджено вплив модифікатора 2,4-діаміноазобензол-4'-карбонової кислоти на адгезійні властивості епоксидної матриці. У результаті аналізу отриманих даних встановлено оптимальну концентрацію модифікатора, за якої забезпечують максимальні показники адгезійної міцності матриці при відриві від сталеві основи зі сталі Ст.3 і зсуві. Доведено, що модифікатор, взаємодіючи з епоксидним олігомером у процесі формування композиту, активує процеси взаємодії на межі поділу фаз «адгезив – субстрат». Це забезпечує отримання матеріалу не лише з поліпшеними показниками адгезійної міцності, але й з незначними залишковими напруженнями.

Ключові слова: матриця, епоксидний композит, модифікатор, адгезійні властивості, міцність, основа, залишкові напруження.

А.В. Букетов, Р.Ю. Негруца, В.Н. Яцюк

Херсонская государственная морская академия

ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАТОРА 2,4-ДИАМИНОАЗОБЕНЗОЛ-4'-КАРБОНОВОЙ КИСЛОТЫ НА АДГЕЗИОННЫЕ СВОЙСТВА И ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ

Показано, что одним из основных методов регулирования структуры и свойств полимерных композитов является их физическая модификация. Обосновано, что дополнительно улучшить свойства эпоксидных композитов возможно введением в связующее на предыдущей стадии формирования модификаторов при гомеопатическом содержании. В этом плане перспективным является использование в качестве модификатора 2,4-диаминоазобензол-4'-карбоновой кислоты, содержащего аминные группы. Последнее предполагает взаимодействие с отвердителем ПЕПА и, в дальнейшем, создание комплексных соединений с эпоксидным олигомером.

В работе было исследовано влияние модификатора 2,4-диаминоазобензол-4'-карбоновой кислоты на адгезионные свойства эпоксидной матрицы. В результате анализа полученных данных установлено оптимальную концентрацию модификатора, при которой обеспечивают максимальные показатели адгезионной прочности матрицы при отрыве от стальной основы из стали Ст 3 и сдвиге.

Доказано, что модификатор, взаимодействуя с эпоксидным олигомером в процессе формирования композита, активизирует процессы взаимодействия на границе раздела фаз «адгезив - субстрат». Это обеспечивает получение материала не только с улучшенными показателями адгезионной прочности, но и с незначительными остаточными напряжениями.

Ключевые слова: матрица, эпоксидный композит, модификатор, адгезионные свойства, прочность, основа, остаточные напряжения.

A.V. Buketov, R.Yu. Negrutza, V.M. Yatsyuk

Kherson State Maritime Academy

2,4-DIAMINOAZOBENZENE-4'-CARBOXYLIC ACID MODIFIER EFFECT ON ADHESIVE PROPERTIES AND PROTECTIVE POLYMER COATINGS RESIDUAL STRESSES

It is shown that one of the main method of regulating the structure and properties of polymer composites is their physical modification. It is proved that it is possible to improve the properties of epoxy composites by entering homeopathic dose of bonding additive into the binder during the previous stage of modifiers formation. From this perspective the usage of 2,4-diaminoazobenzene-4'-carboxylic acid modifier containing amine groups is promising. It involves interaction with the PEPA hardener and the future development of complex compounds with an epoxy oligomer.

2,4-diaminoazobenzene-4'-carboxylic acid modifier effect on the adhesion properties of the epoxy matrix is investigated in this article. As a result of obtained data analysis the most suitable concentration of the modifier is determined that provides maximum adhesion strength of the matrix when it is separated from the steel base of grade St 3 and the shift.

It is substantiated that the modifier activates the interaction processes at the boundary line of the «adhesive-substrate» phases by interacting with the epoxy oligomer during the polymer formation. It leads to material formation with improved adhesion strength criteria, but also with low residual stresses characteristics.

Key words: matrix, epoxy composite, modifier, adhesion properties, strength, basis, residual stresses.

Постановка проблеми. На сьогодні відомий широкий спектр полімерних композитних матеріалів (КМ), які використовують у вигляді покриттів для захисту деталей технологічного устаткування від корозії і зношування. Серед них чільне місце займають покриття на епоксидній основі. Вони відрізняються покращеними фізико-механічними і теплофізичними властивостями. Однак, однією з важливих властивостей захисних покриттів є їх адгезійна міцність до металевої основи, позаяк відшарування чи розтріскування адгезивів при експлуатації деталей у першу чергу залежить від їх міцності прилипання до основи. Тому на сьогодні актуальним питанням промисловості є впровадження полімерних покриттів з підвищеними показниками адгезійної міцності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Авторами [1-6] показано, що для покращення адгезійних властивостей полімерних покриттів у епоксидний зв'язувач доцільно вводити модифікатори, пластифікатори і наповнювачі. Актуальним на сьогодні є модифікація епоксидних олігомерів, оскільки введення добавок за незначного вмісту не лише приводить до поліпшення властивостей матеріалів, але й зумовлює суттєве зменшення їх вартості за одночасного збільшення ресурсу експлуатації. При цьому важливим є вибір природи модифікатора, який має бути активним до фізико-хімічної взаємодії із епоксидним олігомером. У цьому контексті цікавим з наукової і практичної точки зору є застосування як модифікатора 2,4-діаміноазобензол-4'-карбонової кислоти. Таку добавку доцільно вводити у епоксидний зв'язувач, позаяк модифікатор містить активні до взаємодії з макромолекулами смоли гідроксильні, карбоксильні, карбонільні і амініні групи. Тому проведення дослідження з метою визначення впливу кількості модифікатора 2,4-діаміноазобензол-4'-карбонової кислоти на адгезійні властивості епоксидної матриці є актуальною задачею сучасної промисловості.

Мета роботи – дослідити вплив модифікатора 2,4-діаміноазобензол-4'-карбонової кислоти на адгезійні властивості та залишкові напруження захисних епоксикомпозитних покриттів.

Матеріали та методика дослідження. Як основний компонент для зв'язувача при формуванні епоксидних композитних матеріалів (КМ) вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84), який характеризується високою адгезійною та когезійною міцністю, незначною усадкою і технологічністю при нанесенні на поверхні складного профілю. Структурна формула фрагменту епоксидного діанового олігомеру ЕД-20 наведена на рис. 1 [5]. Як модифікатор використано 2,4-діаміноазобензол-4'-карбонової кислоти (ДААБКК). Модифікатор вводили у зв'язувач за вмісту від 0,10 до 2,00 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 (тут і далі за текстом мас. ч. наводять на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20). Молекулярна формула модифікатора: $C_{13}H_{12}N_4O_2$. Молекулярна маса ДААБКК – 256,25998. Модифікатор розчинний у полярних органічних розчинниках – метанол, етанол, ацетон, етилацетат, малорозчинний у воді. Структурну формулу модифікатора наведено на рис. 2.

Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін ПЕПА (ТУ 6-05-241-202-78), що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. Відомо, що ПЕПА є низькомолекулярною речовиною, яка складається з таких взаємозв'язаних компонентів: $[-CH_2-CH_2-NH-]_n$. Структурну формулу фрагменту твердника ПЕПА наведено на рис. 3. Різні стадії зшивання моделювали і досліджували при введенні твердника у композицію за вмісту 10 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 з метою визначення оптимального для відповідних характеристик співвідношення компонентів у системі «зв'язувач – модифікатор». Характеристики епоксидного діанового олігомеру, модифікатора і твердника наведено у табл. 1.

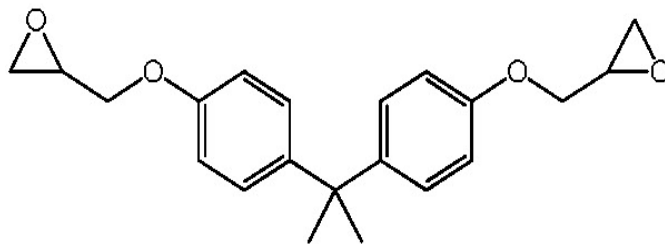


Рис. 1. Структурна формула фрагменту епоксидного діанового олігомеру ЕД-20 [6]

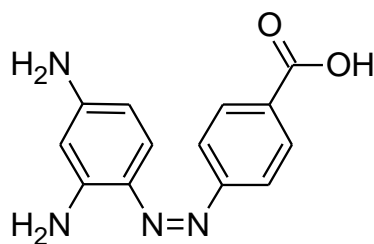


Рис. 2. Загальний вигляд хімічних зв'язків модифікатора 2,4-діаміноазобензол-4'-карбонової кислоти (ДААБКК)

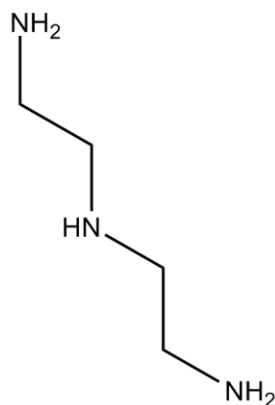


Рис. 3. Структурна формула фрагменту твердника ПЕПА [6]

Таблиця 1

Характеристики компонентів епоксидного зв'язувача

Характеристики	Епоксидний олігомер ЕД-20	Модифікатор ДААБКК	Твердник ПЕПА
Молекулярна маса	390...430	256	230...250
Вміст епоксидних груп, %	20,0...22,5	–	–
Вміст гідроксильних груп, %	1,25	–	–
Середня функціональність за епоксидними групами, f_n	2,0	–	–
Вміст азоту, %	–	21,86	19,5...22,0
Вміст вуглецю, %	–	60,93	–
Вміст кисню, %	–	12,49	–
Вміст водню, %	–	4,72	–
В'язкість, η , Па·с	13...20	–	0,9
Густина, ρ , г/см ³	1,16	–	1,05

Епоксидні композити і покриття на їх основі формували за такою технологією: підігрівання смоли до температури $T = 353 \pm 2$ К і витримка при даній температурі впродовж часу $\tau = 20 \pm 0,1$ хв; гідродинамічне суміщення олігомеру і модифікатора впродовж часу $\tau = 1 \pm 0,1$ хв; ультразвукова обробка (УЗО) композиції впродовж часу $\tau = 1,5 \pm 0,1$ хв; охолодження композиції до кімнатної температури впродовж часу $\tau = 60 \pm 5$ хв; введення твердника і суміщення компонентів композиції впродовж часу $\tau = 5 \pm 0,1$ хв. Затверджували КМ за режимом: формування зразків та їх витримання впродовж часу $\tau = 12,0 \pm 0,1$ год за температури $T = 293 \pm 2$ К, нагрівання зі швидкістю $v = 3$ К/хв до температури $T = 393 \pm 2$ К, витримання впродовж часу $\tau = 2,0 \pm 0,05$ год, повільне охолодження до температури $T = 293 \pm 2$ К. З метою стабілізації структурних процесів у матриці зразки витримували впродовж часу $\tau = 24$ год на повітрі за температури $T = 293 \pm 2$ К з наступним проведенням експериментальних випробувань.

Адгезійну міцність матриці до металевіт основи досліджували, вимірюючи руйнівні напруження («метод грибків») при рівномірному відриві пари склесних зразків згідно ГОСТ 14760 - 69. Дослідження адгезійної міцності при зсуві проводили згідно ГОСТ 14759 - 69, аналогічно вимірюючи силу відривання клейових з'єднань зразків на автоматизованій розривній

машині УМ-5 при швидкості навантаження $v = 10$ м/с. Діаметр робочої частини зразків при відриві становив – $d = 25$ мм. Слід зазначити, що площа склеювання зразків, які досліджували при відриві та зсуві, була однаковою.

Залишкові напруження у матриці визначали консольним методом [6]. Покриття товщиною $\delta = 0,3 \dots 0,8$ мм формували на металевій основі. Параметри основи: загальна довжина – $l = 100$ мм, робоча довжина – $l_0 = 80$ мм, товщина – $\delta = 0,3$ мм. Відхилення значень при дослідженнях показників адгезійних властивостей і залишкових напружень у КМ становило 4...6 % від номінального.

Для дослідження хімічних зв'язків у модифікаторі використовували ІЧ-спектральний аналіз. ІЧ-спектри реєстрували на спектрофотометрі марки «IRAffinity-1» (Японія) у ділянці хвильових чисел $\nu = 400 \dots 2400$ см^{-1} однопроменевим методом у відбитому світлі. Розгортку спектру за хвильовими числами $\lambda^{-1} = \nu$ здійснювали на діаграмі в межах 225 мм у діапазоні вибраних частот. Хвильові числа, інтенсивність пропускання, напівширину і площу смуги поглинання визначали за допомогою комп'ютерної програми IRsolution. Похибка при визначенні хвильового числа – $\nu = \pm 0,01$ см^{-1} , а при визначенні точності розташування піку – $\nu = \pm 0,125$ см^{-1} . Фотометрична точність становила $\pm 0,2$ % при програмному управлінні щільною і тривалістю інтегрування – $t = 10$ с. Крок інтегрування – $\Delta\lambda = 4$ см^{-1} .

Результати досліджень та їх обговорення. На початковому етапі аналізували структуру і наявність хімічних зв'язків у модифікаторі для виявлення його активності до взаємодії з епоксидною смолою у процесі полімеризації матриці. Методом ІЧ-спектроскопії встановлено наступне.

Виявлено смуги поглинання незначної інтенсивності при хвильових числах $\nu = 501,49$; $532,35$; $648,08$ см^{-1} (рис. 4). Дані смуги поглинання характеризують -СН- маятникові коливання. Також виявлено смуги поглинання середньої інтенсивності при хвильових числах $\nu = 688,59 \dots 752,24$ см^{-1} , які характеризують маятникові коливання -СН- груп та первинних амінів -NH₂.

Смуги поглинання при хвильових числах $\nu = 812,03$; $852,54$; $893,04$ см^{-1} свідчать про валентні коливання -С-С- груп і маятникові коливання -СН- груп, мають оптичну густину малої інтенсивності та незначну площу піка. Смуга поглинання для модифікатора при хвильовому числі $\nu = 943,19$ см^{-1} має також незначну оптичну густину і площу піка. Дана смуга на спектрі відноситься до валентних коливань -С-С-, -С-N- груп і парабензолу.

Також виявлено валентні коливання -С-С-, -С-N- і вторинних амінів -NH₂ при $\nu = 1109,07$ та $1170,79$ см^{-1} . При цьому смуга з хвильовим числом $\nu = 1109,07$ см^{-1} має оптичну густину середньої інтенсивності, а смуга при $\nu = 1170,79$ см^{-1} має густину сильної інтенсивності, але незначну площу піка. Смуги середньої інтенсивності виявлено при хвильових числах $\nu = 1203,58$; $1257,59$ см^{-1} , які оптично накладаються і мають достатньо велику оптичну густину та площу піка. Вони характеризують наявність деформаційних коливань -ОН- груп, валентних коливань -С-N- груп і третинних амінів -N-R₂. Крім того, додатково виявлено деформаційні коливання -ОН- груп, маятникові коливання СН- груп та третинних амінів -N-R₂, свідченням чого є наявність смуг поглинання при хвильових числах $\nu = 1313,52$; $1384,89$ см^{-1} .

Також виявлені маятникові коливання -СН- груп на спектрі модифікатора при $\nu = 1417,68$; $1456,26$ см^{-1} . При цьому дані смуги поглинання накладаються і мають оптичну густину сильної інтенсивності та значну площу. Смуги поглинання для вихідного модифікатора при хвильових числах $\nu = 1519,91$; $1556,55$ см^{-1} мають оптичну густину сильної інтенсивності, але незначну площу. Вони свідчать про наявність у структурі модифікатора первинних амінів -NH₂ і парабензолу. Смуги, що накладаються, сильної інтенсивності і значної площі виявлено при хвильових числах $\nu = 1604,77$; $1633,71$; $1693,50$ см^{-1} . Це дозволяє констатувати про валентні коливання -С=C-, -С=N- груп, а також – валентні коливання карбонільної С=О, карбоксильної СООН- груп та первинних амінів -NH₂.

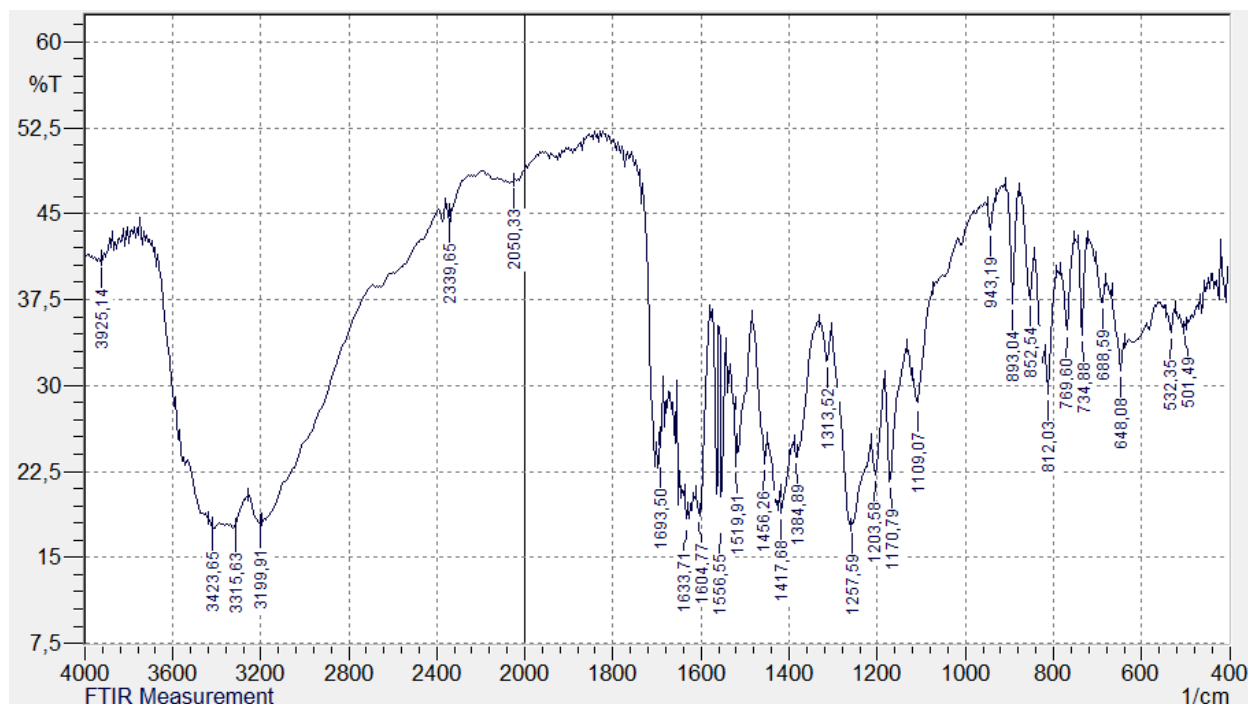


Рис. 4. Спектр модифікатора 2,4-діаміноазобензол-4'-карбонової кислоти у ділянці хвильових чисел $\nu = 400 \dots 4000 \text{ см}^{-1}$

Важливими є смуги поглинання у діапазоні хвильових чисел $\nu = 2050,33; 2339,65 \text{ см}^{-1}$, які свідчать про маятникові коливання C-H- груп ($\nu = 2050,33 \text{ см}^{-1}$) і валентні коливання C-N- груп ($\nu = 2339,65 \text{ см}^{-1}$). Смуги сильної інтенсивності виявлено при хвильових числах $\nu = 3199,91; 3315,63; 3423,65 \text{ см}^{-1}$. Як видно з рис. 4, вони накладаються, тому характеризуються сильною оптичною густиною і значною площею. Наявність даних смуг свідчить про наявність маятникових коливань -CH- груп, валентних коливань -OH-груп та парабензолу ($\nu = 3199,91 \text{ см}^{-1}$), а також – про валентні коливання OH- груп і маятникові коливання -CH- груп. Це свідчить про значну кількість даних груп у модифікаторі, що дозволяє констатувати наступне. Дана добавка у епоксидній матриці може бути активною до взаємодії з гідроксильними групами епоксидолігомеру та твердника за рахунок згаданих вище груп, позаяк їхня кількість у модифікаторі є значною. Додатково слід зазначити про наявність смуги поглинання при хвильовому числі $\nu = 3925,14 \text{ см}^{-1}$, характерної для валентних коливань -OH- груп. Дана смуга відзначається малою інтенсивністю і площею.

На основі аналізу ІЧ-спектру модифікатора ДААБКК можна констатувати про його активність до фізико-хімічної взаємодії із компонентами зв'язувача (ЕД-20 – ПЕПА) за рахунок значної кількості груп та сегментів.

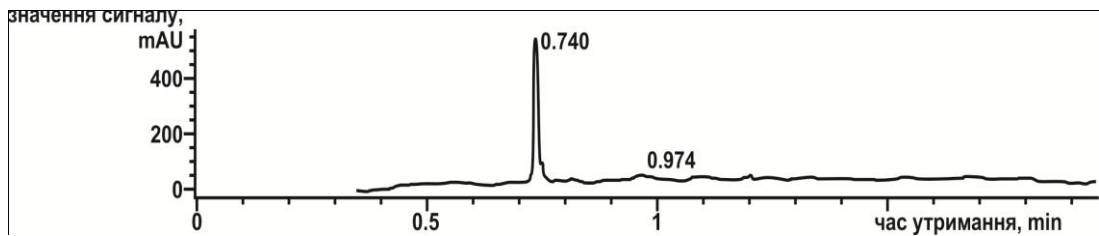
Додатково методом газової хроматографії мас-селективним детектуванням проводили дослідження з метою визначення молекулярної маси синтезованого модифікатора.

При цьому речовину масою 0,0124 г розчиняли в метанолі та проводили хроматографування за наступних умов:

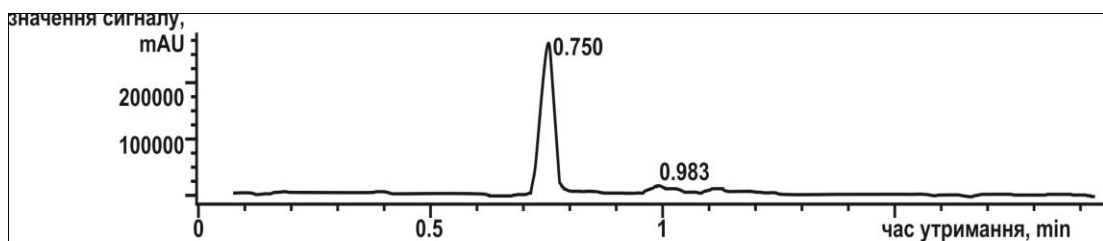
- прилад – GC/MS Agilent Technologies 6890 N;
- капілярна колонка – HP 19091S-433 (HP-5MS);
- довжина – 30 мм, діаметр – 0,25 мм, фаза – 0,25мкм;
- газ-носії – гелій;
- постійний потік газу-носія – 1,5 мл/хв;
- інжектор – автоінжектор 7683, Split 20:1;
- температура випаровувача – $T = 250 \text{ }^\circ\text{C}$; технологічні режими нагрівання: $T_{\text{поч}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, утримання – 2 хв, швидкість нагрівання – $15 \text{ }^\circ\text{C/хв}$, $T_{\text{кін}} = 280 \text{ }^\circ\text{C}$;
- детектор – мас-селективний, температура інтерфейсу $T = 280 \text{ }^\circ\text{C}$;
- іонізація – електронним ударом, енергія іонізації – 70 eV;
- температура іонного джерела – $T = 230 \text{ }^\circ\text{C}$;
- температура квадруполя – $T = 150 \text{ }^\circ\text{C}$;

- проба – 1,0 мкл.

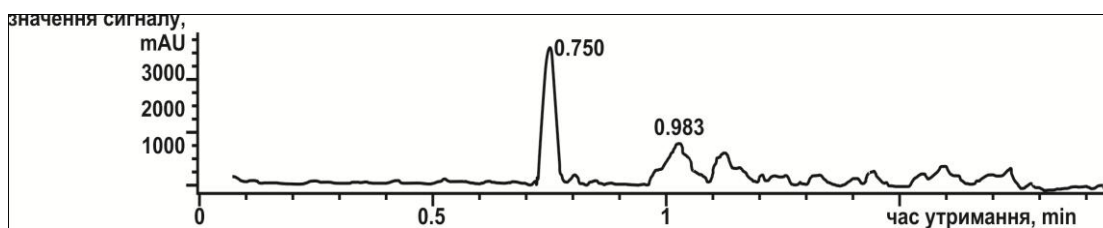
Результати дослідження наведено на рис. 5. На попередньому етапі проводили хроматографування трьох проб модифікатора і знаходили значення сигналів від часу їх утримання. На наступному етапі аналізували параметри сигналів. Як показано у табл. 2 (приклад для проби № 1) сигнал отримано при часі утримання $t = 0,740$ хв з площею піка $S = 97,42$ %. Тобто, кількість речовини модифікатора у пробі становить 97,42 %. Крім того, додатково отримано сигнал при часі утримання $t = 0,974$ хв з площею піка $S = 2,58$ %, що свідчить про відсоток домішок у пробі.



а)



б)



в)

**Рис. 5. Значення сигналу від часу утримання проби модифікатора
а) проба № 1; б) проба № 2; в) проба № 3**

Надалі для визначеного часу утримання сигналу $RT = 0,740$ mAU, який характеризує лише досліджувану речовину – синтезований модифікатор, знаходили залежність значення характеристикних сигналів від m/z (m – маса проби; z – заряд) (рис. 6). У результаті знаходили значення характеристикних сигналів, які співставляли з табличними даними, внаслідок чого отримали величину молекулярної маси синтезованого модифікатора. Слід зазначити, що молекулярна маса модифікатора майже співпадає з аналогічною масою твердника і несуттєво відрізняється від молекулярної маси епоксидного олігомера. Передбачали, що це, як і значна кількість активних груп у модифікаторі, що доведено методом ІЧ-спектроскопії, може суттєво вплинути на перебіг міжфазових процесів взаємодії при полімеризації матриці. Останнє, у свою чергу, забезпечить підвищення показників адгезійних властивостей модифікованої епоксидної матриці.

Параметри сигналів		
№	Час утримання, хв	Площа піка, %
1	0,740	97,42
2	0,974	2,58

Значення характ. сигн.,

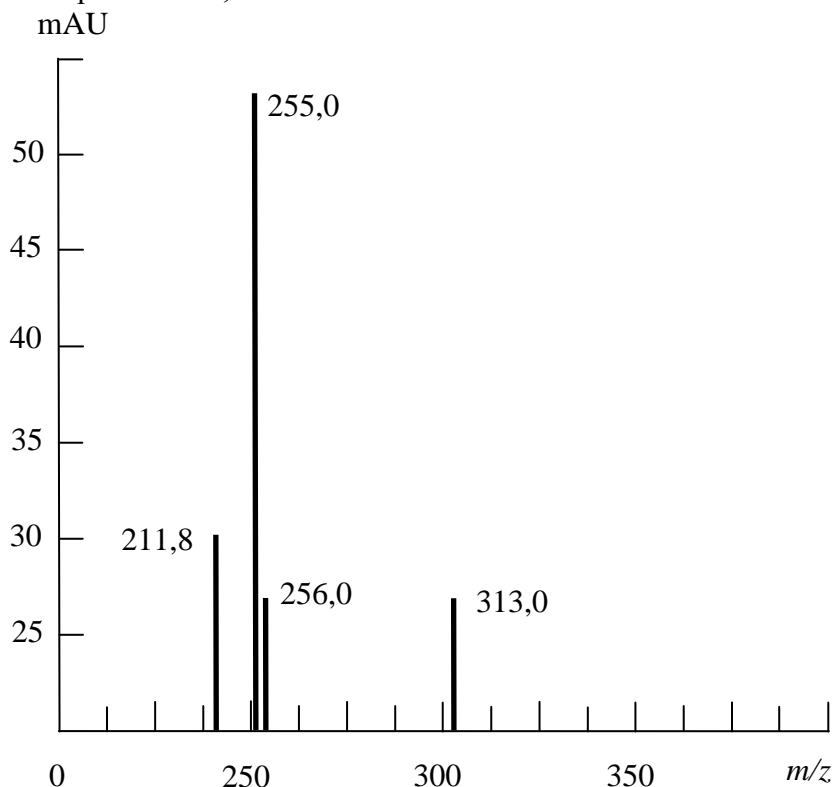


Рис. 6. Залежність значення характеристичних сигналів від m/z при часі утримання сигналу $RT = 0,740$ mAU; m – маса проби; z – заряд

На наступному етапі досліджували властивості вихідної епоксидної матриці. Встановлено (рис. 7), що показники її адгезійної міцності при відриві і зсуві, а також залишкових напружень становлять відповідно: $\sigma_a = 24,8$ МПа, $\tau = 8,5$ МПа, $\sigma_s = 1,4$ МПа. Доведено (рис. 7, крива 1), що при введенні модифікатора за незначного вмісту $q = 0,25 \dots 0,50$ мас.ч. адгезійна міцність КМ порівняно з вихідною матрицею монотонно зростає від $\sigma_a = 24,8$ МПа до $\sigma_a = 32,3 \dots 35,3$ МПа. Максимум ($\sigma_a = 36,1$ МПа) на кривій залежності адгезійної міцності при відриві від вмісту модифікатора спостерігали при введенні модифікатора у композит у кількості $q = 1,0$ мас.ч. При подальшому збільшенні вмісту добавки у епоксидному зв'язувачі спостерігали зменшення показників адгезійної міцності матриці. Зокрема, за вмісту ДААБКК у кількості 2,0 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру адгезійна міцність матриці становить $\sigma_a = 33,7$ МПа. Поліпшення адгезійних властивостей епоксидної матриці в результаті введення модифікатора, на наш погляд, можна пояснити фізико-хімічними процесами у зв'язувачі при його полімеризації. Як було доведено вище (рис. 2, рис. 4), модифікатор містить карбонільні $C=O$, карбоксильні $COOH$ - та гідроксильні $-OH$ -групи, а також бокові групи первинних амінів $-NH_2$. Очевидно, що при зшиванні зв'язувача відбувається руйнування груп $-NH_2$ і, можливо, $N-C$ зв'язків, в результаті чого утворюються додаткові вільні радикали з функціональними групами. Такі радикали є активнішими до міжфазової взаємодії з епоксидним олігомером, що передбачає збільшення гель-фракції у матриці внаслідок зростання кількості зв'язків у просторовій сітці полімера. У свою чергу це забезпечує поліпшення адгезійних властивостей модифікованої матриці. Крім того, у структурі модифікатора карбонільні, карбоксильні і, особливо, гідроксильні групи активуються у присутності твердника, що забезпечує їх інтенсивну взаємодію з боковими групами і сегментами епоксидного олігомера. Це додатково забезпечує збільшення густини просторової сітки матриці, що підвищує показники не лише когезійної, але й адгезійної міцності матриці.

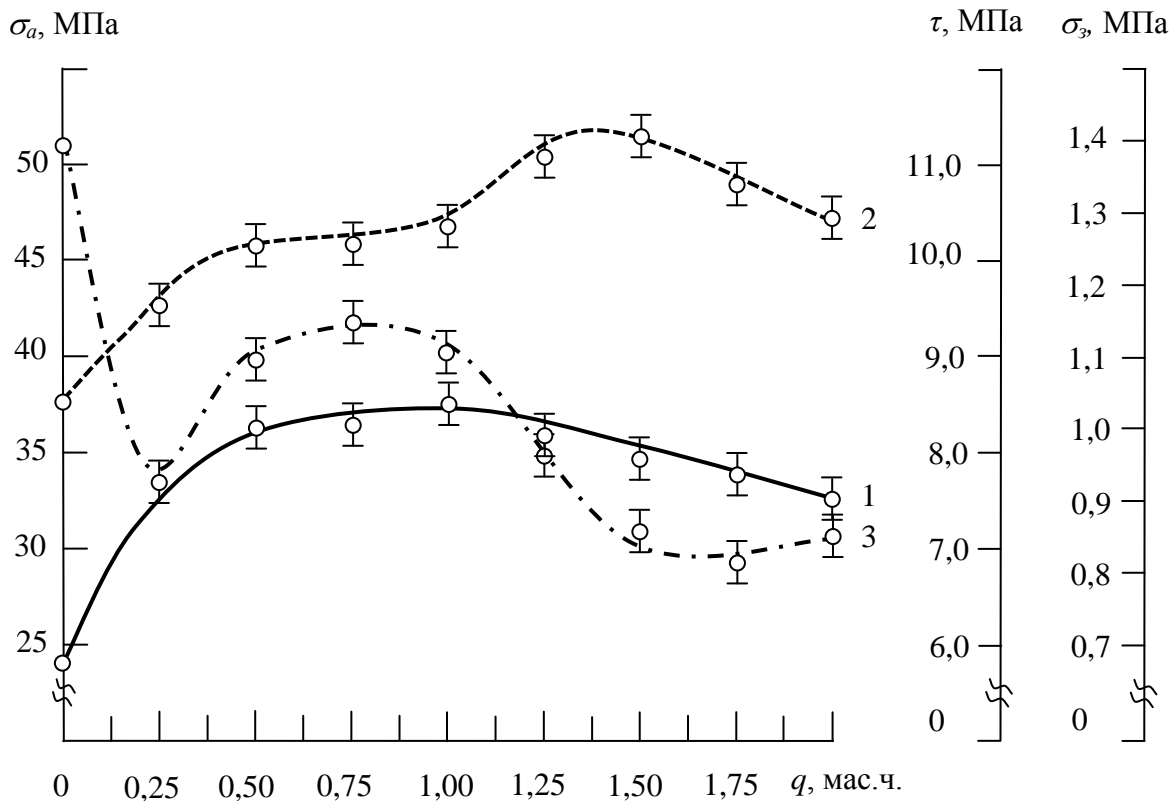


Рис. 7. Залежність адгезійної міцності і залишкових напружень у КМ від вмісту модифікатора ДААБКК: 1 – адгезійна міцність при відриві (σ_a); 2 – адгезійна міцність при зсуві (τ); 3 – залишкові напруження (σ_3). Матеріал основи – сталь марки Ст 3.

Відомо [3, 4], що під час експлуатації технологічного устаткування, особливо транспортної галузі, на деталі та механізми діють навантаження не лише у вигляді нормальних сил, а й дотичних. Тому актуальним є дослідження величини тангенціальних напружень під час експлуатації і руйнування системи «захисне покриття – металева основа». Виходячи з цього, у роботі досліджували вплив кількості модифікатора на адгезійну міцність при зсуві епоксидної матриці. Експериментально встановлено (рис. 7, крива 2), що введення добавки за вмісту $q = 0,25$ мас.ч. приводить до збільшення порівняно з вихідною матрицею адгезійної міцності при зсуві КМ від $\tau = 8,5$ МПа до $\tau = 9,5$ МПа. Надалі при введенні у епоксидний олігомер модифікатора у кількості $q = 0,50 \dots 1,00$ мас.ч. адгезійна міцність при зсуві КМ суттєво зростає (до $\tau = 10,2 \dots 10,4$ МПа). Максимальні показники адгезійної міцності при зсуві ($\tau = 11,1$ МПа) спостерігали для КМ із вмістом модифікатора у кількості 1,50 мас.ч. Надалі при збільшенні вмісту добавки показники адгезійних властивостей зменшуються. Слід зазначити, що порівняно з кривою залежності адгезійної міцності при розриві максимум на кривій « $\tau - q$ » є дещо зміщеним, що можна пояснити суттєвим впливом домінуючих сил, як нормальних, так і тангенціальних, за різних методів проведення досліджень.

Як показано авторами [4, 5], залишкові напруження у захисних покриттях є одним із визначальних факторів їх довговічності. Зокрема, значні показники залишкових напружень зумовлюють передчасне старіння покриттів, що передбачає їх передчасне руйнування. Тому важливим є дослідження їх показників не лише після формування адгезивів, але й під час експлуатації деталей технологічного устаткування.

Експериментально встановлено (рис. 7), що залишкові напруження у вихідній епоксидній матриці становлять $\sigma_3 = 1,4$ МПа. Доведено (рис. 7, крива 3), що введення модифікатора у кількості $q = 0,25$ мас.ч. приводить до суттєвого зменшення залишкових напружень від $\sigma_3 = 1,4$ МПа до $\sigma_3 = 0,9$ МПа. Це можна пояснити пластифікуючою дією добавки з одного боку і недостатнім затверджуванням матриці внаслідок незначної кількості модифікатора з другого боку. При збільшенні кількості добавки до $q = 0,50 \dots 1,00$ мас.ч. залишкові напруження зростають до $\sigma_3 = 1,0 \dots 1,2$ МПа. Зазначимо, що у даному діапазоні концентрацій модифікатора формуються КМ з максимальними показниками адгезійної міцності. Це свідчить про те, що формується міцнозшита

структура матриці, яка забезпечує покращення адгезійних властивостей, хоча залишкові напруження, хоч несуттєво, але зростають. За збільшення вмісту добавки до $q = 1,50 \dots 2,00$ мас.ч. залишкові напруження, як і адгезійні характеристики, зменшуються. Це, у першу чергу, зумовлено надмірною кількістю ДААБКК у епоксидній системі, що призводить до підвищення золь-фракції у розроблених матеріалах.

Висновки. У роботі встановлено оптимальний вміст модифікатора 2,4-діаміноазобензол-4'-карбонової кислоти для формування модифікованого епоксидного захисного покриття з покращеними адгезійними характеристиками і незначними залишковими напруженнями. Доведено, що при введенні модифікатора 2,4-діаміноазобензол-4'-карбонової кислоти у кількості $q = 1,0$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 формується матеріал з наступними властивостями: адгезійна міцність при відриві – $\sigma_a = 36,1$ МПа; адгезійна міцність при зсуві – $\tau = 10,4$ МПа. Це забезпечує підвищення, порівняно з вихідною епоксидною матрицею, показників адгезійної міцності при відриві у 1,5 разів, а адгезійної міцності при зсуві у 1,2 рази. Водночас слід зазначити, що введення модифікатора у кількості $q = 1,0$ мас.ч. зумовлює зниження залишкових напружень у покриттях від $\sigma_z = 1,4$ МПа (для вихідної епоксидної матриці) до $\sigma_z = 1,0$ МПа. Отриманий композит доцільно використовувати у вигляді матриці для формування покриттів різного функціонального призначення.

Література

1. Buketov A.V. Optimization of components in development of polymeric coatings for restoration of transport vehicles / A.V. Buketov, M.V. Brailo, D.P. Stukhlyak, S.V. Yakushchenko, O.O. Saprionov, V.V. Cherniavskiy, V.M. Husiev, D.A. Dmitriev, V.M. Yatsyuk, O.M. Bezbakh, R.Yu. Negrutza // Весник КарГУ. – 2018. - № 4(92). – Р. 119-131.
2. Михайлин Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы / Ю.А.Михайлин. – С-Пб.: Научные основы и технологии, 2009. – 660 с.
3. Akimov A.V. Development of polymer composites with improved thermophysical properties for shipbuilding and ship repair / A.V. Akimov, A.V. Buketov, O.O. Saprionov, M.V. Brailo, S.V. Yakushchenko, S.A. Smetankin // Composites: Mechanics, Computations, Applications: An International Journal. – Vol. 10. – № 2. – 2019. – pp. 117–134.
4. Buketov A.V. Impact toughness of nanocomposite materials filled with fullerene C60 particles / A.V. Buketov, A.A. Saprionov, N.N. Buketova, M.V. Brailo, P.O. Marushak, S.V. Panin, M.Yu. Amelin // Composites: Mechanics, Computations, Applications: An International Journal. – Vol. 9(2). – 2018. – P.141–161.
5. Buketov A.V. Increasing the reliability of the equipment of oil and gas transportation industry due to polymeric nanocomposites // A.V. Buketov, M.Yu. Amelin, R.Yu. Negrutza, A.V. Saprionova, O.M. Bezbach, S.V. Voronenko. Journal of Hydrocarbon Power Engineering. – 2017. – Vol. – 4(2). – P. 64-67.
6. Стухляк П.Д., Букетов А.В., Редько О.І. Епоксидно-діанові композити: технологія формування, фізико-механічні і теплофізичні властивості: монографія. – Тернопіль: Крок, 2011. – 165 с.

Стаття надійшла до редакції 15.03.2019

УДК: 621.43 + 621.43.016.4-57+536.421+541.6:541.183

В.П. Волков¹, І.В. Грицук², М.В. Володарець³, Д.С. Погорлецький², Р.В. Симоненко⁴*Харківський національний автомобільно-дорожній університет¹**Херсонська державна морська академія²**Український державний університет залізничного транспорту³**ДП "ДержавтотрансНДІпроект"⁴***ОСОБЛИВОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧОГО МАТЕРІАЛУ ДЛЯ ЗДІЙСНЕННЯ КОМБІНОВАНОГО
ПРОГРІВУ ГІБРИДНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ**

В роботі розглянуто особливості формування теплоенергетичних характеристик теплоакumuлюючого матеріалу для здійснення комбінованого прогріву транспортного засобу в процесах рекуперації енергії. Представлена схема системи комбінованої утилізації теплової енергії транспортного двигуна та транспортного засобу. Сформульовано основні вимоги до теплових акумуляторів фазового переходу системи прогріву. Наведено результати експериментальних досліджень на фізичній моделі системи рекуперації з тепловим акумулятором.

Ключові слова: транспортний засіб; тепловий акумулятор; фазовий перехід; теплоакumuлюючий матеріал, система рекуперації, тепла підготовка.

**В.П. Волков, И.В. Грицук, Н.В. Володарец, Д.С. Погорлецкий, Р.В. Симоненко
ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ
КОМБИНИРОВАННОГО ПРОГРЕВА ГИБРИДНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

В работе рассмотрены особенности формирования теплоэнергетических характеристик теплоаккумуляторного материала для осуществления комбинированного прогрева транспортного средства в процессах рекуперации энергии. Представлена схема системы комбинированной утилизации тепловой энергии транспортного двигателя и транспортного средства. Сформулированы основные требования к тепловым аккумуляторам фазового перехода системы прогрева. Приведены результаты экспериментальных исследований на физической модели системы рекуперации с тепловым аккумулятором.

Ключевые слова: транспортное средство; тепловой аккумулятор; фазовый переход; теплоаккумуляторный материал, система рекуперации, тепловая подготовка.

**V. Volkov, I. Gritsuk, M. Volodarets, D. Pohorletskyi, R. Symonenko
FEATURES OF THE STUDY OF THERMAL AND ENERGY CHARACTERISTICS OF THE
HEAT-ACCUMULATING MATERIAL FOR THE COMBINED HEATING OF A HYBRID
VEHICLE**

The features of study of heat-energy characteristics of heat-accumulating material for carrying out combined heating of a vehicle, which uses a hybrid drive, in the processes of its energy recovery, are considered in the paper. The scheme of the system of combined utilization of heat energy of a transport engine and a vehicle is presented. The basic requirements for thermal accumulators of the phase transition of the heating system are formulated. The results of experimental research on the physical model of thermal accumulator are presented. The combined scheme of realization of the energy recovery system on the vehicle with electric transmission and utilization of thermal energy on the laboratory physical model is proposed and implemented. The need for such a scheme arises in the event of a long interruption in the operation of the vehicle's engine, when the thermal accumulators of the heating system are partially or completely discharged due to the inevitable loss of heat in the surrounding space.

Keywords: vehicle; heat accumulator; phase transition; heat storage material, recovery system, heat treatment.

Постановка проблеми.

Для ефективної роботи двигуна транспортного засобу дієвим є впровадження в їх конструкцію сучасних ресурсозберігаючих, екологічно чистих технологічних рішень. Це дозволить розширити функціональні можливості, а також збільшити їх продуктивність.

Для адаптації зазначених заходів в практику експлуатації транспортних засобів (ТЗ) доцільним є проведення системних досліджень, що включають в себе різні методи конструювання, розрахунково-експериментальні дослідження й аналіз отриманих результатів, на рівнях створюваних комплексів з теплової підготовки та їх компонентів. Їх впровадження в практику експлуатації транспортних засобів, які використовують гібридну передачу потужності, потребує адаптації їх функціональних і технологічних можливостей з використанням електричної енергії рекуперації від гальмування транспортного засобу [1-6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Виконаний аналіз існуючих систем когенерації, рекуперативних систем транспортних засобів з електричною тягою (гібридних), характеристик і сфер застосування накопичувачів енергії для них [1-24, 29] показав, що для них є ефективним поєднання можливостей рекуперативної системи транспортного засобу, оснащеного електричною тягою, з можливостями системи комбінованої утилізації теплової енергії на основі теплових акумуляторів фазового переходу.

Постановка завдань.

Метою роботи є розгляд особливостей дослідження, отримання і формування раціональних теплоенергетичних характеристик теплоакуючого матеріалу (ТАМ) для здійснення комбінованого прогріву гібридного транспортного засобу в різних системах та механізмах в умовах експлуатації.

Викладення основного матеріалу.

В роботі [23] розглянуті можливості вдосконалення процесів теплової підготовки підсистем та механізмів гібридного транспортного засобу з використанням теплових акумуляторів фазового переходу в умовах експлуатації.

Для формування системи прогріву двигуна і транспортного засобу, оснащеного системою рекуперації, вирішено використовувати комбінацію теплових акумуляторів фазового переходу при одночасному застосуванні електричних нагрівачів. Особливості використання в транспортних засобах теплових акумуляторів фазового переходу описані в роботах [1-6]. Принципова схема системи комбінованої утилізації теплової енергії на основі теплових акумуляторів (ТА) фазового переходу, розроблена авторами, показана в роботі [5]. Система виконує частину функцій систем охолодження, мащення і випуску відпрацьованих газів (ВГ), а також здійснює визначальний вплив на протікання робочого процесу транспортного двигуна і салону транспортного засобу. Вона складається з наступних складових і елементів: підсистеми прискореного прогріву двигуна (СППД), підсистеми утилізації теплової енергії ВГ з ТА фазового переходу (СУТТА), контактного теплового акумулятора (КТА), накопичувача моторного масла з тепловим акумулятором (НМОТА), накопичувача охолоджуючої рідини з тепловим акумулятором (НОРТА), ТА каталізатора системи нейтралізації ВГ (ТАСНВГ) [5].

Вказані підсистеми двигуна і ТЗ можуть працювати спільно у складі та за алгоритмом роботи системи комбінованої утилізації теплової енергії, або окремо одна від одної з виконанням особливих, властивих їм особистих функцій [5,6].

Застосування системи комбінованої утилізації теплової та електричної енергії на основі теплових акумуляторів для транспортного двигуна і гібридного ТЗ дає можливість виконувати [23, 24]: швидкий передпусковий прогрів двигуна ТЗ без його пуску від фазоперехідного ТА СУТТА та підсистеми СППД на рівні 40-60 °С; швидкий прогрів до температури, при якій можливе навантаження двигуна ТЗ; скоротити час прогріву до оптимальної, з точки зору робочого процесу двигуна ТЗ, температури ОР і МО (на рівні 85±5 (95±2) °С) та підтримувати її на заданому експлуатаційному рівні; швидкий прогрів салону гібридного ТЗ до температури, при якій можлива експлуатація ТЗ без використання високовольтної батареї; забезпечувати стаке підтримання температури двигуна ТЗ під час зупинки (в міжзмінний період) до температури 40-50 °С без його роботи в режимі холостого ходу; забезпечувати стаке підтримання температури високовольтної батареї гібридного ТЗ в умовах експлуатації при низьких температурах оточуючого середовища.

Було розроблено цикл забезпечення теплової підготовки підсистем гібридного транспортного засобу, який складається з послідовних стадій накопичення теплоти в процесах зарядки ТА різними джерелами енергії гібридного транспортного засобу, її зберігання та використання (розрядка ТА) для прискореного прогріву окремих підсистем гібридного транспортного засобу: ДВЗ, салону транспортного засобу, високовольтної батареї тощо - описано в [5, 25].

Розглянемо особливості формування теплоенергетичних характеристик ТАМ для здійснення комбінованого прогріву транспортного засобу в процесах рекуперації енергії транспортного засобу.

Для дослідження теплоенергетичних характеристик ТАМ у системі рекуперації ТЗ [34 - 36] була:

- виготовлена фізична модель рекуперативної установки транспортного засобу і теплового акумулятора;
- виготовлені і повірені термопари;
- підібрано нагрівальне і вимірювальне обладнання;

- здійснено апробацію працездатності системи.

Важливим фактором ефективної роботи системи рекуперації тепла є правильний підбір ТАМ.

Вибір ТАМ здійснювали з урахуванням наступних вимог. ТАМ повинен володіти:

- значною теплоємністю;
- в показаному інтервалі температур теплоакumuлююча речовина повинна мати точку фазо-агрегатного переходу (точку плавлення);
- хімічною стабільністю;
- не повинен переходити в газоподібний стан за рахунок кипіння або сублимації;
- не повинен вступати в хімічну реакцію з матеріалом капсули;
- не повинен надавати отруйну дію на організм людини при проведенні ремонту або обслуговування теплового акумулятора;
- не повинен бути вибухонебезпечним і загорятися в діапазоні робочих температур;
- доступним і бути відносно недорогими.

На основі поставлених вимог до теплових акумуляторів фазового переходу системи прогріву були досліджені і обрані ТАМ.

В основу експериментальних досліджень покладена необхідність прогріву двигуна транспортного засобу при низькій температурі оточуючого середовища в період передпускового прогріву до температур «гарячого пуску», а саме: 40 °С, або 50 °С, або 60 °С, при яких можливо розпочати рухатись, а при більших температурах – приймати навантаження, а потім, в процесі руху ТЗ – нагрів до температури $85 \pm 1,5$ °С [5, 26].

На основі проведеного аналізу [2, 3, 5, 26 - 29] і результатів експериментального дослідження, для необхідних температурних діапазонів робочих середовищ, на які планувалося впливати системою комбінованого прогріву транспортного двигуна і гібридного транспортного засобу, були обрані теплоакumuлюючі речовини [5, 26, 30].

Для системи охолодження і оливи транспортного двигуна, а саме ТА фазового переходу підсистеми утилізації теплової енергії відпрацьованих газів, був використаний поліетилен високого тиску, при цьому в якості ТАМ контактного теплового акумулятора фазового переходу і оболонки накопичувачів для моторного масла і охолоджуючої рідини з ТА фазового переходу була використана суміш високомолекулярних вуглеводнів С18-С35 (парафін Т3) [5, 26].

При виборі ТАМ для системи нейтралізації відпрацьованих газів були використані 2 речовини - відповідно для бензинового і дизельного двигуна. При цьому керувалися такими положеннями. Основною умовою оптимального ступеня нейтралізації ВГ транспортного двигуна - до 98% є точне дотримання коефіцієнта надлишку повітря $\alpha = 1 \pm 0,005$. Цей дуже вузький діапазон називають альфа-діапазоном. Дотримання таких дуже жорстких допустимих меж можливо тільки за допомогою електронних засобів регулювання двигуна. Ці жорсткі допуски можна порівнювати з допустимими межами при перевірці токсичності відпрацьованих газів для перевірки контуру регулювання $\pm 0,02/0,03$. Забезпечення швидкого досягнення відповідних значень α після запуску двигуна транспортних засобів досягається також і за допомогою попереднього пуску двигуна передпускової його теплової підготовки, а використання додаткового підігріву потоку відпрацьованих газів забезпечує додатково короткий термін його досягнення. Крім цього, з практики автомобільного транспорту відомо, що одним з важливих чинників високого ступеня нейтралізації ВГ після здійснення запуску транспортного двигуна є досягнення в найкоротші терміни точки початку температурного стрибка каталізатора (Light-off) [31, 32]. Точкою Light-off називають температуру [32], при якій в каталізаторі перетворюється 50% шкідливих речовин. У каталізаторів потрібної дії точка Light-off знаходиться на рівні 250 °С, в той час як в окислювальних каталізаторах для дизельних двигунів через високу концентрацію кисню у ВГ вона досягається вже при 160 °С [32]. Ці обрані теплоакumuлюючі речовини гідрокінон і їдкий натр [31].

Фізична модель теплового акумулятора є герметичною капсулою трубчастого типу, в якій розміщений ТАМ, температуру якого вимірювали термopарою, що розташовується в оболонці [5]. Термopара мала безпосередній тепловий контакт з теплоакumuлюючою речовиною. В якості матеріалів для виготовлення ємкості капсули використовували безшовну товстостінну трубу з нержавіючої жароміцної сталі аустенітного класу марки 12Х18Н10Т. На цьому етапі досліджень головною метою було отримання даних про кількість теплової енергії, яку накопичують теплоакumuлюючі речовини при нагріванні і віддають при охолодженні. На фізичній моделі теплоакumuлюючої установки вивчені температурно-часові параметри процесів накопичення і

реалізації утилізованої теплоти, запропоновані принципи і схематичні рішення реалізації управління тепловими потоками, уточнені параметри теплових акумуляторів фазового переходу [5].

В процесі проведених досліджень, запропонована і реалізована комбінована схема реалізації системи рекуперації енергії на транспортному засобі з електричною передачею і утилізацією теплової енергії на лабораторній фізичній моделі. Запропонована схема включає в себе як рекуперацію енергії гальмування транспортного засобу, так і рекуперацію теплової енергії, але додатково дозволяє витратити енергію накопичену в конденсаторах для використання в системі теплової підготовки транспортного двигуна або підтримки його в прогрітому стані [5, 34 – 37]. Необхідність в реалізації такої схеми виникає в разі тривалої перерви в роботі двигуна транспортного засобу, коли теплові акумулятори системи прогріву частково або повністю розряджаються за рахунок неминучих втрат тепла в навколишній простір.

Дослідження на фізичній моделі підтвердили можливість використання рекуперативної системи енергії руху ТЗ з конденсаторами надвеликої ємності для прогріву теплових акумуляторів [5, 31, 34 – 37].

Дослідженнями впливу напруги живлення силового блоку перетворювача напруги на параметри рекуперативної системи визначено, що рекуперативна система зберігає працездатність при зниженні напруги джерела енергопостачання (накопичувальний конденсаторний блок або тяговий електродвигун в генераторному режимі) майже до нульового значення. Це дає можливість повністю використовувати ємність накопичувального конденсатора і здійснювати електричне гальмування транспортного засобу з накопиченням енергії практично до повної його зупинки.

Разом із тим, слід зазначити, що при тривалому зберіганні теплової енергії в теплових акумуляторах, неминучі її втрати навіть при якісній теплоізоляції. Компенсувати втрати теплової енергії можливо за рахунок підігріву теплоакumuлюючої речовини від бортового джерела електричної енергії. В якості такого джерела може виступати накопичувач електричної енергії в транспортних засобах з електричною передачею, оснащених системою рекуперації електричної енергії. В якості накопичувачів електричної енергії можуть використовуватися акумулятори або конденсатори надвеликої ємності [5, 34 – 37]. Використання конденсаторів є більш доречним, оскільки в них значний гарантований термін служби (до 15 років) і вони здатні працювати з тривалими струмами заряду і розряду в сотні і тисячі ампер.

За допомогою фізичної моделі і перерахунку отриманих результатів для маси досліджуваних речовин до 1 кг при використанні електричного нагріву фізичних моделей ТА (капсул) від конденсаторів надвеликої потужності отримали результати, показані для парафіну на рис. 1, поліетилену рис. 2, їдконого натру рис. 3 і гідрохінону рис. 4. Вертикальна лінія на графіках, підтверджує наявність фазового переходу в часі.

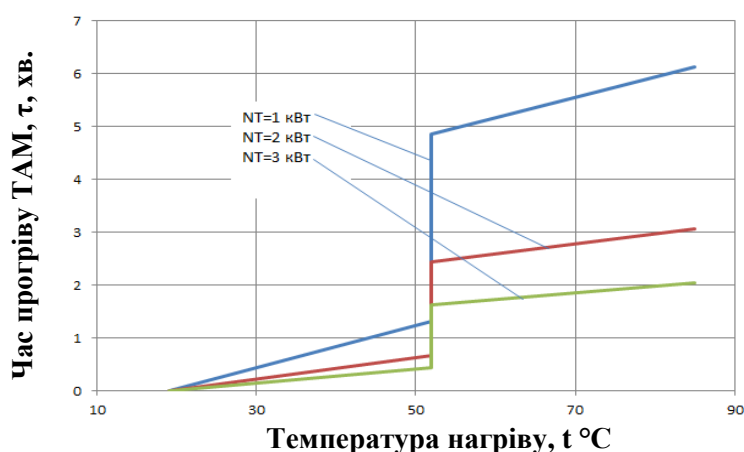


Рис. 1. Експериментально-розрахункові залежності часу прогріву ТАМ парафіну від конденсаторів надвеликої потужності, отримані на фізичній моделі рекуперативної установки ТЗ при різній потужності нагрівачів

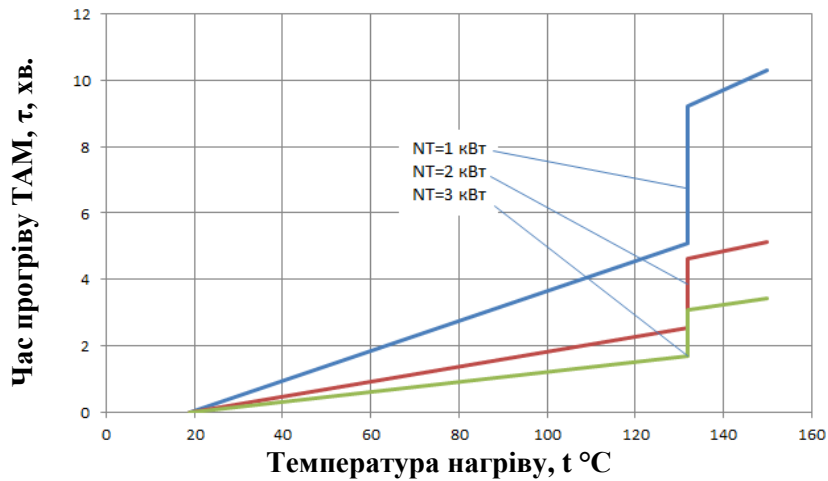


Рис. 2. Експериментально-розрахункові залежності часу прогріву ТАМ поліетилену від конденсаторів надвеликої потужності, отримані на фізичній моделі рекуперативної установки ТЗ при різній потужності нагрівачів

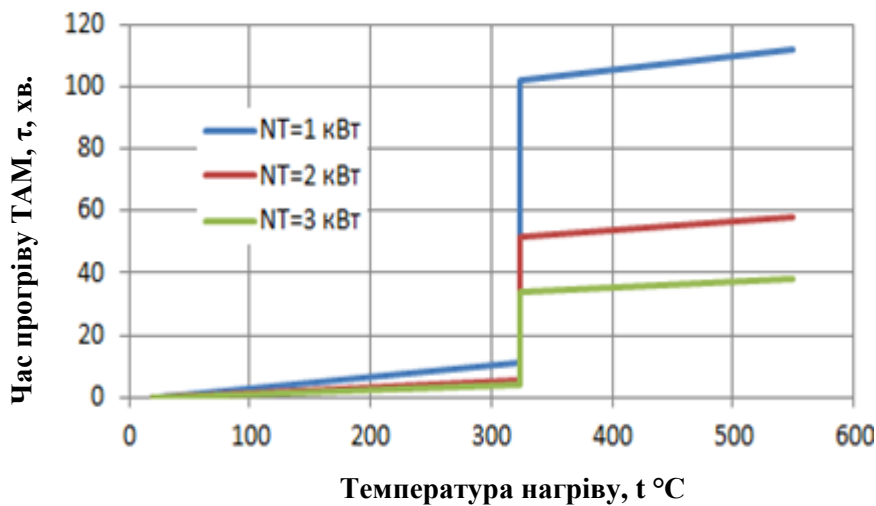


Рис. 3. Експериментально-розрахункові залежності часу прогріву ТАМ їдкою натру від конденсаторів надвеликої потужності, отримані на фізичній моделі рекуперативної установки ТЗ при різній потужності нагрівачів

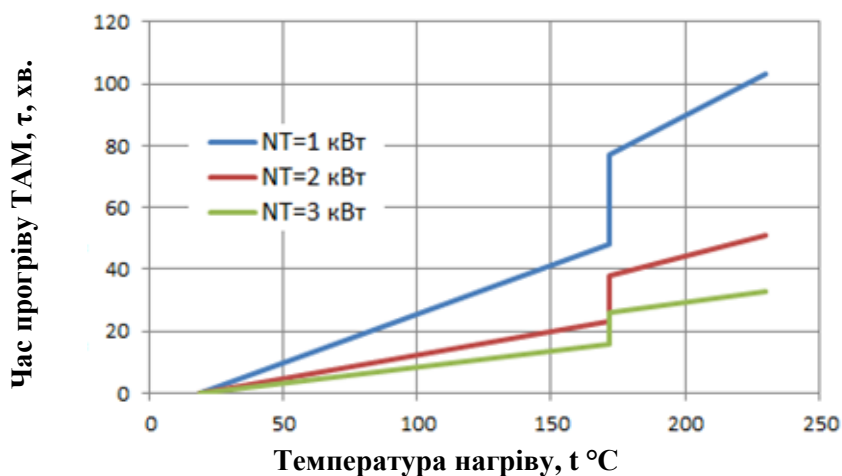


Рис. 4. Експериментально-розрахункові залежності часу прогріву ТАМ гідрохінону від конденсаторів надвеликої потужності, отримані на фізичній моделі рекуперативної установки ТЗ при різній потужності нагрівачів

Потужність встановлювали і автоматично підтримували за рахунок зміни шпороватості імпульсів струму частотою 20 Гц. Пристрій для формування і регулятор потужності імпульсів зібраний на базі ШИМ - контролера TL494. В якості силового ключа використовували чотири включених паралельно IGBT транзистора IRG4PC60F [5, 37].

В цілому, в процесі використання системи рекуперації енергії в транспортних засобах, досліджені на фізичній моделі, для різних ТАМ всієї системи прогріву, були отримані залежності процесів нагрівання ТАМ теплових акумуляторів від часу, показані на рис. 5.

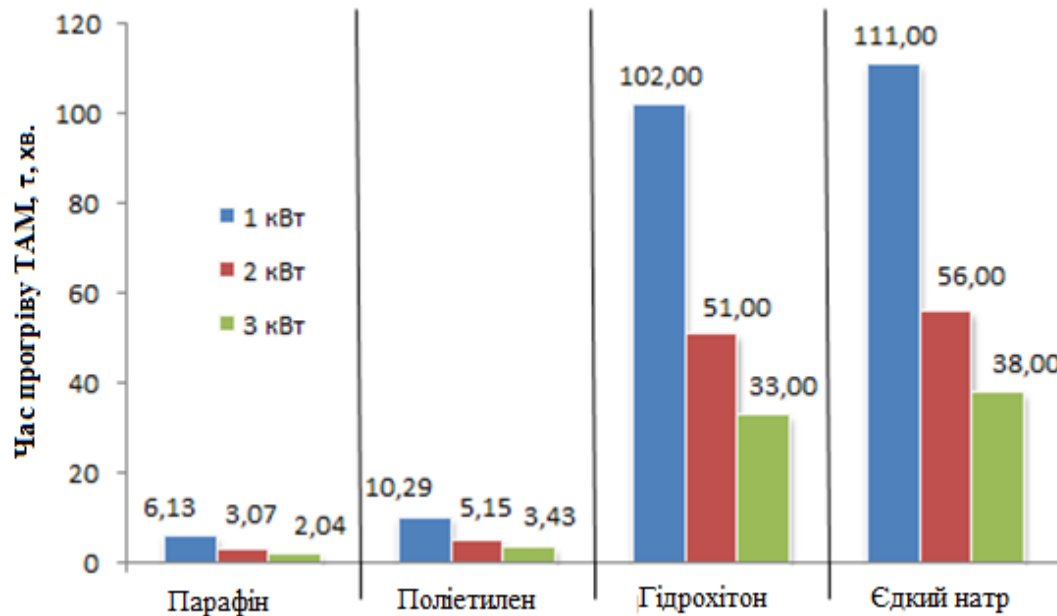


Рис. 5. Порівняльні залежності часу прогріву теплоакумуючих матеріалів системи прогріву для транспортного засобу з використанням системи рекуперації енергії при різній потужності нагрівачів

Виявлено, що використання накопиченої в конденсаторах надвеликої ємності електричної енергії для забезпечення зарядки ТА фазового переходу дозволяє диверсифікувати енергетичні потоки забезпечення працездатності ТА в процесах експлуатації ТЗ, що змінюються.

Висновки

В роботі наведено процес формування теплоенергетичних характеристик ТАМ для здійснення комбінованого прогріву транспортного засобу в процесах рекуперації енергії транспортного засобу. Для цього була виготовлена фізична модель рекуперативної установки транспортного засобу і теплового акумулятора; виготовлені і повірені термометри; підібрано нагрівальне і вимірювальне обладнання; здійснено апробацію працездатності системи. В ході досліджень була запропонована і реалізована комбінована схема реалізації системи рекуперації енергії на транспортному засобі з електричною передачею і утилізацією теплової енергії на лабораторній фізичній моделі.

За допомогою фізичної моделі і перерахунку отриманих результатів для маси досліджуваних речовин до 1 кг при використанні електричного нагріву фізичних моделей ТА (капсул) від конденсаторів надвеликої потужності отримали результати для парафіну, поліетилену, їдкого натру і гідроксидону відповідно.

В процесі використання системи рекуперації енергії в транспортних засобах, досліджені на фізичній моделі, для різних ТАМ всієї системи прогріву, були отримані залежності процесів нагрівання ТАМ теплових акумуляторів від часу.

Список використаних джерел:

1. Park, S., Woo, S., Shon, J., & Lee, K. (2017). Experimental study on heat storage system using phase-change material in a diesel engine. Energy, 119, 1108-1118. doi: 10.1016/j.energy.2016.11.063.
2. Вашуркин И.О. Тепловая подготовка и пуск ДВС мобильных транспортных и строительных машин зимой. СПб.: Наука, 2002. 145 с.

3. Will, F. and Boretti, A., "A New Method to Warm Up Lubricating Oil to Improve the Fuel Efficiency During Cold Start," SAE Int. J. Engines 4(1):175-187, 2011, doi.org/10.4271/2011-01-0318.
4. Матейчик В. П. Системний підхід до аналізу структурних схем енергоустановок транспортних засобів. Вісник НТУ "ХПІ" №7(т.2). Харків, НТУ"ХПІ". 2002. С. 162-167.
5. Gritsuk, I., Volkov, V., Gutarevych, Y., Mateichyk, V., and Verbovskiy V. 'Improving Engine Pre-Start And After-Start Heating by Using the Combined Heating System,' SAE Technical Paper 2016-01-8071, 2016, doi:10.4271/2016-01-8071.
6. Волков В. П., Грицук І. В., Гутаревич Ю. Ф., Александров В. Д., Поддубняк В. Й., Прилепський Ю. В., Комов П. Б., Адров Д. С., Вербовський В. С., Краснокутська З. І., Волкова Т. В. Системи прогріву двигунів внутрішнього згорання: основи функціонування: монографія. Донецьк: ЛАНДОХ-XXI, 2015. 314 с.
7. Donnelly F.W., Cousineau R.L., Horsley R.N.M. Hybrid Technology for the Rail Industry. Proceedings of the 2004 ASME/IEEE Joint Railroad Conference. pp 113 – 117.
8. Lohner A., Evers W. Intelligent Power Management of a Supercapacitor Based Hybrid Power Train for Light-Rail Vehicles and City Busses. IEEE 35th Power Electronics Specialist Conference, 2004. pp 672-676.
9. Yap H.T., Schofield N., Bingham C.M. Hybrid Energy/Power Sources for Electric Vehicle Traction Systems IEEE Power Electronics, Machines and Drives Conference, 2004. pp 61 – 66.
10. Wolfs P., Negnitsky M. (ed). Energy Storage Options for Hybrid Diesel Electric Shunting Locomotives. Australasian Universities Power Engineering Conference AUPEC, Hobart, Tasmania: University of Tasmania, 2005, Sep 25 2005. pp. S123-S123.
11. Cousineau R. Development of a Hybrid Switcher Locomotive. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, February, 2006. p. 25-29.
12. Akli C.R., Sareni B., Roboam X., Jeunesse A. Integrated optimal design of a hybrid locomotive with multiobjective genetic algorithms. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2009. vol. 30 (n° 3-4). pp. 151-162. ISSN 1383-5416.
13. Фалендыш А.П., Володарец Н.В. Использование гибридных передач на маневровых тепловозах. Локомотив-информ. 2010. №12, декабрь. С. 4-7.
14. Liudvinavičius L., Lingaitis L.P. New locomotive energy management systems. Maintenance and reliability. Eksploatacja i niezawodność, Polish Academy of Sciences Branch in Lublin. No 1. 2010. pp. 35-41.
15. Liudvinavičius L., Lingaitis L.P. Locomotive kinetic energy management. Transport Problems: an International Scientific Journal. Sep 2011. Vol. 6 Issue 3. pp. 135-142.
16. Falendish, A. Diesel-locomotive switcher's modernization by hybrid transmission of power / A. Falendish, N. Volodarets, N. Bragin // ТЕКА. Commission of motorization and energetics in agriculture. – Lublin-Lugansk. – 2012. – Vol. 12. – No 4. – P. 58-63.
17. Володарець, М.В. Удосконалення методів та моделей визначення техніко-економічних показників гібридних локомотивів: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07. Укр. держ. ун-т залізн. трансп. Харків, 2016. 20 с.
18. Falendish A., Kharlamov P., Kletska O., Volodarets N. Calculation of the Parameters of Hybrid Shunting Locomotive. Transportation Research Procedia Volume 14, 2016. Elsevier B.V. Pp. 665-671. - doi: 10.1016/j.trpro.2016.05.32.
19. Falendish A., Volodarets M., Hachenko V., Kletska O. The impact of the type of operation on the parameters of a shunting diesel locomotive with hybrid power plant. MATEC Web of Conferences: BulTrans-2017: 9th International Scientific Conference on Aeronautics, Automotive and Railway Engineering and Technologies. 2017. Vol. 133. Article number 03003. 4 p. DOI: 10.1051/mateconf/201713303003.
20. Volodarets M., Kletska O., Hachenko V., Shuleshko D., Kosariev O. Determination Parameters of a Hybrid vehicle in Its Life Cycle. International Journal of Engineering & Technology. 2018. Vol. 7, №. 4.3. Pp. 339-343. DOI: 10.14419/ijet.v7i4.3.19830.
21. Баласанян Г.А. Оценка эффективности интегрированных когенерационных систем // Экотехнологии и ресурсосбережение. 2006. № 3. С. 9–12.
22. Morosuk T. Morosuk C., Bishliaga S. 'Thermodynamic analysis of traditional and alternative heating systems for Ukraine' // In: Advances in Energy Studies. Reconsidering the Importance of Energy, Eds. Ulgiati, S., Brown, T.M., Giampietro, V., Herendeed, R.A. and Mayumi, K. (SGEditoriali, Padova). 2003. P. 381-388.
23. Грицук І.В., Володарець М.В., Погорлецький Д.С., Курносенко Д.В., Левченко Д.І. Особливості моделювання та формування в експлуатації теплової підготовки двигуна транспортного засобу на основі теплових акумуляторів фазового переходу. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Вип. 18. Т. 2. Мелітополь: ТДАТУ, 2018. С. 295-304.
24. Gritsuk, I. V., Mateichyk, V., Aleksandrov, V., Prilepsky, Y., Panchenko, S., Kagramanian, A., Volkov V., Cherniak Yu., Volodarets M., Belousov E., Kukharonak H., Rodin O. 'Features of Modeling Thermal Development Processes of the Vehicle Engine Based on Phase-Transitional Thermal Accumulators,' SAE Technical Paper 2019-01-0906, 2019.
25. Гутаревич Ю.Ф., Грицук І.В., Вербовський В.С., Краснокутська З.І. Особливості алгоритму роботи системи передпускового прогріву газового двигуна в процесі здійснення пуску і прогріву. Вісник СевНТУ. Збірник наук. праць. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. Севастополь: СевНТУ. 2013. Випуск 143/2013. с.53-57.

26. Gritsuk, I., Aleksandrov, V., Panchenko, S., Kagramanian, Sobol O., Sobolev A., Varbanets R., "Features of Application Materials While Designing Phase Transition Heat Accumulators of Vehicle Engines," SAE Technical Paper 2017-01-5003. 2017.
27. Александров В.Д. Кинетика зародышеобразования и массовой кристаллизации переохлажденных жидкостей и аморфных сред. Донецк: Донбасс, 2011. 580с.
28. Левенберг В.Д., Ткач М.Р., Гольстрем В.А. Аккумулирование тепла. Киев: Техника. 1991. 112 с.
29. Александров В. Д., Гутаревич Ю. Ф., Грицук І. В., Прилепський Ю. В., Постніков В. А., Гуцун А. М., Адров Д. С., Вербовський В. С., Краснокутська З. І. Теплові акумулятори фазового переходу для транспортних засобів: параметри робочих процесів: монографія. Донецьк: Вид-во «Ноулідж» (Донецьке відділення). 2014. 230 с.
30. Gritsuk, I., Gutarevych, Y., Mateichyk, V., and Volkov, V., "Improving the Processes of Preheating and Heating after the Vehicular Engine Start by Using Heating System with Phase-Transitional Thermal Accumulator," SAE Technical Paper 2016-01-0204, 2016, doi:10.4271/2016-01-0204.
31. Development of an Electric Bus for Power Station Tours 42 Kiyomi Yamasaki, Shunji Taniguchi, Kazuyuki Adachi, Goichi Ariyoshi; Kyushu Electric Power Co., Inc. In Proceedings of 18-th International Electric Vehicle Symposium (EVS-18) October 20-24, 2001 Berlin, Germany A Conference of the WEVA – World Electric Vehicle Association
32. Хендерсон Б., Хейнес Дж. OBD-II и электронные системы управления двигателем. Руководство. СПб.: Алфамер Паблишинг, 2011. 248 с.
33. Грицук І.В., Прилепський Ю.В., Краснокутська З.І. Патент № 75811 Україна, МПК (2012.01) F01P 3/22 (2006.01), Система регулювання температури охолоджуючої рідини двигуна внутрішнього згорання з утилізацією теплоти тепловим акумулятором транспортного засобу, оснащеного системою рекуперації електричної енергії / / (Україна); Заявник і патентовласник Національний транспортний ун-т. № u2012 07571; заяв.20.06.2012; опубл. 10.12.2012. Бюл. №23. 4с.:іл.
34. Прилепський Ю.В., Грицук І.В., Адров Д. С., Дорошко В. І., Картава С. О. Визначення параметрів теплоакуючих речовин для бортової системи рекуперації теплової енергії тягового рухомого складу. Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту. Донецьк: ДонІЗТ, 2012. Випуск №31. с. 168-176.
35. Прилепский Ю.В., Грицук І.В. Использование физической модели для исследования процессов рекуперации в транспортных средствах с электрической передачей. Вісник Національного технічного університету «ХПІ».Збірник наукових праць. Серія: Автомобіле- та тракторобудування. Х.: НТУ «ХПІ». 2013. № 30 (1003). с.134-139.
36. Грицук І.В., Прилепский Ю.В. Экономия топливных ресурсов за счет использования бортовой системы рекуперации с утилизацией энергии на транспортном средстве с электрической передачей. Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. Всеукраїнська науково-практична конференція, 10-12 жовтня 2012р. Херсон: ХДМА. 2012. с. 243-247.
37. Черняк Ю.В., Прилепский Ю.В., Грицук І.В. Фізична модель рекуперативної системи маневрового тепловозу: монографія. Донецьк: ДонІЗТ. 2010. – 196с. ISBN 978-966-8707-28-5.

Стаття надійшла до редакції 20.03.2019

УДК 53.082.36:531.755

А.Я. Ганзюк, О.І. Стремецький*Хмельницький національний університет, Україна***ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ ПОКАЗНИКІВ ВУГЛЕВОДНЕВИХ СУМІШЕЙ,
ОЧИЩЕНИХ ГІДРОФОБНИМИ СОРБЦІЙНИМИ МАТЕРІАЛАМИ**

Досліджено адсорбцію нафтопродуктів на сапонітових глинах, модифікованих поліорганосилоксанами. Отримані результати довели збільшення кількості парафінів, ізопарафінів та ароматичних вуглеводнів у пробі моторного палива, очищеного модифікованим сапонітом. Встановлено, що завдяки очистці моторного палива модифікованими сапонітами можна зменшити токсичні викиди та збільшити октанове число, що обумовлено видаленням низькооктанових парафінових вуглеводнів. Показано, що зменшуються викиди CO та CO₂ при використанні моторного палива, очищеного адсорбцією на модифікованому сапоніті.

Ключові слова: сапоніт, поліорганосилоксани, адсорбція, моторне паливо.

A. Hanyuk, O. Stremetsky**THE ADSORPTION OF PETROLEUM PRODUCTS ON SAPONITE CLAYS MODIFIED BY
POLYORGANOSILOXANES WAS INVESTIGATED**

The obtained results showed an increase in the amount of paraffins, iso-paraffins and aromatic hydrocarbons in a sample of motor fuel purified by modified saponite. It was established that by refining motor fuel with modified saponite it is possible to reduce toxic emissions and increase the octane number due to the removal of low-octane paraffin hydrocarbons. It is reported that CO and CO₂ emissions decrease with the use of motor fuel purified by adsorption on modified saponite.

Key words: saponite, polyorganosiloxanes, adsorption, motor fuels.

А.Я. Ганзюк, А.И. Стремецкий**ИССЛЕДОВАНО АДсорбЦИЮ НЕФТЕПРОДУКТОВ НА САПОНИТОВЫХ ГЛИНАХ,
МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОЛИОРГАНОСИЛОКСАНАМИ**

Полученные результаты показали увеличение количества парафинов, изопарафинов и ароматических углеводородов в пробе моторного топлива, очищенного модифицированным сапонитом. Установлено, что благодаря очистке моторного топлива модифицированными сапонитами можно уменьшить токсичные выбросы и увеличить октановое число, что обусловлено удалением низкооктановых парафиновых углеводородов. Показано, что уменьшаются выбросы CO и CO₂ при использовании моторного топлива, очищенного адсорбцией на модифицированном сапоните.

Ключевые слова: сапонит, полиорганосилоксаны, адсорбция, моторное топливо.

Вивчення адсорбції молекул з різною будовою органомодифікованими глинами представляє великий інтерес для вирішення багатьох теоретичних та практичних задач адсорбційної технології. Це дає можливість з'ясувати роль пористої структури і модифікуючих агентів в адсорбційній взаємодії [1-3]. При отриманні високого гідрофобного ефекту важливо не знизити адсорбційні характеристики мінералу [4-8, 12].

Мета роботи – вивчення доцільності використання поліорганосилоксанів у якості модифікаторів поверхні сапонітових глин з метою збільшення їх сорбційної здатності.

Об'єктом дослідження є глинистий мінерал сапоніт Ташківського родовища Хмельницької області.

Предметом дослідження є процес адсорбції вуглеводнів на природному глинистому мінералі до та після його модифікації поліорганосилоксанами.

Матеріали та методи

Зразки сапонітової глини Ташківського родовища, які використано в роботі, отримані методом усереднення проб, взятих безпосередньо у кар'єрі, розмелені до дрібнодисперсного порошку та відфракціоновані ситовим методом до фракції ≤ 1 мм. У якості модифікаторів використано водорозчинні емульсії поліорганосилоксанів [13-16]: полісилоксан (ПС), полідиметилсилоксан (ПДМС).

Результати експерименту

З метою вивчення доцільності багаторазового використання органомінеральних сорбційних матеріалів на основі сапоніту, досліджували зміни їх сорбційних властивостей з кожним наступним циклом використання [9-11], для проби бензину, очищеного природним сапонітом, обробленим ПС, що за результатами хроматографічних досліджень показав найбільше підвищення октанового числа. У табл. 1 наведений детальний вуглеводневий аналіз проби очищеного бензину А-92.

Таблиця 1

Детальний вуглеводневий аналіз очищеного бензину А-92

Етап очистки	Ваговий вміст (у %) вуглеводнів					Октанове число		Тиск насиченої пари, кПа
	Парафіни	Ізопарафіни	Ароматика	Нафтени	Олефіни	Дослідницький метод	Моторний метод	
Контрольна проба	10,675	32,185	30,802	12,718	9,547	91,476	81,810	40,578
Етап 1	13,299	33,301	36,038	7,823	4,762	99,487	79,363	42,447
Етап 2	9,875	30,571	27,753	4,954	15,186	93,025	80,470	35,308
Етап 3	8,692	24,994	35,207	10,760	4,391	94,693	81,074	28,803
Етап 4	9,836	28,383	30,745	12,547	6,658	95,106	80,723	37,537
Етап 5	10,996	28,045	33,085	12,882	5,711	93,969	80,419	40,090

Згідно з даними таблиці, після очищення бензину А-92 сапонітом, модифікованим ПС, відбулися наступні зміни: ваговий вміст парафінів та ізопарафінів після першого етапу очистки збільшився на 2,5 % та 1 %, відповідно, порівняно з контрольною пробую, а після другого етапу – зменшився. Вміст ароматики зріс після очистки, окрім другого етапу, що можна вважати за похибку. Вміст нафтенів та олефінів після очистки, навпаки, зменшився порівняно з контрольною пробую.

Очистка привела також до зміни октанового числа, що показано на рис. 1. За дослідницьким методом воно зросло від 2 до 8 одиниць. Тиск насиченої пари збільшився тільки при першому етапі очистки, після наступних етапів – зменшився незначно.

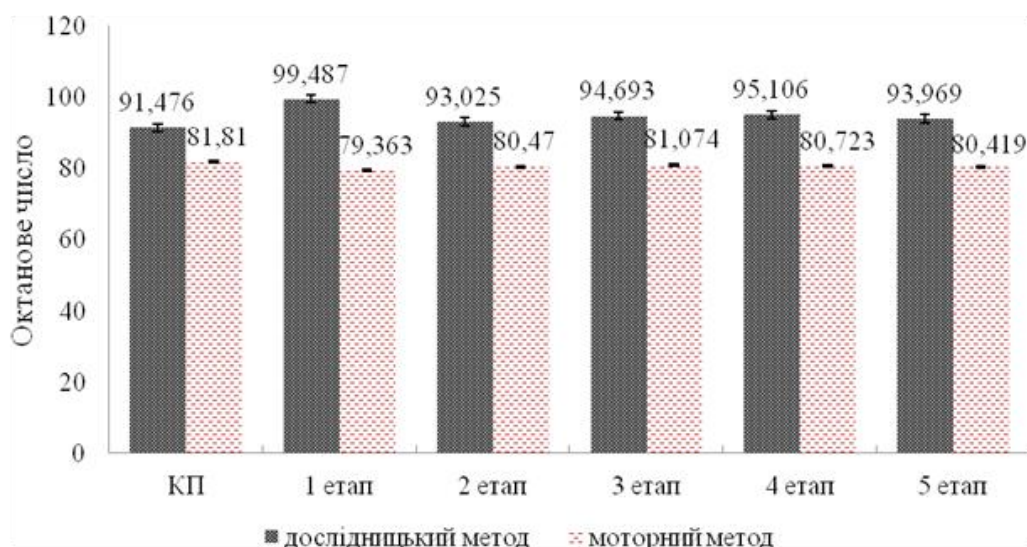


Рис. 1. Показники октанових чисел за дослідницьким та моторним методами бензину А-92, очищеного природним сапонітом, обробленим ПС

Для визначення ефективності використання отриманих сорбційних матеріалів для очистки бензину А-92, порівняно з іншими промисловими зразками, було взято автомобільний паливний фільтр з гофрованого паперу, марки LSA automotive (Польща). Очищену пробу бензину хроматографували і за допомогою програми "GAZOLIN" обробляли результати. Ваговий вміст (у %) вуглеводнів представлений на рис.2, а показники октанових чисел за дослідницьким та моторним методами, порівняно з контрольною пробую – на рис. 3.

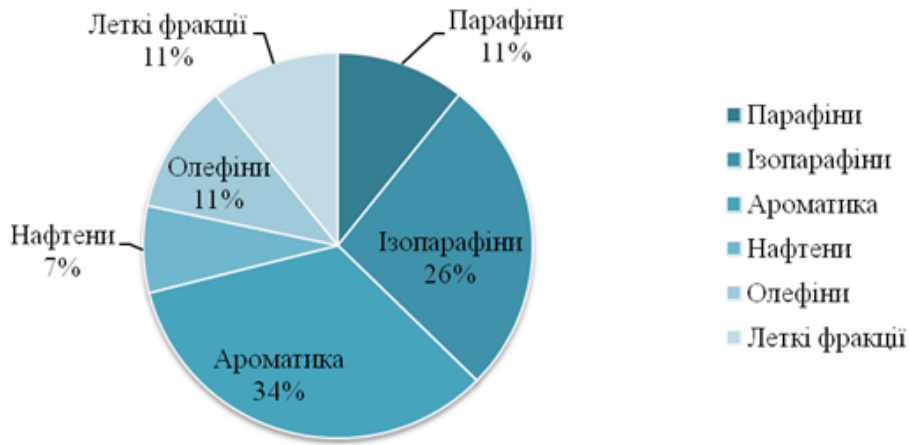


Рис.2. Ваговий вміст (у %) вуглеводнів у пробі бензину, очищеного за допомогою автомобільного фільтра з гофрованого паперу

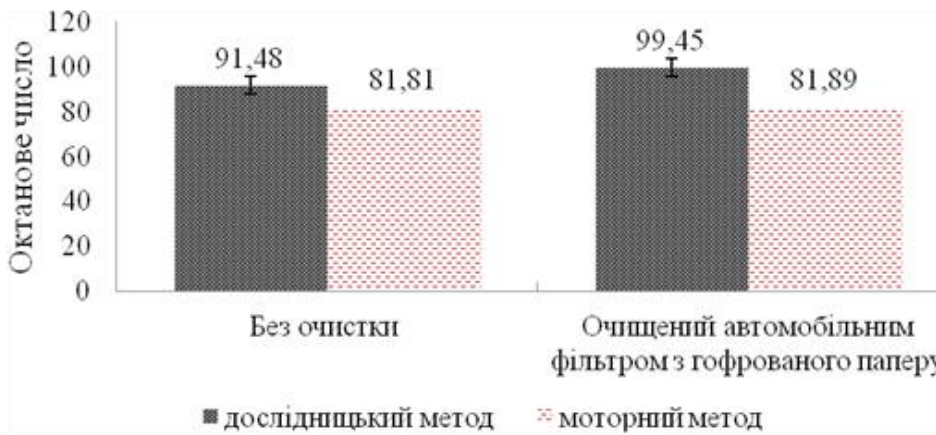


Рис.3. Показники октанових чисел за дослідницьким та моторним методами бензину А-92, очищеного за допомогою автомобільного фільтра з гофрованого паперу

Ефективність використання паливного фільтра на основі гофрованого паперу показала підвищення октанового числа на 8 одиниць, тоді як ефект зростання для зразків бензину, очищених отриманими сорбційними матеріалами на основі сапоніту становив від 8 до 11 одиниць, що підтверджує доцільність їх використання.

Бензини за своїми фізико-хімічними показниками мають відповідати вимогам та нормам ДСТУ 4063-2001. Тому для досліджуваних автомобільних бензинів проведено фракціонування при температурах $t^{\circ} < 70$, $70 < t^{\circ} < 100$, $100 < t^{\circ} < 150$. Показники октанового числа та вмісту ароматичних фракцій бензину марки А-92 неочищеного, як контрольна проба, та очищеного ПС після відгонки при різних температурах представлено в табл. 2 та на рис. 4 та 5

Таблиця 2

Показники октанового числа та вмісту ароматичних фракцій бензину марки А-92 неочищеного та очищеного сапонітом, обробленим ПС, після відгонки при різних температурах

Зразок природного мінерального сорбенту	Октанове число за дослідницьким методом	Октанове число за моторним методом	Вміст ароматичних фракцій, %
Неочищений, фракція бензину при $t^{\circ} < 70$	97,94	84,66	1,75

Неочищений, фракція бензину при $70 < t^{\circ} < 100$	93,07	77,65	5,68
Неочищений, фракція бензину при $100 < t^{\circ} < 150$	57,49	60,27	10,15
Середнє ОЧ для неочищеного	82,83	74,19	–
Очищений ПС, фракція бензину при $t^{\circ} < 70$	90,89	80,36	9,62
Очищений ПС, фракція бензину при $70 < t^{\circ} < 100$	88,17	76,42	26,98
Очищений ПС, фракція бензину при $100 < t^{\circ} < 150$	103,39	79,18	53,16
Середнє ОЧ для очищеного ПС	94,15	78,65	–

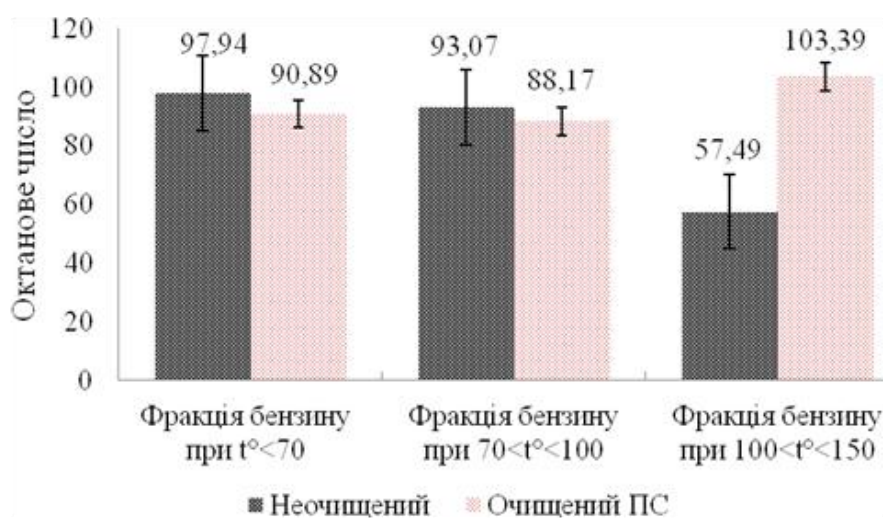


Рис. 4. Показники октанових чисел за дослідницьким методом бензину А-92, неочищеного та очищеного сапонітом, обробленим ПС, після відгонки при різних температурах

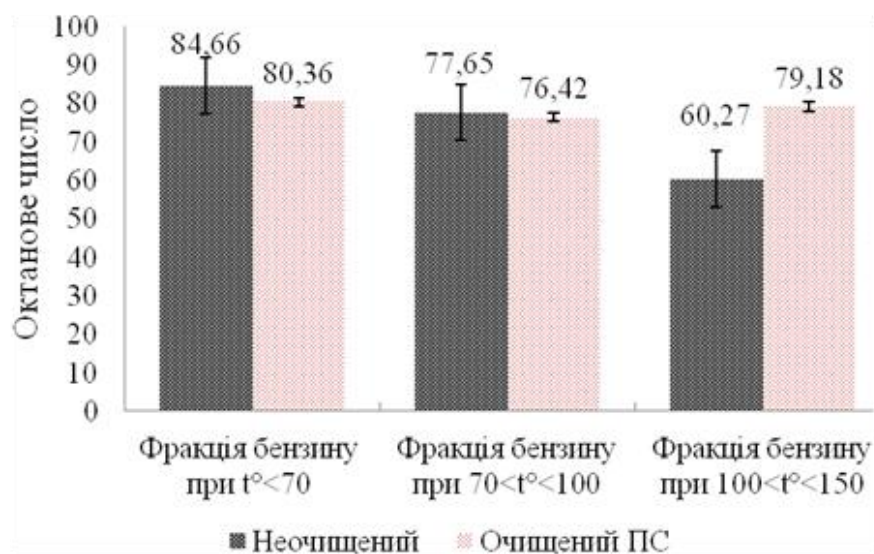


Рис. 5. Показники октанових чисел за моторним методом бензину А-92, неочищеного та очищеного сапонітом, обробленим ПС, після відгонки при різних температурах

Найвища ефективність органомінерального сорбційного матеріалу на основі сапоніту, проявляється для фракції з температурою відгонки при $100 < t^{\circ} < 150$, октанове число підвищується майже в два рази за дослідницьким методом. Середнє значення октанового числа, порівняно з контрольною пробою, вище на 12 одиниць.

На рис. 6-11 наведено детальний вуглеводневий склад зразків бензинів.

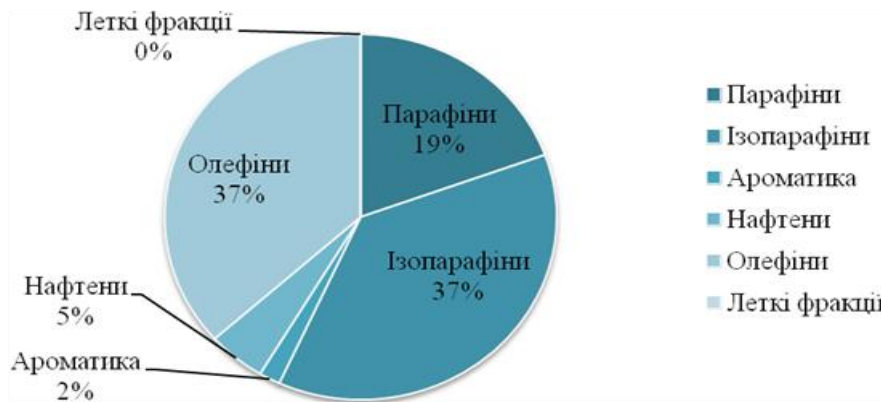


Рис. 6. Ваговий вміст (у %) вуглеводнів у пробі бензину, неочищеного (фракція бензину при $t^{\circ} < 70$)

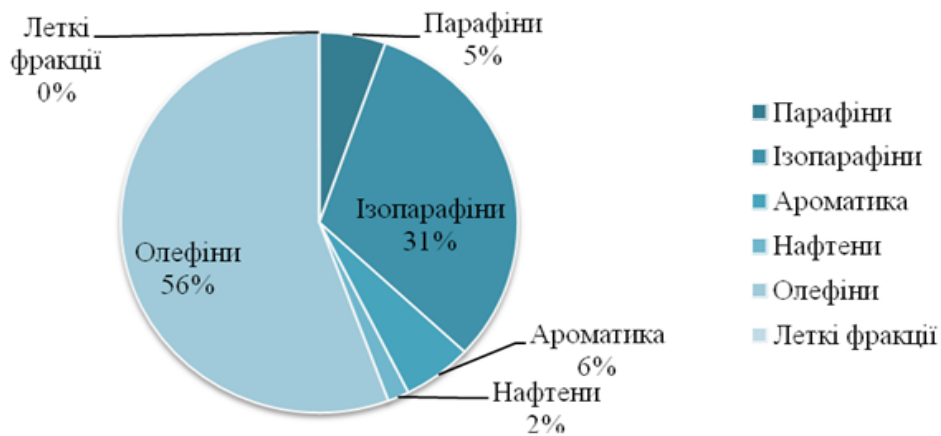


Рис. 7. Ваговий вміст (у %) вуглеводнів у пробі бензину, неочищеного (фракція бензину при $70 < t^{\circ} < 100$)



Рис. 8. Ваговий вміст (у %) вуглеводнів у пробі бензину, неочищеного (фракція бензину при $100 < t^{\circ} < 150$)

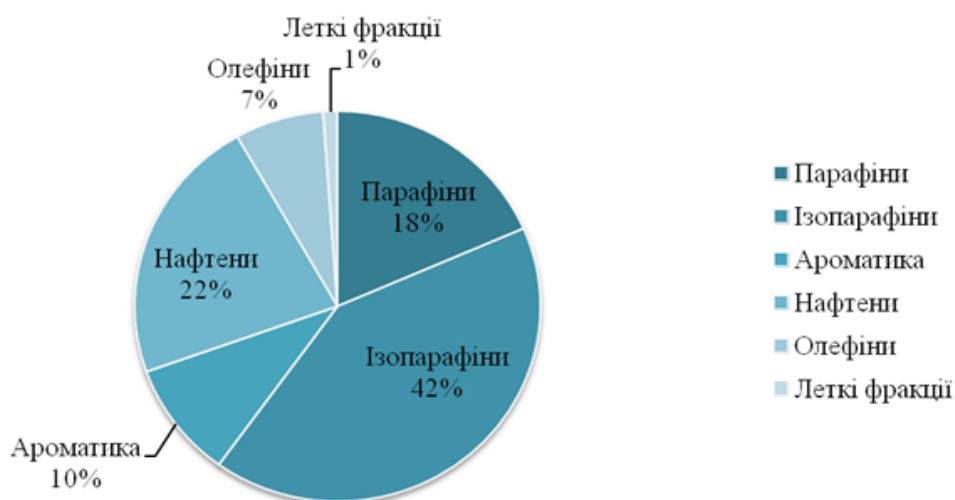


Рис. 9. Ваговий вміст (у %) вуглеводнів у пробі бензину, очищеного сапонітом, обробленим ПДМС (фракція бензину при $t^{\circ} < 70$)



Рис.10. Ваговий вміст (у %) вуглеводнів у пробі бензину, очищеного сапонітом, обробленим ПДМС (фракція бензину при $70 < t^{\circ} < 100$)

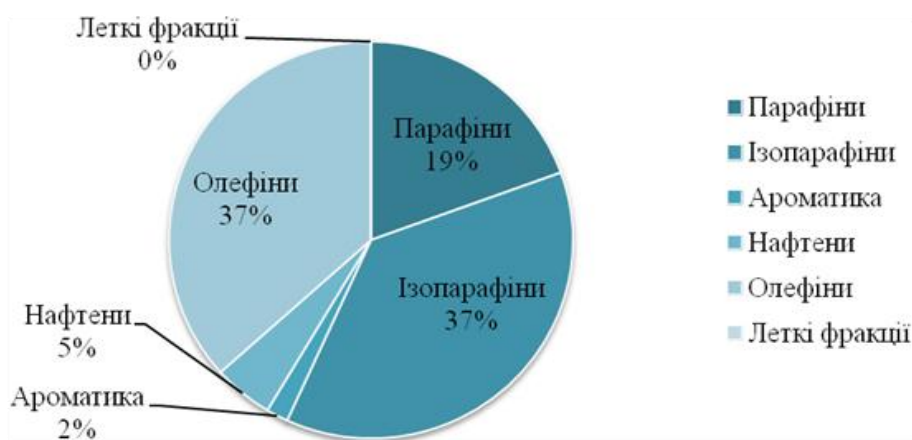


Рис. 11. Ваговий вміст (у %) вуглеводнів у пробі бензину, очищеного сапонітом, обробленим ПДМС (фракція бензину при $100 < t^{\circ} < 150$)

Згідно з отриманими результатами вагового вмісту вуглеводнів у пробі бензину, очищеного модифікованим сапонітом, збільшується кількість парафінів, ізопарафінів та ароматики. При чому найбільше зростання спостерігається для фракції бензину при температурі відгону $70 < t^{\circ} < 100$ та $100 < t^{\circ} < 150$. Кількість ароматичних вуглеводнів для цієї фракції збільшується майже в 5 разів, що відповідає температурі їх кипіння (80-145 °С), тоді як кількість олефінів для всіх фракцій суттєво зменшується.

Важливими показниками є середнє значення молекулярної маси та відносної густини досліджуваних нафтопродуктів (табл.3).

Таблиця 3

Середні показники молекулярної маси та відносної густини бензину марки А-92 неочищеного та очищеного ПС після відгонки при різних температурах

Зразок природного мінерального сорбенту	Молекулярна маса, г/моль	Відносна густина
Неочищений, фракція бензину при $t^{\circ} < 70$	79,309	0,650
Неочищений, фракція бензину при $70 < t^{\circ} < 100$	89,059	0,692
Неочищений, фракція бензину при $100 < t^{\circ} < 150$	111,187	0,745
Очищений ПС, фракція бензину при $t^{\circ} < 70$	84,211	0,694
Очищений ПС, фракція бензину при $70 < t^{\circ} < 100$	94,878	0,735
Очищений ПС, фракція бензину при $100 < t^{\circ} < 150$	113,681	0,828

Якість моторних палив безпосередньо впливає на продуктивність двигуна, термін його служби, а також на вихлопи газу, що, відповідно, впливає на якість повітря. Забезпечення екологічної безпеки при виробництві та застосуванні палива потребує вилучення з нього сполук важких металів та сірки.

Специфікація палива стає ще більш важливою з підвищенням контролю викидів та встановленням контролюючого обладнання на транспортних засобах. У світовому масштабі на автомобільний транспорт припадає близько 16 % антропогенних викидів CO₂.

За допомогою сорбційних властивостей модифікованих сапонітів можна зменшити токсичність викидів автомобілів. Очистку палива проводили природним сапонітом, модифікованим ПС, у співвідношенні: 20 г органоглини на 1 л палива. Перемішування проводили за допомогою ультразвуку протягом 5 хв та центрифугували. Дослідження вихлопів CO, CO₂ та вуглеводнів проводили на газоаналізаторі "Інфракар" в двох режимах - холостому та активному (швидкість розгону -90 км/год). Результати досліджень наведені у табл. 4.

Таблиця 4

Показники вихлопів від автомобільного палива при різних режимах роботи двигуна

Зразок нафтопродукту	Режим холостий			Режим активний		
	Вміст CO, %	Вміст CO ₂ , %	Вміст вуглеводнів, ppm	Вміст CO, %	Вміст CO ₂ , %	Вміст вуглеводнів, ppm
Бензин неочищений, марки А-92	4,89	11,19	0,584	2,25	12,97	0,333
Бензин очищений органоглиною	0,17	8,67	0,474	1,40	11,44	0,289

Висновки

Отже, за даними досліджень, після очистки палива природним сапонітом, модифікованим ПС, вміст CO (%) зменшується при холостому режимі для очищеного бензину марки А-92 від 4,89 до 0,17, вміст CO₂ – від 11,19 до 8,67, а вміст вуглеводнів (ppm) – від 0,584 до 0,474. В активному режимі двигуна вміст CO змінюється в межах від 2,25 до 1,40, CO₂ – від 2,25 до 1,40, а вуглеводнів – в межах 0,333-0,289. Отримані результати дають підставу стверджувати, що органомодифіковані сапоніти можуть бути використані при одержанні моторних палив високої якості і з пониженою токсичністю, що дозволить покращити екологічну безпеку. За результатами хроматографічних досліджень встановлено, що очистка бензину сорбційними матеріалами на основі сапоніту

приводить до зростання октанового числа на 8–11 одиниць, без суттєвого впливу на основні експлуатаційні характеристики палива, порівняно з контрольною пробєю. Найвища ефективність органомінерального сорбційного матеріалу на основі сапоніту проявляється для фракції з температурою відгонки при $100 < t < 150$, октанове число підвищується майже в два рази за дослідницьким методом. Виявлено, що завдяки очистці вуглеводневих сумішей, отриманих сорбційними матеріалами, можна зменшити токсичні викиди S та CO₂. Таким чином, отримання моторних палив високої якості і з пониженою токсичністю полягає у видаленні саме низькооктанових парафінових вуглеводнів.

1. Vasylechko V. O. Adsorption of cadmium on acid-modified Transcarpathian clinoptilolite / V. O. Vasylechko, G. Gryshchouk, Y. B. Kuz'ma et al. // *Microporous and mesoporous Materials*. – 2003. – № 60 (1). – P. 183–196.
2. Ергожин Е. Е. Органомінеральні сорбенти і поліфункціональні системи на основі природного алюмосилікатного і угольно-мінерального сиров'язь / Е. Е. Ергожин, А. М. Акимбаєва. – Алматы : ТОО "Print-S", 2007. – 375 с.
3. Ганзюк А. Я. Застосування мінеральних адсорбентів у процесах очищення, розділення та кондиціонування газових і рідких середовищ / А. Я. Ганзюк, С. А. Карван, Г. М. Дейчук (Сокол) // Вісник Хмельницького національного університету. Технічна наука. – Хмельницький, 2016. – № 2. – С. 266–269.
4. Ganziuk A. The current problem of cleaning, conditioning and division adsorption processes in gas and liquid states / A. Ganziuk, G. Deichuk (Sokol) // *Ecological innovation : monograph ed. by Olga Paraska, Norbert Radek, Mirosław Bonek*. – Pinczow, Poland, 2015. – P. 224–233.
5. Sokol G. M. Research of the adsorptivity of sorbents on the basis of natural mineral saponite / G. M. Sokol, S. A. Karvan, A. Y. Ganzyuk // *Abstracts: International Conference "Modern Problems of Surface Chemistry"* Chuiko Institute of Surface Chemistry, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv. – 20–21 May, 2014. – P. 179.
6. Kemp S. Back-reacted saponite in Jurassic mudstones and limestones intruded by a Tertiary sill, Isle of Skye / S. Kemp, C. Rochelle, R. Merriman // *Clay Minerals*, 2005. – № 40(3). – P. 263–282.
7. Deichuk (Sokol) G. M. Characterization and adsorptive properties of saponite clay / G. M. Deichuk (Sokol), M. Sprynskyy, A. Y. Ganziuk, B. Buszewski // *Fifteenth Polish – Ukrainian Symposium: Theoretical and experimental studies of interfacial phenomena and their technological applications*, Lviv, Ukraine, 12–15 September. – 2016. – P. 150.
8. Deichuk (Sokol) G. M. Preparation of silver/saponite nanocomposites / G. M. Deichuk (Sokol), M. Sprynskyy, A. Y. Ganzyuk, B. Buszewski // *The 10th International Congress of Societas Humboldtiana Polonorum on Longevity – a blessing or a curse: Medical, technological, cultural, socio-economic and legal aspects*, Lodz, Poland 30 Jun–2 July, 2016. – P. 41.
9. Spivak V. Ecological sorbent which is mainly consists of saponite mineral from Ukrainian clay-field / V. Spivak, I. Astrelin, N. Tolstopalova, I. Atamaniuk // *Chemistry & Chemical Technology*. – 2012. – № 6 (4). – P. 451–457.
10. Пат. 110845 Україна, МПК (2016.01), B01J 20/30. Спосіб отримання гідрофобного органомінерального адсорбенту на основі сапонітової глини / Г. М. Дейчук (Сокол), А. Я. Ганзюк, С. А. Карван, Х. А. Ганзюк; заявник і патенто власник Хмельницький національний університет. – № u201603500; заявл. 04.04.2016; опубл. 25.10.2016, Бюл. № 20–4 с.
11. Фоменко О. Е. Модифицирование силикатных поверхностей путем силилирования их кремнийорганическими соединениями / О. Е. Фоменко, Ф. Рёсснер // *Сорбционные и хроматографические процессы*. – 2009. – № 9 (5). – С. 633–642.
12. Deichuk (Sokol) G. Organic-mineral sorption materials on the basis of saponite clay / G. Deichuk (Sokol), A. Ganzyuk, Ch. Ganzyuk // *Abstracts: Workshop with Nobel Prize Winner Professor Erwin Neher. Progress in biomedicine and neuromedicine*. Poland, Cracow, 21–23 June. – 2015. – P. 115–116.
13. Пат. 2055637 Российская Федерация, МПК В 01 J 20/16, С 02 F 1/28. Спосіб получения гидрофобного адсорбента для извлечения нефтепродуктов из водных сред / Ю. И. Тарасевич, С. В. Бондаренко, А. В. Назаренко, Л. К. Патюк, К. А. Забела; заявитель и патентообладатель Институт коллоидной химии и химии воды им. А. В. Думанского АН Украины. – № 4919467/26; заявл. 18.03.91; опубл. 10.03.96.
14. Пат. № 2247935 Российская Федерация, МПК С 02 F 1/28, В 01 J 20/30. Спосіб получения гидрофобного адсорбента для очистки природных и сточных вод от нефтепродуктов / Л. А. Николаева, М. А. Голубчиков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет». – № 2010144232/05; заявл. 28.10.2010; опубл. 20.04.12.
15. Пат. 2055637 Российская Федерация, МПК В 01 J 20/16, С 02 F 1/28. Спосіб получения гидрофобного адсорбента для извлечения нефтепродуктов из водных сред / Ю. И. Тарасевич, С. В. Бондаренко, А. В. Назаренко, Л. К. Патюк, К. А. Забела; заявитель и патентообладатель Институт коллоидной химии и химии воды им. А. В. Думанского АН Украины. – № 4919467/26; заявл. 18.03.91; опубл. 10.03.96.
16. Пат. № 2247935 Российская Федерация, МПК С 02 F 1/28, В 01 J 20/30. Спосіб получения гидрофобного адсорбента для очистки природных и сточных вод от нефтепродуктов / Л. А. Николаева, М. А. Голубчиков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет». – № 2010144232/05; заявл. 28.10.2010; опубл. 20.04.12.

Стаття надійшла до редакції 11.03.2019

УДК 628.316.12

М.В. Дегтяр, О.П. Галкіна**Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова**
ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ СТАНУ ДОВКІЛЛЯ ОБ'ЄКТІВ СКЛАДУВАННЯ
ВІДХОДІВ

Проведений аналіз екологічних проблем, що виникають при експлуатації полігонів, представлені результати спостережень за динамікою стану підземних та поверхневих вод, ґрунтів. На контрольних об'єктах встановлено накопичення шкідливих речовин, притаманних фільтраційним водам полігонів твердих побутових відходів. Запропоновано низку заходів для мінімізації впливу об'єктів розміщення відходів на довкілля.

Ключові слова: моніторинг, довкілля, фільтрат, полігон, забруднення.

М.В. Дегтярь, Е.П. Галкина**ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**
ОБЪЕКТОВ ЗАХОРОНЕНИЯ ОТХОДОВ

Проведен анализ экологических проблем, возникающих при эксплуатации полигонов, представлены результаты наблюдений за динамикой состояния подземных и поверхностных вод, почв. На контрольных объектах установлено накопление вредных веществ, присущих фильтрационным водам полигонов твердых бытовых отходов. Предложен ряд мероприятий по минимизации влияния объектов размещения отходов на окружающую среду.

Ключевые слова: мониторинг, окружающая среда, фильтрат, полигон, загрязнения.

M. Degtyar, O. Galkina**ECOLOGICAL MONITORING OF THE ENVIRONMENTAL STATE OF WASTE CONCRETE**
OBJECTS

An analysis of ecological problems that arise during landfill operation, the results of observations on the dynamics of the state of underground and surface waters and soils has been presented. At the control sites, the accumulation of harmful substances inherent in the filtration water of the landfills of solid household waste is established. A number of measures have been proposed to minimize the impact of waste disposal facilities on the environment.

Keywords: monitoring, environment, leachate, landfill, pollution.

Постановка проблеми.

Полігони захоронення твердих побутових відходів (ТПВ) є суттєвим негативним чинником впливу на основні компоненти довкілля. Такі об'єкти захоронення відходів є одночасно причиною відчуження земель і суттєвим джерелом потрапляння забруднюючих речовин в усі геосферні оболонки: літосферу, біосферу, гідросферу і атмосферу.

При біодеградації відходів у тілі полігона протікають складні хімічні та біохімічні процеси, у тому числі з утворенням нових токсичних речовин, що мають високий клас небезпеки.

Основною метою моніторингу таких систем (умовно «полігон-довкілля») є виявлення динаміки якісної і кількісної зміни стану контрольних об'єктів. Основна увага буде приділена впливу на об'єкти гідросфери. Проблема забруднення об'єктів гідросфери, повинна вирішуватися головним чином на стадії проекту та будівництва полігона, зокрема завдяки організації гідроізолюючого шару (геомембрани) та влаштування дренажної системи для відведення фільтрату.

У процесі експлуатації полігону (стадія активного ацетогенезу та метаногенезу) можливий лише збір та очищення фільтрату з метою недопущення ускладнення екологічної ситуації.

На даний момент на деяких великих полігонах очищення стоків відбувається на локальних очисних спорудах. На невеликих і несанкціонованих полігонах (смітниках) очищення поверхневих стоків і фільтрату не проводиться.

Моніторинг територій складування відходів повинен включати контроль за станом підземних і поверхневих вод, атмосферного повітря, ґрунтів, шумового забруднення в радіусі впливу полігона ТПВ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

За останніми даними кількість накопичених відходів в Україні оцінюється, за різними даними (офіційна та неофіційна статистика), до 30 млрд. тонн, які займають більше 10 % усієї території країни [1, 2].

Згідно даних Міністерства регіонального розвитку будівництва та житлово-комунального господарства, за 2016 рік в Україні (не враховуючи Автономну республіку Крим, дані відсутні) — **утворилося близько 49 мільйонів кубометрів побутових відходів.**

Основним способом утилізації сміття в Україні залишається захоронення, більше 90% відходів потрапляють на полігони ТПВ.

Відповідно до норм Директиви ЄС 1999/31/ЄС [3] придатні для повторного використання відходи повинні відправлятися на відповідні підприємства, безпечні відвозитися на полігони ТПВ, а небезпечні повинні знешкоджуватися. Відходи, що здатні до біологічної деградації не мають потрапляти на полігон.

З 1 січня 2018 року, згідно статті 32 Закону України "Про відходи", Україна зобов'язалася сортувати все сміття за видами матеріалів, а також сортувати його на придатне для повторного використання, небезпечне та для захоронення. Цей пункт відповідає вище названій Директиві, та Директиві ЄС 2008/98, які регулюють поводження зі сміттям у країнах Європи, мають на меті скорочення кількості відходів, що потрапляють на полігони, регламентують порядок дій при поводженні з відходами.

Поступовий перехід від полігонного поховання до сортування та промислової переробки є основною тенденцією у розв'язанні проблеми відходів у світовій практиці [4]. Досвід показує, що із часом склад твердих побутових відходів трохи змінюється, збільшується вміст пакувальних матеріалів, зокрема паперу і пластику. З 1995 року практично призупинився ріст норм накопичення відходів, кардинально змінився склад харчових відходів, що пов'язане зі зміною якості та асортименту продуктів харчування. [5].

Отже для мінімізації шкідливого впливу полігонів та їх похідних на довкілля потрібно позбутися джерела впливу чи мінімізувати його вплив, за рахунок кардинального зменшення обсягів відходів, що потрапляють на полігон для захоронення.

Постановка завдань.

Отже метою роботи є комплексна оцінка негативного впливу на довкілля, аналіз можливих заходів з мінімізації негативного впливу.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

- Попереднє обстеження майданчика полігона та прилеглих територій для встановлення контрольних об'єктів (поверхневі та підземні водні джерела, ґрунт, повітря) і їхніх основних показників (фонова концентрація);
- Прогнозування динаміки стану контрольних об'єктів в період ацетогенезу та метаногенезу;
- Розробка заходів (зокрема за рахунок нормативної бази) з недопущення якісного погіршення контролюємих об'єктів.

Викладення основного матеріалу.

При розкладанні відходів у тілі полігона протікають складні біохімічні процеси, в результаті яких утворюються нові, іноді більш токсичні речовини. Тому основним фактором негативного впливу полігона твердих побутових відходів на навколишнє середовище є вплив фільтраційних вод, що утворюються в результаті деструкції відходів. Фільтрат мігрує з тіла полігона, забруднюючи ґрунти, поверхневі та підземні води. При неналежному моніторингу, чи його відсутності негативний вплив на контрольні об'єкти може прийняти незворотній характер, саме тому організація моніторингу є обов'язковою. Моніторинг територій складування відходів повинен включати контроль над станом підземних і поверхневих вод, атмосферного повітря, ґрунтів, шумового забруднення в радіусі впливу полігона ТПВ.

Основним фактором негативного впливу полігона твердих побутових відходів на навколишнє середовище є вплив фільтраційних вод, що утворюються в результаті розкладання відходів.

На більшості полігонів і смітників України фільтрат, що витікає з тіла полігона, не очищається та може потрапляти в найближчі водотоки, а скидання фільтрату у водойми загального користування неприпустимо. На деяких полігонах фільтрат збирають у спеціально створені ставки-накопичувачі, в поодиноких випадках фільтрат очищається на локальних установках.

Середній річний обсяг фільтрату, що утворюється, становить 2-3 тис. м³/га. Склад фільтрату залежить від терміну експлуатації полігона, типу відходів, обсягу потрапляння поверхневих і ґрунтових вод.

Співвідношення компонентів відходів, їх кількісний і фракційний склад залежать від ступеня благоустрою житлового фонду, кліматичних і географічних особливостей, чисельності

населення, соціального та економічного рівня життя, наявності або відсутності технології сортування та обробки відходів і їх місце в технологічному ланцюжку відходопродукції.

Для мінімізації наслідків шкідливого впливу забруднених територій проводяться різні заходи: рекультивация, санація, меліорація. Напрямок рекультивации визначає подальше цільове використання територій.

Основним призначенням рекультивации є нейтралізація впливу фільтрату та продуктів розкладання ТПВ, ступінь впливу яких частково залежить від коефіцієнта фільтрації ґрунтів підвалін полігону, а також наявність протифільтраційного екрана на дні котловану.

В ході досліджень проводився контроль динаміки складу фільтрату, зокрема вплив на якісні показники фази експлуатації полігону. Оцінювався характер та ступінь можливого забруднення довкілля. Для оцінки антропогенного впливу були досліджені прилеглі території, зокрема відібрані проби ґрунту, води. Для порівняння ступеня негативного впливу контролювалися об'єкти навколишнього середовища за межами впливу полігону. Об'єктом дослідження було обрано полігони в м. Харків та м. Одеса. Слід зазначити, що за результатами аналізу вміст шкідливих речовин в контрольних об'єктах за межами впливу полігону знаходиться в межах норми.

Основними забруднюючими речовинами, що мігрують із фільтратом з тіла полігону ТПВ, за даними багаторічного моніторингу є марганець, хром свинець, мідь, сульфати нітрати. Причому концентрація цих речовин та їх наявність змінюється в залежності від «віку» фільтрату. Так для «молодого» фільтрату характерний більш агресивний склад, з високими показниками БПК та ХПК, для «старого» фільтрату, що утворюється на стадії стабільного метаногенезу ці показники можуть бути нижчими в десятки та сотні разів.

На даний момент в Україні нараховується більше 6000 сміттєзвалищ, та більше 32000 несанкціонованих звалищ [6]. Для оцінки масштабів проблеми достатньо поглянути на онлайн-мапу сміттєзвалищ, яку в 2018 році запустило Мінприроди. (рис.1)

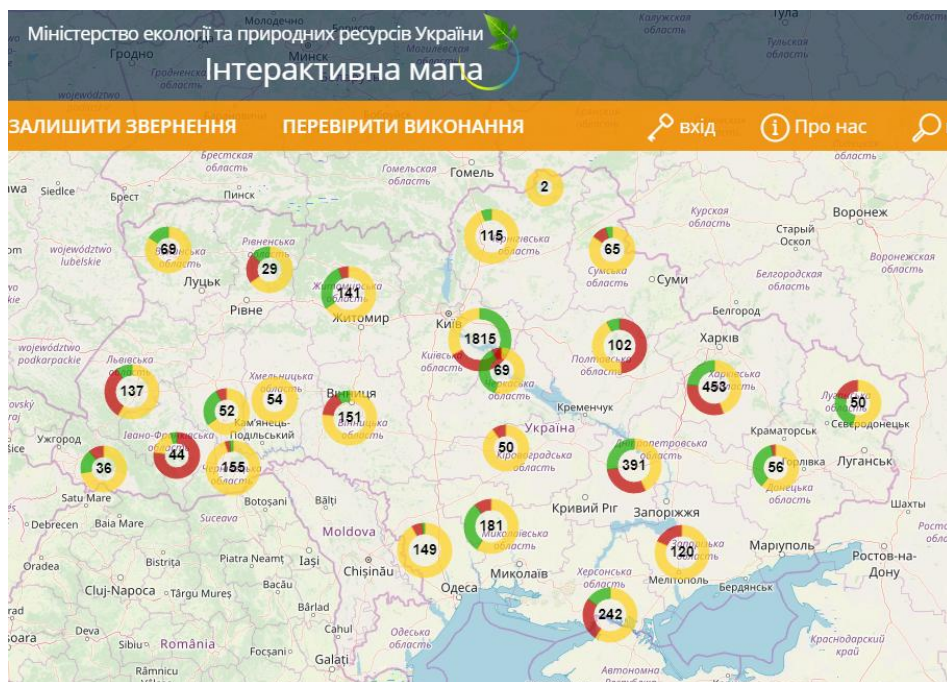


Рис. 1. Онлайн - мапа сміттєзвалищ України

За даними Мінрегіону, найбільше потребують нових полігонів для захоронення твердих побутових відходів Дніпровська, Запорізька і Київська області. Найбільше проблемних полігонів, що потребують рекультивации, у Закарпатській області.

Аналізуючи данні мапи можна зробити висновок, що саме столиця займає топове місце по кількості несанкціонованих звалищ, а значить і найбільш вразлива з екологічної точки зору.

Міста Одеса та Харків, які фігурують в даній роботі в якості об'єктів дослідження займають також одні з перших місць по рівню вразливості за рахунок великої кількості несанкціонованих сміттєзвалищ. (рис.2).

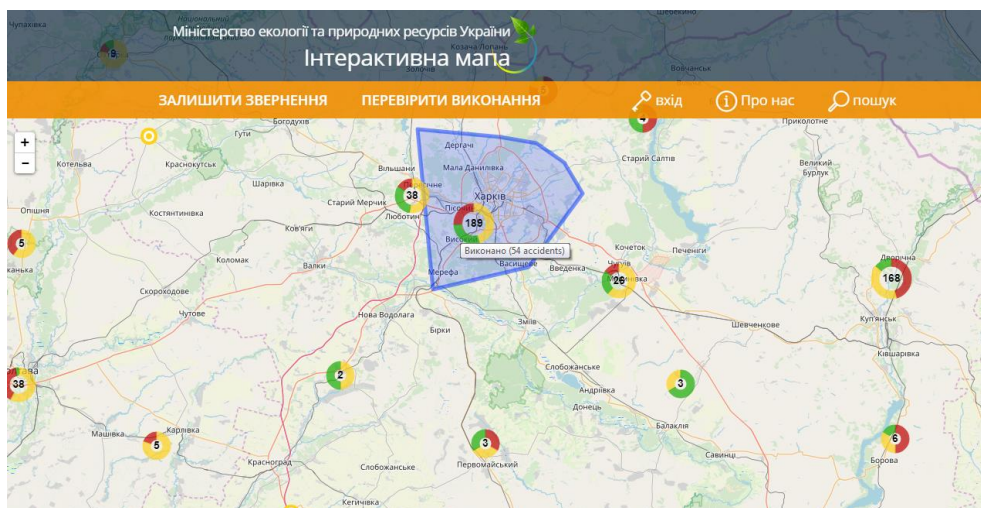


Рис. 2. Онлайн - мапа сміттєзвалищ Харківської області

При дослідженні ґрунтів на полігоні ТПВ м. Запоріжжя, у межах санітарно-захисної зони, були отримані наступні дані: вміст цинку, хрому, міді й нікелю, не перевищує припустимих значень, вміст кадмію перевищує норму в 1,5 рази, свинцю 4-6 раз, нафтопродуктів більш ніж в 10 раз. Аналіз проведених досліджень показує перевищення великої кількості контрольованих показників протягом терміну спостереження зі збільшенням концентрацій, що пояснюється активізацією хімічних процесів у тілі полігона, зокрема в стадії активного метаногенезу.

Гідрохімічні дослідження проводилися з контрольних колодязів або свердловин, закладених вище та нижче полігона по потоку ґрунтових вод.

Завдяки своїй полікомпонентності відходи розкладаються нерівномірно в часі, тому фільтрат накопичується лінзоподібно. Виявлення місць локалізації фільтрату необхідно для фіксування траєкторії фільтрату в геологічне середовище, розробки та впровадження природоохоронних заходів.

Для захисту поверхневих і ґрунтових вод від потрапляння фільтрату при будівництві нових полігонів повинні бути передбачені наступні заходи:

- створення багат шарового екрана по дну та укосам котловану під час будівництва, у якому розміщується полігон ТПВ;
- відкачка фільтрату з тіла полігона з наступним транспортуванням на очисні споруди.

Згідно ДБН В.2.4- 2 - 2005 [7] ґрунтові води на ділянці розміщення полігонів ТПВ повинні перебувати на глибині не менше 2 м від його фундаменту.

При проведенні досліджень на полігоні в м/ Запоріжжя (протягом 3- х кварталів) була отримана наступна динаміка зміни концентрацій в ґрунтових водах ряді контрольних свердловин, зокрема за завислими речовинами, азоту, показником БПК₅, (рис. 3).

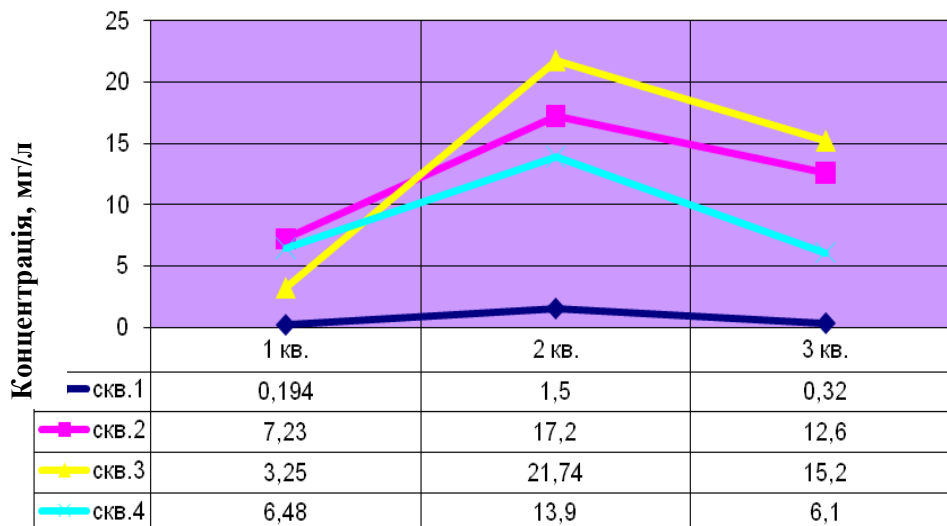


Рис. 3. Концентрація амонійного азоту в ґрунтових водах

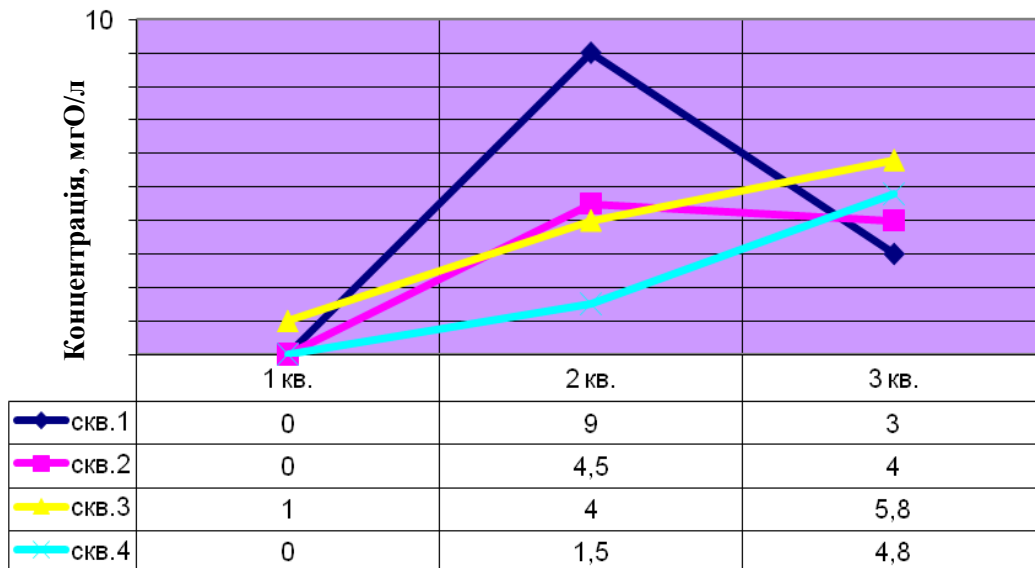


Рис. 4. Динаміка зміни показника БПК₅ в ґрунтових водах.

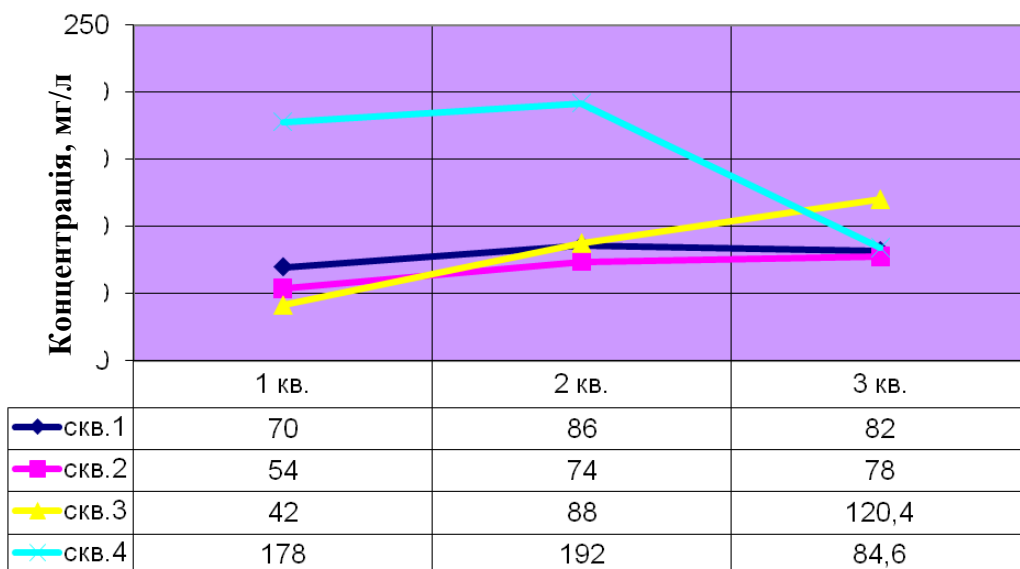


Рис. 5. Зміна концентрації по завислим речовинам в ґрунтових водах

Таким чином, моніторинг території полігону та частково прилеглих територій дозволив отримати уяву про ступінь його впливу на навколишнє середовище. Дані моніторингу показали високий ступінь забруднення територій за контролюємими показниками, що має агресивно-негативний вплив на водні ресурси, атмосферу та літосфери, і обмежує можливість наступного пострекультиваційного використання полігону.

Висновки.

У 2017-2018 роках в Україні спостерігається тенденція на збільшення обсягів відходів, що потрапляють на сміттєзвалища. На даний момент існує незацікавленість населення та виробників у скороченні обсягів відходів. Тому основним завданням для мінімізації негативного впливу полігонів на навколишнє середовище є кардинальне скорочення обсягів неперероблених відходів, що потрапляють на полігони, в першу чергу завдяки сортуванню та переробці відходів.

В період проектування та будівництва полігону обов'язковою умовою є створення багат шарового екрана по дну та укосам котловану, з матеріалу з дуже низьким коефіцієнтом фільтрації (геомембрана), та створення дренажної системи для відведення фільтрату, з обов'язковим очищенням на локальних очисних спорудах, які повинні бути розташовані на території полігону.

Список використаних джерел:

1. Ресурсосберегающие технологии очистки сточных вод: монография / С. С. Душкин, А. Н. Коваленко, М. В. Дегтярь, Т. А. Шевченко; Харьк. нац. акад. городского хоз-ва – Х. : ХНАГХ. – 2011. – 168 с.
2. <https://biggggidea.com/practices/prosmittya-pobutovi-vidhodi-vikliki-dlya-ukrani-ta-svitu/>
3. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_925
4. Гриценко А.В. Технологические основы промышленной переработки отходов мегаполиса / Гриценко А.В., Горох Н.П и др. – Х.: ХНАДУ, –2005.- 340с.
5. Національна стратегія поводження з твердими побутовими відходами в Україні / Звіт про існуючу ситуацію в секторі та стратегічні питання. Державний комітет України з питань житлово-комунального господарства Квітень 2004.– 220 с.
6. (https://dzerkalo.media/ukrayina-posidaye-pershe-mistse-u-sviti-za-kilkistyu-smittya/) Державні будівельні норми України. Проектування. Полігони твердих побутових відходів. Основи проектування [Електронний ресурс] // ДБН В. 2.4-2-2005 Режим доступа: <http://dbn.at.ua/load/1-1-0-289.>

Стаття надійшла до редакції 19.03.2019

УДК 673, 628.1

О.С. Дробот, С.Я. Підгайчук, О.П. Бабак, Н.М. Яворська

Хмельницький національний університет

**АНАЛІЗ ДЕФЕКТІВ ЕЛЕМЕНТІВ ДЕТАЛЕЙ СУЧАСНИХ СИСТЕМ
ВОДОПОСТАЧАННЯ**

Зроблено аналіз дефектів деталей сучасних систем водопостачання, які надходять для експертизи до Випробувального центру Хмельницького національного університету. Запропоновано рекомендації з підготовки сплавів та ливарної оснастки, дотримання яких забезпечить високу якість одержаної продукції для запобігання аварійним ситуаціям в системах водопостачання громадських будівель.

Ключові слова: елементи кранів, неметалеві включення, ліквіація, тріщини

О.С. Дробот, С.Я. Підгайчук, О.П. Бабак, Н.М. Яворская

**АНАЛИЗ ДЕФЕКТОВ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕТАЛЕЙ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ
ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

Проведен анализ дефектов деталей современных систем водоснабжения, которые поступают для экспертизы в Испытательный центр Хмельницкого национального университета. Предложены рекомендации по подготовке сплавов и литейной оснастки, выполнение которых обеспечит высокое качество литья для предупреждения аварийных ситуаций в системах водоснабжения жилых домов.

Ключевые слова: элементы кранов, неметаллические включения, ликвация, трещины

O.S. Drobot, S.J. Pidgaychuk, O.P. Babak, N.M. Yavorskaya

**DEFECT ANALYSIS OF THE ELEMENTS OF A MODERN WATER SUPPLY SYSTEM'S
PARTS**

Analysis of defects for the water supply and drainage systems, which has been done on metallographic and X-ray spectral researches basis in Khmelnytskyi University Testing Centre has been given in the research. The main defects, which have caused anticipatory crash of details has been detected, described and the reasons for their occurrence were determined. Although castings that has been given for the expertise, foundry system were made by different manufacturers, from different alloys and different time were used for their preparation, they all have mostly the same defects. The main reason for the emergence of defects is violation of the casting technology and poor performance of some operations. Recommendations for the casting technology based on non-ferrous metals, as well as improvements for the foundry system structures has been given in the research, which can help manufacturers with defects reduction or eventheir elimination, to increase life of water supply details and to prevent the emergency situations in public buildings water supply systems.

Keywords: crane elements, non-metallic inclusions, segregation, cracks

В стародавньому Римі вода мешканцям міста подавалась по мармуровим водогонам. Сучасні українці користуються водою, яка надходить до них по трубам через лічильники, крани, фільтри тощо. Якщо мармурові водогони збереглися вже не одну тисячу років, то сучасні елементи водогонів не мають такої надійності та живучості.

В лабораторію з випробувань конструкційних та інструментальних матеріалів Випробувального центру Хмельницького національного університету протягом 20 років надходять для експертизи зруйновані штуцера, радіатори центрального опалення, лічильники витрат води, крани на предмет визначення причин руйнування цих виробів чи їх елементів в процесі експлуатації мешканцями багатоповерхових будинків.

Статистика свідчить, що найчастіше надходять для експертизи зруйновані елементи кранів, фільтри, штуцера холодної та гарячої води.



Рис. 1 Загальний вигляд елементів штуцера лічильника холодної води



Рис. 2. Загальний вигляд елементів фільтра грубої очистки води



Рис. 3. Загальний вигляд елементів сантехнічного шланга: накидна гайка, ущільнювач, фланець

Проведені металографічні та рентгеноспектральні дослідження дозволили виявити причини руйнування вищезазначених виробів і запропонувати виробникам заходи щодо попередження основних дефектів, які виникають під час одержання виливок і призводять до руйнувань гідротехнічних вузлів уже в процесі експлуатації.

Для виготовлення кранів холодної води використовують ливарні латуні та ливарні безолов'яні бронзи, в складі яких є мідь, алюміній, свинець, сурма. Такі сплави, як правило, мають неметалеві включення розчинів або хімічних сполук металів з киснем, сіркою, азотом, які є причиною виникнення значної пористості сплавів після кристалізації.

Практично всі види дефектів, які можуть виникати при одержанні виливок з кольорових металів, були виявлені під час проведення експертизи в наданих виробках: неметалеві і шлакові включення (рис.4- 8, 9, 10,13, 14), пори (рис. 7, 11, 15), тріщини (рис.12, 15).

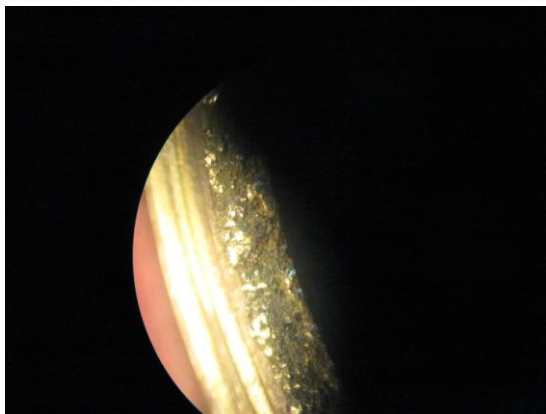


Рис.4. Поверхня злому різьбового з'єднання знімної пробки фільтра з шлаковими та неметалевими включеннями

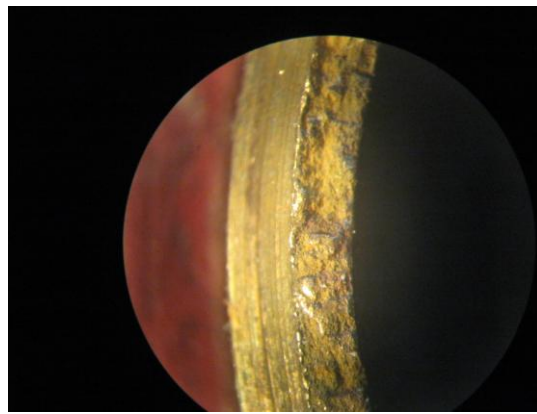


Рис.5. Поверхня злому різьбового з'єднання з шлаковими і неметалевими включеннями, що вкривають всю поверхню. Злом не має характерного для металу блиску



Рис.6. Шлакове включення на поверхні злому корпусу штуцера

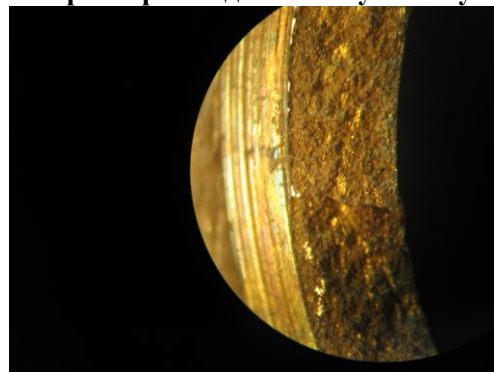


Рис.7. Пори і неметалеві включення у корпусі штуцера

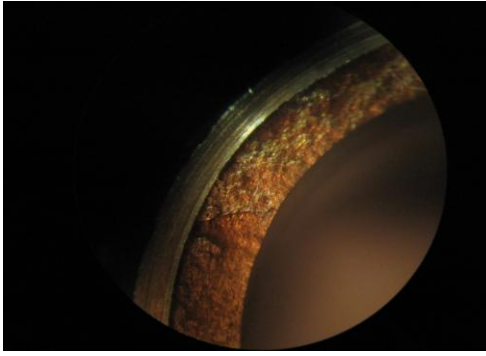


Рис.8. Значна кількість неметалевих включень, які розміщені по поверхні злому корпусу штуцера у вигляді блакитних включень

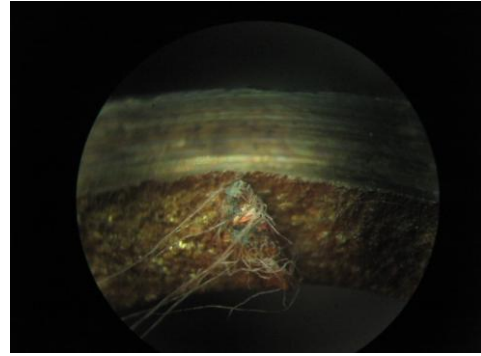


Рис.9. Шлакове включення значної величини у корпусі штуцера

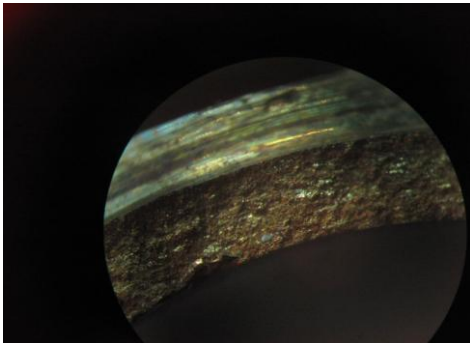


Рис.10. Шлакові і неметалеві включення по поверхні злому корпусу штуцера

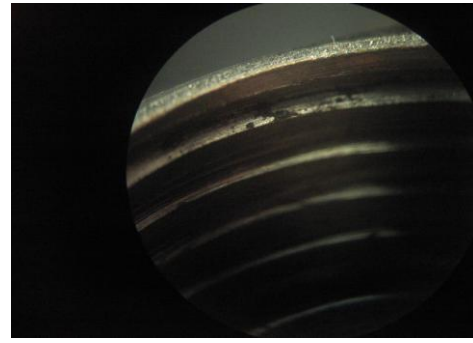


Рис.11. Накидна гайка. Тріщина, шлакові включення, пори, які утворилися від газів, що вийшли на поверхню витків різьби

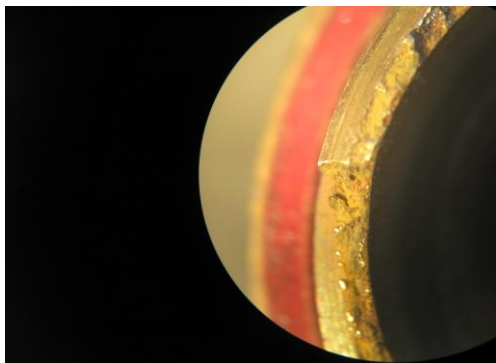


Рис. 12 Тріщини в корпусі штуцера

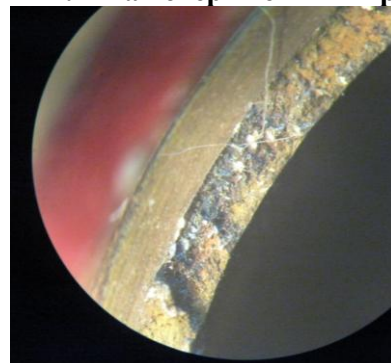


Рис.13. Скупчення шлакових включень біля поперечної тріщини.

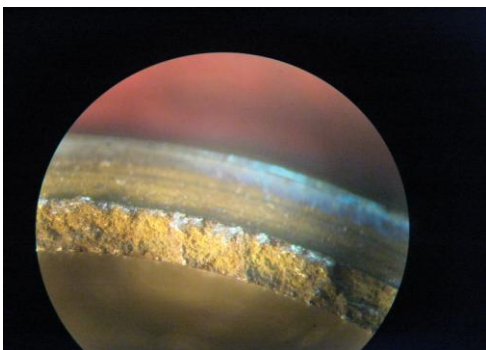


Рис.14. Неметалеві включення в зломі корпусу

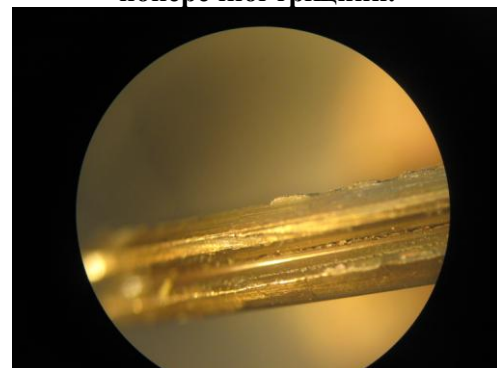


Рис.15. Пори між витками різьби (кільцева тріщина)

Надані для експертизи виливки виготовлені різними виробниками, з сплавів неоднакового складу та в різний час, однак мають практично однакові дефекти. На базі проведеного аналізу можна стверджувати, що основною причиною виникнення дефектів є порушення технології лиття, не якісне виконання окремих операцій.

Як показує практика властивості литих мідних сплавів визначаються їх складом та умовами кристалізації. В науковій літературі описані основні дефекти, які найчастіше виникають у виливках з ливарних бронз та латуней [1-3]. Серед таких дефектів найважливіші: усадка, ліквіація та газопоглинання.

Внаслідок властивості металу зменшувати свій об'єм при кристалізації (усадка), в об'ємі виливка можуть утворюватись усадочні раковини і пори. Практика показала, що величина усадки залежить від хімічного складу сплаву, швидкості його охолодження, температури заливання. Отже, для усунення негативних явищ, які є наслідком усадки металу рекомендовано: Вибирати сплави з більш широким інтервалом кристалізації. Наприклад, алюмінієві бронзи, які містять 6 - 9 % алюмінію мають значну лінійну усадку - 2,37 %, інтервал кристалізації - всього 46 °С, а олов'яні бронзи, у яких температурний інтервал кристалізації – 180 °С, мають лінійну усадку 1,0 %.

Виливки із сплавів з широким інтервалом кристалізації мають після кристалізації розсіяну усадочну раковину. Для таких сплавів в конструкції ливарної форми передбачено поєднання додатку зливка з випором, або передбачають невеликі додатки зливка для живлення масивних вузлів. Виливки з сплавів з проміжним інтервалом кристалізації мають дефекти у вигляді раковин та усадочної пористості. Для таких виливок передбачають більш розвинуті додатки зливка, ніж для сплавів з широким інтервалом кристалізації.

У латунного литва утворюється зосереджена раковина в теплових вузлах виливка і відсутні усадочні пори (якщо вузький інтервал кристалізації), тому вносять конструктивні зміни - роблять більш розвинуті додатки зливка для виведення раковин за межі виливка.

Мідні сплави схильні до утворення усадочних раковин пористості, а також тріщин.

Гарячі тріщини - виникають внаслідок значних усадочних напружень при температурі кристалізації. Холодні - при більш низьких температурах. Значна кількість міжкристалічних тріщин виникає в місцях скупчення неметалевих включень.

Слід відмітити, що всі мідні сплави схильні також до дендритної ліквіації. Ліквіація викликає неоднорідність механічних властивостей в різних частинах виливка, що призводить до руйнування деталей під час експлуатації. Хімічна неоднорідність закристалізованого металу залежить від хімічного складу сплаву, конфігурації виливка, швидкості охолодження.

Здатність металу в рідкому стані розчиняти гази (газопоглинання) сприяє появі внутрішніх порожнин, заповнених газом внаслідок неповного їх виділення з металу при охолодженні. Це є причиною одержання виливок з різною щільністю. При незначному газопоглинанні виливок буде щільний, без внутрішніх порожнин. Розчинені в металі гази погіршують пластичність металу, а ті, що знаходяться у вигляді хімічних сполук, не тільки погіршують механічні властивості виливок, але й сприяють появі тріщин.

Розчинність газів залежить від хімічного складу сплаву, температури заливання, в'язкості сплаву і властивостей ливарної форми. Для зменшення газонасичення сплавів застосовують плавку в вакуумі чи в середовищі інертних газів, а також дегазацію вакуумуванням в спеціальних камерах тощо.

Відомо, що пори виникають внаслідок виділення газів (кисню, азоту, сірчаного газу) внаслідок зменшення їх розчинності в металі при його кристалізації та неповного видалення їх під час розкислення. Сприяють появі пор недостатня очистка вихідних компонентів, наявність в шихті іржі, водню, вологи.

Якщо ливарний сплав (як, наприклад, алюмінієва бронза з 6 - 9 % Al) має вузький інтервал кристалізації то під час кристалізації можливе утворення грубозернистої стовбчастої структури. Такі бронзи в розплавленому стані схильні до окислення, що спричиняє утворення плівки окислів алюмінію та вспінювання розплаву при заливанні його у форму. Тому виливки з алюмінієвих бронз часто бувають уражені газовими раковинами і пористістю, особливо при заливанні у форму перегрітого металу та при наявності в ньому олова.(рис.10). Газові раковини, як будь-яка нещільність виливка, знижують його міцність і тому недопустимі. Виливки, що мають газові раковини, зазвичай бракують.

Для отримання якісних відливок важливим є підготовка сплавів до заливки у ливарні форми. Для цього сплави легують, рафінують, модифікують.

Склад шихтових матеріалів, флюсів і розкислювачів має відповідати сертифікату, мають бути забезпечені умови їх зберігання (не попадання масла, іржі, вологи), що гарантує одержання розплаву заданого складу.

Слід враховувати, що окремі елементи сплаву під час плавки можуть окислюватись, вигорати чи випаровуватись, звітруватись при підвищених температурах, сублімуватись,

вступаючи в хімічну взаємодію з іншими компонентами чи з футеровкою печі і переходити в шлак. Для відновлення потрібного складу сплаву втрати окремих елементів в ньому потрібно компенсувати додаванням до розплаву спеціальних добавок (лігатури), які готують на металургійних підприємствах. Лігатури містять крім легуючого елемента також основний метал сплаву, тому вони легше і повніше засвоюються розплавом, чим чистий легуючий елемент. Використання лігатур особливо необхідне, якщо температури плавлення основного ливарного сплаву і легуючого елемента мають значну різницю.

Широко використовують лігатури з кольорових металів такого складу: мідь - нікель (15 - 33% Ni), мідь - алюміній (50% Al), мідь - олово (50% Sn), алюміній - магній (до 10% Mg).

Для покращення ливарних властивостей бронз до їх складу вводять легуючі елементи - марганець, залізо, нікель, свинець, для подрібнення зерна вводять бор - 0,02%. До складу латуней вводять (1 - 2 % іноді - 4%) алюміній, кремній, марганець, нікель, олово, свинець, залізо. Ці елементи покращують технологічні властивості ливарних мідних сплавів, а також впливають на їх структуру: Al - підвищує рідкотекучість, міцність, корозійну стійкість, Mn - підвищує міцність і знижує корозійну стійкість, Fe - подрібнює структуру, гальмує ріст зерна внаслідок чого підвищує механічні властивості. Si - покращує ливарні властивості, підвищує міцність, зберігає високу пластичність. Zn - є заміником олова в олов'яній бронзі, він знижує температуру плавлення, температурний інтервал кристалізації, лінійну усадку, покращує герметичність виливок. Ni - підвищує механічні властивості, усуває ліквацію, особливо при наявності в сплаві свинцю. В мідних сплавах присутні також домішки: миш'яку 0,01 - 0,05%, сурми - 0,05%, олова - 0,1%, кремнію - 0,2 - 0,1%, нікелю - 0,5 - 1%, свинцю 0,05 - 0,3%, заліза - 0,1%, цинку - 0,5 - 1,5 %, фосфору - 0,01 - 0,1, разом - 1, 0 - 2, 8%. Тому такі сплави, як правило, містять неметалеві включення цих металів з киснем, сіркою, азотом, воднем які є причиною виникнення значної пористості метала після кристалізації. Так, залізо - мало розчинне в міді, утворює з алюмінієм інтерметалічну сполуку Fe₃ Al, яка виділяється як самостійна фаза у вигляді дрібнодисперсних часточок. Включення Cu₂O мають переважно блакитний колір, включення CuS мають сірий колір, алюмосилікати - світлосірого кольору (рис. 10). Сприяють появі значної кількості цих включень недостатня очистка вихідних компонентів перед плавкою та неповне розкислення сплаву перед розливанням.

Під кінець плавки мідні розплави активно окислюються, утворюючи дрібнодисперсні оксиди, сульфідні, які забруднюють сплав і, що є значним недоліком, важко видаляються з металу. Крім того метал насичується воднем, внаслідок чого виникає пористість, погіршується щільність та герметичність виливок.

Алюмінієві бронзи та латуні, кременісті та берилієві, при окисленні утворюють щільні оксидні плівки, які можуть з розплавом попадати до порожнини ливарної форми.

Для відокремлення оксидних плівок і шлакових включень ливникові системи оснащують відцентровими шлаковиками. Розплав в них вводять по дотичній до бічної поверхні, що надає йому обертового руху навкруг осі шлаковловлювача. Відцентрова сила сприяє накопиченню неметалевих включень в центрі шлаковловлювача в зоні низького тиску, перешкоджаючи їх попаданню в тіло виливка

Для видалення із сплаву кисню, який знаходиться у вигляді розчинених в металі оксидів, ефективно застосовувати розкислення. Під час розкислення елементи, які знаходяться у складі лігатур виконують роль відновників: вони з'єднуються з киснем оксиду, розчиненого в розплаві, відновлюють метал, а самі у вигляді оксидів переходять у шлак. Очищення (рафінування) розплаву розкисленням сприяє значному покращенню якості метала виливка, підвищенню його міцності і пластичності. Попередити утворення нерозчинних дрібнозернистих оксидів можна введенням розкислювачів в мідь перед введенням легуючих елементів. Для цього використовують фосфор у вигляді фосфористої міді. Сплави, які містять цинк, алюміній та кремній розкислюють берилієм, який суттєво підвищує щільність виливок. Досить часто для більшої ефективності процесу вносять конструктивні зміни у ливарну оснастку.

Ливникова система для виливок з мідних сплавів повинна забезпечувати найбільш повне видалення окисних плівок і повільне заповнення порожнини форми, тому має бути сконструйована з використанням ливникової системи, що розширюється, з змієподібними і сходишковими стояками і з нижнім підводом металу, з використанням фільтрувальних сіток, шлаковловлювачів з ріжковим ливниковим ходом.

Для зменшення усадки мідних сплавів під час кристалізації потрібно використовувати великі додатки зливка.

Для видалення завислих легких неметалевих включень та з метою зменшення вмісту газів доцільно проводити перед розливанням рафінування продуванням розплаву інертними газами. Для цього вводять хлористий марганець (0,1 - 0, 2 %) або обробляють розплав рафінуючими фторидними флюсами (плавиковий шпат CaF_2).

Для плавки мідних сплавів переважно в якості флюсів використовують соду, буру, кухонну сіль, бій скла, криоліт і деревне вугілля. Вони не тільки сприяють видаленню з металу небажаних домішок, але й захищають метал від вигорання легкоплавких складових (наприклад, цинку). Захисні шлаки і флюси це складні сплави оксидів і солей, які завантажують на поверхню розплаву (чи покривають ними поверхню розплаву). Шлаки і флюси мають бути більш легкоплавкими, ніж металевий розплав. Їх густина має бути меншою за густину рідкого металу. Для надійного захисту металу від газів, шлаки і флюси повинні бути непроникливими для газів повітря і пічних газів. В'язкість шлаків має бути невисокою для гарного розтікання по поверхні розплаву. Одночасно шлаки і флюси повинні видалятися з поверхні рідкого розплаву чи затримуватись при розливанні. Шар рідкого шлаку чи флюсу товщиною 5 -10 мм на поверхні металевого розплаву не тільки захищає його від взаємодії з газовим середовищем, але практично протистоїть випаровуванню розплаву. Крім рідких шлаків і флюсів, для захисту розплаву від взаємодії з газами, використовують тверді покриття - деревне вугілля чи подрібнені електроди. В разі підготовки складних сплавів з хімічно - активними добавками для захисту розплаву від взаємодії з повітрям використовують атмосферу захисних чи інертних газів.

Заключним заходом для покращення властивостей виливок є процес модифікування - подрібнення структурних складових сплавів на макро - і мікрорівнях. Існує декілька способів виконання цього процесу, однак суть усіх полягає у введенні в металевий розплав часточок, які за першим механізмом стають самостійними центрами кристалізації («пряме» гетерогенне зародкоутворення), чи утворюють їх внаслідок взаємодії з розплавом. Другий механізм - блокування росту кристалічних зародків, що утворюються в розплаві. Внаслідок модифікування подрібнюється чи макрозерно, чи структурні складові на мікрорівні (можливі два ці процеси одночасно). Змінюється морфологія металевих зерен, неметалевих включень і виділень інтерметалічних фаз з голкоподібною формою, які сприяють виникненню концентрації напружень і розвитку тріщин, на глобулярну чи близьку до неї форму, що попереджує виникнення таких явищ.

Розплави бронзи і латуней, які містять алюміній, модифікують введенням цирконію, ванадію, титану, вольфраму (0,05- 0,2 %). Для подрібнення зерна вводять бор - 0,02%. Суттєве подрібнення структури мідних сплавів можна досягти введенням нанопорошку карбіду кремнію SiC з розміром часточок 0,02 мкм в кількості 0,004 % мас., що зменшує зерно у 8 разів [4].

Висновки. Аналіз дефектів елементів деталей систем водопостачання та водовідведення, який проведено у Випробувальному центрі Хмельницького національного університету дозволив виявити та описати основні дефекти, що спричиняють їх достроковий вихід з ладу та причини їх виникнення. Це дозволило сформулювати рекомендації та основні заходи, виконання яких дозволить виробникам зменшити кількість дефектів чи навіть їх усунути для збільшення строку експлуатації деталей водопостачання та запобігти аварійним ситуаціям в системах водопостачання громадських будівель.

Список використаних джерел:

1. Курдюмов А.В. Производство отливок из сплавов цветных металлов / А.В.Курдюмов и др. - М.: МИСиС, 1996. с. 24-28.
2. Цветное литье.: Справочник / Н.М. Галдин - М.: Машиностроение, 1989. 389 с.
3. ОСТ 24.207.01-90. Отраслевой стандарт. Арматура трубопроводная. Отливки из чугуна и цветных сплавов. Общие технические требования.
4. Крушенко Г.Г., Черепанов А.Н., Полубояров В.А., Кузнецов В.А. Влияние нанопорошков тугоплавких материалов на свойства литых изделий из черных и цветных металлов и сплавов. / Машиностроитель. 2004. № 12. с.32-38.

Рецензенти:

Боровик Олег Васильович - заступник ректора Національної академії Державної прикордонної служби України ім. Б.Хмельницького, доктор технічних наук, професор

Диха Олександр Володимирович - завідувач кафедри трибології, автомобілів і матеріалознавства, доктор технічних наук, професор

Стаття надійшла до редакції 20.03.2019

УДК 621.3: 811.161.2

В.Ю. Дудник*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»***ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗКУ АНАФОРИ ПРИРОДОМОВНИХ ТЕКСТІВ ДЛЯ УКРАЇНСЬКОЇ МОВИ**

У статті автори проводять дослідження існуючих алгоритмів системного аналізу з метою розв'язання питання анафори природомовних текстів з української мови. Наводиться детальне обґрунтування актуальності поставленої задачі, оскільки стрімкий розвиток інформаційних технологій дає потужний поштовх до проведення досліджень в галузі аналізу текстових масивів.

У роботі досліджені функціональні можливості відомих підходів системного аналізу до розв'язку питання анафори природомовних текстів для української мови. Наведений алгоритм для проведення обчислень семантико-синтаксичних критеріїв для попередньої пари антецедент-анафора.

Ключові слова: анафора, комп'ютерна лінгвістика, аналіз, системний підхід, автоматизація, алгоритм.

В.Ю. Дудник*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»***ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ РЕШЕНИЯ АНАФОРИ ПРИРОДОМОВНИХ ТЕКСТОВ ДЛЯ УКРАИНСКОГО ЯЗЫКА**

В статье авторы проводят исследования существующих алгоритмов системного анализа с целью решения вопроса анафори природомовных текстов с украинского языка. Приводится детальное обоснование актуальности поставленной задачи, поскольку стремительное развитие информационных технологий дает мощный толчок к проведению исследований в области анализа текстовых массивов.

В работе исследованы функциональные возможности известных подходов системного анализа к решению вопроса анафори природомовных текстов для украинского языка. Приведенный алгоритм для проведения вычислений семантико-синтаксических критериев заранее выбранной пары антецедент-анафора.

Ключевые слова: анафора, компьютерная лингвистика, анализ, системный подход, автоматизация, алгоритм.

V.Y. Dudnik*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"***USE OF SYSTEM ANALYSIS FOR THE SOLUTION OF THE ANAPHOR FOR NATURAL LANGUAGE TEXTS FOR THE UKRAINIAN LANGUAGE**

In the article, the authors conduct research of existing algorithms of system analysis in order to solve the problem of the anaphora of natural language texts from the Ukrainian language. The detailed justification of the relevance of the task is given, because the rapid development of information technology gives a powerful impetus to research in the field of analysis of text arrays.

The analysis of objects taken from natural texts is a subject area of automatic processing of natural language NLP (Natural Language Processing), the essence of which work to achieve from the computer a full understanding of natural texts. In this regard, the issue of the anaphora is a central issue in cognitive linguistics, besides this, the anaphora serves as a means of communication in transformational grammar, as well as anaphoric type expressions contained in a numerical reference system, since they denote the coercive nature of the names, which means direct reference.

The development of literary works has shown that the task of automating processes in solving the issues of anaphora occupies a leading place among the scholars. This can be explained by the fact that in natural language texts, in most cases, speech expressions are presented, which are difficult to interpret without understanding the previous contents of the test array, as a rule they are anaphoric pronouns, for example, the pronouns belonging to the third person he, he.

In this work the functional possibilities of known approaches of system analysis to the solution of the question of the anaphora of natural texts for the Ukrainian language are explored. The algorithm for calculating the semantic-syntactic criteria for the pre-chosen pair of antecedent-anaphora is given.

In this regard, there is a research interest in addressing the issue of anaphora natural texts with the involvement of automated systems. The process of automating the detection of anaphoric links will enable a successful combination and approximation of the automated process for the processing of textual information into the model of the speech model of a person, which in turn will open new promising directions for the solution of applied tasks, referring to automatic translation, the search of the necessary information, machine annotation and referencing.

Keywords: anaphora, computer linguistics, analysis, systematic approach, automation, algorithm.

Постановка проблеми. Виникнення комп'ютерних технологій є універсальним інструментом, яким повинен володіти кожен науковець сьогодення, адже завдяки використанню ЕОМ, сучасний науковець збільшує свої здібності та має змогу розв'язувати ускладнені від звичних задач за порівняно менший часовий проміжок [3]. Найважливішим у даному поєднанні

«людина-машина» є висока точність отриманих результатів у порівнянні із звичайними рутинними методами обчислення.

Сучасний розвиток філологічних наук відбувається в часи коли інформаційні комунікаційні технології є невід'ємною частиною людського життя. Значна частина аудиторії, яка використовує ІТ-розробки у своїх наукових експериментах, дослідженнях не є спеціалістами даної галузі, а є представниками інших не менш важливих та цікавих наук, проте провести ґрунтовне дослідження потрібного напрямку, узагальнити отриманий результат експерименту, у більшості випадків неможливо без використання комп'ютера з метою автоматизації процесів у складних системах різної природи.

У зв'язку з цим якщо проглянути будову вікон програмних додатків, то можна прослідкувати досить простий та зрозумілий інтерфейс, який зосереджений на представників різноманітних професій. Найбільш доступним інтерфейсом для кожного з нас є засоби мовлення на рідній мові, тобто це можливість вимовляти в голос, тобто синтезувати необхідний звук із запропонованого тексту, а з іншої сторони це розробки засобів для здійснення аналізу та синтезу природомовних текстових масивів [6,7].

Ключовим питанням при роботі із інформацією є її опрацювання до необхідного виду, тобто вихідну інформацію необхідно подати у вигляді деякого масиву або вектору, інформаційної вибірки, якщо виникають складнощі у перетворенні то можливе подання інформації у графічному вигляді, головна мета при опрацюванні природомовних текстів – подати текстові дані таким чином, щоб фахівець зміг прийняти правильне рішення або використовувати інформацію для подальшого перетворення до потрібного виду. Успішна практична реалізація потребує залучення потужного апарату системного аналізу [5].

Системний аналіз має широкий спектр застосування, зокрема в філологічних науках, які останнім часом здійснюють перехід до автоматизації великої кількості рутинних процесів [3,4].

Для деталізації вивчення поставленого питання розв'язку анафори природомовних текстів системний аналіз у своєму арсеналі має різноманітні системні підходи, які в повній мірі вивчають об'єкт дослідження, явища та процеси які з ним пов'язані. Іншими словами системний підхід являє собою практичну реалізацію необхідних принципів цілісності досліджуваних процесів, які можуть мати різний ступінь складності, внутрішні зв'язки та інші характеристики їх виникнення та розвитку.

Сьогодні лінгвістичного аналізу складно уявити без використання методів та моделей, які дають змогу побудувати необхідну систему аналізу, та автоматизувати роботу значної кількості вчених, побудована система зможе здійснювати детальний аналіз та інтелектуальну обробку природомовних текстів, даний напрям займає вагоме місце у наукових працях науковців сьогодення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Огляд літературних джерел показує, що сучасні системи аналізу мають високий показник ефективності роботи під час аналізу природомовних текстів, які полягають у тому що при обробці текстових масивів використовується білінгвістична семантична база, яка є досить об'ємною та оперує близько 120 000 словесними одиницями та внутрішніми зв'язками, які можуть носити асоціативний характер [6].

Розвиток інтелектуальних технологій для обробки текстової інформації займає перші місця у наукових дослідників та розробників програмного забезпечення. Це явище можна пояснити тим, що комбінування основних методів, базових підходів на перетині декількох наук завжди є актуальним, оскільки виникають перспективи для майбутнього розширення кола наукових інтересів кожного із представників досліджуваних галузей наук.

Розв'язанню питання анафори присвячені роботи таких вчених: А. Анісімова, Н.Д. Арутюнова, А. А. Кибрика, Е. В. Падучева, О. Палагіна, О. Литвиненка, Ю. Марчука, А. Д. Шмелева, K.W. Chang, C.J. Hsieh та ін.

У роботі Толпегіна П.В., Ветрова Д.П., Кропотова Д.А. показано, яким чином можна сконструювати класифікатор, який використовуючи синтаксичну інформацію дозволяє встановити поєднання антецедент-анафора або навпаки доводить їхню несумісність [4].

На даному етапі вирішення питання синтаксичного аналізу тексту, науковці-лінгвісти мають успішні результати, проте вчені, в коло наукових інтересів, яких входить проведення семантичного аналізу природомовних текстів, приходять до багатьох проблем, вирішення яких неможливе без використання комп'ютерних технологій, а саме – питання вирішення анафори у природомовних текстах з української мови. Сучасні дослідники виокремили чотири типи анафори такі як: прислівникова, займенникова, іменникова, нульова [3,5].

Вивчаючи новітні наукові розробки в галузі системного аналізу можна виокремити такі перспективні напрями розвитку:

1. Теоретична частина системології у філологічних науках;
2. Практичне застосування системотехніки у задачах прикладного характеру;
3. Методологія системного аналізу природомовних текстів.

Можна із впевненістю стверджувати, що окреслені вище напрями розвитку системного аналізу, як науки прикладного значення, становлять концепцію розвитку системного підходу.

Опрацювання літературних джерел дає зрозуміти, що використання системного аналізу перш за все представляє можливість досліджувати процеси, які відбуваються у складних системах завдяки моделюванню функціонального стану розглядуваної системи та створює перспективи до зростання ефективності роботи складних систем та автоматизації її процесів на основі математичного моделювання та комп'ютерній реалізації побудованих алгоритмів [1,4].

Таким чином, автоматизація вирішення питання анафори можлива із залученням апарату системного аналізу, що в свою чергу потребує додаткових досліджень існуючих алгоритмів та створення перспектив для майбутніх досліджень.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Провести дослідження алгоритмів системного аналізу, результати роботи яких спрямовані на автоматизацію обробки природомовних текстів української мови, зокрема шляхи розв'язання питання анафори.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розвиток наукового прогресу призводить до збільшення інформаційних обсягів, за помірними оцінками фахівців, накопичення інформації можна розглядати за принципами геометричної прогресії, але всі ми добре знаємо що кількість це не завжди якість, тобто для того щоб прийняти вдаль рішення необхідно в повній мірі володіти необхідними інформаційними ресурсами, які будуть містити повні дані, достовірні та крім цього вони повинні бути доступні для осіб які займаються вирішенням поставленого питання.

У зв'язку з цим можна з впевненістю стверджувати, що на сьогоднішній день, інформація – це фундаментальний ресурс для прогресу суспільства, а засобом для вирішення питання продуктивності роботи сучасного спеціаліста є інформаційні системи та технології. Не секрет, що основний вид інформації, яку людина здатна сприймати та відразу опрацювати, залежно від розумових здібностей є текстова інформація.

Зародження кібернетики – науки про узагальнені принципи для управління громіздкими (множинними) системами різної природи виникнення, дало змогу зрозуміти кожному пересічному жителю планети, що всередині будь-яких живих організмів можна встановити інформаційні процеси які там відбуваються, а сконструйовані інженерами технічні винаходи теж можуть функціонувати завдяки інформаційному управлінню.

Розглянемо актуальне питання сьогодення – питання автоматизації обробки природомовних текстів. Якщо проводити аналіз текстової інформації на основі використання комп'ютерних технологій то такий аналіз перш за все полягає на первинних евристичних алгоритмах для опрацювання природомовних текстів, а також до цього списку додаються бази даних, які будуються за всіма лінгвістичними характеристиками [2].

На практиці філологи використовують наступні системи аналізу для розв'язання поставлених проблем у природомовних текстах:

1) Система проведення семантичного перебору текстів – дана система здійснює аналіз запропонованого тексту та може охарактеризувати документ з точки зору його приналежності до досліджуваної тематики.

2) Система перекладу «Вітамін Е» – дає змогу вдосконалити автоматизований машинний переклад, така система виникла на основі алгоритмів та системних підходів білінгвістичного аналізу, який носить семантичний характер.

3) Система сортування Інтернет-повідомлень – така система проводить ґрунтовний аналіз інформаційних текстових надходжень до глобальної мережі, що дає можливість захистити необхідний контент, трафік та перешкодити до його доступу.

Дані системи аналізу дають змогу виконати ґрунтовний аналіз текстових даних та відшукати відповіді на більшість питань лінгвістичного характеру.

Варто відмітити, що якщо необхідно розв'язати питання займенникової анафори то необхідно сконструювати класифікатор, підґрунтям до побудови якого будуть інформативні дані стосовно вивчених властивостей синтаксичного та семантичного характеру досліджуваних слів анафори та в свою чергу антецедента. Вказана інформація дає змогу сформулювати висновок відносно їхнього поєднання або несумісності [3].

Зосередимо свою увагу на вивченні основних підходів до розв'язання питання анафори у природомовних текстах з української мови. Найпопулярнішим та результативним методом відокремлення анафори, зокрема займенникового типу є метод Міткова, суть даного методу полягає у об'єднанні відомих евристичних підходів до єдиної зручної при роботі форми, яка дає змогу виокремити необхідні критерії аналізу антецедентів по належності до анафори, суть якої полягає у використанні базової інформації, синтаксичного та морфологічного характеру, де кожному критерію присвоюється певна вага та кінцеве підсумовування ваг критеріїв, яким підходить по всім поставленим умовам розглядувана пара із текстового масиву.

Наукові розробки не стоять на місці, а це говорить проте, що метод Міткова отримав ряд модифікацій, доповнень роботи базового алгоритму, які в основному полягають у використанні семантичної інформації в чистому вигляді та семантичної інформації, яка зображується у вигляді тензорної моделі.

Розглянемо критерії оцінювання, які беруть за основу синтаксичну інформацію. Вказані критерії опрацьовують інформацію різного походження, тобто вони здатні розпізнавати бінарні, дійсні, натуральні значення, де широкого застосування здобули бінарні критерії, які користуються законами дискретної математики, тобто процес кодування є цілком логічним: якщо маємо 0 – то стверджуємо про невиконання критерію, якщо 1 – то критерій успішно виконується.

Для кращого сприймання бінарних критеріїв наведемо перелік найпопулярніших: бінарні характеристики трьох родів, властивості множини анафори, а також антецеденту; підмет речення представляє собою – антецедент; якщо антецедент виступає як власна назва. Якщо говорити про критерії, які виділяють натуральне значення: враховується кількість входжень антецедента у досліджуване речення, текст, анафоричні зв'язки; береться до уваги значення власних назв, які зосереджені між анафорою та антецедентом [4].

Складними у реалізації є критерії з дійсними значеннями, основними з яких є: обчислення середнього значення двійки антецедента-анафора із використанням підходу опорних векторів, для них перед цим була вказана несумісність на досліджуваному інтервалі між антецедентом та анафорою; потрібний кандидат вступає у альфа-зв'язок від того слова, яке розташоване в ідентичній фактор-множині. Складність даного критерію можна пояснити занадто громіздкою практичною реалізацією, оскільки вони рідко використовуються незалежно від інших критеріїв, тобто для того щоб використати критерії з дійсними значеннями необхідно перед цим вже мати дієвий класифікатор [6].

Варто відмітити, що після перезавантаження необхідної кількості разів із використанням додаткових критеріїв, які необхідні залежно від властивостей текстового масиву, вид класифікатора буде іншим тобто буде необхідний додатковий перерахунок отриманих даних після цих критеріїв, які теж потрібно брати до уваги в процес тренування.

Розглянемо модифікований метод для проведення оцінки пари антецедент-анафора на основі використання тензорного аналізу [5]. Для цього будемо досліджувати слово або словосполучення антецеденту m та початкове речення якому воно належить n . Крім цього до розгляду вводиться безпосередньо речення n' яке містить анафоричний займенник m' . Розглянемо основні етапи для досліджуваної пари m та m' побудови критеріїв семантико-синтаксичних властивостей.

Перш за все необхідно сконструювати управляючі простори $\tilde{m}n$ та $\tilde{m}'n'$ для заданих речень m та m' , побудову такого простору можна виконати використовуючи метод який висвітлений в [1]. Синтаксичний простір будемо розглядати як систему, яка об'єднана довільними способами, різноманітних синтаксичних конструкцій, які взаємодіють між собою, дана система має у своєму складі засоби для вираження існуючих зв'язків та встановлення характеру між ними. Під синтаксичною конструкцією будемо розуміти довільну синтаксичну побудову.

На наступному етапі вказують та припускають існування two (двійки) та three (трійки), які задовольняють умову two in $\tilde{m}n$, three in $\tilde{m}'n'$; прийнято вважати, що m є базовим компонентом в two і three. Потім потрібно конкретно визначити значення двійки (two') та трійки (three') та накласти умови існування: two' in $\tilde{m}'n'$, three' in $\tilde{m}'n'$; m' аналогічно до m міститься в two' і three'. Далі семантико-синтаксичний критерій полягає у виконанні обчислень на основі бінарного критерію:

$$\begin{cases} 1, \text{коли виконується } two.type = two'.type \\ 0, \text{у протилежному випадку.} \end{cases}$$

На наступному кроці потрібно провести обчислення критеріїв натуральних чисел беручи до уваги кінцеву інформацію та відшукування семантичної відстані, яка присутня між словами по фундаментальних характеристиках WordNet [2].

Останній етап даного алгоритму полягає у обчисленні критерію дійсних чисел використання у вжитку антецедента у розумінні анафори на основі формування запитів до утвореної тензорної моделі за такими векторами:

1. Якщо $two'.first = m'$,

то $(m, two'.second)$

інакше $(two'.first, m)$

2. Якщо $three'.first = m'$

то $(m, three'.second, three'.third)$

інакше якщо $three'.two = m'$

то $(three'.first, m, three'.third)$

інакше $(three'.first, three'.second, m)$.

Виходячи з вище наведеного алгоритму, відмітимо, що бінарний критерій за своєю структурою повністю нагадує критерій синтаксичного паралелізму, це можна пояснити тим що відбувається перевірка типів зв'язку на входження антецедента та анафори.

Використання натуральнозначних критеріїв дає змогу встановити синтаксично-семантичні паралельні значення та виконати перевірку на ідентичність за своїм змістом слів, які перебувають у одних і тих самих відношеннях синтаксичного характеру стосовно анафори та антецедента.

Використання дійснозначних критеріїв із залученням тензорної моделі дає змогу встановити можливість використання у даному реченні антецедента на місці анафори. Процедура заміни відбувається наступним чином: коли виконавши заміну анафори антецедента у двійці та трійці з'являються семантично необґрунтовані вислови, то утворену пару потрібно відкинути [7]. Заслуговує на увагу не менш важливий метод, який знаходить успішну реалізацію в системному аналізі, а саме тренувальне використання класифікатора на основі методу опорних векторів. Для практичного застосування вказаного методу потрібно визначити розмічену вибірку тренувального характеру, беручи до уваги вказану вибірку необхідно вказати позитивні та негативні задачі для тренувального навчання, щоб виконати поставлені вимоги треба обчислити перераховані раніше характеристичні ознаки всіх можливих пар антецедентів та анафор.

Наукові доробки показують, що число пар у негативних задачах буде наближатися до $k * l$, коефіцієнт k відповідає за чисельність анафоричних займенників у вибірці для тренування, а l показує чисельність кандидатів у антецеденти. У зв'язку з цим число негативних задач буде на порядок більшим від числа позитивних задач.

З метою прискорення роботи описаного алгоритму вчені прийшли до того, що потрібно зменшувати чисельність негативних задач, шляхом нехтування негативних пар антецедент-анафора, у досліджуваній вибірці тренувального характеру, вибрати для відкидання потрібно тільки ті пари у яких встановлено, що відстань між ними значно більша ніж встановлене стале число, яке вибрано на основі інформації стосовно ступеня зв'язності початкової нашої вибірки для тренування. Аналітичне подання описаного методу має наступний вигляд:

$$D = \left\{ (x_i, y_i) \mid x_i \in \mathcal{R}^{33}, y_i \in \{-1, 1\}_{i=1}^n \right\}, \quad (1)$$

x_i потрібно розуміти як i -ту характеристичну точку вибірки тренувального характеру у досліджуваному просторі ознак

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{точка являє собою сумісну пару} \\ -1, & \text{у протилежному випадку,} \end{cases}$$

k показує кількість двійок (пар) у досліджуваній вибірці.

Якщо реалізація вище наведеного алгоритму відбувається у лінійному випадку цього ж методу опорних векторів то дослідник матиме справу із гіперплощиною, яку можна задати наступним чином:

$$m \cdot x - b = 0,$$

де \cdot — представляє скалярний добуток.

Більшість відомих алгоритмів системного аналізу, які представляють собою системи штучного аналізу не розвинені настільки, щоб безпомилково проаналізувати та зрозуміти природомовні тексти українською мовою. Побудований вище простір, які має вказані характеристики також відноситься до таких систем, у зв'язку з цим може трапитися так що не всі точки у просторовій реалізації будуть чітко вказувати на сумісність чи несумісність пар в тому чи іншому сенсі, в якому потрібно для конкретного дослідження. Це пояснюється тим, що новостворена поверхня ніяк не поділить простір на дві частини, де будуть зосереджені точки, які відносяться до свого класу у кожному із цих частин простору. При практичній реалізації інколи виникають труднощі у зв'язку із неправильним вибором роздільної поверхні.

Для детального дослідження характеристик отриманої поверхні потрібно її візуалізувати, адже геометрична інтерпретація дасть можливість використати виміри та ін. наявні результати.

Якщо все ж таки маємо справу із нероздільними класами поверхні, то потрібно брати до уваги деякі припущення тобто пом'якшувати допустимі норми роздільності, а це вже є модифікацією методу опорних векторів.

Тренувальне використання класифікатора на основі використання методу опорних векторів полягає у розв'язанні задачі, яка відноситься до оптимізаційних методів:

$$\begin{aligned} \arg \min_{m,b,\xi} & \left(\frac{1}{2} \|m\|^2 + C \sum_{i=1}^n \xi_i \right) \\ y_i \cdot (m \cdot x_i - b) & \geq 1 - \xi_i, \quad 1 \leq i \leq n \\ \xi_i & \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

де вважається C – лінійний штрафний коефіцієнт. Наведену задачу можна розв'язати будь-яким методом оптимізації.

Стає очевидним, що першочерговим завданням сучасної комп'ютерної лінгвістики є правильне розпізнавання у текстових масивах згадок різноманітної природи: особи, події, явища та ін., а на наступному етапі потрібно встановити існуючі між ними зв'язки та описати характеристичні властивості. Властивості таких об'єктів залежать від розглядуваної предметної області. Отримані дані проходять необхідний формальний опис для збереження у загальній інформаційній базі даних. Якщо говорити про інформаційний об'єкт то він завжди відповідає певному відношенню до деякої предметної області із заданою структурою. Дослідники, як правило припускають, що аналіз та опрацювання тексту відбувається у межах деякої системи аналізу, яка має обмежену предметну область та представлена на мові формальних алгоритмів.

Висновки. У статі описана концепція сучасного розвитку системного аналізу на основі використання системних підходів при розв'язанні задач прикладного характеру, зокрема для розв'язку анафори природомовних текстів та встановлення міжпредметних зв'язків, з метою окреслення перспективних шляхів подальшого розвитку фундаментальних наук.

Досліджені основні критерії оцінювання, які побудовані на базі синтаксичної інформації, які здатні обробляти інформацію різної природи походження.

Встановлено, що в процесі проведення аналізу текстової інформації природною мовою, головною умовою є якісне виконання процедури ототожнення об'єктів, які неодноразово зустрічаються в тексті.

Розглянутий модифікований метод тензорного аналізу спрямований на проведення оцінки пари антецедент-анафора. Описаний процес вибору класифікатора на базі морфологічних ознак та синтаксично-семантичних властивостей. Для вибору антецеденту, відбувається морфологічний, синтаксичний фільтр для представників в кандидати.

Проведене дослідження основних етапів побудови класифікатора, який бере до уваги синтаксично-семантичну інформацію, яка представлена у вигляді тензорної моделі мови. Даний метод є дієвим при вирішенні задачі анафори завдяки тренуванню класифікатора.

Виходячи з вище сказаного, питання розв'язку анафори представляє інтерес для майбутніх досліджень, оскільки це дасть змогу автоматизувати роботу великої кількості вчених по виконанню аналізу текстових масивів.

Список використаних джерел:

1. Вознюк Т.Г. Алгоритм побудови керуючого простору синтаксичних структур природномовних текстів. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Фізико-математичні науки. 2014. № 1. С. 122- 127.
2. Марченко О.О. Методи оцінювання семантичної близькості–зв'язності слів природної мови. Штучний інтелект. 2012. №4. С. 213-219.
3. Павленко М.А. Анализ методов решения задачи извлечения информации из текстов. *Системы обработки информации*. Харків. Харків, 2013. Вип. 8 (115). С.158-162.
4. Толпегин П.В. Автоматическое разрешение кореференции местоимений третьего лица русскоязычных текстов : дисс. ... канд. техн. наук / Вычисл. центр РАН. Москва, 2008. 238 с.
5. Korobov M. Morphological analyzer and generator for Russian and Ukrainian languages. *International Conference on Analysis of Images, Social Networks and Texts*. Springer, Cham, 2015. С. 320-332.
6. Nivre J., Hall J., Nilsson J. et al. MaltParser: A language-independent system for data-driven dependency parsing. *Natural Language Engineering*. 2007. Vol. 13. No. 2. P. 95–135.
7. Protopopova E.V., Bodrova A.A., Volskaya S.A., Krylova I.V., Chuchunkov A.S., Alexeeva S.V., Vocharov V.V., Granovsky D.V. Anaphoric Annotation and Corpus-Based Anaphora Resolution: An Experiment, *Computational Linguistics and Intellectual Technologies. Диалог-2014*: сб. тр. Междунар. науч. конф. по компьютер. лингвистике. 2014. Вып. 13. С. 562–571.

Стаття надійшла до редакції 07.03.2019

УДК 621.43

А.А. Дудніков, В.В. Дудник, О.В. Канівець, О.У. Дрожжана
Полтавська державна аграрна академія

ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ВІБРАЦІЙНИМ ПЛАСТИЧНИМ ДЕФОРМУВАННЯМ

Розглянуто способи підвищення зносостійкості дисків сошників зернових сіялок за рахунок зміцнення їх матеріалу вібраційним деформуванням

Ключові слова: поверхневий шар, зносостійкість, вібраційне зміцнення, ступінь зміцнення, довговічність

А.А. Дудников, В.В. Дудник, О.В. Канивец, О.У. Дрожжаная
Полтавская государственная аграрная академия

УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ВИБРАЦИОННЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Рассмотрены способы повышения износостойкости дисков сошников зерновых сеялок за счет упрочнения их материала вибрационным деформированием.

Ключевые слова: поверхностный слой, износостойкость, вибрационное упрочнение, степень упрочнения, долговечность.

A. Dudnikov, V. Dudnyk, V. Kanivets, O. Drozhchana
Poltava State Agrarian Academy

STRENGTHENING DETAILS BY VIBRAND PLASTIC DEFORMATION

Ways to improve the wear resistance of the disks of the openers of grain seeders due to the hardening of their material by vibration deformation are considered.

Keywords: surface layer, wear resistance, vibration hardening, degree of hardening, durability.

Постановка проблеми. При експлуатації машин існує проблема виходу з ладу деталей внаслідок зношування зовнішніх поверхонь. Тому при їх відновленні для отримання належної якості ремонту необхідно все більшу увагу звертати на зміцнення поверхневого шару.

Можливість створення поверхневого шару з рівномірним зміцненням, а також формування поверхневим пластичним деформуванням (ППД) твердості оброблюваного матеріалу і зміцнюючих залишкових напружень стиску до цього часу залишається не повністю реалізованою.

Забезпечити цю можливість можна регулюванням режимів обробки і, відповідно, показниками якості поверхневого шару матеріалу деталей за рахунок динамічного навантаження.

Проблемність успішного використання динамічних методів ППД полягає в регулюванні показників якості поверхневого шару. Керування процесом динамічного деформування оброблюваної поверхні деталей дозволить підвищити коефіцієнт корисної дії процесу і збільшити точність регулювання отриманих показників якості по глибині матеріалу.

Тому, розробка зміцнюючих технологій, які сприяють підвищенню ресурсу сільськогосподарських машин, є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведено ряд досліджень [1, 2, 3] по обґрунтуванню вимог до зміцненого шару. У роботах вказано на необхідність отримання твердості і залишкових напружень по глибині поверхневого шару, що максимально відповідають експлуатаційним вимогам.

Перспективи створення поверхневого шару з рівномірним зміцненням засобами поверхневого пластичного деформування, а також формування твердості матеріалу і залишкових напружень до нашого часу залишаються не до кінця реалізованими. Здійснити дані можливості можна за рахунок регулювання режимів обробки і показників якості поверхневого шару [4].

Так як енергія удару, що витрачається на пластичну деформацію, має менші значення у порівнянні із статичною роботою, то для отримання зміцненого поверхневого шару із більшим зміцненням і глибиною, на нашу думку, доцільніше досліджувати ППД із динамічними навантаженнями [5].

Необхідно відмітити, що в літературі недостатньо розкриті питання застосування поверхневого пластичного деформування в ремонтному виробництві при відновленні робочих органів ґрунтообробних машин, що надають можливості проведення самостійних досліджень [6].

Постановка завдань. Метою роботи є підвищення довговічності деталей сільськогосподарських машин із використанням зміцнюючої технології пластичного деформування.

Викладення основного матеріалу. Низька якість поверхневого шару деталей машин, як правило, призводить до його руйнування та втрати працездатності виробів [1].

Дослідженнями [7] та ряду інших вчених доведено взаємозв'язок показників якості поверхневого шару з його експлуатаційними властивостями, які, зазвичай, характеризуються опором втоми і зносостійкістю.

Для оцінки якості поверхневого шару використовуються наступні показники: хімічний склад, структура, твердість, залишкові напруження, параметри шорсткості.

Твердість – одна із характеристик стану робочої поверхні. Від значення твердості залежать експлуатаційні властивості деталей. Залежно від виду і величини зношування матеріалу деталей визначається глибина поверхневого шару із підвищеною твердістю.

Низька твердість серцевини матеріалу деталі може призвести до підвищеної деформації зміцненого шару: чим твердіше серцевина, тим тонше може бути шар.

Зміцнення матеріалу поверхневим пластичним деформуванням дозволяє запобігти появі втомних тріщин, а також значно знизити шкідливий вплив зовнішніх дефектів і шорсткості поверхні.

На нашу думку, основне завдання при обробці поверхонь полягає у створенні мікрогеометрії, що забезпечує мінімальний знос під час припрацювання.

При забезпеченні якості поверхневого шару важливу роль відіграє вибір способу зміцнення поверхневим пластичним деформуванням. Технологія ППД дозволяє економити дорогі метали. Вона вирізняється досить високою точністю і стабільністю режимів, а також забезпечує плавну зміну залишкових напружень та мікротвердості по глибині оброблюваного шару деталі.

Зміна твердості поверхневого шару матеріалу після ППД залежить, перш за все, від властивостей оброблюваного матеріалу і режимів обробки.

Як показує аналіз способів ППД найбільші діапазони регулювання показників якості поверхневого шару мають способи, що використовують енергію удару, які забезпечують високу якість обробленої поверхні деталі і оптимальну гетерогенно зміцнену структуру.

Технологія зміцнення, що розробляється, повинна забезпечувати можливість регулювання показниками якості для підвищення надійності роботи машин.

Зміцнення поверхні деталей залежить від багатьох факторів, дослідження впливу кожного з яких має важливе значення для розробки технологічного процесу їх відновлення. Такими факторами є: амплітуда A , частота коливання робочого інструменту n і час зміцнення t .

В якості критеріїв оптимізації у багатофакторному експерименті були обрані знос по діаметру ΔD і товщині Δa нових дисків сошників із сталі 65Г з віброзміцненням робочої поверхні та відновлених приварюванням сегментів із сталі 45 з наплавкою сормайтотом і вібраційним зміцненням.

Результати експериментальних досліджень наведені в табл. 1.

В результаті проведеного регресійного аналізу отримані наступні рівняння взаємозв'язку основних параметрів вібраційного зміцнення:

– знос ΔD_1 нового диска із сталі 65Г:

$$\Delta D_1 = 1,3086 - 1,5709x_1 - 0,0005x_2 - 0,0343x_3 + 1,5531x_1^2 + 1,9 \cdot 10^{-7}x_2^2 + 0,0009x_3^2; \quad (1)$$

– знос Δa_1 нового диска із сталі 65Г:

$$\Delta a_1 = 1,3946 - 1,4865x_1 - 0,0005x_2 - 0,0447x_3 + 1,5019x_1^2 + 1,64 \cdot 10^{-7}x_2^2 + 0,001x_3^2; \quad (2)$$

– знос ΔD_2 відновленого диска приварюванням сегментів із сталі 45 з наплавкою сормайтотом:

$$\Delta D_2 = 1,3819 - 1,6535x_1 - 0,0005x_2 - 0,0393x_3 + 1,6531x_1^2 + 1,77 \cdot 10^{-7}x_2^2 + 0,0007x_3^2; \quad (3)$$

– знос Δa_2 відновленого диска приварюванням сегментів із сталі 45 з наплавкою сормайтотом:

$$\Delta a_2 = 1,4904 - 1,9109x_1 - 0,00065x_2 - 0,0344x_3 + 1,9201x_1^2 + 2,18 \cdot 10^{-7}x_2^2 + 0,0007x_3^2, \quad (4)$$

де x_1 – фактор амплітуди робочого органу; x_2 – фактор частоти коливання робочого органу; x_3 – фактор часу обробки.

Отримуємо математичні моделі зміни зносів по діаметру ΔD і товщині Δa нових дисків сошників із сталі 65Г з вібраційним зміцненням робочої поверхні та відновлених приварюванням сегментів із сталі 45 з наплавкою сормайтотом і вібраційним деформуванням:

$$\Delta D_1 = 1,3086 - 1,5709A - 0,0005n - 0,0343t + 1,5531A^2 + 1,9 \cdot 10^{-7}n^2 + 0,0009t^2; \quad (5)$$

$$\Delta a_1 = 1,3946 - 1,4865A - 0,0005n - 0,0447t + 1,5019A^2 + 1,64 \cdot 10^{-7}n^2 + 0,001t^2; \quad (6)$$

$$\Delta D_2 = 1,3819 - 1,6535A - 0,0005n - 0,0393t + 1,6531A^2 + 1,77 \cdot 10^{-7}n^2 + 0,0007t^2; \quad (7)$$

$$\Delta a_2 = 1,4904 - 1,9109A - 0,00065n - 0,0344t + 1,9201A^2 + 2,18 \cdot 10^{-7}n^2 + 0,0007t^2. \quad (8)$$

Рівняння регресій (5-8) дають можливість графічно побудувати поверхні відгуків залежності величини зносу від часу зміцнення t , амплітуди A і частоти n коливань робочого органу. Для

відновленого диска приваркою сегментів із сталі 45 з наплавкою сормайтотом і вібраційним зміцненням поверхні відгуків показані на рис. 1–3.

Таблиця 1.

Дані дослідження зношення дисків сошників

Номер досліджу	Амплітуда робочого органу A , мм	Частота робочого органу n , хв^{-1}	Час зміцнен ня t , с	Величина зносу I , мм			
				варіанти дисків			
				сталь 65Г		сталь 45 з наплавкою сормайтотом	
				ΔD_1	Δa_1	ΔD_2	Δa_2
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,25	700	10	0,46	0,50	0,49	0,55
2	0,25	700	20	0,34	0,41	0,37	0,40
3	0,25	700	30	0,45	0,46	0,48	0,52
4	0,25	1400	10	0,35	0,39	0,41	0,44
5	0,25	1400	20	0,23	0,28	0,27	0,32
6	0,25	1400	30	0,31	0,36	0,30	0,34
7	0,25	2100	10	0,49	0,52	0,51	0,56
8	0,25	2100	20	0,29	0,32	0,33	0,38
9	0,25	2100	30	0,41	0,43	0,45	0,49
10	0,5	700	10	0,34	0,46	0,37	0,46
11	0,5	700	20	0,22	0,27	0,26	0,34
12	0,5	700	30	0,30	0,35	0,33	0,39
13	0,5	1400	10	0,26	0,29	0,29	0,24
14	0,5	1400	20	0,27	0,31	0,31	0,34
15	0,5	1400	30	0,21	0,26	0,25	0,29
16	0,5	2100	10	0,33	0,37	0,37	0,44
17	0,5	2100	20	0,26	0,23	0,22	0,27
18	0,5	2100	30	0,28	0,34	0,32	0,39
19	0,75	700	10	0,43	0,47	0,48	0,54
20	0,75	700	20	0,34	0,38	0,40	0,44
21	0,75	700	30	0,42	0,47	0,48	0,55
22	0,75	1400	10	0,34	0,49	0,40	0,44
23	0,75	1400	20	0,28	0,32	0,34	0,39
24	0,75	1400	30	0,31	0,33	0,35	0,40
25	0,75	2100	10	0,50	0,53	0,52	0,58
26	0,75	2100	20	0,41	0,38	0,36	0,45
27	0,75	2100	30	0,46	0,49	0,47	0,50

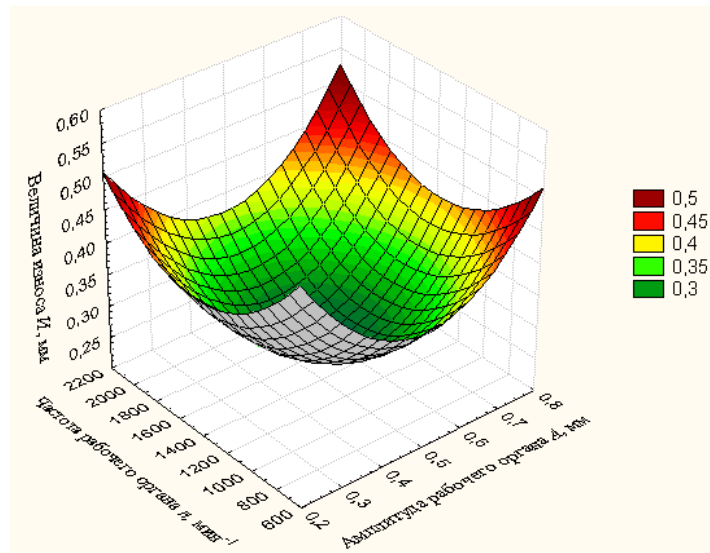


Рис. 1. Поверхня відгуку залежності величини зносу від амплітуди A і частоти n коливань робочого органу

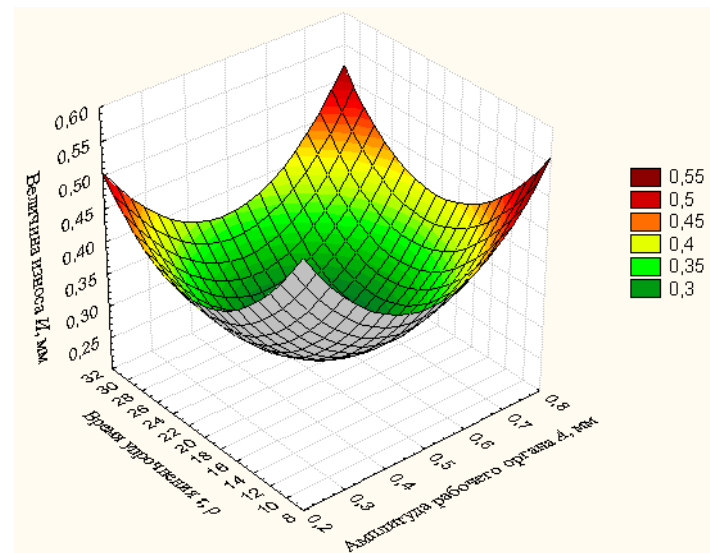


Рис. 2. Поверхня відгуку залежності величини зносу від часу зміцнення t і амплітуди A коливань робочого органу

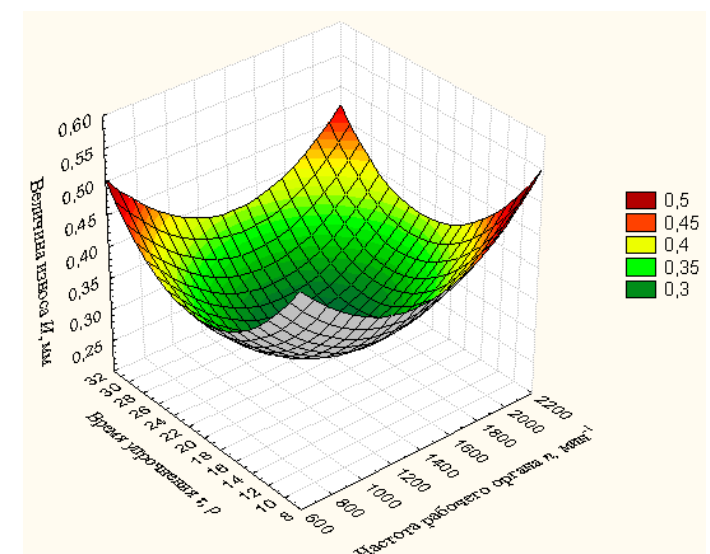


Рис. 3. Поверхня відгуку залежності величини зносу від часу зміцнення t і частоти n коливань робочого органу

Провівши дослідження на екстремуми отриманих поверхонь встановлено, що оптимальними режимами вібраційного зміцнення є: частота коливань робочого органу $n = 1400 \text{ хв}^{-1}$; амплітуда робочого органу $A = 0,5 \text{ мм}$; час зміцнення $t = 20 \text{ с}$.

При звичайному деформуванні зважаючи на постійний контакт оброблювального інструменту з оброблюваним металом траєкторії максимальних дотичних напружень розташовуються під кутом 90° до оброблюваної поверхні.

У процесі вібраційного деформування цей кут буде змінюватися від 45° до 90° і в момент відриву інструмента зусилля буде направлено до напрямку його руху під більшим кутом, що сприяє збільшенню деформації. Це, в свою чергу, викликає більше ущільнення оброблюваного матеріалу.

Після перетворення знаходимо:

$$\eta = \log_{\varepsilon} \frac{\sigma_s}{\sigma_T} \quad (9)$$

де σ_T – границя текучості; σ_s – напруження текучості матеріалу; η – показник деформаційного зміцнення (ступінь зміцнення).

Розрахункові значення ступеня зміцнення, що отримані по залежності (9), наведені в табл. 2.

Встановлено, що ступінь зміцнення матеріалу дисків сошників, відновлених приварюванням сегментів з подальшим наплавленням сормайт при вібраційному деформуванні в 1,48 рази більше, ніж при звичайній обробці.

Таблиця 2.

Розрахункові значення ступеня зміцнення

Матеріал	Ступінь зміцнення η	
	звичайне деформування	вібраційне деформування
Сталь 65Г	0,108	0,144
Сталь 65Г, сормайт	0,085	0,126

В результаті дії абразивного середовища відбувається інтенсивне зношування ріжучої кромки дисків сошників, що викликає їх затуплення та призводить до погіршення технологічного процесу посіву. Для визначення зносу дисків сошників використовувалися наступні їх варіанти: 1 – нові диски із сталі 65Г діаметром 300 мм; 2 – нові диски із сталі 65Г діаметром 300 мм з віброзміцненням робочої поверхні; 3 – відновлені приварюванням сегментів із сталі 45 з наплавкою сормайт і вібраційним зміцненням.

Приварку сегментів шириною 15 мм і товщиною 2,5 мм здійснювали на напівавтоматі А-765 дротом діаметром 2 мм марки 08ГС. Зміцнення проводили на вібраційній установці (кафедра технології та засобів механізації аграрного виробництва).

Дані лабораторних досліджень наведені в табл. 3.

Таблиця 3.

Дані зносу дисків під час стендових випробувань

Номер варіанта	Абсолютний знос діаметра, мм	Абсолютний знос товщини леза, мм
1	0,84	0,53
2	0,32	0,28
3	0,36	0,30

Дані стендових випробувань показали, що для вказаних варіантів найменшу величину зносу мали нові диски сошників із вібраційним зміцненням.

Проведені випробування дозволили визначити оптимальні значення діаметра $D = 300 \text{ мм}$ і товщини леза диска $a = 2,5 \text{ мм}$ та вибрати найбільш ефективний технологічний процес відновлення з використанням вібраційного зміцнення.

Висновки. Зносостійкість, а, отже, і ресурс дисків сошників залежить як від їх геометричних параметрів, так і, в значній мірі, від способу відновлення. Визначено основні параметри при відновленні деталей поверхневим пластичним деформуванням з використанням

механічних коливань оброблювального інструменту: частота $n = 1400 \text{ хв}^{-1}$; амплітуда $A = 0,5 \text{ мм}$; час зміцнення $t = 20 \text{ с}$. Встановлено, що ступінь зміцнення леза дисків сошників, відновлених приварюванням сегментів з подальшою наплавкою сормайтот при вібраційному деформуванні в 1,48 рази більше, ніж при звичайній обробці.

Список використаних джерел:

1. Овсеенко А. Н., Серебряков В. И., Гаек М. М. Технологическое обеспечение качества изделий машиностроения: монография. М.: Янус-К, 2003. 296 с.
2. Олейник Н. В., Кычин В. П., Луговской А. Л. Поверхностное динамическое упрочнение деталей машин. К.: Техника, 1984. 151 с.
3. Дудников А. А., Беловод А. И., Дудник В. В., Канівець А. В. Повышение долговечности деталей машин пластическим деформированием. Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за галузями знань «Машинобудування та металообробка», «Інженерна механіка», «Металургія та матеріалознавство»). Луцьк: ЛНТУ, 2011. Вип. 32. С. 128–131.
4. Афтаназів І. С., Гавриш А. П., Киричокта П. О. Підвищення надійності деталей машин поверхневим пластичним деформуванням: навч. посіб. Житомир: ЖІТІ, 2001. 516 с.
5. Скобло Т. С., Власовець В. М., Науменко А. О., Дудников И. А. Исследование влияния виброобработки на упрочнение структурных составляющих стали 10. Вісник Харківського національного технічного університету сільськогосподарства імені Петра Василенка. 2015. Вип. 158. С. 279–287.
6. Чепан П. А. Технологические основы упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. Минск: Наука и техника, 1981. 128 с.
7. Бандура В. Н., Деревенько И. А. Схема напряжённого состояния в поверхностном пластически деформированном слое. Вібрації та техніці і технологія. 2006. № 3 (45). С. 26–29.
8. Кислик В. А. Упрочнение и износостойкость. М.: Машиностроение, 1992. 287 с.

Стаття надійшла до редакції 15.03.2019

УДК 628.356

І.Б. Засідко¹, М.С. Полутренко², О.М. Мандрик²¹Державне агентство водних ресурсів України, м. Київ, Україна²Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна**ВИКОРИСТАННЯ ЦЕОЛІТУ І АНТРАЦИТУ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ПРИРОДНИХ ТА СТИЧНИХ ВОД ВІД ЙОНІВ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ**

Вміст важких металів у природних водах призводить до їх накопичення у різних органах і тканинах гідробіонтів, деякі важкі метали здатні передаватися по трофічних ланцюгах навіть до людини. У водоймах, які знаходяться під сильним антропогенним пресом, відбувається зниження видового різноманіття водних екосистем, зміна їх структури. Однією з причин забруднення природних вод важкими металами є скид у водні об'єкти недостатньо-очищених промислових і комунально-побутових стічних вод. Тому, проблема очищення природних і стічних вод від важких металів є актуальною. Для цього широко використовуються адсорбенти різної хімічної структури і перевагою адсорбентів, порівняно з іншими способами очищення, є добра поглинаюча здатність, прості засоби регенерації і можливість їх багаторазового використання. Однак, багато адсорбентів мають високу вартість, тому актуальним є пошук адсорбентів, які є доступними, недорогими та забезпечують високу ступінь очищення води.

В роботі досліджено адсорбційну здатність цеоліту Сокирницького родовища та антрациту Донецького басейну відносно іонів купруму та марганцю. Встановлено, що сорбенти адсорбують іони купруму та марганцю і більш ефективним є цеоліт, який з розчинів малих концентрацій (0,05-0,1 мг/дм³) повністю адсорбує ці іони, а антрацит адсорбує з цих розчинів 60-64 % іонів міді та 53-56 % іонів марганцю. Зі збільшенням концентрацій іонів у розчині, ефективність сорбції, як цеолітом, так і антрацитом, знижується. Досліджено вплив рН середовища та температури на ефективність адсорбції цеолітом та антрацитом іонів купруму і марганцю. Встановлено, що за статичних умов сорбція іонів купруму та марганцю найефективніше проходить у кислому середовищі, ефективна температура для цеоліту 20⁰С, для антрациту - 10⁰С.

Ключові слова: екосистеми; важкі метали; адсорбент; ступінь очищення; адсорбційна здатність

І.Б. Засідко¹, М.С. Полутренко², О.Н. Мандрык²¹ Государственное агентство водных ресурсов Украины, г. Киев, Украина² Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, г. Ивано-Франковск, Украина**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦЕОЛИТА И АНТРАЦИТА ДЛЯ ОЧИСТКИ ПРИРОДНЫХ И СТОЧНЫХ ВОД ОТ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ**

Содержание тяжелых металлов в природных водах приводит к их накоплению в разных органах и тканях гидробионтов, некоторые тяжелые металлы способны передаваться по трофическим цепочкам даже к человеку. В водных объектах, которые находятся под сильным антропогенным давлением, происходит снижение видового разнообразия водных экосистем, изменение их структуры. Одной из причин загрязнения природных вод тяжелыми металлами является сброс в водные объекты недостаточно-очищенных промышленных и коммунально-бытовых сточных вод. Поэтому, проблема очищения сточных вод от тяжелых металлов актуальна. Для этого широко используются адсорбенты разной химической структуры и преимуществом адсорбентов, по сравнению с другими методами очищения, является хорошая поглощательная способность, простые средства регенерации и возможность их многократного использования. Однако, много адсорбентов дорогостоящие, поэтому актуальным является поиск адсорбентов доступных, недорогих и способных обеспечить высокую степень очищения воды.

В работе исследовано адсорбционную способность цеолита Сокирницького месторождения и антрацита Донецького басейна по отношению к ионам меди и марганца. Установлено, что ионы меди и марганца адсорбируют оба сорбента, но более эффективным является цеолит, который с растворов малых концентраций (0,05-0,1 мг/дм³) полностью адсорбирует эти ионы. С увеличением концентрации ионов в растворе, эффективность сорбции, как цеолитом, так и антрацитом, снижается. Исследовано влияние рН среды и температуры на эффективность адсорбции цеолитом и антрацитом ионов меди и марганца. Установлено, что за статических условий сорбция ионов меди и марганца наиболее эффективно происходит в кислой среде, эффективная температура для цеолита 20⁰С, для антрацита - 10⁰С.

Ключевые слова: экосистемы; тяжелые металлы; адсорбент; степень очищения; адсорбционная способность

I. Zasidko¹, M. Polutrenko², O. Mandryk²¹ State Agency of Water Resources of Ukraine, Kyiv, Ukraine² Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine**USE OF ZEOLITE AND ANTHRACITE FOR NATURAL WATER AND EFFLUENTS CLEANING FROM HEAVY METALS IONS**

The content of heavy metals in natural waters leads to accumulation of thereof in different organs and tissues of hydrobionts, some heavy metals are capable of passing to humans by food chain. In the basins under a strong anthropogenic pressure, the specific diversity of water ecosystems is decreased and their structure changes. One of the reasons of natural

water pollution with heavy metals is discharge into waterbodies of industrial and communal effluents which are not sufficiently clean. Therefore, the problem of cleaning natural water and effluents from heavy metals is urgent. For this, they widely use sorbents of different chemical structure and the advantage of sorbents comparing to other methods of cleaning, is their good adsorbing capacity, simple means of regeneration and possibility of their multiple use. However, many sorbents have a very high cost, and therefore, the search of sorbents that would be available, cheap and highly efficient in terms of water cleaning is urgent.

In our work, we investigate the adsorption capacity of zeolite of Sokyrynske field and anthracite of Donetsk basin concerning cuprum and mangan ions. It has been established that the sorbents adsorb cuprum and mangan ions and the most effective is zeolite which completely adsorbs the mentioned ions from the low concentration solutions (0,05 – 0,1 mg/dm³), and anthracite adsorbs 60-64% of cuprum ions and 53-56% of mangan ions from the mentioned solutions. With increase of ion concentration in the solution, both zeolite and anthracite adsorption efficiency decreases. We have investigated environment pH and temperature influence on the adsorption efficiency of cuprum and mangan ions by zeolite and anthracite. It has been established that under static conditions the adsorption of cuprum and mangan ions is the most effective in acid environment with effective temperature 20°C for zeolite and 10°C for anthracite.

Key words: ecosystems, heavy metals, sorbents, degree of cleaning, adsorption capacity

Актуальність проблеми. Забруднення водойм важкими металами є актуальною екологічною проблемою. Причиною забруднення є порушення екологічних вимог підприємствами-водокористувачами та скид ними у водні об'єкти неочищених та недостатньо-очищених промислових і комунально-побутових стічних вод. Важкі метали, утворюючи комплексні неорганічних та органічні сполуки, сконцентровуються в 30-100 разів і цим створюють загрозу для питного та рибогосподарського водопостачання [1].

В окремих річках Прикарпаття, що протікають в промислових зонах, спостерігається значний вміст йонів купруму, а підземній воді – значний вміст йонів мангану. Так, в 2016 році в річку Бистриця підприємствами скинуто 152 кг купруму, в річку Ворона – 71 кг мангану. При проведенні досліджень води зі свердловини для питного водопостачання, встановлено, що вміст йонів мангану в 10 разів вище ГДК [2]. Високий рівень забруднення природних та стічних вод важкими металами вимагає вдосконалення існуючих та пошуку нових методів водоочищення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Для очищення стічних вод від важких металів застосовують реагентні, іонообмінні, електрохімічні та адсорбційні методи [3-10]. Перспективним є адсорбційний метод. Сорбентами слугують різні іонообмінні матеріали: активоване вугілля, силікагелі, глини [11-17]. Проте, актуальним є дослідження природних адсорбентів, а саме цеоліту та антрациту. Завдяки пористій структурі ці адсорбенти мають високу адсорбційну здатність і використовуються для утилізації різноманітних відходів, розділення та визначення токсичних речовин і для адсорбції важких металів із природних та стічних вод [18-21].

З огляду на вищенаведене, **метою роботи** є дослідження можливості використання природного цеоліту Сокирицького родовища та антрациту Донецького басейну для очищення природних та стічних вод комунальних підприємств від йонів важких металів, зокрема визначення впливу концентрації йонів купруму і мангану на ефективність адсорбції, дослідження впливу рН середовища і температури на адсорбційну здатність цеоліту та антрациту.

Методика експерименту.

Визначення адсорбційної здатності цеоліту та антрациту проводили на приготуваних із стандартних зразків розчинах купрум нітрату та манган нітрату концентрації 0,05 мг/дм³, 0,1 мг/дм³, 1 мг/дм³, 5 мг/дм³ та 10 мг/дм³.

Дослідження проводили наступним чином: у конічні колби поміщали по 1 г адсорбентів і 250 см³ розчину з йонами Cu²⁺ та Mn²⁺. Отримані розчини перемішували і залишали в стані спокою, повторюючи такі операції через кожних 12 годин. Через 48 годин від початку досліду розчини фільтрували через беззольний фільтр «синя стрічка» і проводили вимірювання залишкової концентрації йонів фотометричним методом на приладі КФК-3-01 (табл.1, 2, 3). Досліди проводили при температурі 20 ± 1⁰ С за статичних умов.

Ступінь сорбції (поглинання) (S,%) йонів визначали за формулою:

$$S = C_0 - C_i / C_0 \cdot 100\%, \text{ де:}$$

C₀ – вихідна концентрація визначуваного йона в розчині, мг/дм³

C_i - залишкова концентрація визначуваного йона в розчині, мг/дм³

Результати експериментальних досліджень та обговорення

Визначення адсорбційної здатності цеоліту та антрациту по відношенню до йонів купруму та мангану проводили з використанням 1 г адсорбентів, фракції з діаметром зерен 0,125 мм - 0,5 мм за 48 годин. Результати досліджень наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Адсорбція іонів купруму і мангану цеолітом та антрацитом

№ п/п	Концентрація іонів Cu^{2+} та Mn^{2+} у вихідному розчині, мг/дм^3	Залишкова концентрація іонів в розчині, мг/дм^3			
		Адсорбція цеолітом		Адсорбція антрацитом	
		Cu^{2+}	Mn^{2+}	Cu^{2+}	Mn^{2+}
1	0,05	0	0	0,018	0,022
2	0,1	0	0	0,040	0,047
3	1,0	0,025	0,41	0,37	0,50
4	5,0	2,54	3,58	2,98	3,70
5	10,0	7,24	8,38	7,67	8,66

Аналіз даних з табл.1 вказує, що в області малих концентрацій (0,05 - 0,1 мг/дм^3) за 48 годин цеоліт повністю адсорбує йони купруму та мангану. Зі збільшенням концентрації іонів у розчині, ефективність сорбції знижується. Концентрація іонів купруму та мангану 1,0 мг/дм^3 , при адсорбції цеолітом, через 48 годин зменшилася на 97,5 %, та 59 %, концентрація іонів купруму та мангану 5,0 мг/дм^3 зменшилася на 50,8 % та 28,4 %, а концентрація 10,0 мг/дм^3 - на 23,3 % та 13,4 %.

При адсорбції антрацитом спостерігається інша картина. Навіть з розчинів малих концентрацій йони адсорбуються антрацитом не повністю. Концентрація іонів купруму та мангану 0,05 мг/дм^3 через 48 годин зменшилася на 64 %, та 56 %, концентрація іонів 0,1 мг/дм^3 зменшилася на 60 %, та 53 %. При збільшенні концентрації іонів у розчині, ефективність сорбції теж знижується. Так, концентрація іонів купруму та мангану 1,0 мг/дм^3 зменшилася на 63 %, та 50 %, концентрація іонів 5,0 мг/дм^3 зменшилася на 40,4 % та 26 %, а концентрація 10,0 мг/дм^3 - на 27,6 % та 16,2 %.

Аналіз ступеня сорбції іонів міді та мангану цеолітом і антрацитом підтверджує більшу ефективність адсорбції цеолітом, особливо з розчинів малих концентрацій (табл.2, рис.1-2).

Таблиця 2

Ступінь сорбції іонів купруму і мангану цеолітом та антрацитом

№ п/п	Концентрація іонів Cu^{2+} та Mn^{2+} у вихідному розчині, мг/дм^3	Ступінь сорбції, S,%			
		Адсорбція цеолітом		Адсорбція антрацитом	
		Cu^{2+}	Mn^{2+}	Cu^{2+}	Mn^{2+}
1	0,05	100	100	64	56
2	0,1	100	100	60	53
3	1,0	97,5	59	63	50
4	5,0	50,8	28,4	40,4	26
5	10,0	27,6	16,2	23,3	13,4

В області малих концентрацій (0,05 - 0,1) мг/дм^3 ступінь сорбції іонів Cu^{2+} та Mn^{2+} цеолітом становить 100 %, антрацитом тільки 64 % - 60 % для іонів Cu^{2+} та 56 % - 53 % для іонів Mn^{2+} . Для концентрацій іонів 1 мг/дм^3 - 10 мг/дм^3 ступінь сорбції іонів цеолітом вищий в 1,5 - 1,2 рази для іонів купруму та в 1,2- 1,1 рази для іонів мангану.

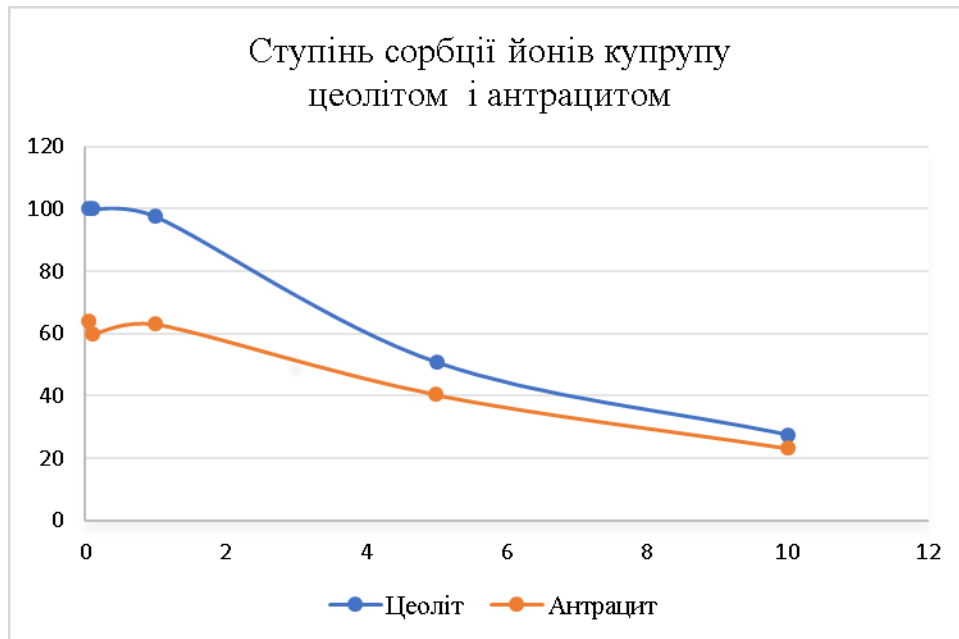


Рис.1. Вплив природи сорбента на ступінь сорбції йонів купруму

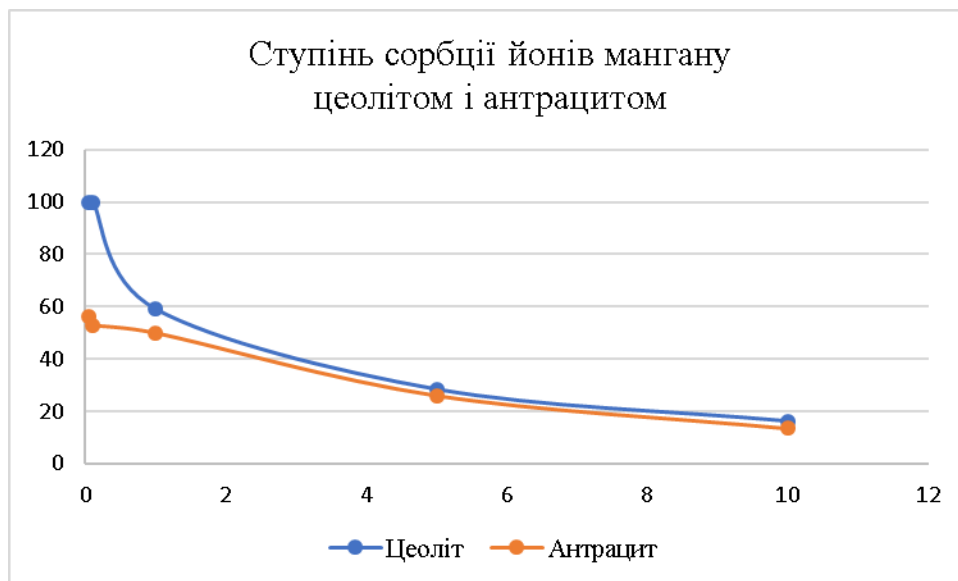


Рис.2. Вплив природи сорбента на ступінь сорбції йонів мангану

Визначення впливу рН середовища на здатність цеоліту та антрациту поглинати йони купруму та мангану проводили на розчинах з концентрацією цих йонів 1 мг/дм^3 . Дослідження проводили при рН 3,05, 7,0 та 10,4 для йонів купруму і при рН 3,0, 7,0 та 10,1 для йонів мангану, використовуючи для одержання лужного середовища 1N розчин NaOH (табл.3). Встановлення відповідного значення рН середовища проводили з допомогою рН-метра- іономіра Експерт-001.

Таблиця 3

Вплив рН середовища на адсорбцію цеолітом та антрацитом йонів купруму та мангану з розчинів концентрацією 1,0 мг/дм³

№ дослідю	Йони важких металів	рН розчинів	Залишкова концентрація йонів при адсорбції цеолітом, мг/дм ³	Ступінь сорбції йонів цеолітом, %	Залишкова концентрація йонів при адсорбції антрацитом, мг/дм ³	Ступінь сорбції йонів антрацитом %
1	Cu ²⁺	3,05	0,025	97,5	0,37	63
2		7,0	1,0	0	1,0	0
3		10,4	1,0	0	1,0	0
4	Mn ²⁺	3,0	0,41	59	0,50	50
5		7,0	1,0	0	1,0	0
6		10,1	1,0	0	1,0	0

Аналіз даних табл. 3 показує, що за статичних умов цеоліт і антрацит найефективніше адсорбують йони Cu²⁺ та Mn²⁺ у кислому середовищі, проте в порівняльних умовах сорбційна здатність цеоліту є вищою, порівняно з антрацитом. В кислому середовищі аквайони Me²⁺ можуть ефективно обмінюватись з рухливими катіонами адсорбента. Зі збільшенням рН частка йонних гідроксокомплексів збільшується, йони металів у формі Me(OH)⁽ⁿ⁻¹⁾⁺ мають значно більший радіус гідратованого йона і, як наслідок, недостатньо ефективно проникають у пори адсорбента. У нейтральному та лужному середовищі, з появою гідроксильних форм, адсорбція Cu²⁺ та Mn²⁺ відсутня.

Аналізуючи ступінь сорбції цеолітом та антрацитом йонів купруму і мангану в кислому середовищі можна стверджувати, що цеоліт є ефективнішим адсорбентом.

Для визначення впливу температури на здатність цеоліту і антрациту поглинати йони купруму та мангану проводили дослідження з розчинами концентрації 1 мг/дм³. Стакани з досліджуваними розчинами поміщали в хладотермостат ХТ і витримували 48 годин при температурі 2⁰С, 10⁰С, 20⁰С, 30⁰С, перемішуючи розчини кожні 12 годин. (табл. 4).

Таблиця 4

Вплив температури середовища на адсорбцію цеолітом та антрацитом йонів купруму і мангану

Концентрація йонів у вихідному розчині, мг/дм ³		Залишкова концентрація йонів в розчині, мг/дм ³							
		Адсорбція цеолітом				Адсорбція антрацитом			
		Температура, ⁰ С							
		2	10	20	30	2	10	20	30
Cu ²⁺	1,0	0,270	0,029	0,025	0,045	0,54	0,35	0,37	0,42
Mn ²⁺	1,0	1,0	0,57	0,41	0,70	1,0	0,48	0,50	0,56

Аналіз даних з табл.4 вказує, що адсорбція цеолітом йонів купруму та мангану є максимальною при температурі 20⁰С. Вміст йонів купруму концентрації 1,0 мг/дм³ при 20⁰С зменшився на 97,5 %, вміст йонів мангану – на 59 %.

Адсорбція антрацитом найефективніше проходить при температурі 10 ⁰С. Вміст йонів купруму концентрації 1,0 мг/дм³ при 10⁰С зменшився на 65 %, вміст йонів мангану – на 52 %.

Таблиця 5

Ступінь сорбції цеолітом та антрацитом іонів купруму і мангану при різних температурах

№ п/п	Концентрація іонів у вихідному розчині, мг/дм ³		Ступінь сорбції, %							
			Адсорбція цеолітом				Адсорбція антрацитом			
			Температура, °С							
			2	10	20	30	2	10	20	30
1	Cu ²⁺	1,0	73	97,1	97,5	95,5	46	65	63	58
2	Mn ²⁺	1,0	0,0	43	59	30	0,0	52	50	44

Варто зазначити, що при використанні цеоліту ступінь сорбції іонів Cu²⁺ та Mn²⁺ в 1,5 – 1,1 рази вищий, ніж при використанні антрациту.

Порівняльний аналіз даних по адсорбції іонів при різних температурах показав, що вплив температури на процес адсорбції є неоднозначним. Відомо, що адсорбція – екзотермічний процес і його протіканню мало б сприяти зниження температури, адже з ростом температури такі процеси погіршуються. Однак, при сорбції іонів, розміри яких близькі до ефективних розмірів пор сорбентів, проникнення цих іонів в пори залежить від їх кінетичної енергії [27]. Крім того, для кожної температури існує свій стан рівноваги між адсорбцією і десорбцією. В нашому випадку встановлено, що за статичних умов іони Cu²⁺ та Mn²⁺ цеолітом найефективніше адсорбуються при температурі 20⁰ С, а антрацитом – при температурі 10⁰ С.

Висновки:

1 Встановлена можливість використання цеоліту Сокирницького родовища та антрациту Донецького басейну для очищення природних та стічних вод комунальних підприємств від іонів купруму та мангану.

2 Досліджено, що сорбційна здатність цеоліту є вищою порівняно з антрацитом щодо іонів купруму та мангану. Зі збільшенням концентрації іонів у розчині, ефективність сорбції знижується.

3 Досліджено вплив рН розчину на ефективність адсорбції іонів купруму і мангану цеолітом та антрацитом. Встановлено, що максимальний ступінь адсорбції іонів купруму і мангану досягається в кислому середовищі.

4 Досліджено вплив температури на ефективність адсорбції іонів купруму і мангану. Встановлено, що максимальний ступінь сорбції цеолітом іонів купруму та мангану досягається при температурі 20⁰ С, антрацитом - при температурі 10⁰ С.

Список використаних джерел:

- 1 Тимофеева С.С. Состояние и перспективы развития методов очищения сточных вод красильно-отделочного производства / С.С.Тимофеева // Химия и технология воды.-1991. – Т.13, № 6. – С.555-569.
- 2 Водні ресурси Івано-Франківської області. Звіт Івано-Франківського обласного управління водних ресурсів, 2017.
- 3 Жуков А.И. Методы очистки производственных сточных вод / А.И.Жуков, И.Л.Монгайт, И.Д. Родзилер; Справочное пособие.- М. : Стройиздат – 1977. –С.173-201.
- 4 Зинатулина Н.М. Физико-химические методы обезвреживания сточных вод / Н.М. Зинатулина, Г.И. Ханина, О.А. Коваленко, Н.В. Гудзь // Хімічна промисловість України - №1-2, 2000. – С.93-98.
- 5 Максін В.И. Оценка взаимного влияния ионов на реагентную очистку сточных вод гальванических производств // ХитВ. –1997. – т.19. № 6. – С.579-587 .
- 6 Запольский А.К. Комплексная переработка сточных вод гальванического производства / Запольский А.К., Образцов В.В. - К: Техника, 1989. – С.167
- 7 Кочетов Г.М. Комплексная очистка сточных вод промышленных предприятий с регенерацией тяжелых металлов / Г.М. Кочетов // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2000. – № 4. – С.41-43
- 8 Ожередова М.А. Установка обезвреживания никельсодержащих промывных вод / М.А.Ожередова, А.В.Суворин, А.Д.Тюлбинов //Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2006. – № 5. – С.72-75
- 9 Криворучко А.П., Пономарев М.И., Корнилович Б.Ю. Очистка медьсодержащих сточных вод электродиализом. // ХитВ.-1997-т.19, №6. - С.622-625.

- 10 Гребенюк В.Д. Состояние и перспективы развития метод очистки сточных вод гальванических производств / Гребенюк В.Д., Соболевская Т.Т., Махно А.Г. // ХИТВ.-1989-т. 11, №5-С. 407-421.
- 11 Третинник В.Ю. Природные дисперсные минералы Украины и перспективы их использования в технологии водоочистки / В.Ю. // Химия и технология воды. –1998. –Т.20. – № 2. – С.183-191.
- 12 Мальований М.С. Адсорбційні технології забезпечення техногенної безпеки шляхом використання природних дисперсних сорбентів / [М.С. Мальований, З.С. Одноріг, М.І. Санніков, І.М. Петрушка та інші] // Проблеми економії енергії: III міжнар. наук-парку. конф, 10-14 жовтня 2001р.: зб. мат. - 2001 –С.246-247.
- 13 Мальований М.С. Очищення стічних вод природними дисперсними сорбентами: монографія / М.С. Мальований, І.М. Петрушка. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2012. – С.80.
- 14 Дрий В.А. Глинистые минералы / Дрий В.А., Косовская А.Г. – М.: Мир, 1980. – С.204.
- 15 Круглицкий Н.Н. Физико-химические основы регулирования свойств дисперсий глинистых минералов / Н.Н. Круглицкий. - Киев: 1968. – С.456.
- 16 Степова К.В. Хемосорбція гідроген сульфідом модифікованими природними сорбентами: автореф. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.07.08 – « Процеси та обладнання хімічної технології » / К.В. Степова. – Львів.: 2011. – С.20.
- 17 Цицишвили Г.В. Природные цеолиты / Г.В. Цицишвили, Т.Г. Андроникашвили, Г.Н.Киров, Л.Д. Фелизова. – М.: Химия, 1985. – 224с.
- 18 Тарасевич Ю.И. Природные сорбенты в процессах очистки воды. – К.: Наукова думка, 1981. – С.302
- 19 Брек Д. Цеолитовые молекулярные сита / Д. Брек. – М. : Мир, 1976. – С.778.
- 20 Scott M., Kathleen A., Prabir K. Handbook of zeolite science and technology, eds. CRC Press, 2003, p.16
- 21 Киселев А.В. Поверхностные явления и адсорбция / А.В.Киселев, Я.И.Герасимов // Курс физической химии. – М.: Госхимиздат, 1963. – Т.1.– С.624.

Стаття надійшла до редакції 04.02.2019

УДК 648.18

E.V. Ivanyuk, M.P. Osmuk*National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»***UTILIZATION OF INDUSTRIAL WASTE IN THE TECHNOLOGY OF SYNTHESIS OF
INORGANIC PIGMENTS IN DIFFERENT OXIDE SYSTEMS**

It was established that industrial waste high-iron Red Sludge, SiC-sludge, medium-temperature STK-1, high Al-containing - spent catalysts AKM, and highly zinc-containing - spent absorber of hydrogen sulfide NIAP-02-05 can be used as a feedstock for synthesis of inorganic pigments of various colors with the equivalent replacement of pure non-ferrous oxides by sludges.

Key words: Industrial waste, environmental pollutants, pigments, color modifier, charge mineralizer, decor, spinel structures, synthesizing roasting.

О.В. Іванюк, М.П. Осьмук*Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»***УТИЛІЗАЦІЯ ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ В ТЕХНОЛОГІЇ СИНТЕЗУ НЕОРГАНІЧНИХ
ПІГМЕНТІВ У РІЗНИХ ОКСИДНИХ СИСТЕМАХ**

Встановлено, що промислові відходи: високозалістий Червоний шлам, SiC-шлам, відпрацьовані каталізатори середньотемпературний STK-1, високоалюмовмісні АКМ, та високоцинковмісний поглинач сірководню - НИАП-02-05 можна використати як вихідну сировину для синтезу неорганічних пігментів різноманітної кольорової гами з еквівалентною заміною чистих оксидів кольороутворюючих металів на відходи.

Ключові слова: Промислові відходи, політанти навколишнього середовища, пігменти, модифікатори кольору, мінералізатори шихти, декор, шпінельні структури, синтезуючий обпал.

Е.В. Иванюк, М.П. Осмук*Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»***УТИЛИЗАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ В ТЕХНОЛОГИИ СИНТЕЗА
НЕОРГАНИЧЕСКИХ ПИГМЕНТОВ В РАЗНЫХ ОКСИДНЫХ СИСТЕМАХ**

Установлено, что промышленные отходы высокожелезистые Красный шлам, SiC-шлам, среднетемпературный STK-1, высокоалюмосодержащие – отработанные катализаторы АКМ, и высокоцинкосодеждающие – отработанный поглотитель сероводорода НИАП-02-05 можно использовать в качестве исходного сырья для синтеза неорганических пигментов разнообразной цветовой гаммы с эквивалентной заменой чистых оксидов цветообразующих металлов на отходы.

Ключевые слова: Промышленные отходы, поллютанты окружающей среды, пигменты, модификатор цвета, минерализатор шихты, декор, шпинельные структуры, синтезирующий обжиг.

Introduction. Industrial waste of various production is the main source of the economy of the raw, using them in the synthesis of inorganic can reduce the pollution of the atmosphere, soils, underground and surface water during elimination, elimination and preservation. In this aspect, industrial waste can be classified as secondary «deposits» of zinc, chromium (III), ferrum(III), aluminium, vanadium, zircon, titanium, etc. It raises the problem of rational use of secondary mineral resources and deeper processing of raw materials and a reduction wastes of production, and also requires efficient technologies for their utilization.

Currently, as the basis for the production of heat-resistant paints is used the inorganic heat resistant pigments, that were obtained by sintering pure metal oxides during reactions in solid phases. The use of pure oxides makes the price of production higher, that is why the problem of finding alternative sources of pigments and using them instead of pure oxides of zinc, chromium, Ferrum, titanium, vanadium, etc is actual.

Analysis of recent researches and publications. The analysis of literary sources shows that industrial waste from heat and power engineering, chemical, woodworking, textile, metallurgy and other industries is mainly used for the production of building materials [1-5]. But the methods of recycling, that were developed, do not foresee the use of the most valuable specific properties of metal compounds that contain waste. For example, the proximity of their composition to the inorganic pigment charge. It predicts the possibility of replacing pure oxides of metals from chromium (III), ferrum (III), aluminum, titanium, zinc in pigments into industrial waste. The literature also does not systematize the scientific and

technological justification for the use of waste as a raw material for the synthesis of pigments. Therefore, it is important to establish the possibility of using different types of waste in the production of pigments of a variety of color schemes.

Previously unsettled problem constituent. Synthesize inorganic pigments with the use of industrial wastes of various manufacturing enterprises, which have clear normative documents of Ukraine (DSTU 2999-95, DSTU 2419-94).

In accordance with the data the aim of this work is the need for selection and passage of spent catalysts and sinks as a raw materials – wastes of the chemical and metallurgical industry, red mud – wastes of alumina production, SiC-sludge, which containing the components of iron oxide, titanium, zinc, aluminum, cobalt, and molybdenum. These wastes give the principle possibility of full or partial replacement of active oxides of metals in charges of inorganic suspect environmental problems and misuse of the target product.

The main material. This work proposes the utilization of industrial waste in the technology of production of inorganic pigments of various oxide systems.

The chemical composition of the samples of industrial waste selected for the study is shown in Table 1.

Table 1

Chemical composition of samples of industrial waste used for trial synthesis of inorganic pigments

Components of sludges	The mass fraction of components in the sludge, %.				
	Red slime	SiC- slime	Catalyst AKM	Catalyst NIAP-02-05	Catalyst STK-1
Al ₂ O ₃	18.0		84.0		
Fe ₂ O ₃	55.0	96.47			92.0
ZnO		0.95		90.0	
MgO				10.0	
Cr ₂ O ₃					8.0
TiO ₂	6.0				
MoO ₃			12.0		
CaO	5.0				
Na ₂ O	4.0				
CuO		2.56			
SiO ₂	8.0				
PbO		0.02			
CoO			4.0		
loss on firing	4.0				

Based on the oxide composition, the wastes used to replace pure oxides in the pigment charge can be classified as high-ferro-content (Red-slime, SiC-slime, medium-temperature catalyst STK-1), high-alumina (activated catalysts AKM) and highly zinc-containing (spent sinks of hydrogen sulfide NIAP - 02-05). High-alumina and highly zinc-compatible - suitable for use in the synthesis of color pigments corresponding to absorption in the long-wavelength spectrum, that is, blue, green, in the oxide system Cr₂O₃- Co₂O₃-ZnO-Al₂O₃, and high-ferro-content - for the short-wave absorption range, respectively, for brown, choristy, terracotta shades in the oxide system - Cr₂O₃- Fe₂O₃-ZnO-Al₂O₃.

In the synthesis of inorganic pigments based on industrial waste, it is necessary to achieve the obtaining of certain coloring and technological properties, and the maximum content of waste in the composition of the charge. Industrial pigments with a mass fraction were selected according to the standard samples by color and technological properties, %: choristy Cr₂O₃ – 16.0, Fe₂O₃ - 15.0, Al₂O₃ - 9.0, ZnO- 60.0; brown Cr₂O₃ – 16.8, Fe₂O₃ - 15.7, Al₂O₃ – 15.1, ZnO- 52.4; blue Cr₂O₃ – 33.0, Co₂O₃ - 13.0, Al₂O₃ - 30.0, ZnO- 20.0, H₃BO₃ – 4.0; green Cr₂O₃ – 50.0, Al₂O₃ - 40.0, H₃BO₃ – 10.0 [6-9].

The quantities of pigments synthesized in the work and their color properties with the use of industrial waste are presented in Table 2

Table 2

Composition and characteristics of pigments of various oxide systems

Index of pigment	Components of the charge, %					Characteristics of pigment		
	Sludge	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	ZnO	Al ₂ O ₃	Color	Colorful decor properties	
							porcelain	faience
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Raw – SiC-slime. Color – ocher Oxide system: Cr₂O₃- Fe₂O₃-ZnO-Al₂O₃								
Industrial	-	16,0	15,0	60,0	9,0	Ocher-brown	Brown light	Brown-ocher
B1	58.0	6.0	-	27.0	9.0	Ocher-brown dark	Brown	Ocher
B2	53.0	7.0	-	31.0	9.0	Dark ocher with a brown undertone	Brown	Ocher-brown
B3	50.0	8.0	-	33.0	9.0	Ocher dark	Brown	Red-ocher
B4	43.0	9.0	-	43.0	5.0	Ocher	Ocher-brown	Ocher dark
B5	40.0	9.0	-	46.0	5.0	Ocher	Ocher-brown	Brown-ocher
B6	40.0	9.0	-	41.0	10.0	Ocher with a brown undertone	Brown	Ocher
B7	50.0	7.0	-	36.0	7.0	Ocher saturated	Ocher	Ocher dark
B8	50.0	7.0	-	38.0	5.0	Ocher dark	Ocher	Ocher dark
Raw material - NIAP 02-05 / STK-1. Color - brownish-green Oxide system: Cr₂O₃- Fe₂O₃-ZnO								
Industrial	-	16.8	15.7	52.4	15.1	Brown	Chocolate brown saturated	Brown
1	2	3	4	5	6	7	8	9
K1	90.0/10.0	-	-	-	-	Light Brown	Brown	Brown
K2	30.0/30.	40.0	-	-	-	Brown saturated	Brown	Brown
K3	25.0/30.	45.0	-	-	-	Brown	Light Brown	Light Brown
K4	20.0/-	50.0	30.0	-	-	Brown	Brownish green	Brownish green
K5	15.0/-	55.0	30.0	-	-	Light Brown	Brownish green	Brownish green
K6	10.0/30.	60.0	-	-	-	Green-brown	Green-brown	Green-brown
K7	5.0/30.0	65.0	-	-	-	Dark olive	Olive	Olive
Raw material-AKM. Color blue-sky-blue Oxide system Cr₂O₃- Co₂O₃-ZnO-Al₂O₃								
Industrial	H ₃ BO ₃ -4.0	33.0	Co ₂ O ₃ -13.0	20.0	30.0	Blue	Blue	Blue

C1	90.0	-	TiO ₂ - 10.0	-	-	Grey	Grey light	Grey
C2	90.0	-	MgO- 10.0			Sky-blue	Blue light	Sky-blue
C3	80.0	-	CaO- 10.0	10.0	-	Sky-blue	Intensively blue	Sky-blue
C4	97.5	-	Co ₂ O ₃ - 2.5	-	-	Blue	Blue light	Blue
C5	70.0	MgO 10.0	Co ₂ O ₃ - 12.0	8.0	-	Blue	Intensively blue	Intensively blue
C6	88.5	1.5	MgO 10.0	-	-	Sky-blue	Sky-blue dark	Sky-blue
C7	95.0	5.0	-			Grey	Grey	Grey
Raw material - Red slime. Color -brown Oxide system Cr₂O₃- Fe₂O₃-ZnO-Al₂O₃								
Industrial	-	16.8	15.7	52.4	15.1	Brown	Chocolate saturated	Brown
Ч1	55.0	25.0	-	20.0	-	Brown	Chocolate- brown	Chocolate- brown
Ч2	50.0	18.0	TiO ₂ - 3.0	23.0	-	Brown	Coffee- brown	Light brown
Ч3	70.0	10.0	-	20.0	-	Brown dark	Black- browm	Brown dark
Ч4	63.0	18.0	-	19.0	-	Brown dark	Red-Brown	Brown dark
Ч5	50.0	25.0	-	25.0	-	Brown	Brown saturated	Brown saturated
Ч6	47.0	25.0	-	28.0	-	Brown	Brown saturated	Brown
Ч7	45.0	25.0	-	30.0	-	Ligh brown	Ligh brown	Ligh brown

Grinding and mixing components in pigments (waste and pure metal oxides) were carried out wet, rubbing the charged mixture for 30 minutes. The temperature of the burning in the manufacture of pigments should not be lower than the temperature of decorative burning products [10]. Thus, the temperature of the synthesis of choristy and brown pigments is usually 1550 K, and the blue and turquoise pigments are 1620 K. The pigment bonds were burned for 14-15 hours in accordance with the set temperature curve: preliminary heating at a rate of 4 K / min to 900 K; the main heating at which the spinel-chromophores are formed, at a rate of 2 K / min in the range of 900 ÷ 1620 K or 900-1500 K, depending on the charge composition of the synthesized pigment. Exposure at a maximum temperature of 20-30 minutes and cooling of synthesized pigments 5-6 hours in the furnace environment. The uniformity of the temperature field in the synthesis of roughness is ensured by the optimum loading thickness of the charge.

A weakly-containing medium (carbon monoxide (II) oxide content in the gas environment $\approx 1.2\%$, air excess coefficient $\kappa = 0.98$) is used for the spillage of pigments with high content of chromium (III) oxide (more than 30%). For the spillage of pigments containing ferrum (III), cobalt (III) oxides use an oxidizing medium (excess air ratio $\kappa = 1.2$).

Regarding the degree of shredding of charge materials, in order to provide the necessary contact surface of phases in the solid phase synthesis of pigments at specified temperatures, the initial mixture of components, after grinding, must pass without a residue through a sieve with a grid of 0315 (100 hole/cm²).

As can be seen from Table 2, as a result of synthesis, pigments with given color characteristics - blue, green, coral and brown-coffee corresponding to DSTU 2999-95, DSTU 2419-94 - were obtained as a result of synthesis.

The cobalt (III) oxide, chromium (III) oxide, aluminum (III) oxide, titanium, nickel and manganese oxides were used as modifiers in the system based on spent catalyst such as NIAP and AKM, Red-slime as modifiers.

Synthetic pigments of different colors - from blue-violet, violet to red-brown and olive-green. In the main pigments are obtained loose structure, the decorative surface on porcelain and earthenware corresponds to the current standards for shine, the contour of the figure is clear.

The analysis of the results indicated the promising use of NIAP-02-05, the main component of which is zinc oxide, and STK-1, as a source of ferrum (III) oxide. But the negative point is that the spent sinks of hydrogen sulfide NIAP-02-05 contain about 20% of sulfur, because in the methane conversion and purification of natural gas from sulfur compounds absorption of hydrogen sulfide occurs by the reaction: $ZnO + H_2S = ZnS + H_2O$. Before using the spent NIAP-02-05 as raw material in pigment charge, it is necessary to remove the sulfur compounds by preliminary burning it at a temperature of 1073-1273 K in an oxidizing medium: $2ZnS + 3O_2 = 2ZnO + 2SO_2$.

At simultaneous use of high-iron catalyst STK-1 and high-zinc-containing NIAP-02-05 and modifiers of chromium (III), aluminum (III) oxides pigment of brown scale is obtained. This achieves practically 100% saving of pure oxides of ferrum (III) and zinc. Color of decor from chocolate brown (samples K1, K2) to green-brown (samples K4-K7). STK-1 and NIAP-02-05 contain up to 92% iron (III) oxide and 8% chromium (III) oxide, 90% zinc oxide and 10% magnesium oxide. This amount of iron (III), chromium (III), zinc and magnesium oxides is sufficient for the formation of spinelide-chromophore on the basis of iron (III), chromium (III) $Zn_{1-x}Fe_y[Fe_xFe_{2-y}]$, $Zn_{1-x}Cr_y[Fe_xCr_{2-y}]$ and magnesium spinelite based magnesium compounds $Mg_{1-x-y}Zn_{n-y}Fe_{x+y}[Fe_{2-x-y}Mg_xZn_y]O_4$ that provide saturation to the shades of brown pigments. Insufficient amount of chromium (III) oxide, necessary for the formation of zinc-iron-chrome dyed spinel, can be offset by pure chromium (III) oxide.

Non-traditional raw materials for the synthesis of blue-and-blue pigments are spent cobalt-containing catalysts of hydrogenation type AKM, which are used in the processes of hydro-purification of natural gas and petroleum products from sulfur compounds in the technological processes of ammonia production and oil refining.

The catalyst of AKM in the main technological processes practically does not undergo changes, but it can adsorb organic compounds on its surface, which did not enter the main reaction. Therefore, the preliminary heat treatment of the alumina-cobalt-molybdenum activated catalyst at a temperature of 1000-1300K will ensure the full suitability of the catalyst for the synthesis of pigments.

Aluminum and chromium (III) oxides were used as modifiers and mineralizers for the blue-and-blue series of pigments. Soft pink blue powders were obtained, which are technological in manufacturing. The decorating swindle gives the porcelain and faience surface colors from light gray, blue to blue.

Subformation to the catalyst AKM separately for 10% zinc oxide and calcium oxide (sample C3) no significant changes in the intensity of coloring the pigment does not cause, but reduces the digestion of the pigment, which is formed in the powdered state. The introduction of 10% magnesium oxide (sample C2) into the pigment charge leads to an increase in the intensity of its color and some shift in the short-wave region corresponding to the formation of the cobalt magnesium-aluminum spinel $xCoO \cdot (1-x)MgO \cdot Al_2O_3$.

The presence in the pigments of 10% molybdenum (VI) oxide, as part of the AKM catalyst, does not significantly affect the coloring properties of cobalt-magnesium-aluminum pigment. An increase in the concentration of cobalt (III) oxide in a pigment to 12% naturally increases the intensity of coloration to produce blue-blue and blue pigment shades. Increasing the concentration of magnesium oxide up to 10% and aluminum oxide (with increasing mass fraction of waste) in the charge up to 50% (sample C6) gradually reduces the intensity of pigment coloration, changing the color tone by diluting the chromophore compound with achromatic (white) aluminum (III) oxide, which allows to regulate the technological properties of pigments made using an activated AKM catalyst.

As a result of the regeneration of silicon carbide by the acidic method [11], washing rinses with a rather high concentration of ions of transition and heavy metals are formed, from which ferrous SiC-sludges were obtained for cleaning of high-precision cutting solutions of silicon wafers. Chromium (III) and zinc oxides were used as modifiers and mineralizers to obtain pigments of the void chrome, which allows to synthesize the product of a given color scale. The color of the décor varies from brown to void. The optimal ratio of the used sludge and chromium (III) oxide is achieved in samples B7 and B8, in batches which achieve significant savings both Cr_2O_3 and Al_2O_3 . In this case, the color is close to the reference [6], and a further increase in the concentration of Cr_2O_3 in the charge composition of the

pigment is inappropriate (sample B6). An increase in the concentration of ZnO in the sample B5, B6, shifts the color of the decor in the brown area.

Accordingly, in the case of SiC-slime cleaning, high-precision cutting of silicon wafers for complete replacement of Fe₂O₃ and partial replacement of Cr₂O₃, anhydrous pigments are synthesized. The void color is due to the formation of mixed spinels of the composition: Zn_(1-x-y)Fe_xCr_y[Zn_(x+y)Fe_(2-2n-x)Cr_(2n-y)]O₄ та Zn_{1-x-y}Al_xCr_y[Zn_(x+y)Al_(2-2n-x)Cr_(2n-y)]O₄.

Alumina production residues – Red-slime (RS) containing iron (III) and aluminum (III) compounds at concentrations in excess of their content in high quality natural ores can be recommended for the synthesis of brown pigment pigments. In the charge of Pigments Ч1-Ч7, a complete replacement of chemically pure Fe₂O₃ and Al₂O₃ oxides was provided for the RS. To form a stable brown color of the chromophore compounds, the spinel structures of the pigment model were loaded with chromium (III) with oxide, zinc oxide, and to create a gradient of color titanium (IV) with oxide. The presence of SiO₂ in the sludge structure and Na₂O in very high concentrations increases the speed of the spinel synthesis, and at a lower temperature, which reduces energy consumption in the production of pigments.

For pigments of brown color, made with the use of RS, the main crystalline phase is the zinc-iron-chromium spinel Zn_(1-x-y)Fe_xCr_y[Zn_(x+y)Fe_(2-2n-x)Cr_(2n-y)]O₄ which paints pigment in chocolate brown shades (pigment of optimal composition Ch1). In addition, the coffee-beige color of brown pigments (Ч2) is explained by the formation of spinel-like Fe(Ti)₂O₄[12].

Conclusions.

1. The possibility of utilization of industrial waste of high-zeolite – Red-slime, SiC-slime, medium-temperature catalyst STK-1, high-alumina - spent catalysts AKM, and high-zinc-containing - is a spent absorber of hydrogen sulfide NIAP-02-05 in the synthesis of inorganic pigments of different colors.

2. The method of solid phase syntheses has established the region of optimal composition of pigments of blue-green and choristy-brown colors.

3. It is shown that the use of industrial waste leads to significant savings in pure oxides of chromium (III), cobalt (III), ferrum (III), zinc, aluminum, while simultaneously solving the problems of the ecology of industrial regions of Ukraine.

References:

1. Глуховський І.В., Шумейко В.М., Овруцький В.М., Сучасні технології знешкодження та утилізації небезпечних відходів виробництва. -К.: ДПМК Мінекобезпеки України, 1998. -42с.

2. Галецкий Л.С., Лебедь Н.И., Польской Ф.Р., Современное состояние изученности и использования промотходов предприятий Украины // Тезисы докладов конференции. Оценка состояния отходов промышленных предприятий и перспективы использования их в качестве техногенных месторождений, 13-15 декабря 1994 г., Кривой Рог. – К.: Знание, 1994

3. Селиванова Н.В., Трифонова Т.А., Ширкин Л.А., Утилизация отходов гальванических производств. Известия Самарского Н.Ц. РАН, том 13, №1(8), 2011, стр.2085-2091.

4. Демьянова В.С., Щепетова В.А., Янин В.С., Чумакова О.А. О возможности использования отходов гальванического производства для заполнения карьерных выработок // Современные наукоемкие технологии. – 2011. – № 6. – С. 39-40

5. Залыгина О. С. Утилизация гальванического шлама в производстве стройматериалов / О. С. Залыгина, С. Е. Баранцева // Стекло и керамика. – 2002. – № 4. – С. 3-6.

6. Пат. 31122А Україна, МКІ 6 С03С 1/04. Неорганічний пігмент вохристого кольору / Іванюк О.В., Астрелін, І.М., Супрунчук В.І.; Заявл.13.07.98; Опубл.15.12.2000, Бюл. № 7-ІІ.

7. А.С. 1370123 СССР, МКІ СОЗ С1/04. Керамический пигмент вишнево-коричневого цвета. / Иркиевская О.Т., Демидовская А.Н., Кукушкина Г.Н. и др.; Заявл.05.05.86; Опубл. 30.01.88, Бюл. № 4.

8. А.С. 1460052 СССР, МКІ СОЗ С1/04. Подглазурный краситель синего цвета для фарфора. / Демидовская А.Н., Иркиевская О.Т., Кукушкина Г.Н. и др.; Заявл.30.06.87; Опубл. 30.01.89, Бюл. № 39.

9. Пат. 30992А Україна, МКІ 6 С 03С 1/04. Неорганічний пігмент синьо-зеленого кольору / Іванюк О.В., Астрелін І.М., Супрунчук В.І.; Заявл 20.08.98; Опубл.15.12.2000, Бюл. № 7-ІІ

10. ОСТ 17-828-87 Технология производства фарфоровых и фаянсовых изделий. Обжиг декорированных изделий. Группа Т 53. -М.:ЦНИИТЭИлегпром, 1987.

11. І.М. Астрелін, О.І. Янушевська, О.В. Іванюк Регенерація SiC кислотною обробкою шламу різання монокристалічного кремнію та реагентно-флокуляційне очищення утворених промивних вод//Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». -2017. -Випуск 57 (Технічні науки) .-С.22-26

12. Шабельская Н.П., Зеленская Б.А. и др. Синтез композиционного материала TiO₂-(Fe,Ti)O₄-Fe₂O₃ и его каталитические свойства. Фундаментальные исследования. 2015, №9(часть3)-С.532-535. ISSN 1812-7339.

Стаття надійшла до редакції 21.02.2019

УДК 629.083

Д.М. Клец¹, А.И. Назаров¹, Е.М. Шпинда¹, Е.Е. Калашников²

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Харьковский национальный аэрокосмический университет им. Жуковского

ОЦЕНКА РЕАЛИЗАЦИИ ТОРМОЗНЫХ МОМЕНТОВ НА ОСЯХ ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ С УЧЕТОМ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ

Разработана методика оценки реализации тормозных моментов на осях легковых автомобилей с учетом аэродинамического сопротивления движению, которая заключается в том, что, начиная с момента нарастания тормозных сил на колесах и заканчивая достижением их предельных значений, фактические нормальные нагрузки на колесах задней оси имеют гораздо большие значения, чем определенные по классической методике. На основании предложенного коэффициента запаса тормозного момента на осях автомобиля Chevrolet Aveo при снаряженной массе установлено возможное увеличение тормозного момента на колесах задней оси на 16,3-30,2% без потери устойчивости.

Ключевые слова: легковой автомобиль, торможение, коэффициент запаса тормозного момента.

Д.М. Клец¹, О.І. Назаров¹, Є.М. Шпінда¹, Є.Є. Калашніков²

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Харківський національний аерокосмічний університет ім. Жуковського

ОЦІНКА РЕАЛІЗАЦІЇ ГАЛЬМОВИХ МОМЕНТІВ НА ОСЯХ ЛЕГКОВОГО АВТОМОБІЛЯ З УРАХУВАННЯМ АЕРОДИНАМІЧНОГО ОПОРУ РУХУ

Розроблено методику оцінки реалізації гальмівних моментів на осях легкових автомобілів з урахуванням аеродинамічного опору руху, яка полягає в тому, що, починаючи від моменту наростання гальмівних сил на колесах і закінчуючи досягненням ними граничних значень, фактичні нормальні навантаження на колесах задньої осі мають набагато більші значення, ніж визначені за класичною методикою. На підставі запропонованого коефіцієнта запасу гальмівного моменту на осях автомобіля Chevrolet Aveo зі спорядженою масою встановлене можливе збільшення гальмівного моменту на колесах задньої осі на 16,3-30,2% без втрати стійкості.

Ключові слова: легковий автомобіль, гальмування, коефіцієнт запасу гальмівного моменту.

D.M. Klets¹, A.I. Nazarov¹, E.M. Spinda¹, E.E. Kalashnikov²

Kharkov National Automobile and Highway University

Kharkov National Aerospace University Zhukovsky

EVALUATION OF THE REALIZATION OF BRAKE MOMENTS ON THE AXIS OF A PASSENGER CAR TAKING INTO ACCOUNT AERODYNAMIC RESISTANCE TO MOVEMENT

A method has been developed for evaluating the implementation of braking moments on the axles of passenger cars, taking into account the aerodynamic resistance to movement, which consists in the fact that the actual normal loads on the wheels of the rear axle have much greater values, starting with the moment when the braking forces on the wheels increase. than determined by the classical method. Based on the proposed brake torque safety factor on the Chevrolet Aveo vehicle axles with curb weight, a possible increase in the braking torque on the rear axle wheels was found to be 16,3-30,2% without loss of stability.

Keywords: passenger car, braking, brake torque safety factor.

Введение. Стремительное увеличение количества легковых автомобилей на дорогах Украины, а также прогнозируемый рост интенсивности и скорости движения автомобильного транспорта [1], приводят к ужесточению требований к безопасности их использования, что напрямую связано с реализацией предельно-возможных тормозных сил в различных эксплуатационных условиях.

В общем случае эксплуатационные условия при торможении легкового автомобиля включают [1–3]:

- а) действие аэродинамического сопротивления: сила лобового сопротивления, подъемная и боковая аэродинамические силы;
- б) местность и категория дороги, где выполняется торможение;
- в) дорожные условия;
- г) дорожное покрытие: сухой асфальтобетон; мокрый асфальт; укатанный снег; «микс» (мокрый снег, грязь); лед.

В общем случае торможения легкового автомобиля, движущегося на горизонтальном участке дороги, действуют силы аэродинамического сопротивления движению, составляющие несколько процентов от веса автомобиля [4].

Для эксплуатируемых легковых автомобилей аэродинамическое сопротивление зависит, в первую очередь, от коэффициента лобового сопротивления, который находится в пределах 0,18–0,35 [5] и составляет дополнительную силу, препятствующую движению, зависящую от скорости движения и эксплуатационных условий, оговоренных выше.

Анализ последних публикаций и достижений. По данным литературных источников [4, 5] аэродинамическая сила лобового сопротивления, состоит из пяти составляющих, среди которых сопротивление формы кузова 55-60%, внутреннее сопротивление кузова 10-15%, дополнительное сопротивление 10-15%, индуктивное сопротивление 5-10% (вызывается взаимодействием боковой и подъемной силы в направлении продольной оси), сопротивление трению поверхностных слоев автомобиля – 5-10% (рис. 1).

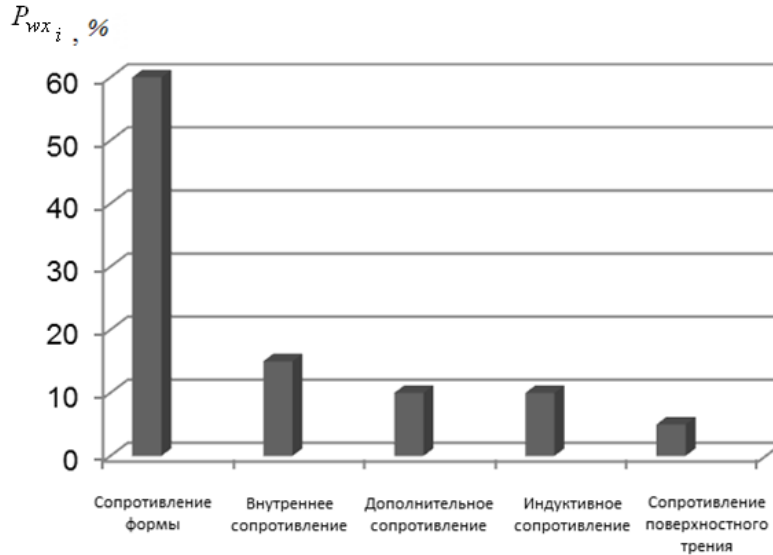


Рис.1 – Диаграмма возможного распределения составляющих аэродинамического сопротивления легкового автомобиля [4, 5]

Как следует из анализа долевого распределения составляющих общего аэродинамического сопротивления легкового автомобиля, львиную долю занимает сила лобового сопротивления P_{wx} и около 10% - индуктивное сопротивление, создаваемое боковую P_{wy} и подъемную P_{wz} силу.

Поскольку в литературных источниках [4–6] присутствуют данные только о коэффициентах аэродинамического сопротивления в продольном направлении легковых автомобилей, то для учета наибольшего влияния аэродинамической силы сопротивления воздушного потока в дальнейшем будем считать, что в общем случае боковая и подъемная силы от воздушного потока, создаваемые индуктивное сопротивление при движении легкового автомобиля, в долевым отношении к силе лобового сопротивления составляют:

– боковую силу

$$P_{wy} = \lambda_y \cdot P_{wx}, \quad (1)$$

– подъемную силу

$$P_{wz} = \lambda_z \cdot P_{wx}, \quad (2)$$

где λ_y , λ_z – коэффициенты пропорциональности между боковой (подъемной) составляющими и продольной силой аэродинамического сопротивления движению.

В случаях торможения легкового автомобиля (рис. 2) в эксплуатационных условиях нормальные осевые реакции, определенные по классическим зависимостям [4, 5], отличаются от тех же реакций, определенных по уточненным ранее зависимостям [7].

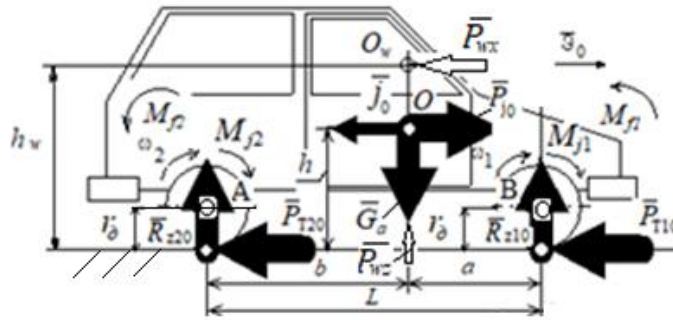


Рис. 2 – Схема сил, действующих на автомобиль при торможении

Цель и постановка задачи. Целью работы установление реализуемых предельных тормозных моментов на осях легковых автомобилей с учетом аэродинамического сопротивления.

Математическая модель и алгоритм решения задачи. Для легковых автомобилей, оборудованных АБС, затормаживаемых в различных эксплуатационных условиях, аэродинамическое сопротивление движению будет зависеть от коэффициента лобового сопротивления кузова, площади сопротивления и начальной скорости торможения.

Влияние аэродинамического сопротивления движению легкового автомобиля предложено [8] учитывать изменением нормальных реакций на осях, т.е. коэффициентом динамического изменения осевых нормальных реакций, т.е.

$$m_{Ri} = \frac{R_{zi}}{R_{zi}^0}, \tag{3}$$

где R_{zi}^0 – нормальная динамическая нагрузка на i -ой оси легкового автомобиля, определяемая по классическим формулам [5]:

– на передней оси

$$R_{z1}^0 = m_a \cdot g \cdot \left(\frac{b}{L} + z \cdot \frac{h}{L} \right), \tag{4}$$

– на задней оси

$$R_{z2}^0 = m_a \cdot g \cdot \left(\frac{a}{L} - z \cdot \frac{h}{L} \right). \tag{5}$$

P_{zi} – нормальная динамическая нагрузка, определяемая по уточненным зависимостям [7, 9], представленным в развернутом виде с учетом аэродинамического фактора:

– на передней оси автомобиля

$$R_{z1} = m_a \cdot g \cdot \left(\frac{b}{L} + z \cdot \frac{h}{L} \right) - m_a \cdot g \cdot \left[\frac{f_a \cdot r_{cm} + r_k \cdot (z - \varphi)}{L} - \frac{z \cdot g}{r_k} \cdot \frac{\sum I_i}{L} + \Phi_w \cdot \frac{h_w - r_k \cdot (1 - \lambda_z \cdot \varphi) + \lambda_z \cdot (b - f_a \cdot r_{cm})}{L} \right], \tag{6}$$

– на задней оси автомобиля

$$R_{z1} = m_a \cdot g \cdot \left(\frac{a}{L} - z \cdot \frac{h}{L} \right) + m_a \cdot g \cdot \left[\frac{f_a \cdot r_{cm} + r_k \cdot (z - \varphi)}{L} - \frac{z \cdot g}{r_k} \cdot \frac{\sum I_i}{L} + \Phi_w \cdot \frac{h_w - r_k \cdot (1 - \lambda_z \cdot \varphi) - \lambda_z \cdot (a + f_a \cdot r_{cm})}{L} \right], \tag{7}$$

где m_a – масса легкового автомобиля;

a, b, h – координаты центра тяжести автомобиля;

L – продольная база автомобиля;

$z = \frac{j}{g}$ – коэффициент торможения [5];

f_a – коэффициент сопротивления качению колес;

r_{cm} – статический радиус колеса [10];

r_k – кинематический радиус колес передней и задней оси [10];

φ – коэффициент сцепления между шиной колеса и опорной поверхностью дороги;

$\sum I_i$ – суммарные моменты инерции вращающихся масс на i -ой оси автомобиля;

h_w – высотная координата метацентра автомобиля;

Φ_w – аэродинамический фактор [7]

$$\Phi_w = \frac{K_0 \cdot F_w \cdot g_0^2}{m_a \cdot g}, \quad (8)$$

где K_0 – коэффициент обтекаемости (для Chevrolet Aveo принимается $0,35 \text{ кг/м}^3$ [5]);

F_w – площадь Миделя;

g_0 – скорость автомобиля, при которой производится торможение.

Для сравнительной оценки эффективности торможения легкового автомобиля введем коэффициент запаса осевого тормозного момента, который равен отношению величин действительных осевых тормозных моментов и идеальных, определяемых:

– с использованием классических зависимостей (4) и (5)

$$m_{Ti}^0 = 1 - \frac{M_{Ti}}{[M_{Ti}^0]}, \quad (9)$$

где $[M_{Ti}^0]$ – предельный тормозной момент на i -ой оси легкового автомобиля, определяемый по классическим зависимостям (4), (5):

– на передней оси

$$[M_{T1}^0] = [P_{T1}^0] \cdot r_k = R_{z1}^0 \cdot \varphi \cdot r_k, \quad (10)$$

– на задней оси

$$[M_{T2}^0] = [P_{T2}^0] \cdot r_k = R_{z2}^0 \cdot \varphi \cdot r_k; \quad (11)$$

$[P_{Ti}^0]$ – предельная тормозная сила на i -ой оси легкового автомобиля, определяемая с учетом классических формул [4, 5]:

– с использованием полученных зависимостей (6) и (7)

$$m_{Ti} = 1 - \frac{M_{Ti}}{[M_{Ti}]}, \quad (12)$$

где $[M_{Ti}]$ – предельный тормозной момент на i -ой оси легкового автомобиля, определяемый по уточненным (6), (7) зависимостям:

– на передней оси

$$[M_{T1}] = [P_{T1}] \cdot r_k = R_{z1} \cdot \varphi \cdot r_k, \quad (13)$$

– на задней оси

$$[M_{T2}] = [P_{T2}] \cdot r_k = R_{z2} \cdot \varphi \cdot r_k; \quad (14)$$

$[P_{Ti}]$ – предельная тормозная сила на i -ой оси легкового автомобиля, определяемая с учетом уточненных зависимостей для нормальных реакций;

M_{Ti} – действительный тормозной момент, развиваемый на i -ой оси легкового автомобиля, определяемый:

– на передней оси

$$M_{T1} = P_{T1} \cdot r_k = p_1 \cdot K_1 \cdot r_k \leq [M_{T1}], \quad (15)$$

– на задней оси

$$M_{T2} = P_{T2} \cdot r_k = p_2 \cdot K_2 \cdot r_k \leq [M_{T2}], \quad (16)$$

где K_i – конструктивный параметр тормозного механизма, применяемого на i -ой оси легкового автомобиля [7, 8].

При комплектовании легковых автомобилей Chevrolet Aveo радиальными дисками R14 колес были получены конструктивные параметры тормозных механизмов, m^2 :

– передней оси $K_1=9,94 \cdot 10^{-4}$;

– задней оси $K_2=6,82 \cdot 10^{-4}$.

Приняв закон изменения приводного давления в контурах тормозного привода [5, 11] для легкового автомобиля, оборудованного АБС,

$$p_i = 0 - p_{\max}, \quad (17)$$

где p_i – приводное давление в i -ом контуре тормозного привода;

p_{\max} – максимальное приводное давление тормозного привода.

При чем, на момент блокирования колес какой-либо оси $p_1 = p_2$, после чего $p_1 \neq p_2$:

– в случае блокирования колес передней оси

$$p_1 \leq \frac{[P_{T1}]}{K_1}, \quad (18)$$

– в случае блокирования колес задней оси

$$p_2 \leq \frac{[P_{T2}]}{K_2}. \quad (19)$$

Для автомобилей Chevrolet Aveo, оборудованных регуляторами тормозных сил [12] с компенсирующей характеристикой, до первой точки срабатывания (точка на отрезке АБ, рис. 3) справедливо равенство

$$p_1 + \Delta p = p_2 + \Delta p = p_{10} = p_{20}, \quad (20)$$

где Δp – величина приращения приводного давления;

$p_{10}(p_{20})$ – величина приводного давления в контурах передних (задних) тормозов в точке φ_0 срабатывания регулятора тормозных сил, находящейся на отрезке АБ в зависимости от загрузки автомобиля

$$p_{10} = \frac{P_{T1}^{\varphi_0}}{K_1}, \quad (21)$$

где $P_{T1}^{\varphi_0}$ – идеальная тормозная сила на передней оси легкового автомобиля в точке φ_0 .

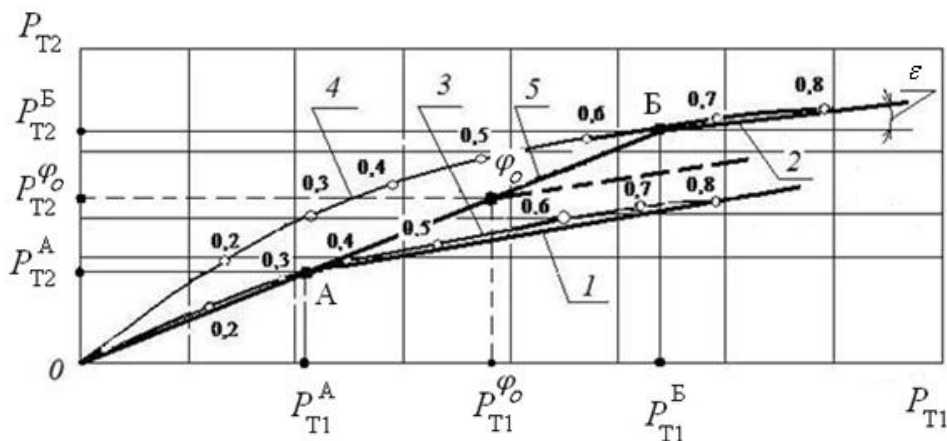
При достижении точки φ_0 давление в контурах передних тормозов изменяется по закону

$$p_1 = p_{10} + \Delta p, \quad (22)$$

а в контурах задних тормозов

$$p_2 = p_{10} + (p_1 - p_{10}) \cdot K_y, \quad (23)$$

где K_y – коэффициент усиления давления ($K_y = \operatorname{tg} \varepsilon$, см. рис. 3).



- 1, 2 – характеристики регулятора тормозных сил для автомобиля со снаряженной и полной массой;
 3, 4 – кривые идеального распределения тормозных сил;
 5 – постоянное распределение тормозных сил

Рис. 3 – Рабочие и идеальные характеристики тормозной системы Chevrolet Aveo, оборудованной регуляторами тормозных сил

Тогда закон изменения приводного давления в контурах задних тормозных механизмов (см. рис.3) может быть представлен в виде

$$p_2 = p_{10} + (p_1 - p_{10}) \cdot \frac{p_2^{\varphi=0,8} - p_{20}}{p_1^{\varphi=0,8} - p_{10}}, \quad (24)$$

где $p_2^{\varphi=0,8}$ – величина приводного давления в контуре задних тормозных механизмов, соответствующая максимальной идеальной тормозной силе на задней оси легкового автомобиля при $\varphi = 0,8$

$$p_2^{\varphi=0,8} = \frac{P_{T2}^{\varphi_0}}{K_2}, \quad (25)$$

$p_1^{\varphi=0,8}$ – величина приводного давления в контуре передних тормозных механизмов, соответствующая максимальной идеальной тормозной силе на передней оси легкового автомобиля при $\varphi = 0,8$

$$p_1^{\varphi=0,8} = \frac{P_{T1}^{\varphi_0}}{K_1}. \quad (26)$$

Для оценки наименьших возможных значений коэффициентов динамического изменения нормальных реакций и запаса тормозного момента на осях, определяемых по уточненной и классической теории, рассматривается случай экстренного торможения автомобиля Chevrolet Aveo, оборудованного АБС, со снаряженной массой в безветренную погоду.

На основании расчетных данных построены графические зависимости коэффициентов динамического изменения нормальных реакций и запаса осевых тормозных моментов от коэффициента торможения для рассматриваемых автомобилей, затормаживаемых на горизонтальном участке автомобильной дороги при начальной скорости, изменяемой в пределах 80-150 км/час (рис. 4).

Анализ расчетных кривых (см. рис. 4) показывает, что для легковых автомобилей Chevrolet Aveo со снаряженной массой, совершающих экстренное торможение на горизонтальной дороге при начальной скорости, изменяющейся в пределах 80-150 км/час, коэффициент динамического изменения нормальных осевых реакций:

- 1) на передней оси убывает с $m_{R1} = 0,914$ до $m_{R1} = 0,875$;
- 2) на задней оси возрастает с $m_{R2} = 1,24$ до $m_{R2} = 1,43$.

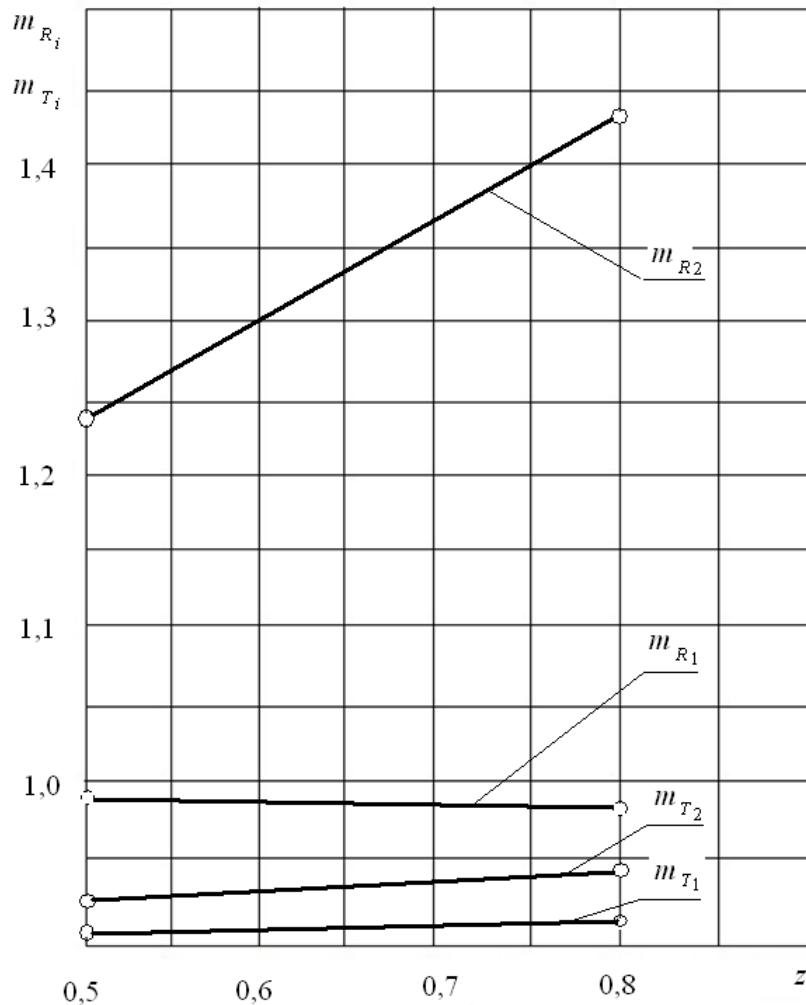


Рис. 4 – Теоретичні коефіцієнти динамічного зміння нормальних реакцій и запаса тормозних моментів на осях Chevrolet Aveo

Следовательно, в сравнении с классической теорией, имеет место наибольшее увеличение нормальной нагрузки на колесах задней оси автомобиля, составляющее 24–43%.

При этом коэффициент запаса тормозного момента составляет:

- 1) на передней оси $m_{T_1} = 0,103 - 0,152$;
- 2) на задней оси $m_{T_2} = 0,163 - 0,302$.

Следовательно, в сравнении с классической теорией, возможность реализации наибольшего запаса тормозного момента имеет место на колесах задней оси автомобиля со снаряженной массой, составляющее 16,3–30,2%.

Выводы. В общем случае выполнения экстренных торможений с начальной скоростью 80–150 км/ч на горизонтальной дороге с сухим асфальтобетонным покрытием легковыми автомобилями при снаряженной массе, имеющими коэффициент обтекаемости кузова не более 0,35, запас не реализованного тормозного момента на колесах задней оси увеличивается и может составлять от 16,3% до 30,2%.

Следовательно, в сравнении с классической теорией, на колесах задней оси автомобиля при снаряженной массе может быть реализован дополнительный тормозной момент больший на 16,3–30,2% без потери устойчивости, что возможно при совместном использовании АБС и гидравлических устройств [13], отслеживающих изменение нормальных нагрузок.

Список использованной литературы:

1. Ярещенко Н.В. Довгострокове прогнозування швидкостей руху на автомобільних дорогах [Текст]: автореф. дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук: спец. 05.22.11 «Автомобільні шляхи та аеродроми» / Н.В. Ярещенко. – Харків, 1999. – 16 с.
2. Говорущенко Н.Я. Основы теории эксплуатации автомобилей / Говорущенко Н.Я. – К.: Выща школа, 1971. – 232с.
3. Бабков Н.Ф. Дорожные условия и режимы движения автомобилей/ Бабков Н.Ф.–М.: Транспорт, 1967. – 323 с.
4. Вопросы динамики торможения и теория рабочих процессов тормозных систем автомобилей / [Генбом Б.Б., Гудз Г.С., Демьянюк В.А. и др.]. – Львов: Выща школа, 1974. – 234 с.
5. Агейкин Я.С. Теория автомобиля [Электронный ресурс]: учеб. пособ. / Я.С. Агейкин, Н.С. Вольская. – М.: МГИУ, 2008. – 318 с. – Режим доступа: <http://www.books.google.com.ua/books>.
6. Гухо В.Г. Аэродинамика автомобиля / Гухо В.Г.; [пер. с немец.]. – М.: Машиностроение, 1987. – 403 с.
7. Клец Д.М. Потенційна можливість реалізації прирощення вповільнення легковими автомобілями під час екстреного гальмування в різних експлуатаційних умовах: [міжвузівський збірник наук. праць] / Клец Д.М., Назаров О.І., Шпінда Є.М. // Наукові Нотатки. – ЛНТУ. – Вип. 64. – 2019. – С. 81-86.
8. Назаров И.А. Усовершенствование методики оценки тормозных свойств легковых автомобилей: [сборник научн. трудов] / Назаров И.А., Сергиенко Н.Е. // Вісник НТУ«ХП»: Серія «Транспортне машинобудування». –Харків, 2017. – №6 (1227). – С. 17-27. – ISSN 2079-0023.
9. Podrigalo, M. Improvement of the Assessment Methods for the Braking Dynamics with ABS Malfunction / Podrigalo, M., Klets D., Sergiyenko O. and other // SAE 36th Annual Brake Colloquium and Exhibition, Brake 2018; JW Marriott Desert Springs Palm Desert; United States. – 14–17 October 2018. – Engin. Inst, BajaCalif. Autonom. Univ., Mexico, 2018.
10. Шины пневматические для легковых автомобилей. Технические условия: ГОСТ 4754-97. – [Введен 01.06.99]. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 22 с.
11. Совершенствование способов регулирования выходных параметров тормозной системы автотранспортных средств / [Туренко А.Н., Богомоллов В.А., Клименко В.И. и др.]. – Харьков: Изд-во ХНАДУ (ХАДИ), 2002. – 400 с.
12. Papashev, O.Kh. Regulators of brake forces of passenger automobiles / Papashev, O.Kh., Filipenko, S.V., Podrigalo, M.A., Volkov, V.P., Nazarov, A.I. // AvtomobilnayaPromyshlennost, - Moskau, 2004. - №12. – pp. 17-19.
13. Пат. №1173243 Україна, МПК 2006.01, В60Т 8/1766, В60Т 8/30. Гідравлічний гальмівний привод легкових автомобілів / [Назаров О.І., Назаров І.О., Назаров В.І., Ємельянов В.Л.]; заявник і патентотримач Харків, національний автомобільно-дорожній університет №u201613490; заявл. 28.12.2016; опубл. 26.06.2017, Бюл. №12.

Рецензенты:**Волков В.П.**, докт. техн. наук, профессор, ХНАДУ**Бондаренко А.И.**, докт. техн. наук, доцент, НТУ «ХПИ»

Стаття надійшла до редакції 05.03.2019

УДК 179.16

В.Д. Ковальов, М.С. Мельник, Я.С. Антоненко*Донбаська державна машинобудівна академія***АДАПТИВНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ПОХИБКАМИ ОБРОБКИ ВИРОБУ З
УРАХУВАННЯМ ГЕОМЕТРИЧНИХ ВІДХИЛЕНЬ НЕСУЧОЇ СИСТЕМИ ТА
ТЕМПЕРАТУРНИХ ДЕФОРМАЦІЙ**

Запропоновано адаптивну систему управління, що дозволяє компенсувати пружні деформації елементів несучої системи, що виникають під дією сил різання, а також теплові деформації, викликані зміною температури після початку процесу обробки і являє собою одне з рішень задачі отримання інформації про поточні параметри процесу обробки.

Ключові слова: адаптивна система, жорсткість, похибки, точність обробки, система ЧПУ, несуча система.

В.Д. Ковалев, М.С. Мельник, Я.С. Антоненко**АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЯМИ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛИ С
УЧЕТОМ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ОТКЛОНЕНИЙ НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ И
ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ**

Предложена адаптивная система управления, которая позволяет компенсировать упругие деформации элементов несущей системы, возникающих под действием сил резания, а также тепловые деформации, вызванные изменением температуры после начала процесса обработки и представляет собой один из методов решения задач получения информации про текущие параметры процесса обработки.

Ключевые слова: адаптивная система, жесткость, погрешности, точность обработки, система ЧПУ, несущая система.

V. Kovalov, M. Melnik, Y. Antonenko**ADAPTIVE CONTROL SYSTEM OF PROCESSING ERRORS OF DETAILS TAKING INTO
ACCOUNT GEOMETRIC DIFFERENCES OF THE CARRIER SYSTEM AND
TEMPERATURE DEFORMATION**

An adaptive control system is proposed, which allows to compensate for the elastic deformations of the elements of the carrier system arising under the action of cutting forces, as well as thermal deformations caused by temperature changes after the start of the processing process and is one of the methods for solving problems of obtaining information about the current parameters of the processing.

Keywords: adaptive system, rigidity, errors, machining accuracy, CNC system, carrier system.

Постановка проблеми. Підвищення точності важких токарних верстатів являє собою основну проблему сучасного машинобудування. Якість виробів залежить від точності виготовлення окремих деталей. Особливо треба виділити деталі типу нежорсткі вали, які по більшості працюють у важких умовах навантаження і навіть незначна неточність при їх виготовленні суттєво прискорює процес їх зношування та руйнування виробу. Силові впливи, віджим станини, теплові перетворення в процесі різання призводять до відхилень як інструменту, так і заготовки від первинного положення, що призводить до деформацій геометричних характеристик поверхні деталей. Таким чином, створення адаптивної системи управління, для компенсації пружних та температурних деформацій елементів несучої системи являє собою один із методів вирішення питання точності важкого верстатного обладнання з ЧПУ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У верстатобудуванні накопичено значний досвід у оцінюванні точності технологічного обладнання. Значний внесок у розвиток теорії точності внесли вітчизняні та зарубіжні вчені: В.С. Балакшин, Б.М. Базров, В.С. Корсаков, І.М. Колесов, М.Г. Косов, А.Г. Сулов, Л.В. Худобін, Б.Л. Штриков, Н.Влок, D.Tabor та ін. Одним з найперспективніших шляхів підвищення точності верстатів є оснащення їх системами адаптації. Сучасні системи ЧПУ дозволяють компенсувати температурні відхилення із врахуванням довжини ходових гвинтів, рейок в процесі обробки, але для врахування геометрії та температурних компенсацій несучої системи це поки що не реалізовано. Наприклад, при температурній деформації станини, відхилення не відстежується, і компенсації не відбувається, що відображається на геометрії виробу, і, як наслідок, на точності обробки. Це має особливе значення при обробці на важких токарних верстатах, враховуючи габарити верстатів і виробів.

Постановка завдань. В даний час для досягнення необхідної точності виготовлення деталей розроблені критерії працездатності токарних верстатів, які регламентуються ДСТУ та іншою технічною документацією. Основними критеріями працездатності верстата щодо

забезпечення необхідної точності ϵ : геометрична і кінематична точність, статична жорсткість, точність позиціонування, тепло-, вібро-, і зносостійкість, а також інші критерії. Однак навіть у разі, коли значення вказаних критеріїв відповідатимуть вимогам стандартів не гарантується виготовлення деталі, яка повністю відповідає вимогам робочого креслення. Це пояснюється застарілими поняттями, закладеними в визначення зазначених критеріїв і тим, що існуючі методи їх визначення не враховують головного, що в процесі обробки на токарний верстат діє комплекс експлуатаційних навантажень, що мають випадкову природу, внаслідок чого траєкторії формоутворюючих елементів верстата спотворюються, в результаті чого спотворюється форма деталі і її показники точності.

У зв'язку з цим актуальним стає визначення очікуваної точності токарної обробки в процесі її здійснення за результатами оцінки траєкторій формоутворюючих рухів деталі і різця.

Для отримання правильної геометричної форми великогабаритних нежорстких виробів, необхідно враховувати не тільки коливання зусилля різання, викликані мінливістю припуску і твердості заготовки, особливості закріплення заготовки, але і пружні віджимання по довжині оброблюваної заготовки та температурні деформації, пов'язані зі зміною податливості несучої системи. Ідеальним способом вирішення даного завдання було б створення абсолютно жорсткої верстатної системи і точне прогнозування коливань твердості заготовки і силових характеристик в процесі виробництва. Але, в реальних умовах обробки на важких верстатах це створити неможливо. Таким чином, природним виходом в даному випадку є спроба якщо не повністю усунути, то хоча б частково компенсувати похибки, що виникають в процесі обробки.

Вдосконалення точносних характеристик важких верстатів можливо на основі комплексного підходу: розробки станини раціональної конструкції для нівелювання геометричних відхилень деталі і компенсації температурних змін методом активного контролю в процесі обробки.

Викладення основного матеріалу. Як відомо, елементи технологічної системи, що володіють кінцевою жорсткістю створюють ефект копіювання похибок форми заготовки на готовий виріб. Похибки форми заготовки створюють зміни припуску, що тягне за собою зміни сили різання, які в свою чергу викликають змінні деформації елементів технологічної системи, тобто відхилення взаємного положення заготовки та інструменту від заданого. В результаті похибки форми заготовки майже пропорційно копіюються на оброблений виріб [1]. Очевидно, що для зменшення ефекту копіювання необхідно підвищувати жорсткість технологічної системи, що і реалізується на практиці. Але змінювати жорсткість заготовки, яка також є елементом технологічної системи, в більшості випадків можливості немає. Тобто підвищення жорсткості вузлів верстата призначеного для обробки нежорстких заготовок не дасть позитивного ефекту. Ще однією значною перешкодою для досягнення високої точності форми виробу є зовнішні силові впливи, наприклад вібрація від дисбалансу заготовки, від механізмів верстата або поруч розташованого обладнання, а також теплові деформації заготовки, інструменту та вузлів верстата, викликані тепловиділенням в зоні різання, яке створює нерівномірне, мінливе у часі температурне поле технологічної системи.

Для реалізації алгоритмів підвищення точності [2] було використано метод адаптації несучих систем до змінюваних умов функціонування – управління пружними переміщеннями елементів несучої системи та адаптивне управління відхиленнями виробу з урахуванням геометричних відхилень несучої системи та температурних деформацій.

Корекція, заснована на вимірюванні первинних відхилень елементів несучої системи верстата в координатах (X, Y, Z) в робочому просторі, запам'ятовуванні масиву даних та компенсації при відпрацюванні траєкторії руху безпосередньо при обробці отримала широке використання при підвищенні точності важких токарних верстатів. У сучасних системах ЧПУ верстатами обов'язково присутня корекція шагу гвинта та компенсація люфту, яка компенсує відхилення позиціонування.

Розробка структури системи адаптивного управління для вирішення завдань подібного роду не є проблемою, тут цілком достатньо простої стабілізуючої системи, що підтримує задане взаємне положення інструменту і заготовки. Складність полягає в розробці способу отримання інформації про миттєве взаємне розташування інструменту та заготовки, а також у створенні швидкодіючого приводу для внесення поправки.

Існуючі методи вимірювання відхилень: лазерний інтерферометр, вимірювання по струні, обкатний ролик та ін. Недоліками лазерного інтерферометра, використання якого знайшло відображення у роботі [3] є складність отримання великої кількості фазових кроків, зниження інтенсивності лазерного випромінювання після проходження різних ділянок. При використанні

вимірювання по струні стикаємось із рядом проблем, таких як похибки, що виникають в результаті неточності форми деталей верстатів, що використовуються в якості бази відліку. Зношення щупів за умов обертальної швидкості різання при обробці на токарних верстатах ускладнюють використання обкатного ролика для нашого випадку. Безконтактні методи вимірювань забезпечують широкі можливості оцінки вихідних параметрів верстата. Вони дозволяють автоматизувати процес вимірювань та отримати масив даних, фіксувати результати графічно, переробляти інформацію з оцінкою широкою номенклатури показників точності верстата.

У роботі запропоновано методику компенсації геометричних відхилень несучої системи з урахуванням температурних деформацій. Принцип дії полягає в наступному: вимірювання відхилень деталі від еталону в процесі обробки і врахування в системі ЧПК для коригування програми обробки. Запропоновано використовувати для вимірювання відхилень при обробці на важких токарних верстатах як реалізацію методу активного контролю - скобу із безконтактними пластинами (рис.1), одна з яких нерухома, а інша із можливістю переміщення в залежності від змін відхилень діаметру та підпружинена.

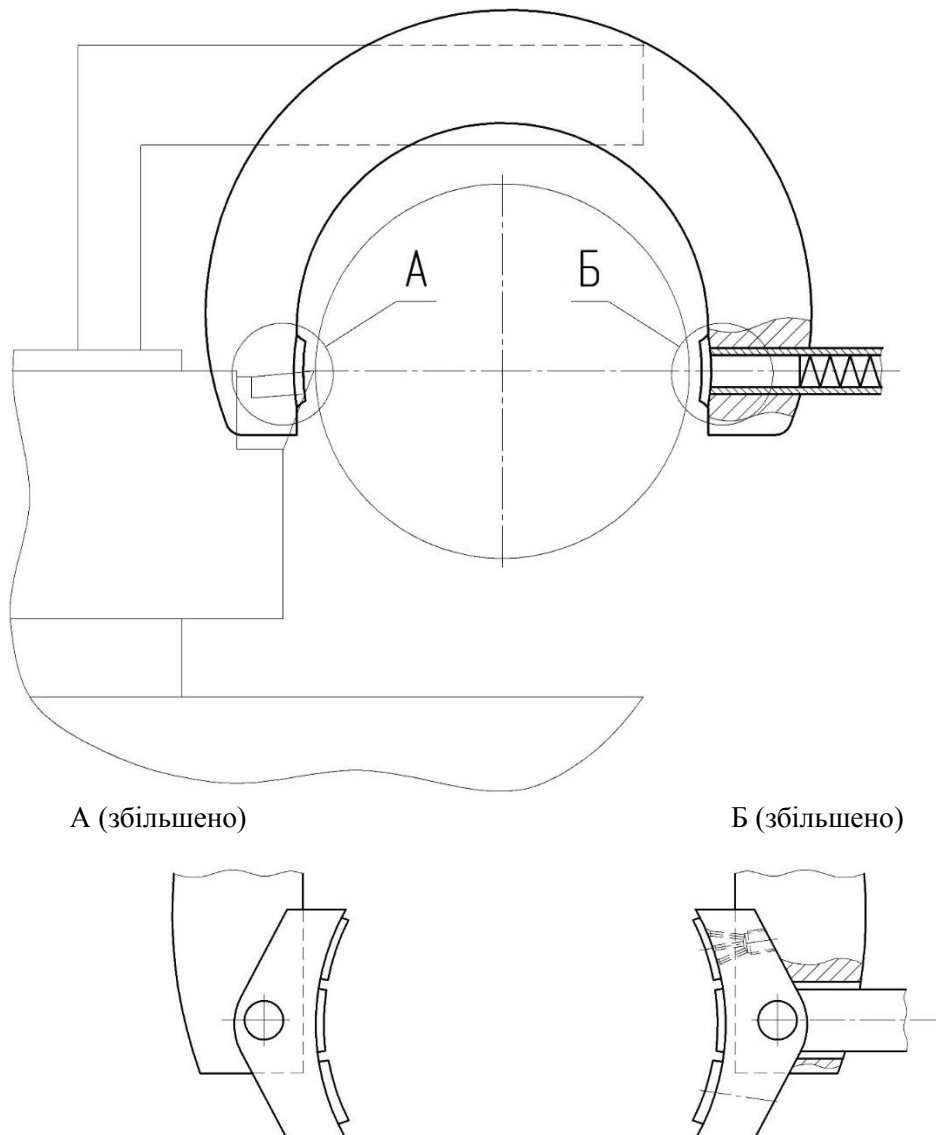


Рис. 1. Запропонована схема реалізації методу активного контролю

Відсутність тертя між виробом і пластинами забезпечується за рахунок повітряного шару, який забезпечується компресором з обох боків по діаметру і двох ємнісних датчиків, відхилення яких підсумовується з відхиленням вимірювальної лінійки і враховується у програмі ЧПУ. (рис.3)

$$V_{\text{привод}} = (X_{\text{зад}} - X_{\text{факт}} - \Delta)K_{\text{прон}} + V_{\text{зад}}K_{\text{пред}} \quad (1)$$

У даному методі вирішується проблема вимірювань безконтактними датчиками – видалення стружки та змащувально-охолоджуючої рідини, за рахунок повітряного шару вони видаляються із зони вимірювання. Використання ємнісного датчика обґрунтовано відсутністю чутливості до характеристик матеріалу, для великогабаритних деталей це має особливе значення.

Вхідний сигнал $f_{\text{ВХ}}$ частотою 50 Гц подається від генератора G на через мостову схему на синхронні вимикачі (враховується знак \pm), якими відсікається нижня напівхвиля. Опір резисторів згладжує напівхвилі, тим самим утворюючи постійну напругу. Далі через підсилювач постійного струму сигнал передається на АЦП контролера.

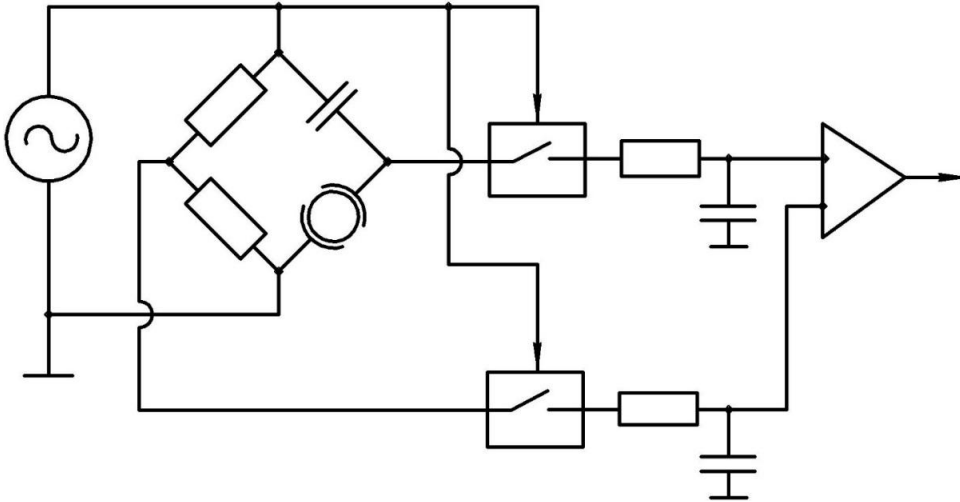


Рис. 2. Схема перетворення сигналу ємнісного датчика

$$U = \frac{I}{X_c} \quad X_c = \frac{1}{\omega c} \quad (2)$$

$$I = \frac{U_{\text{ген}}}{X_{\text{Собр}} + X_{\text{Сдатч}}} \quad (3)$$

Ємність конденсатору

$$C = \epsilon_0 \frac{S}{d} \quad (4)$$

$$\frac{1}{C_{\text{обм}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (5)$$

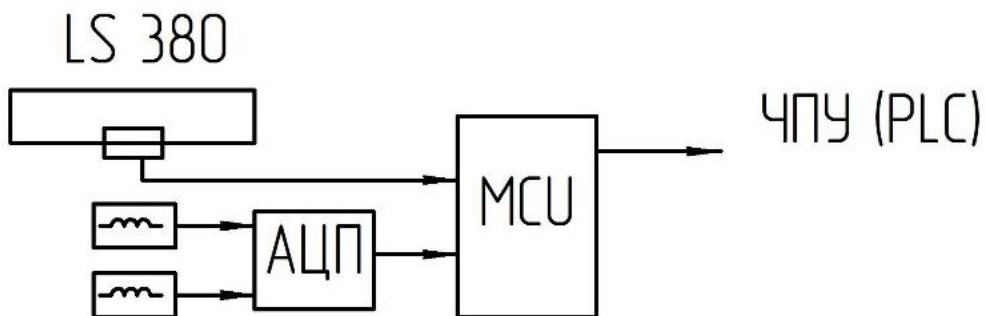


Рис. 3. Схема подачі сигналу із зчитувальних засобів для коригування програми ЧПУ

Одним з необхідних і абсолютно природних напрямків на шляху розвитку підходу управління точністю на основі зміни програми ЧПУ є вивчення існуючих статичних і динамічних характеристик всіх елементів технологічної системи, в тому числі характеристик жорсткості використовуваних вузлів. Проектування програм ЧПУ треба здійснювати не за геометричними характеристиками ідеальної деталі, так як це веде до необхідності компенсації виникаючих деформацій, а за характеристиками, що належить цій множині, що враховує деформації вже на етапі його створення. В роботі запропоновано рекомендації щодо підвищення точності важких токарних верстатів - методи управління точністю зі зворотніми зв'язками - за рахунок моделювання похибок технологічної системи та із застосуванням адаптивної комплексної системи. Розроблено автоматизований вимірювальний комплекс для активного контролю і оцінювання технічного стану несучої системи важкого верстата.

Висновки. Запропоновано схеми і конструкції адаптивних елементів управління геометричною точністю технологічних систем. Удосконалено способи адаптивного управління точністю за відхиленнями елементів несучої системи і похибок готової деталі. Незважаючи на велику кількість розробок в цій області [4,5,6], запропонована адаптивна система, вигідно відрізняється тим, що дозволяє вимірювати і враховувати деформації заготовок, в тому числі великогабаритних, що особливо важливо при обробці нежорстких деталей на важких верстатах, де для досягнення точності доводиться жертвувати продуктивністю. Універсальність використання цієї системи полягає у наявності однієї рухомої пластини з можливістю переміщення в залежності від діаметру вимірювальної поверхні; забезпечення точного вимірювання та мінімального зносу пластин за наявності повітряного шару, за рахунок якого видаляються залишки змащувально-охолоджуючої рідини та стружки в процесі обробки. Ємнісний датчик дозволяє ігнорувати характеристики оброблюваного матеріалу, що має особливе значення при обробці великогабаритних нежорстких деталей на важкому обладнанні.

Управління пружними переміщеннями станин дозволяє практично виключити складову сумарної похибки, обумовлену деформаціями згину станин (близько 60% втрати точності) результатів, що дозволяє використовувати розроблену методику для дослідження і реального проектування верстатів нового покоління.

Список використаних джерел:

1 Kovalev, V.D.; Vasilchenko, Y.V. and Dašić, P.: Adaptive optimal control of a heavy lathe operation. Journal of Mechanics Engineering and Automation (JMEA), Vol. 4, Issue 4 (April 2014), pp. 269-275.

2 Ковалёв В.Д. Путиповышения точности тяжелых станков с ЧПУ / Куриленко Я.С./ Надежность инструмента и оптимизация технологических систем. Сборник научных трудов.- Краматорск- Киев, вып.№20, 2006 с.98-102

3 Підвищення точності важких верстатів на основі керування параметрами формоутворюючої системи дис. канд. техн. наук: 05.03.01 / Мельник Максим Сергійович ; Державний вищий навчальний заклад "Донецький національний технічний ун-т". - Донецьк, 2009.

4 Hai Li, Yingguang Li, Wei Wang, Feature Based Machine Tool Accuracy Analysis Method, Procedia CIRP 2015, 27; 216-222.

5 Ge, LL (Ge Liling)[1]; Zhang, YJ (Zhang Yingjie)[2]; Chen, B (Chen Bo)[2]Study of CCD vision-based monitoring system for NC lathes // MEASUREMENT том: 125 Стр.: 680-686 DOI: 10.1016/j.measurement.2018.05.016 Опубликовано: SEP 2018

6 Development of flank wear model of cutting tool by using adaptive feedback linear control system on machining AISI D2 steel and AISI 4340 steel/ Orra, K (Orra, Kashfull); Choudhury, SK (Choudhury, Sounak K.) - MECHANICAL SYSTEMS AND SIGNAL PROCESSING Том: 81 Стр.: 475-492 DOI: 10.1016/j.ymsp.2016.03.011 Опубликовано: DEC 15 2016

Стаття надійшла до редакції 19.03.2019

УДК 621.647.23

С.Б. Ковальчук, О.В. Горик*Полтавська державна аграрна академія, Полтава, Україна***ПРИРОДНА СИСТЕМА КООРДИНАТ ДЛЯ КРИВОЛІНІЙНИХ КОМПОЗИТНИХ БРУСІВ ІЗ НЕЗМІННИМИ ЛІНІЙНИМИ РОЗМІРАМИ ПОПЕРЕЧНИХ ПЕРЕРІЗІВ**

У роботі подано математичне обґрунтування криволінійної циліндричної ортогональної системи координат, яка є природною для композитного бруса із незмінними лінійними розмірами поперечних перерізів, та отримано загальні аналітичні співвідношення для визначення її параметрів. Наведено приклади застосування запропонованої системи координат для отримання рівнянь теорії пружності для брусів із параболічною, еліптичною та косинусоїдальною віссю.

Ключові слова: криволінійний брус; криволінійна плоска вісь; природна система координат; сімейство кривих; еквідистанта; рівняння теорії пружності.

Форм. 40. Рис. 5. Літ. 22

С.Б. Ковальчук, О.В. Горик**ЕСТЕСТВЕННАЯ СИСТЕМА КООРДИНАТ ДЛЯ КРИВОЛИНЕЙНЫХ КОМПОЗИТНЫХ БРУСЬЕВ С НЕИЗМЕННЫМИ ЛИНЕЙНЫМИ РАЗМЕРАМИ ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЙ**

В работе дано математическое обоснование криволинейной цилиндрической ортогональной системы координат, которая является естественной для композитного бруса с неизменными линейными размерами поперечных сечений, и получены общие аналитические соотношения для определения ее параметров. Приведены примеры применения предложенной системы координат для получения уравнений теории упругости для брусьев с параболической, эллиптической и косинусоидальной осью.

Ключевые слова: криволинейный брус; криволинейная плоская ось; естественная система координат; семейство кривых; эквидистанта; уравнения теории упругости.

S. Kovalchuk, O. Goryk**NATURAL COORDINATE SYSTEM FOR CURVILINEAR COMPOSITE BARS WITH STATIONARY LINEAR DIMENSIONS OF CROSS SECTIONS**

It is known that there are some solutions of the elasticity theory for the tasks of composite bars deformation that are obtained only for multilayer bars with a rectilinear and circular axis, which impedes the efficient design of composite structures with curvilinear rod elements. The goal of this work is the mathematical justification and determination of parameters of the curvilinear cylindrical orthogonal coordinate system, which is natural for composite bars with stationary linear dimensions of cross sections over the length. The coordinate system is based on a one-parameter family of cylindrical surfaces evenly spaced from the base curve (the axis of a bar) and families of planes that are orthogonal to them. Two ways of parameterization of the proposed coordinate system are considered: by the coordinate of the cross section of a bar and by the angle between the cross section and the axis of the auxiliary Cartesian coordinate system, allowing one to take into account the features of axes of various shapes. General analytical relations for determining the parameters of the natural coordinate system by analytically given equation of the axis of a bar have been obtained for the types of parameterization mentioned above. Using these relations, we received the equations of the elasticity theory in the natural coordinate system for bars with a curvilinear plain axis of an arbitrary shape and stationary linear dimensions of cross sections. Some certain examples of implementation of the equations obtained for the bars with a parabolic, elliptic and sinusoidal axis are given. The theoretical framework developed in this paper allows us to expand the possibility of applying the equations of the elasticity theory and relations for internal force factors for curvilinear composite bars in the natural coordinate system for solving a wide range of applied problems.

Keywords: curvilinear bar; curvilinear flat axis; natural coordinate system; curve family; equidistant; equations of the theory of elasticity.

Постановка проблеми. Передові розробки сучасного будівництва та машинобудування неможливо уявити без застосування композитних матеріалів, які дозволяють значно знизити вагу конструкцій і одночасно підвищити їх міцність та надійність. Значну частину будь-якої конструкції складають стержні (бруси, балки) різної форми. Незважаючи на це аналітичні теорії деформування композитних брусів, особливо криволінійних, значно поступаються у розвитку теоріям деформування неоднорідних пластин і оболонок, яким присвячена велика кількість фундаментальних праць, зокрема [1-4].

Деформування пружних однорідних криволінійних стержнів добре вивчене, однак класична теорія деформування, основи якої висвітлені, наприклад, у [5], не може бути застосована до композитних стержнів. Причиною цього є неоднорідність структурної будови композитних брусів, значна піддатливість деформаціям поперечного зсуву і обтиснення та анізотропія фізико-механічних властивостей композитних матеріалів, що не можуть бути враховані в рамках класичної теорії для ізотропних однорідних стержнів.

Відомі аналітичні моделі деформування криволінійних композитних брусів, наприклад [6-9], дозволяють враховувати вплив згаданих властивостей на параметри деформування. Однак вони побудовані із використанням певних спрощень розподілу компонент напружено-деформованого стану (НДС), що знижує точність їх визначення і зужує границі застосування моделей.

Точні розв'язки теорії пружності отримані тільки для криволінійних брусів із круговою віссю і дозволяють враховувати як анізотропію матеріалу [10] та і дискретно-змінну [11-14] або неперервну [15-17] неоднорідність. Однак, такі розв'язки не дозволяють розглядати бруси із іншою формою осі і обмежені у можливості врахування зовнішніх навантажень різного типу.

Відсутність точних розв'язків задач теорії пружності для криволінійних брусів із відмінною від кругової формою осі зумовлена, зокрема, складністю описання їх геометрії, структури та граничних умов у відомих системах координат. Virішити дану проблему дозволяє застосування природної криволінійної системи координат [18], у якій поздовжні волокна та поперечні перерізи співпадають із координатними поверхнями.

Для композитного бруса із криволінійною плоскою віссю довільної форми у природній системі координат авторами у [19] отримані рівняння теорії пружності, у [20] побудовані залежності для внутрішніх силових факторів, а у [21, 22] – співвідношення для моделювання зосереджених та розподілених навантажень. Разом, згадані рівняння та залежності складають теоретичну основу для розв'язання задач деформування криволінійних брусів із віссю довільної форми. Однак, розглянуті у роботах [18-22] приклади ортогональних криволінійних циліндричних систем координат, окрім циліндричної кругової, не спроможні описати криволінійні композитні бруси із сталими вздовж осі лінійними розмірами поперечного перерізу і окремих фаз, як цього вимагають більшість реальних конструкцій.

Мета статті: виконати математичне обґрунтування та отримати співвідношення для визначення параметрів природної системи координат для криволінійних неоднорідних брусів із плоскою віссю довільної форми, що мають незмінні лінійні розміри та структурну будову поперечних перерізів.

Виклад основного матеріалу. У природній криволінійній системі координат $H\Xi Y$ [18], поздовжні поверхні Π_ζ ($\zeta=1,2$) криволінійного бруса (рис. 1) разом із усіма його поздовжніми волокнами належать до однопараметричного сімейства координатних циліндричних поверхонь Π_ζ^g . Аналогічно, торцеві поверхні T_ζ разом із усіма поперечними перерізами належать до однопараметричного сімейства координатних циліндричних поверхонь T_η^f . Проекції поверхонь Π_ζ^g та T_η^f на координатну площину XOZ допоміжної прямокутної системи координат XYZ складають однопараметричні сімейства кривих (рис. 1), відповідно:

$$g_\zeta(x, z, \xi) = 0, \quad f_\eta(x, z, \eta) = 0, \quad (1)$$

де η, ξ – довільні дійсні сталі (параметри сімейств кривих).

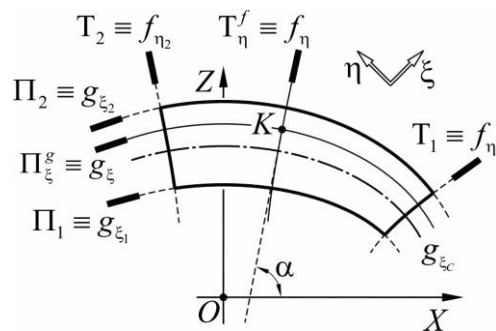


Рис. 1. Схема криволінійного бруса

Зв'язок між координатами довільної точки $K(x, y, z)$ у допоміжній системі XYZ та координатами точки $K(\eta, \xi, y)$ у природній криволінійній системі $H\Xi Y$:

$$x = \omega_x(\eta, \xi), \quad y = y, \quad z = \omega_z(\eta, \xi). \quad (2)$$

Вирази для диференціала дуги на довільних кривих сімейств g_ζ та f_η :

$$ds_{\xi} = L_{\eta} d\eta, \quad ds_{\eta} = L_{\xi} d\xi, \quad (3)$$

де L_{ξ}, L_{η} – коефіцієнти Ламе системи координат НЄУ [18]:

$$L_{\eta} = \sqrt{1 + \kappa^2} \left| \frac{\partial \omega_z}{\partial \eta} \right|, \quad L_{\xi} = \sqrt{1 + \kappa^2} \left| \frac{\partial \omega_x}{\partial \xi} \right|, \quad \kappa = \frac{\partial \omega_z}{\partial \xi} / \frac{\partial \omega_x}{\partial \xi} = - \frac{\partial \omega_x}{\partial \eta} / \frac{\partial \omega_z}{\partial \eta} = \operatorname{tg} \alpha. \quad (4)$$

Виходячи із властивостей взаємно ортогональних сімейств g_{ξ} та f_{η} , має місце рівність

$$- \frac{\partial \omega_z}{\partial \xi} / \frac{\partial \omega_x}{\partial \eta} = \frac{\partial \omega_x}{\partial \xi} / \frac{\partial \omega_z}{\partial \eta} = \lambda. \quad (5)$$

Необхідно відмітити, що в (4) α є кутом між дотичною до кривої f_{η} (проекція поперечного перерізу на XOZ) та додатним напрямом осі OX і у загальному випадку є функцією двох змінних: $\alpha = \alpha(\eta, \xi)$ (рис. 1).

Отримані у [19, 20] рівняння теорії пружності та залежності для внутрішніх силових факторів пружності для довільної циліндричної криволінійної системи координат для свого застосування потребують не самого аналітичного описання систем координат, а тільки їх параметрів, таких як коефіцієнти Ламе L_{ξ} та L_{η} , відношення λ , функція $\alpha(\eta, \xi)$ або коефіцієнт $\kappa = \operatorname{tg}(\alpha)$. Тому використати згадані рівняння та залежності можна без аналітичного описання твірних сімейств кривих g_{ξ} та f_{η} , лише знаючи їх необхідні параметри.

Поставимо задачу формально вибудувати та отримати необхідні параметри природної криволінійної системи координат, яка дозволяє описати криволінійний композитний брус із сталими вздовж осі жорсткості лінійними розмірами та структурою поперечних перерізів.

Для цього розглянемо ділянку композитного дискретно-неоднорідного бруса із постійною структурою, яка залишається незмінною вздовж деякої плоскої кривої $g_{\xi_0} \equiv g_{\xi_c}$, що належить площині XOZ , не має самоперетинів і є однозначною на розглядуваній ділянці (рис. 2).

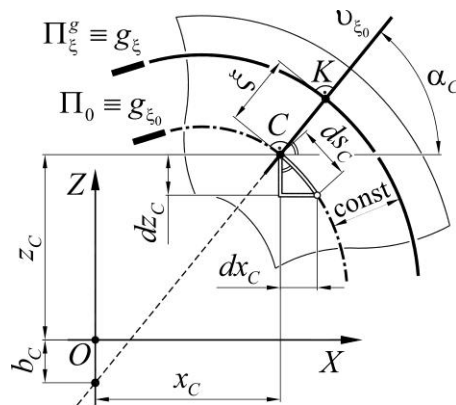


Рис. 2. Схема ділянки криволінійного бруса із постійними розмірами поперечного перерізу вздовж осі

Нехай g_{ξ_0} на розглядуваній ділянці є гладкою кривою, що може бути описана аналітично у вигляді рівняння:

$$g_{\xi_0} = \psi_0(x) - z = 0, \quad (6)$$

де $\psi_0(x) = \psi_0$ – безперервна функція змінної x , що має принаймні першу та другу безперервні похідні.

У випадку, коли лінійні розміри фаз композитного бруса та їх розташування вздовж і відносно осі g_{ξ_0} є незмінними, проекція g_{ξ} кожного поздовжнього волокна на площину XOZ повинна бути кривою рівновіддаленою (паралельною) відносно осі g_{ξ_0} .

Нехай відстань між деякою точкою $C(x_c, z_c)$ кривої g_{ξ_0} та точкою $K(x_k, z_k)$ довільної кривої g_{ξ} , що лежать на перетині даних кривих спільною нормаллю v_{ξ_0} , дорівнює ξ (рис. 2). Тоді координати точки K можна пов'язати із координатами точки C наступними співвідношеннями:

$$x_K = x_C + \xi \cos \alpha_C, \quad z_K = z_C + \xi \sin \alpha_C. \quad (7)$$

Параметр ξ є величиною нормального зміщення точок кривої g_ξ до суміщення із базовою кривою g_{ξ_0} і може набувати від'ємних та додатних значень, а також дорівнювати нулю, причому $g_{\xi_0} = g_\xi|_{\xi=0}$. Далі вважатимемо, що додатні значення ξ відраховуються в обраному напрямку вектора бінормалі кривої g_{ξ_0} .

Для кута α_C між нормаллю v_{ξ_0} та додатнім напрямом осі OX (рис. 2), із урахуванням (6) можна записати:

$$\alpha_C = \operatorname{arctg} \left(\frac{d\psi_0}{dx} \Big|_{x=x_C} \right) + \frac{\pi}{2}. \quad (8)$$

Підставивши (8) до співвідношень (7) отримаємо

$$x_K = x_C - \frac{\xi}{\sqrt{1 + \left(\frac{d\psi_0}{dx} \Big|_{x=x_C} \right)^2}} \frac{d\psi_0}{dx} \Big|_{x=x_C}, \quad z_K = \psi_0 \Big|_{x=x_C} + \frac{\xi}{\sqrt{1 + \left(\frac{d\psi_0}{dx} \Big|_{x=x_C} \right)^2}}. \quad (9)$$

Першому співвідношенню (9) надамо наступний вигляд

$$\left(\xi^2 + (x_K - x_C)^2 \right) \left(\frac{d\psi_0}{dx} \Big|_{x=x_C} \right)^2 + (x_K - x_C)^2 = 0. \quad (10)$$

У випадку аналітично заданої функції ψ_0 , співвідношення (10) перетворюється на рівняння відносно x_C . Розв'язком даного рівняння буде залежність $x_C = x_C(x_K, \xi)$, яка дозволяє позбутись у другому співвідношенні (9) координати x_C і отримати залежність між координатами довільної точки K кривої g_ξ : $\psi(x_K, \xi) = z_K|_{x_C=x_C(x_K, \xi)}$. Тоді шукане рівняння паралельної кривої можемо записати у вигляді

$$g_\xi = \psi(x_K, \xi)|_{x_K=x} - z = 0. \quad (11)$$

Рівняння кривої (11) у розгорнутому вигляді, навіть для простої функції базової кривої g_{ξ_0} , буде дуже громіздким. Однак для встановлення параметрів криволінійної системи координат, побудованої на основі g_ξ , отримувати рівняння (11) у завершеному вигляді не потрібно.

Криві (11) складають однопараметричне сімейство паралельних кривих $g_\xi(x, z, \xi) = 0$ із параметром ξ і для формальної побудови природної криволінійної системи координат залишається знайти ортогональне йому сімейство кривих f_η .

Довільна нормаль v_{ξ_0} до осі g_{ξ_0} очевидно буде перпендикулярною і до решти кривих сімейства g_ξ (рис. 2), а її рівняння матиме наступний вигляд

$$v_{\xi_0} = z - x \operatorname{tg} \alpha_C + b_C = 0, \quad \text{або} \quad v_{\xi_0} = (z - z_C) - (x - x_C) \operatorname{tg} \alpha_C = 0. \quad (12)$$

Припустимо, що нормалі v_{ξ_0} в усіх точках деякої ділянки осі g_{ξ_0} можуть бути об'єднані у однопараметричне сімейство прямих

$$f_\eta(x, z, \eta) \equiv v_{\xi_0} = (z - z_C) - (x - x_C) \operatorname{tg} \alpha_C = 0. \quad (13)$$

Для цього необхідно встановити відповідність параметра η до деякого параметра рівняння нормалі v_{ξ_0} . Згідно (12) у якості таких параметрів можна розглядати координати x_C чи z_C , кут α_C чи його тангенс $\operatorname{tg} \alpha_C$, або параметр t , якщо крива g_{ξ_0} задана параметрично. Це дозволяє розглядати різні способи параметризації сімейства f_η , що в окремих випадках дозволяє спростити вигляд рівнянь теорії пружності та інших залежностей у природній системі координат.

Параметризація за координатою поперечного перерізу бруса. Така параметризація природної системи координат відповідає випадку, коли у якості параметра сімейства f_η прийнята координата x_C чи z_C точки осі бруса.

Розглянемо випадок, коли

$$\eta \equiv x_C. \quad (14)$$

Тоді, підставивши (6) та (8) до (13), отримаємо

$$f_\eta = z + \frac{x - \eta}{\frac{d\psi_0}{dx} \Big|_{x=\eta}} - \psi_0 \Big|_{x=\eta} = 0. \quad (15)$$

Встановимо параметри L_ξ , L_η , α , κ та λ для системи координат побудованої на однопараметричних сімействах кривих (11) та (15).

Врахувавши (14) у співвідношеннях (9) та (8) із урахуванням (2) отримаємо

$$\omega_x = \eta - \frac{\xi}{\sqrt{1 + \left(\frac{d\psi_0}{dx} \Big|_{x=\eta}\right)^2}} \frac{d\psi_0}{dx} \Big|_{x=\eta}, \quad \omega_z = \psi_0 \Big|_{x=\eta} + \frac{\xi}{\sqrt{1 + \left(\frac{d\psi_0}{dx} \Big|_{x=\eta}\right)^2}}. \quad (16)$$

Підставивши (16) до третього співвідношення (4), матимемо

$$\kappa = \frac{\partial \omega_z}{\partial \xi} / \frac{\partial \omega_x}{\partial \xi} = -1 / \frac{d\psi_0}{dx} \Big|_{x=\eta}, \quad (17)$$

звідки

$$\alpha = -\arctg\left(1 / \frac{d\psi_0}{dx} \Big|_{x=\eta}\right). \quad (18)$$

Співвідношення (17) і (18) підтверджують очевидну властивість побудованої системи координат: $\alpha = \alpha(\eta)$ – кут між дотичною до поперечного перерізу та віссю OX залежить тільки від координати η .

Підставивши (16) і (17) до двох перших співвідношень (4) отримаємо

$$L_\xi = 1, \quad L_\eta = \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{d\psi_0}{dx} \Big|_{x=\eta}\right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{d\psi_0}{dx} \Big|_{x=\eta}\right)^2}} \left| \frac{\partial(\psi_0 \Big|_{x=\eta})}{\partial \eta} - \frac{\frac{d\psi_0}{dx} \Big|_{x=\eta} \frac{d}{d\eta} \left(\frac{d\psi_0}{dx} \Big|_{x=\eta}\right)}{\left(1 + \left(\frac{d\psi_0}{dx} \Big|_{x=\eta}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}} \right| \xi. \quad (19)$$

Врахувавши, що

$$\frac{\partial \psi_0 \Big|_{x=\eta}}{\partial \eta} = \frac{d\psi_0}{dx} \Big|_{x=\eta}, \quad \frac{d}{d\eta} \left(\frac{d\psi_0}{dx} \Big|_{x=\eta}\right) = \frac{d^2 \psi_0}{dx^2} \Big|_{x=\eta},$$

друге співвідношення (19) можна перетворити до такого вигляду

$$L_\eta = \left| \frac{1}{\sin \alpha} \left(1 - \operatorname{sgn} \left(\frac{d^2 \psi_0}{dx^2} \Big|_{x=\eta}\right) \frac{\xi}{r_0}\right) \right|, \quad (20)$$

де $r_0 = r_0(\eta)$ – радіус кривизни базової кривої g_{ξ_0} :

$$r_0 = \frac{1}{\left| \frac{d^2 \psi_0}{dx^2} \Big|_{x=\eta} \right|} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{d\psi_0}{dx} \Big|_{x=\eta}\right)^2} \right)^3. \quad (21)$$

Співвідношення (20) є узагальненим для базової кривої g_{ξ_0} із довільним знаком кривизни. У випадку показаному на рис. 2, кривизна g_{ξ_0} є від'ємною і якщо на розглядуваній ділянці вона не змінює знак, то $\sin \alpha \geq 0$, відповідно

$$L_\eta = \frac{1}{\sin \alpha} \left(1 + \frac{\xi}{r_0}\right).$$

Необхідно відмітити, що розбиттям базової кривої на ділянки у точках перегину і належним вибором допоміжної системи координат XYZ для кожної такої ділянки, можна завжди досягти умов, у яких буде справедливим дане співвідношення.

Підставивши (16) до (5) і виконавши подібні перетворення, отримаємо для параметра λ

$$\lambda = -\frac{\partial \omega_z}{\partial \xi} / \frac{\partial \omega_x}{\partial \eta} = -\frac{\sin \alpha}{1 - \operatorname{sgn} \left(\frac{d^2 \psi_0}{dx^2} \Big|_{x=\eta} \right) \xi} r_0. \quad (22)$$

Співвідношення (16)-(21) і (22) дозволяють визначити всі необхідні параметри розглядуваної природної системи координат по заданому рівнянню базової кривої g_{ξ_0} . Аналогічно, можна отримати співвідношення для випадку параметризації сімейства f_η за координатою z_C точки базової кривої g_{ξ_0} , прийнявши $\eta \equiv z_C$.

Параметризація за кутом нахилу поперечного перерізу бруса. Такий спосіб параметризації природної системи координат відповідає випадку, коли у якості параметра сімейства f_η прийнято кут нахилу нормалі до базової кривої g_{ξ_0} :

$$\eta \equiv \alpha_C = \alpha. \quad (23)$$

З урахуванням (23), рівняння (13) сімейства f_η набуде вигляду

$$f_\eta(x, z, \eta) = (z - z_C) - (x - x_C) \operatorname{tg} \eta = 0. \quad (24)$$

Аналогічно розглянутому вище випадку визначимо параметри L_ξ , L_η , κ та λ для природної системи координат.

Врахувавши (23) у співвідношеннях (7) отримаємо

$$\omega_x = x_C(\eta) + \xi \cos \eta, \quad \omega_z = \psi_0 \Big|_{x=x_C(\eta)} + \xi \sin \eta. \quad (25)$$

Підставивши (25) до третього співвідношення (4) із урахуванням (9), матимемо

$$\kappa = \frac{\sin \eta}{\cos \eta} = \operatorname{tg} \eta = -1 / \frac{d\psi_0}{dx} \Big|_{x=x_C(\eta)}. \quad (26)$$

З урахуванням (25) і (26) коефіцієнти Ламе в (4) набудуть вигляду

$$L_\xi = \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \eta} |\cos \eta| = 1, \quad (27)$$

$$L_\eta = \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \eta} |\cos \eta| \left| \frac{1}{\cos \eta} \frac{d\psi_0}{dx_C(\eta)} \frac{dx_C(\eta)}{d\eta} + \xi \right| = \left| \frac{1}{\cos \eta} \frac{d\psi_0}{dx_C(\eta)} \frac{dx_C(\eta)}{d\eta} + \xi \right|.$$

Врахувавши, що

$$\cos \eta = -\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{d\psi_0}{dx} \Big|_{x=x_C(\eta)} \right)^2}} \frac{d\psi_0}{dx} \Big|_{x=x_C(\eta)}, \quad \frac{d\psi_0}{dx} \Big|_{x=x_C(\eta)} = \frac{1}{\frac{dx_C(\eta)}{d\eta}} \frac{d\psi_0}{d\eta} \Big|_{x=x_C(\eta)},$$

друге співвідношення (27) перетворимо так

$$L_\eta = \left| \xi - \operatorname{sgn} \left(\frac{dx_C(\eta)}{d\eta} \right) \sqrt{\left(\frac{dx_C(\eta)}{d\eta} \right)^2 + \left(\frac{d\psi_0}{d\eta} \Big|_{x=x_C(\eta)} \right)^2} \right| = \left| \xi - \operatorname{sgn} \left(\frac{dx_C(\eta)}{d\eta} \right) \frac{ds_C}{d\eta} \right|, \quad (28)$$

де $ds_C = \sqrt{\left(dx_C(\eta) \right)^2 + \left(d\psi_0 \Big|_{x=x_C(\eta)} \right)^2}$ – довжина приросту дуги базової кривої g_{ξ_0} .

Однак, приріст довжини дуги

$$ds_C = r_0(\eta) d\eta,$$

що дозволяє записати (28) в остаточному вигляді

$$L_\eta = \left| \xi - \operatorname{sgn} \left(\frac{dx_C(\eta)}{d\eta} \right) r_0(\eta) \right|. \quad (29)$$

Порівнюючи (28) та (29), для радіуса кривизни r_0 можемо записати

$$r_0(\eta) = \sqrt{\left(\frac{dx_c(\eta)}{d\eta}\right)^2 + \left(\frac{d\psi_0|_{x=x_c(\eta)}}{d\eta}\right)^2} = \left|\frac{dx_c(\eta)}{d\eta}\right| \sqrt{1 + \left(\frac{d\psi_0|_{x=x_c(\eta)}}{dx_c(\eta)}\right)^2} = \left|\frac{1}{\sin \eta} \frac{dx_c(\eta)}{d\eta}\right|. \quad (30)$$

Підставивши (25) до (5), із урахуванням (30) отримаємо

$$\lambda = -\frac{\partial \omega_z}{\partial \xi} / \frac{\partial \omega_x}{\partial \eta} = \frac{1}{\xi - \operatorname{sgn}\left(\frac{1}{\sin \eta} \frac{dx_c(\eta)}{d\eta}\right) r_0}. \quad (31)$$

Необхідно відмітити, що параметризація за кутом нахилу поперечного перерізу бруса дозволяє отримати простіші співвідношення для параметрів природної системи координат, але водночас має важливий недолік. За наявності точок перегину з'являється неоднозначна залежність сімейства f_η від параметра η , оскільки одному куту нахилу $\alpha = \eta$ може відповідати декілька прямих сімейства. Тому, у випадку застосування такого способу параметризації виникає необхідність розбиття базової кривої на ділянки без точок перегину, в межах яких кут нахилу нормалі монотонно тільки зростає або тільки спадає.

Результати дослідження. Отримані вище співвідношення для параметрів α, k, λ та коефіцієнтів L_η, L_ξ природної системи координат, побудованої на сімействі паралельних кривих, разом із результатами роботи [19] дозволяють отримати рівняння теорії пружності для криволінійного композитного стержня із незмінними по довжині лінійними розмірами та структурою поперечного перерізу.

З урахуванням (19) та (27), незалежно від розглянутих вище способів параметризації природної системи координат, рівняння теорії пружності, отримані у [19], спрощуються до такого вигляду

$$\begin{aligned} \lambda \frac{\partial \sigma_\eta}{\partial \eta} + \frac{\partial \tau_{\xi\eta}}{\partial \xi} + \frac{\partial \tau_{\eta y}}{\partial y} + 2\lambda \frac{\partial \alpha}{\partial \eta} \tau_{\xi\eta} + \mu^p \left(F_\eta^V - \frac{\partial^2 \tilde{w}}{\partial t^2} \right) &= 0, \\ \lambda \frac{\partial \tau_{\xi\eta}}{\partial \eta} + \frac{\partial \sigma_\xi}{\partial \xi} + \frac{\partial \tau_{\xi y}}{\partial y} + \lambda \frac{\partial \alpha}{\partial \eta} (\sigma_\xi - \sigma_\eta) + \mu^p \left(F_\xi^V - \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial t^2} \right) &= 0, \\ \lambda \frac{\partial \tau_{\eta y}}{\partial \eta} + \frac{\partial \tau_{\xi y}}{\partial \xi} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \lambda \frac{\partial \alpha}{\partial \eta} \tau_{\xi y} + \mu^p \left(F_y^V - \frac{\partial^2 \tilde{v}}{\partial t^2} \right) &= 0, \\ \varepsilon_\eta &= \lambda \left(\frac{\partial \tilde{w}}{\partial \eta} + \frac{\partial \alpha}{\partial \eta} \tilde{u} \right), \quad \varepsilon_\xi = \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \xi}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial \tilde{v}}{\partial y}, \\ \gamma_{\eta\xi} &= \lambda \left(\frac{\partial \tilde{u}}{\partial \eta} - \frac{\partial \alpha}{\partial \eta} \tilde{w} \right) + \frac{\partial \tilde{w}}{\partial \xi}, \quad \gamma_{\xi y} = \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \xi} + \frac{\partial \tilde{u}}{\partial y}, \quad \gamma_{y\eta} = \lambda \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \eta} + \frac{\partial \tilde{w}}{\partial y}, \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_\eta &= \frac{\sigma_\eta}{\mu_\eta^E} - \frac{\mu_{\xi\eta}^V \sigma_\xi}{\mu_\xi^E} - \frac{\mu_{y\eta}^V \sigma_y}{\mu_y^E} + \mu_\eta^9 T, & \gamma_{\eta\xi} &= \frac{1}{\mu_{\eta\xi}^G} \tau_{\eta\xi}, \\ \varepsilon_\xi &= \frac{\sigma_\xi}{\mu_\xi^E} - \frac{\mu_{y\xi}^V \sigma_y}{\mu_y^E} - \frac{\mu_{\eta\xi}^V \sigma_\eta}{\mu_\eta^E} + \mu_\xi^9 T, & \gamma_{\xi y} &= \frac{1}{\mu_{\xi y}^G} \tau_{\xi y}, \\ \varepsilon_y &= \frac{\sigma_y}{\mu_y^E} - \frac{\mu_{\eta y}^V \sigma_\eta}{\mu_\eta^E} - \frac{\mu_{\xi y}^V \sigma_\xi}{\mu_\xi^E} + \mu_y^9 T, & \gamma_{y\eta} &= \frac{1}{\mu_{y\eta}^G} \tau_{y\eta}, \end{aligned} \quad (34)$$

де F_η^V, F_ξ^V, F_y^V – компоненти вектора об'ємних сил; $\tilde{w}, \tilde{u}, \tilde{v}$ – компоненти вектора переміщень; $\mu^p = \mu^p(\xi)$ – функція розподілу густини у поперечному перерізі неоднорідного бруса;

$\mu_a^S = \mu_a^S(\xi)$ – функції розподілу модулів пружності, модулів зсуву, коефіцієнтів Пуассона та

коефіцієнтів температурного розширення; T – інтенсивність температурного поля у розглядуваній точці бруса.

Для плоскої задачі теорії пружності матимемо

$$\lambda \frac{\partial \sigma_\eta}{\partial \eta} + \frac{\partial \tau_{\xi\eta}}{\partial \xi} + 2\lambda \frac{\partial \alpha}{\partial \eta} \tau_{\xi\eta} + \mu^p \left(F_\eta^V - \frac{\partial^2 \tilde{w}}{\partial t^2} \right) = 0, \quad (35)$$

$$\lambda \frac{\partial \tau_{\xi\eta}}{\partial \eta} + \frac{\partial \sigma_\xi}{\partial \xi} + \lambda \frac{\partial \alpha}{\partial \eta} (\sigma_\xi - \sigma_\eta) + \mu^p \left(F_\xi^V - \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial t^2} \right) = 0,$$

$$\varepsilon_\eta = \lambda \left(\frac{\partial \tilde{w}}{\partial \eta} + \frac{\partial \alpha}{\partial \eta} \tilde{u} \right), \quad \varepsilon_\xi = \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \xi}, \quad \gamma_{\eta\xi} = \lambda \left(\frac{\partial \tilde{u}}{\partial \eta} - \frac{\partial \alpha}{\partial \eta} \tilde{w} \right) + \frac{\partial \tilde{w}}{\partial \xi}, \quad (36)$$

$$\varepsilon_\eta = \frac{\sigma_\eta}{\mu_\eta^E} - \frac{\mu_{\xi\eta}^V \sigma_\xi}{\mu_\xi^E} - \frac{\mu_{y\eta}^V \sigma_y}{\mu_y^E} + \mu_\eta^g T, \quad \varepsilon_\xi = \frac{\sigma_\xi}{\mu_\xi^E} - \frac{\mu_{y\xi}^V \sigma_y}{\mu_y^E} - \frac{\mu_{\eta\xi}^V \sigma_\eta}{\mu_\eta^E} + \mu_\xi^g T, \quad \gamma_{\eta\xi} = \frac{1}{\mu_{\eta\xi}^G} \tau_{\eta\xi}. \quad (37)$$

У випадку застосування параметризації за координатою поперечного перерізу бруса, параметри λ та $\partial\alpha/\partial\eta$ у рівняннях (32)-(37) визначаються співвідношеннями (22), (18) і (21)

$$\lambda = - \frac{\left(1 - \operatorname{sgn} \left(\frac{d^2 \psi_0}{dx^2} \Big|_{x=\eta} \right) \xi \right) r_0^{-1}}{\sqrt{1 + \left(\frac{d\psi_0}{dx} \Big|_{x=\eta} \right)^2}}, \quad \frac{d\alpha}{d\eta} = \frac{\frac{d^2 \psi_0}{dx^2} \Big|_{x=\eta}}{1 + \left(\frac{d\psi_0}{dx} \Big|_{x=\eta} \right)^2}, \quad r_0 = \frac{\left(\sqrt{1 + \left(\frac{d\psi_0}{dx} \Big|_{x=\eta} \right)^2} \right)^3}{\left| \frac{d^2 \psi_0}{dx^2} \Big|_{x=\eta} \right|}. \quad (38)$$

Застосування параметризації за кутом нахилу поперечного перерізу бруса згідно (31), (23) та (30) призводить до суттєвого спрощення співвідношень для коефіцієнтів

$$\lambda = \frac{1}{\xi - \operatorname{sgn} \left(\frac{1}{\sin \eta} \frac{dx_c(\eta)}{d\eta} \right) r_0}, \quad \frac{d\alpha}{d\eta} = 1, \quad r_0 = \left| \frac{1}{\sin \eta} \frac{dx_c(\eta)}{d\eta} \right|. \quad (39)$$

Співвідношення (38), (39) і відповідно рівняння (32)-(37) можуть бути конкретизовані для певної форми осі бруса. Наведемо ряд прикладів такої конкретизації.

Параболічна вісь. Розглянемо брус із параболічною віссю (рис. 3), що задана рівнянням $g_{\xi_0} = z - a_2 x^2 - a_0 = 0$, де $a_2, a_0 = \text{const}$.

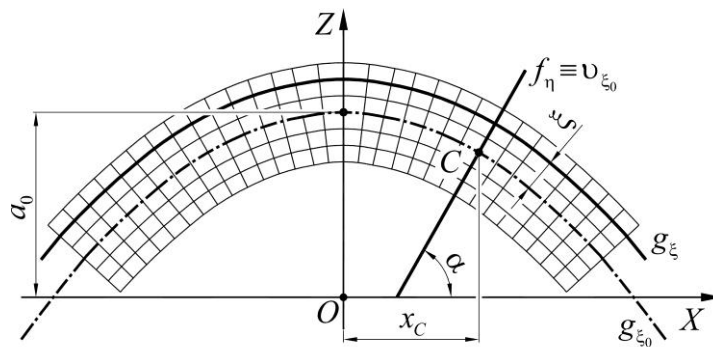


Рис. 3. Схема бруса із параболічною віссю ($a_2 < 0, a_0 > 0$)

Згідно (17)-(19), (21), (32) та (22) матимемо наступні параметри природної системи координат із параметризацією за координатою поперечного перерізу ($x_c = \eta$):

$$\kappa = - \frac{1}{2a_2 \eta}, \quad \alpha = - \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{2a_2 \eta} \right), \quad \frac{d\alpha}{d\eta} = \frac{2a_2}{1 + 4a_2^2 \eta^2}, \quad r_0 = \frac{1}{2|a_2|} \left(\sqrt{1 + 4(a_2 \eta)^2} \right)^3,$$

$$L_{\xi} = 1, L_{\eta} = \left| \frac{\left(\sqrt{1+4a_2^2\eta^2} \right)^3 - 2a_2\xi}{1+4(a_2\eta)^2} \right|, \lambda = \frac{\operatorname{sgn}(a_2\eta) \left(1+4(a_2\eta)^2 \right)}{\left(\sqrt{1+4(a_2\eta)^2} \right)^3 - 2a_2\xi}.$$

Застосування даних співвідношень у (32)-(37) дозволяє отримати рівняння теорії пружності для бруса із параболічною віссю у завершеному вигляді.

Для встановлення параметрів природної системи координат із параметризацією за кутом нахилу поперечного перерізу необхідно встановити залежність $x_c = x_c(\eta)$, що можна зробити розв'язавши (26) відносно даної функції.

У випадку параболічної базової кривої згідно (26) матимемо

$$\operatorname{tg} \eta = -1 \left/ \frac{d}{dx} (a_2 x^2 + a_0) \right|_{x=x_c(\eta)}, \quad x_c(\eta) = -\frac{1}{2a_2 \operatorname{tg} \eta}, \quad \frac{d}{d\eta} x_c(\eta) = \frac{1}{2a_2 \sin^2 \eta}.$$

Тоді, відповідно до (23), (26), (27), (29)-(31) матимемо наступні параметри відповідної природної системи координат

$$\alpha = \eta, \quad \kappa = \operatorname{tg} \eta, \quad r_0 = \frac{1}{2|a_2| \sin^3 \eta}, \quad L_{\xi} = 1, \quad L_{\eta} = \left| \xi - \frac{1}{2a_2 \sin^3 \eta} \right|, \quad \lambda = \frac{1}{\xi - \frac{1}{2a_2 \sin^3 \eta}}.$$

Еліптична вісь. Нехай брус має еліптичну вісь (рис. 4), задану рівнянням $g_{\xi_0} = z - \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - x^2} = 0$, $a, b > 0$.

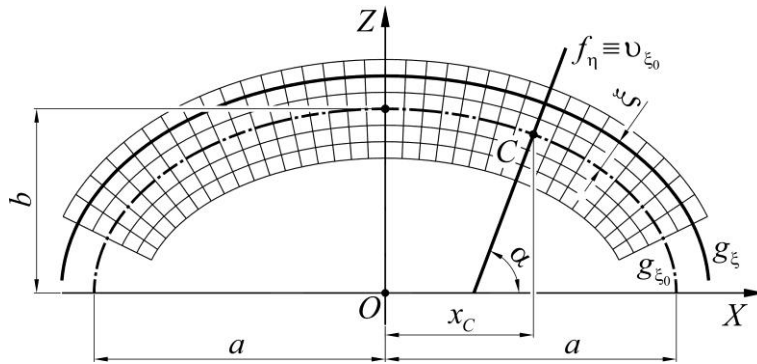


Рис. 4. Схема бруса із еліптичною віссю

Аналогічно попередньому прикладу, із використанням (17)-(19), (21), (32) та (22) отримаємо наступні співвідношення для параметрів природної системи координат із параметризацією за координатою поперечного перерізу ($x_c = \eta$):

$$\kappa = \frac{a\sqrt{a^2 - \eta^2}}{b\eta}, \quad \alpha = \operatorname{arctg} \left(\frac{a\sqrt{a^2 - \eta^2}}{b\eta} \right), \quad \frac{d\alpha}{d\eta} = -\frac{a^3 b}{\sqrt{a^2 - \eta^2} (a^4 + (b^2 - a^2)\eta^2)},$$

$$L_{\xi} = 1, \quad L_{\eta} = \left| \frac{\left(\sqrt{a^4 + (b^2 - a^2)\eta^2} \right)^3 + a^4 b \xi}{a\sqrt{a^2 - \eta^2} (a^4 + (b^2 - a^2)\eta^2)} \right|, \quad \lambda = -\frac{a\sqrt{a^2 - \eta^2} (a^4 + (b^2 - a^2)\eta^2)}{\operatorname{sgn}(\eta) \left(\left(\sqrt{a^4 + (b^2 - a^2)\eta^2} \right)^3 + a^4 b \xi \right)}.$$

Для природної системи координат із параметризацією за кутом нахилу поперечного перерізу, згідно (26), у випадку $x > 0$ матимемо:

$$\operatorname{tg} \eta = \frac{a\sqrt{a^2 - x^2}}{bx}, \quad x_c(\eta) = \frac{a^2}{\sqrt{a^2 + b^2 \operatorname{tg}^2 \eta}}, \quad \frac{d}{d\eta} x_c(\eta) = -\frac{a^2 b^2 \operatorname{tg} \eta (1 + \operatorname{tg}^2 \eta)}{\left(\sqrt{a^2 + b^2 \operatorname{tg}^2 \eta} \right)^3}, \quad 0 \leq \eta < \frac{\pi}{2}.$$

Тоді, із використанням (23), (26), (27), (29)-(31) отримаємо наступні співвідношення

$$\alpha = \eta, \kappa = \operatorname{tg} \eta, r_0 = \left| \frac{a^2 b^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \eta)}{\cos \eta (\sqrt{a^2 + b^2 \operatorname{tg}^2 \eta})^3} \right|, L_\xi = 1, L_\eta = |\xi + r_0|, \lambda = \frac{1}{\xi + r_0}, 0 \leq \eta < \frac{\pi}{2}. \quad (40)$$

Якщо $x < 0$, згідно (26)

$$x_c(\eta) = -\frac{a^2}{\sqrt{a^2 + b^2 \operatorname{tg}^2 \eta}}, \frac{d}{d\eta} x_c(\eta) = \frac{a^2 b^2 \operatorname{tg} \eta (1 + \operatorname{tg}^2 \eta)}{(\sqrt{a^2 + b^2 \operatorname{tg}^2 \eta})^3}, \frac{\pi}{2} < \eta \leq \pi,$$

однак $\operatorname{sgn}\left(\frac{1}{\sin \eta} \frac{dx_c(\eta)}{d\eta}\right) = -1$ на проміжку $\frac{\pi}{2} < \eta \leq \pi$ і співвідношення для параметрів

природної системи координат залишаються аналогічними (40).

Також можна показати, що для еліптичного кільця, якщо напрям нормалі v_{ξ_0} не змінюється при переході через $\eta = \pi$, параметри природної системи координат на усьому проміжку $0 < \eta < 2\pi$ матимуть вигляд

$$\alpha = \eta, \kappa = \operatorname{tg} \eta, L_\xi = 1, L_\eta = |\xi + r_0|, \lambda = \frac{1}{\xi + r_0}, 0 \leq \eta < 2\pi,$$

де $r_0 = r_0(\eta)$ – радіус кривизни, що визначається згідно (40).

Косинусоїдальна вісь. Нехай брус має косинусоїдальну вісь (рис. 5), задану рівнянням $g_{\xi_0} = z - a \cos(bx) = 0, a, b > 0$.

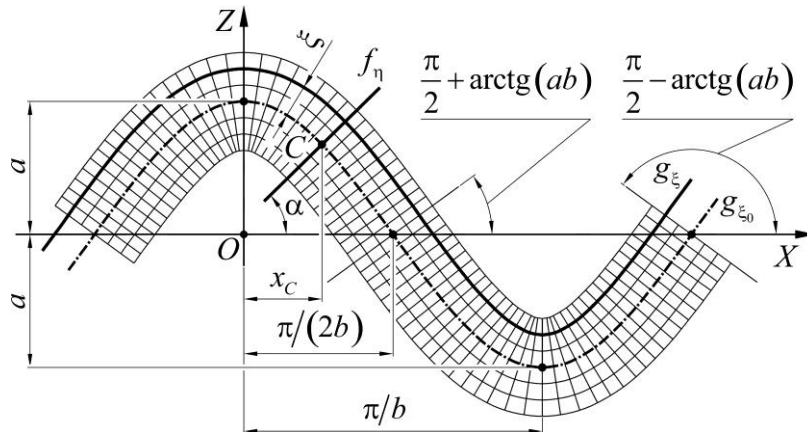


Рис. 5. Схема бруса із косинусоїдальною віссю

У випадку параметризації природної системи координат за координатою перерізу, згідно (17)-(19), (21), (32) та (22) отримані наступні співвідношення для її параметрів

$$\kappa = \frac{1}{ab \sin(b\eta)}, \alpha = \arctan\left(\frac{1}{ab \sin(b\eta)}\right), \frac{d\alpha}{d\eta} = -\frac{ab^2 \cos(b\eta)}{1 + a^2 b^2 \sin^2(b\eta)}, r_0 = \frac{(\sqrt{1 + a^2 b^2 \sin^2(b\eta)})^3}{|-ab^2 \cos(b\eta)|},$$

$$L_\eta = \left| \frac{(\sqrt{1 + a^2 b^2 \sin^2(b\eta)})^3 + ab^2 \cos(b\eta) \xi}{1 + a^2 b^2 \sin^2(b\eta)} \right|, \lambda = -\frac{1 + a^2 b^2 \sin^2(b\eta)}{(\sqrt{1 + a^2 b^2 \sin^2(b\eta)})^3 + ab^2 \cos(b\eta) \xi}.$$

Параметризацію природної системи координат за кутом нахилу нормалі до базової кривої в даному випадку можна застосувати лише для додатної або від'ємної півхвилі косинусоїди, оскільки діапазон зміни кута $(\pi/2 - \operatorname{arctg}(ab) \leq \alpha \leq \pi/2 + \operatorname{arctg}(ab))$ однаковий в обох випадках. Розглянемо додатну півхвилю на проміжку $-\pi/(2b) < x < \pi/(2b)$. Згідно (26) для природної системи координат із параметризацією за кутом нахилу нормалі, матимемо:

$$\operatorname{tg} \eta = \frac{1}{ab \sin(bx)}, \quad x_c(\eta) = \frac{1}{b} \arcsin\left(\frac{1}{ab \operatorname{tg} \eta}\right), \quad \frac{dx_c(\eta)}{d\eta} = -\frac{1}{b |\operatorname{tg} \eta| \sin^2 \eta \sqrt{a^2 b^2 \operatorname{tg}^2 \eta - 1}}.$$

Тоді, відповідно до (23), (26), (27), (29)-(31) матимемо наступні параметри природної системи координат

$$\alpha = \eta, \quad \kappa = \operatorname{tg} \eta, \quad r_0 = \frac{|\operatorname{tg} \eta|}{b |\sin^3 \eta| \sqrt{b^2 a^2 \operatorname{tg}^2 \eta - 1}}, \quad L_\xi = 1, \quad L_\eta = |\xi + r_0|, \quad \lambda = \frac{1}{\xi + r_0}.$$

Аналогічно наведеним прикладам можуть бути отримані завершені рівняння теорії пружності для брусів з іншою формою осі.

Висновки. Таким чином, побудовано криволінійну систему координат на основі однопараметричного сімейства еквідистант базової кривої, заданої аналітично, яка є природною для криволінійного бруса із незмінними лінійними розмірами поперечних перерізів.

Розглянуто два способи параметризації побудованої системи координат: за координатою поперечного перерізу бруса (за координатою точки базової кривої) та за кутом нахилу поперечного перерізу (кутом між нормаллю до базової кривої і віссю абсцис допоміжної прямокутної системи координат), для яких отримано співвідношення для визначення основних параметрів природної системи координат.

Із застосуванням отриманих співвідношень були уточнені рівняння просторової та плоскої задач лінійної теорії пружності для дискретно-неоднорідного композитного бруса із плоскою віссю довільної форми і незмінними лінійними розмірами поперечних перерізів.

Наведені приклади визначення параметрів природної системи координат та коефіцієнтів у рівняннях теорії пружності у випадку параболічної, еліптичної та косинусоїдальної базової кривої показали, що найбільш простий вигляд статичні та геометричні рівняння набувають у випадку параметризації природної системи координат за кутом нахилу поперечного перерізу бруса. Однак, застосування параметризації за координатою перерізу дозволяє розглядати випадки брусів із віссю у формі періодичних кривих без розбиття їх на ділянки між точками перегину.

Отримані співвідношення та рівняння складають основу для побудови розв'язків задач теорії пружності та моделей пружного деформування криволінійних брусів постійної структури та розмірів поперечних перерізів, із аналітично заданою поздовжньою віссю довільної форми.

Список використаних джерел:

1. Амбарцумян С. А. Общая теория анизотропных оболочек. М.: Наука, 1974. 448 с.
2. Алфатов Н. А., Зиновьев П. А., Попов Б. Г. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1984. 264 с.
3. Шваб'юк В. І., Ротко С. В. Лінійне деформування, міцність і стійкість композитних оболонок середньої товщини. Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2015. 264 с.
4. Васильев В. В. Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988. 272 с.
5. Светлицкий В. А. Механика стержней. В 2-х ч. Часть 1. Статика. М.: «Высшая школа», 1987. 320 с.
6. Ascione L., Fraternali F. A penalty model for the analysis of curved composite curved beams. *Computers & Structures*. 1992. 45(5/6). P. 985-999.
7. Lin K. C., Hsieh C. M. The closed form general solutions of 2-D curved laminated beams of variable curvatures. *Composite Structures*. 2007. 79(4), P. 606-618.
8. Luu A.-T., Kim N.-I., Lee J. Bending and buckling of general laminated curved beams using NURBS-based isogeometric analysis. *European Journal of Mechanics A/Solids*. 2015. 54. P. 218-231.
9. Thurnherr C., Groh R. M. J., Ermanni P., Weaver P. M. Higher-order beam model for stress predictions in curved beams made from anisotropic materials. *International Journal of Solids and Structures*. 2016. Vol. 97-98. P. 16-28.
10. Lekhnitskii S. G. On the bending of a plane inhomogeneous curved beam. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 1979. 43(1). P.198-200.
11. Tolf G. Stresses in a Curved Laminated Beam. *Fibre Science and Technology*. 1983. 19(4). P. 243-267.
12. Ko W. L., Jackson R. H. Multilayer Theory for delamination Analysis of a Composite Curved Bar Subjected to End Forces and End Moments. *Composite Structures* 5. Springer, Dordrecht. 1989. P. 173-198.

13. Koval'chuk S. B., Goryk A. V. Elasticity Theory Solution of the Problem on Bending of a Narrow Multilayer Cantilever with a Circular Axis by Loads at its End. *Mechanics of Composite Materials*. 54(5). P. 605-620.
14. Wang M., Liu Y. Elasticity solutions for orthotropic functionally graded curved beams. *European Journal of Mechanics A/Solids*. 2013. 37. P. 8-16.
15. Dryden J. Bending of inhomogeneous curved bars. *International Journal of Solids and Structures*. 2007. 44(11-12). P. 4158-4166.
16. Kardomateas G.A. Bending of a cylindrically orthotropic curved beam with linearly distributed elastic constants. *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*. 1990. 43. P. 43-55.
17. Tufekci E., Eroglu U., Aya S. Exact solution for in-plane static problems of circular beams made of functionally graded materials. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 2016. 44(4). P. 476-494.
18. Ковальчук С. Б., Горик О. В. Природна криволінійна циліндрична система координат для стержнів із плоскою віссю довільної форми. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Одеса, 2017. Вип. 68. С. 31-38.
19. Ковальчук С. Б., Горик О. В. Рівняння теорії пружності для композитних брусів із плоскою віссю довільної форми у природній криволінійній системі координат. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. Луцьк, 2018. Вип. 63 С. 89-97.
20. Ковальчук С. Б., Горик О. В. Інтегральні та диференціальні співвідношення для внутрішніх силових факторів при згині бруса з криволінійною плоскою віссю довільної форми. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Одеса, 2018. Вип. 70. С. 40-48.
21. Ковальчук С. Б., Горик О. В. Аналітичне моделювання зосереджених та локалізованих навантажень брусів із криволінійною плоскою віссю. Частина 1. Моделювання зосереджених у точці навантажень. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Одеса, 2018. Вип. 73. С. 31-40.
22. Ковальчук С. Б., Горик О. В. Аналітичне моделювання зосереджених та локалізованих навантажень брусів із криволінійною плоскою віссю. Частина 2. Моделювання локалізованих на ділянці навантажень. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Одеса, 2019. Вип. 74. С. 31-39.

Рецензенти:

Шваб'юк Василь Іванович, професор кафедри технічної механіки Луцького національного технічного університету, доктор технічних наук, професор.

Павліков Андрій Миколайович, завідувач кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій та опору матеріалів Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка, доктор технічних наук, професор.

Стаття надійшла до редакції 04.03.2019

УДК: 667.64:678.026

В.Г. Кулініч

Херсонська державна морська академія

АДГЕЗИЙНІ ВЛАСТИВОСТІ МОДИФІКОВАНОЇ 4,4-ДИАМІНОДИФЕНІЛМЕТАНОМ ЕПОКСИДНОЇ МАТРИЦІ

Фізичне і хімічне модифікування структури полімерів займає одне з перших місць серед оптимальних засобів для зміни характеристик та складу полімерних композитів. Покращення властивостей матеріалів можливе за допомогою введення наповнювачів, модифікаторів, пластифікаторів та інших різноманітних домішок. Навіть малий відсоток активного модифікатора при введенні його у зв'язувач може значно змінити властивості матеріалів як у кращий, так і в гірший бік.

Досліджено зміну адгезійних властивостей епоксидних композитних матеріалів залежно від вмісту модифікатора діамінодіфенілметану (ДАФМ) $C_{13}H_{14}N_2$. Випробували адгезійні характеристики отриманих матеріалів, а саме - адгезійну міцність на розрив, зсув і залишкові напруження. Було виявлено, що введення у епоксидний олігомер ЕД-20 (100 мас.ч.) модифікатора ДАФМ у кількості $q = 2,0$ мас.ч. забезпечує формування матеріалу із наступними властивостями: адгезійна міцність при відриві від сталюї основи марки Ст 3 - $\sigma_a = 22,2$ МПа, адгезійна міцність при зсуві - $\tau = 7,1$ МПа, залишкові напруження - $\sigma_{res} = 1,2$ МПа.

Аналізуючи отримані результати експерименту та порівнюючи їх з базовими характеристиками вихідної матриці, встановили, що використання даного модифікатора як добавки, що поліпшує адгезійні властивості композитних матеріалів, не є доцільним.

Ключові слова: композитний матеріал, модифікатор, адгезійна міцність, залишкові напруження.

В.Г. Кулініч

Херсонская государственная морская академия

АДГЕЗИОННЫЕ СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННОЙ 4,4-ДИАМИНОДИФЕНИЛМЕТАНОМ ЭПОКСИДНОЙ МАТРИЦЫ

Физическое и химическое модифицирование структуры полимеров занимает одно из первых мест среди оптимальных средств для изменения характеристик и состава полимерных композитов. Улучшение свойств возможно посредством введения наполнителей, модификаторов, пластификаторов и других различных примесей. Даже малый процент активного модификатора при введении его в связующее может значительно изменить свойства материалов как в лучшую, так и в худшую сторону.

Исследовано изменение адгезионных свойств эпоксидных композитных материалов в зависимости от содержания модификатора диаминодифенилметана (ДАФМ) $C_{13}H_{14}N_2$. Испытывали адгезионные характеристики полученных материалов, а именно - адгезионную прочность на разрыв, сдвиг и остаточные напряжения. Было обнаружено, что введение в эпоксидный олигомер ЭД-20 (100 масс. ч.) модификатора ДАФМ в количестве $q = 2,0$ масс.ч. обеспечивает формирование материала со следующими свойствами: адгезионная прочность при отрыве от стальной основы марки Ст 3 - $\sigma_a = 22,2$ МПа, адгезионная прочность при сдвиге - $\tau = 7,1$ МПа, остаточные напряжения - $\sigma_{ост} = 1,2$ МПа.

Анализируя полученные результаты эксперимента и сравнивая их с базовыми характеристиками исходной матрицы, установили, что использование данного модификатора в качестве добавки, улучшающей адгезионные свойства композитных материалов, не является целесообразным.

Ключевые слова: композитный материал, модификатор, адгезионная прочность, остаточные напряжения.

V.G. Kulinich

Kherson State Maritime Academy

EPOXY MATRIX'S ADHESIVE PROPERTIES ALTERATION OF AFTER ADDING THE MODIFIER 4,4-DIAMINODIPHENYLMETHANE

Physical and chemical modification of the structure of polymers occupies one of the first places among the optimal means for changing the characteristics and composition of polymer composites. Improvement of properties is possible through the introduction of fillers, modifiers, plasticizers and other various impurities. Even a small percentage of the active modifier with its introduction into the binder can significantly change the properties of materials for the better and for the worse.

The change in adhesion properties of epoxy composite materials depending on the content of the modifier diaminodiphenylmethane (DAFM) $C_{13}H_{14}N_2$ was investigated. The adhesive characteristics of the materials obtained were tested, namely, adhesive tensile strength, shear and residual stresses. It was found that the introduction of the DAFM modifier in the amount of $q = 2.0$ mass parts into the epoxy oligomer ED-20 (100 wt. parts). provides the formation of a material with the following properties: adhesive strength at separation from the steel base of grade St 3 - $\sigma_a = 22.2$ MPa, adhesive strength at shear - $\tau = 7.1$ MPa, residual stresses - $\sigma_{res} = 1.2$ MPa.

During analyses of received research's results and parent matrix's basic characteristics emphasis is made, that usage of given modifier, as an extrudant, improving composite material's adhesion characteristics is inappropriate.

Key words: composite materials, adhesive characteristics, matrix, steel foundation, modifier.

Постановка проблеми. Світовий ринок полімерних матеріалів не стоїть місці і продовжує постійно розвиватись згідно з вимогами споживачів. Різноманітні властивості полімерних композитних матеріалів (КМ) можуть змінюватися за допомогою широкого спектру введених у зв'язувач добавок відповідно до вимог щодо їхнього використання. Саме можливість розробки матеріалів для застосування згідно запиту споживачів і є основною характеристикою їхньої унікальності[1]. На сьогодні можливо констатувати, що полімерні матеріали займають вагоме місце у промисловості розвинутих країн світу. Асортимент виробів з полімерних матеріалів поширюється завдяки їхнім перевагам, таким як відносно невелика собівартість, швидке і зручне фасування і транспортування, відносно великий термін їх зберігання тощо [2].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Матеріали, створені на основі епоксидного зв'язувача, займають окреме місце серед існуючих полімерних КМ, позаяк вони відзначаються покращеними характеристиками у комплексі [3-5]. Порівняно з традиційними полімерними композитами епоксидні матеріали характеризуються підвищеними показниками адгезійної міцності, фізико-механічних, теплофізичних властивостей, корозійної тривкості та зносостійкості[6,7]. Водночас поліпшення властивостей епоксидних композитів досягають введенням у зв'язувач на попередній стадії формування наповнювачів і пластифікаторів за оптимального вмісту [8-14]. При цьому актуальним є модифікування епоксидних композицій активними добавками. Введення модифікаторів за незначного вмісту може забезпечити суттєве підвищення показників властивостей матеріалів. Тому цікавим було проведення дослідження з метою визначення впливу вмісту як добавки хімічно активного модифікатора 4,4-діамінодифенілметану (ДАФМ) на адгезійні властивості епоксидної матриці.

Мета роботи – дослідити вплив модифікатора 4,4-діамінодифенілметану на адгезійні властивості та залишкові напруження захисних епоксикомпозитних покриттів.

Матеріали та методика дослідження. Як основний компонент для зв'язувача при формуванні епоксидних КМ вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84), який характеризується високою адгезійною та когезійною міцністю, незначною усадкою і технологічністю при нанесенні на поверхні складного профілю. Як модифікатор використано 4,4-діамінодифенілметану (ДАФМ). Модифікатор вводили у зв'язувач за вмісту від 0,10 до 2,00 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 (тут і далі за текстом мас. ч. наводять на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20). Молекулярна формула модифікатора: $C_{13}H_{14}N_2$. Структурну формулу модифікатора наведено на рис. 1. Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін ПЕПА (ТУ 6-05-241-202-78), що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. Відомо[5], що ПЕПА є низькомолекулярною речовиною, яка складається з таких взаємозв'язаних компонентів: $[-CH_2-CH_2-NH-]_n$.

Епоксидні композити і покриття на їх основі формували за такою технологією: підігрівання смоли до температури $T = 353 \pm 2$ К і витримка при даній температурі впродовж часу $\tau = 20 \pm 0,1$ хв; гідродинамічне суміщення олігомеру і модифікатора впродовж часу $\tau = 1 \pm 0,1$ хв; ультразвукова обробка (УЗО) композиції впродовж часу $\tau = 1,5 \pm 0,1$ хв; охолодження композиції до кімнатної температури впродовж часу $\tau = 60 \pm 5$ хв; введення твердника і суміщення компонентів композиції впродовж часу $\tau = 5 \pm 0,1$ хв. Затверджували КМ за режимом: формування зразків та їх витримання впродовж часу $\tau = 12,0 \pm 0,1$ год за температури $T = 293 \pm 2$ К, нагрівання зі швидкістю $v = 3$ К/хв до температури $T = 393 \pm 2$ К, витримання впродовж часу $\tau = 2,0 \pm 0,05$ год, повільне охолодження до температури $T = 293 \pm 2$ К. З метою стабілізації структурних процесів у матриці зразки витримували впродовж часу $\tau = 24$ год на повітрі за температури $T = 293 \pm 2$ К з наступним проведенням експериментальних випробувань.

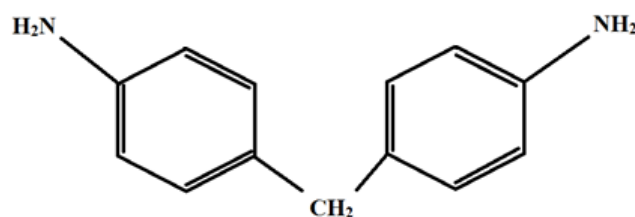


Рис. 1. Структурна формула модифікатора 4,4-діамінодифенілметану

Адгезійну міцність матриці до металевої основи досліджували, вимірюючи руйнівні напруження («метод грибків») при рівномірному відриві пари склеєних зразків згідно ГОСТ 14760 – 69 (рис. 2). Дослідження адгезійної міцності при зсуві проводили згідно ГОСТ 14759 - 69, аналогічно вимірюючи силу відривання клейових з'єднань зразків на автоматизованій розривній машині УМ-5 при швидкості навантаження $v = 10$ м/с (рис. 3). Діаметр робочої частини зразків при відриві становив – $d = 25$ мм. Слід зазначити, що площа склеювання зразків, які досліджували при відриві та зсуві, була однаковою.

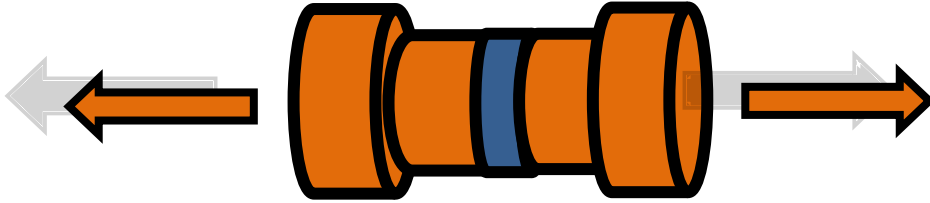


Рис. 2.Схема дослідження адгезійної міцності на відрив



Рис.3.Схема дослідження адгезійної міцності на зсув

Залишкові напруження у матриці визначали консольним методом [6]. Покриття товщиною $\delta = 0,3 \dots 0,8$ мм формували на металевій основі (рис. 4). Параметри основи: загальна довжина – $l = 100$ мм, робоча довжина – $l_0 = 80$ мм, товщина – $\delta = 0,3$ мм. Відхилення значень при дослідженнях показників адгезійних властивостей і залишкових напружень у КМ становило 4...6 % від номінального.

Результати експериментів та їх обговорення. Під час проведення попередніх експериментів було встановлено значення адгезійної міцності епоксидної матриці при її відриві від сталеної основи марки Ст 3. Адгезійна міцність при відриві (нормальні напруження) вихідної матриці складає $\sigma_a = 24,8$ МПа, адгезійна міцність при зсуві (тангенціальні напруження) становить $\tau = 8,5$ МПа, а залишкові напруження – $\sigma_a = 1,4$ МПа.

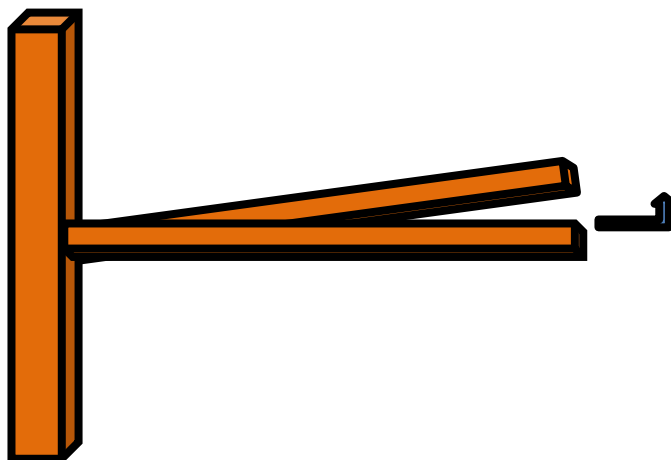


Рис. 4.Схема вимірювання залишкових напружень на консолі

Введення у епоксидний зв'язувач модифікатора ДАФМ у кількості $q = 0,10$ мас.ч. призводить до суттєвого зменшення показників адгезійної міцності матриці при відриві (майже у 2 рази). При цьому показники адгезії становлять $\sigma_a = 12,2$ МПа (рис. 5, крива 1). Мінімум показників адгезійних характеристик на кривій залежності « $\sigma_a - q$ » спостерігали для КМ із вмістом модифікатора у кількості $q = 0,25 \dots 1,25$ мас.ч. У цьому випадку формуються матеріали із значеннями адгезійної міцності – $\sigma_a = 7,1 \dots 9,0$ МПа. Надалі за збільшення концентрації добавки спостерігали покращення адгезійних властивостей модифікованої матриці. Зокрема, у діапазоні вмісту ДАФМ від $q = 1,50$ мас.ч. до $q = 2,00$ мас.ч. показники адгезійної міцності збільшуються від $\sigma_a = 12,6$ МПа до $\sigma_a = 22,2$ МПа. Можна констатувати, що максимальними значеннями адгезійних властивостей у вибраному діапазоні концентрацій модифікатора відзначається КМ із вмістом добавки у кількості $q = 2,00$ мас.ч. Однак, показники σ_a для такої модифікованої матриці все рівно є меншими, порівняно зі значенням для вихідної матриці. Даний результат дозволяє стверджувати про більшу активність до взаємодії бокових груп та сегментів епоксидного олігомери з металевою основою порівняно з модифікатором. При цьому наявність введеного у зв'язувач модифікатора послаблює сили як міжмолекулярної взаємодії макромолекул смоли, так і міжфазової взаємодії системи «епоксидний олігомер – металева основа».

Децю іншу динаміку властивостей спостерігали на кривій залежності дотичних напружень від вмісту модифікатора у КМ. Встановлено (рис. 5, крива 2), що у діапазоні концентрацій ДАФМ $q = 0,10 \dots 1,00$ мас.ч. відбувається підвищення показників адгезійної міцності при зсуві КМ від $\tau = 8,5$ МПа (для вихідної матриці) до $\tau = 9,1 \dots 10,2$ МПа. Надалі збільшення вмісту добавки ($q = 1,25 \dots 2,00$ мас.ч.) призводить до монотонного зменшення показників дотичних напружень модифікованих матриць до $\tau = 3,9 \dots 7,0$ МПа. Таким чином спостерігали антибатну кореляцію показників адгезійної міцності при відриві і зсуві залежно від концентрації модифікатора. Тобто, за максимальних показників тангенціальних напружень (за вмісту добавки у кількості $q = 0,10 \dots 1,00$ мас.ч.) спостерігали мінімальні показники адгезійної міцності при відриві розроблених КМ. Отримані результати дозволяють констатувати про наступне. Визначальним фактором для розроблених матеріалів є природа і напрямок дії сил руйнування. Матеріали доцільно використовувати для захисту устаткування, яке експлуатують під впливом дотичних навантажень, тоді як для деталей, що піддають впливу в основному нормальних сил, використовувати розроблені модифіковані епоксидні матриці у вигляді основи для захисних покриттів не має змісту.

Відомо [2], що залишкові напруження є одним із визначальних факторів динаміки адгезійних властивостей захисних покриттів з часом. Крім того, від величини та характеру розподілення залишкових напружень істотно змінюється адгезія на міцність композитів. Процес виникнення даних напружень відбувається під час формування адгезійного з'єднання. Також залишкові напруження здатні знижувати енергію активації руйнування адгезійного з'єднання, що є додатковою причиною їх подальшого вивчення [9].

Схожу тенденцію (як і на кривій « $\tau - q$ ») спостерігали при аналізі залежності залишкових напружень у покриттях від вмісту модифікатора. Доведено (рис. 5, крива 3), що введення у епоксидний зв'язувач ДАФМ у кількості $q = 0,25 \dots 1,25$ мас.ч. забезпечує підвищення залишкових напружень від $\sigma_s = 1,40$ МПа (для вихідної епоксидної матриці) до $\sigma_s = 1,36 \dots 1,56$ МПа. Надалі збільшення вмісту модифікатора до $q = 1,50 \dots 2,00$ мас.ч. зумовлює формування КМ з невисокими показниками залишкових напружень ($\sigma_s = 1,16 \dots 1,23$ МПа).

Спираючись на проведений аналіз результатів експерименту констатуємо, що модифікатор має неоднорідний характер впливу на властивості епоксидної матриці. Водночас в загальному можна виокремити певні узгодження у динаміці досліджуваних властивостей. Зокрема, матеріал із вмістом добавки у кількості $q = 0,50$ мас.ч. відзначається максимальними показниками адгезійної міцності при зсуві – $\tau = 10,0$ МПа. Також при даній концентрації ДАФМ залишкові напруження у КМ складають $\sigma_s = 1,5$ МПа, що майже не відрізняється від аналогічного показника для вихідної матриці ($\sigma_s = 1,4$ МПа). Водночас зазначимо, що такий КМ характеризується надто низькими показниками адгезійної міцності при відриві ($\sigma_a = 8,8$ МПа).

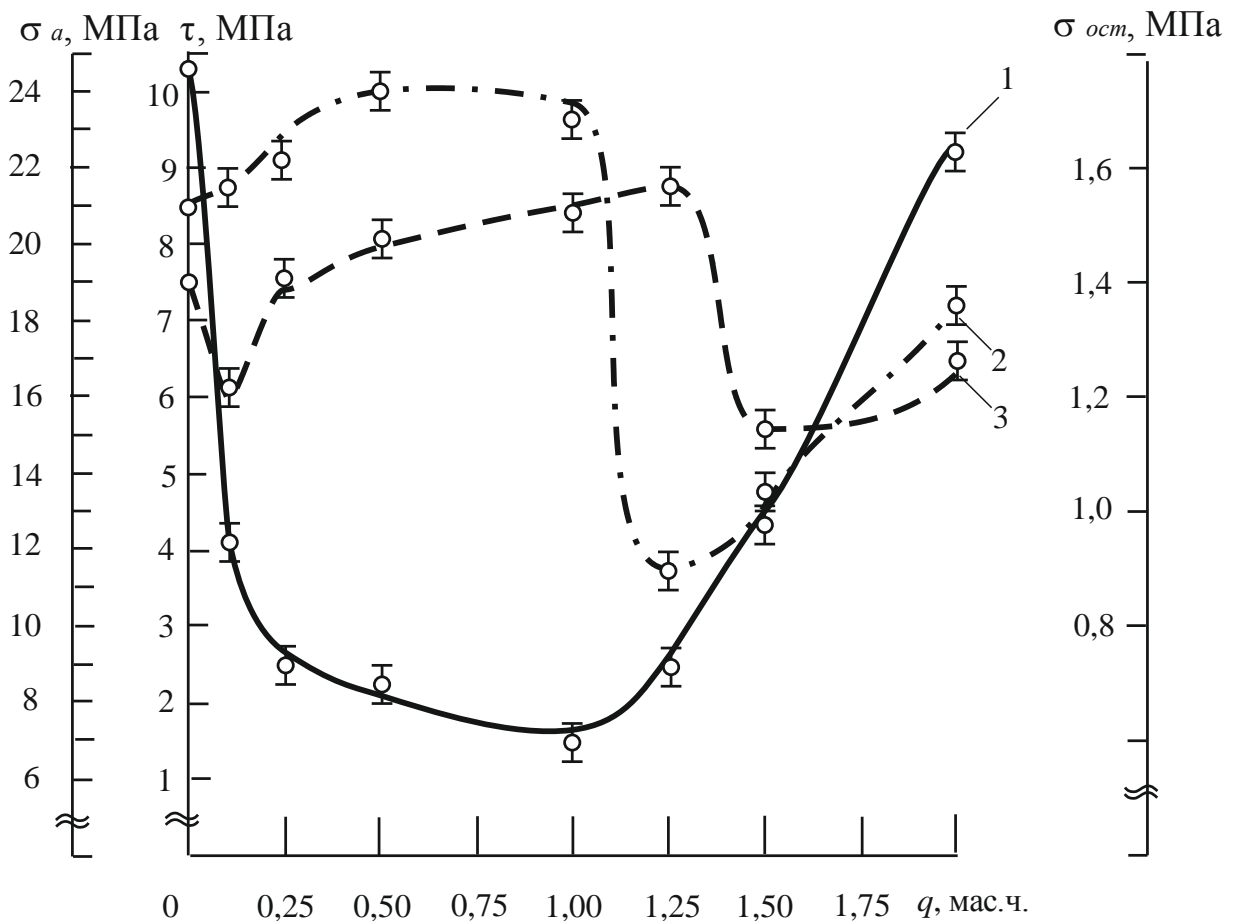


Рис. 5. Залежність адгезійної міцності і залишкових напружень у КМ від вмісту модифікатора ДАФМ: 1 – адгезійна міцність при відриві (σ_a); 2 – адгезійна міцність при зсуві (τ); 3 – залишкові напруження (σ_3). Матеріал основи – сталь марки Ст 3.

Навпаки, максимальними показниками адгезійної міцності при відриві ($\sigma_a = 22,2$ МПа) серед усього діапазону досліджуваних матеріалів характеризується КМ із вмістом модифікатора у кількості $q = 2,00$ мас.ч. При цьому така матриця характеризується меншими порівняно з вихідною матрицею залишковими напруженнями ($\sigma_3 = 1,2$ МПа) і адгезійною міцністю при зсуві $\tau = 7,1$ МПа. Виходячи з цього, можна стверджувати про симбатну кореляцію динаміки властивостей від вмісту модифікатора розроблених КМ (« $\tau - q$ » і « $\sigma_3 - q$ ») і водночас антибатну (« $\sigma_a - q$ » і « $\tau - q$ », а також « $\sigma_a - q$ » і « $\sigma_3 - q$ »), що є додатковим підтвердженням достовірності проведеного експерименту.

Висновки. У роботі досліджено вплив вмісту модифікатора 4,4-діамінодифенілметану на адгезійні властивості і залишкові напруження епоксидної матриці. Доведено, що модифікатор має неоднорідний характер впливу на властивості епоксидної матриці. Встановлено, що матеріал із вмістом добавки у кількості $q = 0,50$ мас.ч. відзначається максимальними показниками адгезійної міцності при зсуві – $\tau = 10,0$ МПа, залишкові напруження складають $\sigma_3 = 1,5$ МПа, що майже не відрізняється від аналогічного показника для вихідної матриці ($\sigma_3 = 1,4$ МПа). Однак, такий матеріал характеризується надто низькими показниками адгезійної міцності при відриві ($\sigma_a = 8,8$ МПа).

Додатково показано, що максимальними показниками адгезійної міцності при відриві ($\sigma_a = 22,2$ МПа) серед усього діапазону досліджуваних матеріалів характеризується композити із вмістом модифікатора у кількості $q = 2,00$ мас.ч. При цьому така матриця характеризується меншими порівняно з вихідною матрицею залишковими напруженнями ($\sigma_3 = 1,2$ МПа) і адгезійною міцністю при зсуві $\tau = 7,1$ МПа.

Виходячи з цього, можна стверджувати про симбатну кореляцію динаміки властивостей від вмісту модифікатора розроблених КМ (« $\tau - q$ » і « $\sigma_3 - q$ ») і водночас антибатну (« $\sigma_a - q$ » і « $\tau - q$ », а також « $\sigma_a - q$ » і « $\sigma_3 - q$ »), що є додатковим підтвердженням достовірності проведеного

експерименту. Отримані результати дозволяють констатувати про те, що визначальним фактором при експлуатації розроблених матеріалів є природа і напрямок дії сил руйнування. Матеріали доцільно використовувати для захисту устаткування, яке експлуатують під впливом дотичних навантажень, тоді як для деталей, що піддають впливу в основному нормальних сил, використовувати розроблені модифіковані епоксидні матриці у вигляді основи для захисних покриттів не має змісту.

Література

1. Kolisnyk R. Conductive polymer nanocomposites for novel heating elements / R. Kolisnyk, M. Korab, M. Iurzhenko, O. Masiuchok, A. Shadrin, Ye. Mamunya, S. Pruvost, V. Demchenko // *Advances in Thin Films, Nanostructured Materials and Coatings* (Eds. Pogrebnyak A., Novosad V.), Singapore: Springer, 2019. – P. 215-224.
2. Demchenko V. Relaxation behavior of polyethylene welded joints / V. Demchenko, M. Iurzhenko, A. Shadrin, A. Galchun // *Nanoscale Research Letters*. – 2017. – N12. – P. 280-285.
5. Браїло М.В. Оптимізація вмісту добавок у епокси-поліефірному зв'язувачі для підвищення когезійної міцності композитів / М.В. Браїло, А.В. Букетов, О.С. Кобельник, С.В. Якущенко, А.В. Сапронова, О.О. Сапронов, А.О. Василенко // *Науковий вісник НЛТУ України: Збірн. наук.-техн. праць*. – Львів: НЛТУ. – 2018. – Том 28, №11. – С. 71-77.
6. Корякина М.И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий / М.И. Корякина. – М.: Химия, 1988. – 272 с.
7. Браїло М.В. Дослідження теплофізичних властивостей епокси-поліефірних композитів, модифікованих метилендіфенілдіізоціанатом / М.В. Браїло, А.В. Букетов, С.В. Якущенко, В.М. Яцюк // *Наукові нотатки*. - Луцьк: ЛНТУ. - Вип. 63. – 2018. – С. 27-33.
8. Бартнев Г.М. Прочность и разрушение высокоэластичных материалов / Г.М. Бартнев, Ю.С. Зуев. – М.: Химия, 1964. – С.27-77.
9. Букетов А.В. Дослідження адгезійних властивостей модифікованих 4-амінобензойною кислотою полімерних композитних матеріалів / А.В. Букетов, А.Г. Кулініч, В.М. Гусев, С.О. Сметанкін, В.М. Яцюк // *Наукові нотатки*. - Луцьк: ЛНТУ. - Вип. 63. – 2018. – С. 34-39.
10. Букетов А.В. Захисні поксикомпозитні покриття з полішченими антикорозійними властивостями і зносостійкістю / А.В. Букетов, М.Ю. Амелін, О.М. Безбах, Р.Ю. Негруца // *Вісник ХНТУ*. – 2018. - № 2 (65). – С. 11-18.
11. Букетов А.В. Вплив модифікатора 4-амінобензойної кислоти на фізико-механічні властивості епоксидних композитних матеріалів / А.В. Букетов, А.Г. Кулініч, В.М. Гусев, С.О. Сметанкін, В. М. Яцюк // *Вісник ХНТУ*. – 2018. - № 2 (65). – С. 19-26.
12. Букетов А.В. Исследование влияния модификатора 4,4'-метиленбис (4,1-фенилен) бис (N,N-диэтилдитиокарбамата) на структуру и свойства эпоксидной матрицы / А.В. Букетов, А.А. Сапронов, В.Н. Яцюк, В.О. Скирденко // *Пластические массы*. – 2014. – № 7-8. – С. 8-17.
13. Букетов А.В. Исследование влияния 1,4-бис (n,n-диметилдитиокарбамата) бензена на механические свойства эпоксидной матрицы / А. В. Букетов [и др.] // *Пластические массы*. – 2014. – № 3-4. – С. 26-34.
14. Яновский Ю.Г., Оценка эффекта усиления при наполнении эпоксидных связующих наноразмерными частицами различной природы (компьютерные прогнозы) / Ю.Г. Яновский, Е.А. Никитина, С.М. Никитин, Ю.Н. Карнет // *Механика композиционных материалов и конструкций*. - 2014. -Т.20, №1. – С.34-57.

Стаття надійшла до редакції 20.03.2019

УДК: 593.3

В.З. Кухар*Львівський національний університет імені Івана Франка***ПОШИРЕННЯ ПЛОСКОЇ ТРІЩИНИ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ПОВЗУЧОСТІ**

Розглянуто основні методи розв'язування типових задач, на прикладі задачі про високотемпературну повзучість плоскої гладкої тріщини в безмежному тривимірному тілі. Запропоновано дискретний метод розв'язування даної задачі. Проведено детальний аналіз методу еліптичного моделювання. Чисельно підтверджено гіпотезу про форму поширення початково-еліптичної тріщини.

Ключові слова: високотемпературна повзучість, плоска тріщина, метод еквівалентних площ.

В.З. Кухар**РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛОСКОЙ ТРЕЩИНЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ**

Рассмотрены основные методы решения типичных задач на примере задачи о высокотемпературной ползучести плоской гладкой трещины в безграничном трехмерном теле. Предложено дискретный метод решения данной задачи. Проведен детальный анализ метода эллиптического моделирования. Численно подтверждена гипотеза о форме распространения начально-эллиптической трещины.

Ключевые слова: высокотемпературная ползучесть, плоская трещина, метод эквивалентных площадей.

V.Z. Koukhar**HIGH TEMPERATURE FLAT CREEP CRACK PROPAGATION**

Basic methods for solving common high temperature creep problems were considered in case of high temperature flat creep crack propagation inside infinite three-dimensional body. The discrete method of solving this problem is proposed. A detailed analysis of the elliptic modeling method is carried out. The hypothesis of initially elliptic crack propagation shape is numerically confirmed.

Keywords: high temperature creep, flat crack, equivalent area method.

Вступ. Руйнування спричинене поширенням плоских тріщин в просторових об'єктах являє собою найбільш поширене явище в інженерній практиці. Дослідженню цього процесу присвячено безліч робіт по механіці руйнування. Побудовано ряд теоретичних моделей, кожна з яких застосовується для конкретного типу і умов руйнування, які вона найкраще описує. Проблема запропонованих моделей полягає в їх складності. Точний розв'язок більшості типових задач на даний момент невідомий.

Постановка проблеми. Розглянемо зокрема задачу про поширення високотемпературної повзучої плоскої тріщини довільного гладкого контуру в безмежному тримірному тілі під дією розтягуючих зусиль перпендикулярних площині тріщини (Рис. 1).

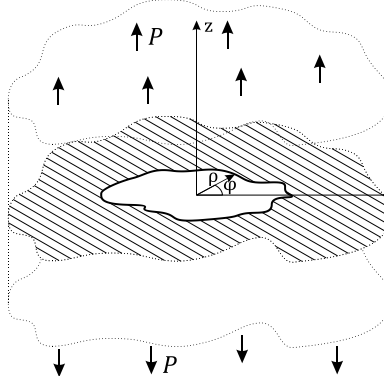


Рис. 1. Плоска тріщина

Введемо циліндричну систему координат (ρ, φ, z) . Тоді контур тріщини можна описати функцією $\rho(\varphi, t) \in C^1(\varphi)$. Рівняння поширення такої тріщини згідно [1].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = F(K_I(\rho, \varphi)) \sqrt{1 - \frac{1}{\rho^2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial \varphi} \right)^2}, \quad (1)$$

де $K_I(\rho, \varphi)$ - коефіцієнт інтенсивності напружень, вираз якого залежить від контуру тріщини, $F(K_I(\rho, \varphi)) = 2\alpha_0 A_1 K_{IC}^{2(m-1)} \frac{K_I^{2m}(\rho, \varphi)}{K_{IC}^2 - K_I^2(\rho, \varphi)}$, де α_0 , A_1 , m , K_{IC} - константи матеріалу.

Аналіз досліджень і публікацій. Це диференціальне рівняння в частинних похідних, яке не має розв'язку в елементарних функціях. Для його розв'язання використовують наближені або ж дискретні методи. Наближені зводяться до заміни початкової тріщини деякою іншою, подібною до неї, дискретні до розбиття і одночасного розв'язання задачі для кожної точки контуру. Зупинимось спочатку на перших.

Метод еквівалентних площ. Найпростіший із них - зведення до однопараметричної задачі $\frac{\partial \rho}{\partial \varphi} = 0$ вперше запропонований в роботі [2] відомий в літературі під назвою *метод еквівалентних площ (МЕП)*. Суть методу полягає в тому, що початкова тріщина довільного контуру замінюється рівною по площі коловою тріщиною (Рис.2).

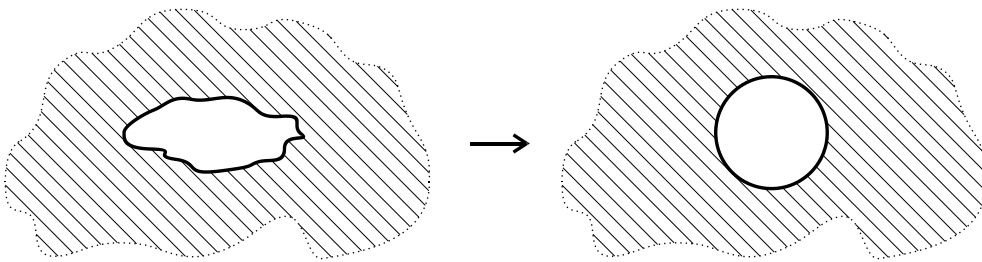


Рис. 2. Метод еквівалентних площ (МЕП)

Тоді рівняння в частинних похідних (1) вироджується в звичайне диференціальне рівняння $\frac{d\rho}{F(K_I(\rho))} = dt$, розв'язок якого дає достатне для інженерної практики наближення розв'язку (1), що підтверджується багатьма експериментальними даними [2]. Проте чим більш витягнута тріщина, тим більшою стає похибка даного методу.

Еліптичний метод. Наступний метод позбавлений цього недоліку. Він полягає у заміні початкової тріщини еліпсом, подібним до контуру тріщини (Рис.3). Більшу вісь еліпса обираємо як початок відліку для кута φ .

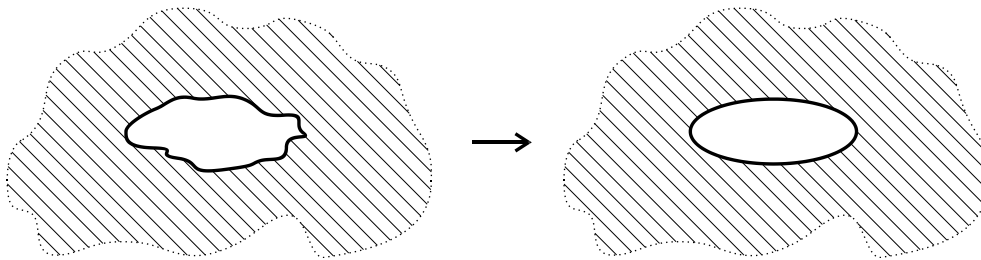


Рис. 3. Метод еліптичного моделювання

Для подальшого розв'язання потрібно зробити припущення, що *контур тріщини в процесі розвитку залишатиметься еліпсом**. Тоді ми зможемо підставивши вираз $K_I(\rho, \varphi)$ для еліпса у рівняння (1) утворити систему рівнянь всього лиш для двох точок $\rho(0, t) = a(t)$ і $\rho(\pi/2, t) = b(t)$ і розв'язати її числовими чи аналітичними методами. Проте оскільки немає точного виразу $K_I(\rho, \varphi)$ для довільного контуру тріщини саме припущення (*) довести неможливо. Зате ми можемо оцінити точність такого припущення за допомогою ресурсоемкого дискретного методу.

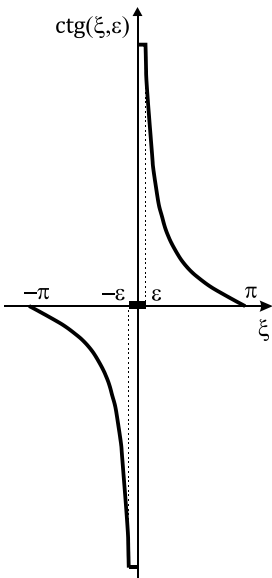
Дискретний метод. Запропонований нами метод базується на використанні наближеного коефіцієнта інтенсивності напружень для тріщини довільного контуру, що прямує до кола виведеного в роботі [3] і адаптованого до нашого випадку.

$$K_I(\rho, \varphi) = \frac{P}{\sqrt{\pi\rho}} \left(2\rho - \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\partial\rho}{\partial\psi} \operatorname{ctg} \frac{\varphi - \psi}{2} d\psi \right) \quad (2)$$

Суть методу полягає в наступному. Проводимо розбиття $\varphi \rightarrow [\varphi_i]$. Підставивши значення початкового контуру тріщини $\rho(\varphi_i, 0)$ в праву частину рівняння (1) знайдемо $\left. \frac{\partial\rho(\varphi_i, t)}{\partial t} \right|_{t=0}$. В будь-який близький до t момент часу $t + \Delta t$ тріщину можна наблизити виразом:

$$\rho(\varphi_i, t + \Delta t) \approx \rho(\varphi_i, t) + \frac{\partial\rho(\varphi_i, t)}{\partial t} \cdot \Delta t. \quad (3)$$

Використовуючи (1) і (3) починаємо ітераційний цикл який моделює розвиток тріщини від початкового моменту $t=0$ до моменту коли матеріал повністю зруйнується $K_I(\varphi_i, t_*) = K_{IC}$. Зауважимо що таким чином ми можемо описати ріст будь-якої плоскої тріщини, проте для тріщин, форма яких сильно відрізняється від кола похибка коефіцієнта (2) може досить сильно вплинути на точність результатів.



Зауважимо також, котангенс у виразі (2) набуватиме в обчисленнях безмежно великих і безмежно малих значень при $\varphi - \psi \rightarrow 0$, що недопустимо для комп'ютерного обчислення. Тому ми використовуватимемо наближення тангенса, а саме:

$$\operatorname{ctg} \left(\frac{\varphi - \psi}{2}, \varepsilon \right) = \begin{cases} \operatorname{ctg} \frac{\varphi - \psi}{2}, & \frac{\varphi - \psi}{2} \in (-\infty, -\varepsilon) \cup (\varepsilon, \infty) \\ \operatorname{ctg}(-\varepsilon), & \frac{\varphi - \psi}{2} \in (-\varepsilon, 0) \\ \operatorname{ctg}(\varepsilon), & \frac{\varphi - \psi}{2} \in (0, \varepsilon) \end{cases} \quad (4)$$

Рис. 4. Наближення котангенса

Постановка завдань. В роботі поставлено мету – зробити числові обчислення усіма вищезазначеними методами, порівняти отримані результати, зробити порівняльну оцінку точності наближених методів до більш точного числового а також перевірити гіпотезу про інваріантність форми початково еліптичної тріщини в процесі її розвитку.

Викладення основного матеріалу. Для перевірки критерію (*) ми обрали еліпс у якого відношення великої осі до малої рівне $\frac{1}{2}$. Оскільки нас цікавить порівняння двох методів початкові дані не мають принципового значення, тому виберемо їх як в роботі [2]:

$$a_0 = 0,002\text{м}, \quad b_0 = 0,001\text{м}, \quad P = 500\text{МПа}, \quad K_{IC} = 142\text{МПа},$$

$$\alpha_0 = 0,1, \quad A_1 = 0,25, \quad m \approx 4, \quad \varepsilon = 0,001.$$

(5)

Для застосування еліптичного методу запишемо коефіцієнт інтенсивності напружень для еліпса [4]:

$$K_I(\rho, \varphi) = \frac{P\sqrt{\pi\rho} \cdot (\sin^2\varphi + k(t) \cdot \cos^2\varphi)^{\frac{1}{4}}}{E(\sqrt{1-k(t)^2})}, \quad (6)$$

де $k(t) = \frac{b(t)}{a(t)} = \frac{\rho(0,t)}{\rho(\pi/2,t)}$ - еліптичність або коефіцієнт стиску, $E(\sqrt{1-k(t)^2})$ - еліптичний інтеграл 1 роду. Підставивши (6) в (1) запишемо наступну систему рівнянь:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{da(t)}{dt} &= 2\alpha_0 A_1 \frac{\left(\frac{P^2 \pi b(t)^2 / a(t)}{E(\sqrt{1-b(t)^2/a(t)^2})^2 K_{IC}^2} \right)^m}{1 - \frac{P^2 \pi b(t)^2 / a(t)}{E(\sqrt{1-b(t)^2/a(t)^2})^2 K_{IC}^2}}; \\ \frac{db(t)}{dt} &= 2\alpha_0 A_1 \frac{\left(\frac{P^2 \pi b(t)}{E(\sqrt{1-b(t)^2/a(t)^2})^2 K_{IC}^2} \right)^m}{1 - \frac{P^2 \pi b(t)}{E(\sqrt{1-b(t)^2/a(t)^2})^2 K_{IC}^2}}; \end{aligned} \right. \quad (7)$$

Використовуючи початкові умови $a(0) = a_0$, $b(0) = b_0$ взяті із (5) розв'яжемо цю систему в програмному середовищі Maple 15.

Програма для моделювання дискретного методу була написана на C++, з використанням (1)-(3), наближення (4) та початкової умови:

$$\rho(\varphi, 0) = \frac{a_0 b_0}{\sqrt{b_0^2 \cos^2(\varphi) + a_0^2 \sin^2(\varphi)}} \quad (8)$$

Порівняльні результати обчислень представлені на Рис.5

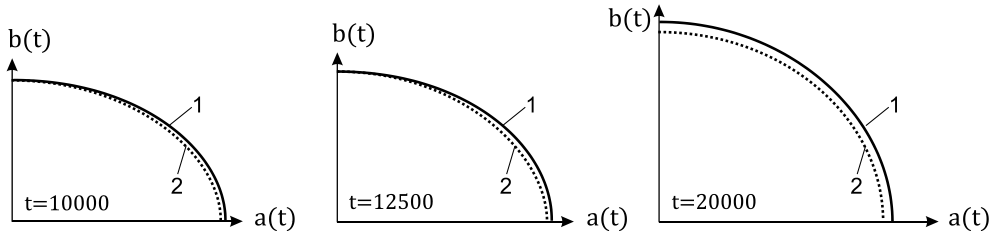


Рис. 5. Результати (крива 1 – дискретний метод, крива 2 – еліптичний метод.)

Аналіз отриманих результатів. Як бачимо контури тріщини для обох методів практично ідентичні. Хочеться проаналізувати декілька нюансів.

а) Найбільша відмінність між контурами при малих t зосереджена якраз у місцях де похибка коефіцієнта інтенсивності (2) найбільша. Ми не можемо сказати точно, але припускаємо що відмінність викликана саме похибкою, тим більше що при зростанні t похибка зменшується і ми бачимо як форми контурів стають все більш ідентичними, а при $\varphi = \frac{\pi}{2}$ коли похибка коефіцієнта (2) менше 0,2% контури тріщини збігаються.

б) Невелике відставання дискретного методу від еліптичного пояснюється своєрідністю наближення (3). Справа в тому, що для опуклих вниз функцій $\frac{\partial^2 \rho(\varphi, t)}{\partial t^2} > 0$ дане наближення занижує значення функції із зростанням t . Відставання зменшується при зменшенні Δt проте це суттєво збільшує час обчислення.

с) Можна з доволі високою точністю сказати, що форма тріщини впродовж її розвитку залишається еліпсом.

d) Довговічність при обчисленні даними методами становить $t_*^1 = 31617$ год і $t_*^2 = 33441$ год для еліптичного і дискретного методу відповідно. Різниця склала всього 5,7%.

Висновки. При розв'язування складних задач механіки руйнування ми часто жертвуємо точністю заради простоти обчислення, мотивуючи це тим, що для інженерної практики цього достатньо, однак це не завжди правильно. Метод еліптичного моделювання тріщини дає точніші результати для більшості тріщин ніж метод еквівалентних площ при не набагато більших обчислювальних затратах. Аналіз припущення яке ми робимо для цього методу показав що він дуже точно описує реальну поведінку еліптичної тріщини. Натомість дискретний метод обчислення є найбільш універсальним із запропонованих методів. Він потребує серйозних обчислювальних ресурсів проте здатний якнайкраще показати якісну і кількісну картину розвитку плоскої тріщини в тілі. Наші обчислення дискретним методом зайняли близько 3 годин, еліптичним кілька секунд. Тому, хоча темпи розвитку обчислювальної техніки та її доступність на ринку свідчать, що майбутнє за дискретними методами обчислення, проте в даний момент метод еліптичного моделювання тріщини є найкращим методом розв'язування типових прикладних інженерних задач.

Список використаних джерел:

1. Андрейків А.Е., Дарчук А.И. Усталостное разрушение и долговечность конструкций. Киев, 1992. 184 с.
2. Андрейків О.Є., Сас Н.Б. Докритичний ріст плоскої тріщини в тривимірному тілі за високотемпературної повзучості. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2008. №2. С. 19-26.
3. Панасюк В. В. Механика квазихрупкого разрушения материалов. Київ, 1991. 416 с.
4. Murakami Y (Ed.). Stress Intensity Factors Handbook: in 2 vol. Oxford, 2001. 1456 pp.

Рецензенти:

Андрейків О.Є., член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор.

Долінська І.Я., в.о. старшого наукового співробітника ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України, канд. фіз-мат наук.

Стаття надійшла до редакції 27.12.2018

УДК 621.316.1

П.Д. Лежнюк¹, В.О. Комар¹, С.В. Кравчук¹, І.О. Бандура²
 Вінницький національний технічний університет¹
 Луцький національний технічний університет²

ФОТОЕЛЕКТРИЧНА СТАНЦІЯ З НАКОПИЧУВАЧЕМ ЯК ЕЛЕМЕНТ БАЛАНСУВАННЯ РЕЖИМУ В ЛОКАЛЬНІЙ ЕЛЕКТРИЧНІЙ СИСТЕМІ

В роботі розв'язується актуальна задача оцінювання впливу нестабільності генерування відновлювальних джерел електроенергії (ВДЕ), зокрема фотоелектричних станцій (ФЕС), на балансову надійність локальної електричної системи (ЛЕС). Проаналізовано закон розподілу генерування ФЕС для певного проміжку часу доби протягом року. Запропоновано математичну модель генерування ФЕС у вигляді гаусових сумішей. Отримано основні характеристики імовірнісного характеру генерування ФЕС. Визначено імовірність покриття заданого графіка навантаження генеруванням ФЕС протягом певного часу доби впродовж всього року. Отримані імовірнісні характеристики процесу балансування дозволяють визначити імовірність забезпечення балансової надійності генеруванням ФЕС на заданому проміжку доби. Бібл. 12, рис. 4. .

Ключові слова: фотоелектрична станція, потужність генерування, графік навантаження, гаусові суміші розподілу, імовірнісні характеристики, балансова надійність.

П.Д. Лежнюк, В.О. Комар, С.В. Кравчук, І.О. Бандура ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ С НАКОПИТЕЛЕМ КАК ЭЛЕМЕНТ БАЛАНСИРОВАНИЯ РЕЖИМА В ЛОКАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

В работе решается актуальная задача оценки влияния нестабильности генерирования восстановительных источников электроэнергии (ВИЭ), в частности фотоэлектрических станций (ФЭС), на балансовую надежность локальной электрической системы (ЛЭС). Проанализированы закон распределения генерирования ФЭС для определенного времени суток на протяжении года. Предложена математическая модель генерирования ФЭС в виде гауссовых смесей. Получены основные характеристики вероятностного характера генерирования ФЭС. Определены вероятность покрытия заданного графика нагрузки генерированием ФЭС в течение определенного времени суток в течение всего года. Полученные имовирнісні характеристики процесса балансировки позволяют определить вероятность обеспечения балансовой надежности генерированием ФЭС на заданном промежутке времени. Библ. 12, рис. 4.

Ключевые слова: фотоэлектрическая станция, мощность генерации, график нагрузки, гауссовы смеси распределения, вероятностные характеристики, балансовая надежность.

P. Lezhnyuk, V. Komar, S. Kravchuk, I. Bandura PHOTOELECTRIC STATION WITH ACCELERATOR AS A ELEMENT OF BALANCING THE MODE IN THE LOCAL ELECTRONIC SYSTEM

The current problem of estimating the instability of the generation of renewable power sources, in particular photovoltaic stations (FES), on the balance reliability of the local electric system (LES) is solved. The law of distribution of generation of FES for a certain period of time of the day by year is analyzed. A mathematical model for generating FES in the form of Gaussian mixtures is proposed. The basic characteristics of the probabilistic nature of the FES generation are derived. The probability of covering the given load graph of the generation of FES during a certain time of day throughout the year is determined. The obtained probabilistic characteristics of the process of balancing allow us to determine the probability of providing balance-reliable power generation for the FES at a given time interval. Bible 12, rice. 4

Keywords: photoelectric station, power generation, load schedule, Gaussian mixes of distribution, probabilistic characteristics, balance reliability.

Постановка проблеми. У зв'язку з розбудовою відновлюваних джерел електроенергії (ВДЕ) в електричних мережах, останні приймають ознаки локальних електричних систем (ЛЕС) [1]. Це значить, що стосовно до них виникають задачі, які є характерними для електроенергетичних систем (ЕЕС) з крупними тепловими, атомними і гідроелектростанціями. До них відносяться забезпечення надійності електропостачання споживачів, підтримування рівнів напруги в допустимих межах, оптимізація потоків потужності з метою зменшення втрат, а також підтримування балансової надійності в ЛЕС з комбінованим електроживленням від місцевих і централізованих джерел енергії [3–5].

Наявність в ЛЕС розподіленого генерування та двосторонніх комунікаційних зв'язків, що є характерною функціональною властивістю Smart Grid, дозволяє реалізовувати переваги і можливості сучасних технологій. В ЛЕС можливо найбільш повно реалізувати загальну функціонально-технологічну ідеологію концепції Smart Grid, сформульованої IEEE як концепції повністю інтегрованої, саморегулюючої електричної системи, що самовідновлюється та керується єдиною мережею інформаційно-керуючих пристроїв і систем у режимі реального часу [2]. Серед функцій, що реалізуються в ЛЕС на основі Smart Grid, входять моніторинг і самодіагностика

обладнання, автоматичне відновлення – самовідновлення мережі, оптимальне керування потоками потужності та ін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Складність реалізації Smart Grid технологій в ЛЕС полягає в тому, що розподілене генерування складається з різнотипних відновлюваних джерел, міра залежності яких від впливових факторів (метеопараметри навколишнього середовища, біоресурси, гідроресурси) суттєво відрізняється. Спільною рисою їх всіх є те, що всі вони є негарантованими джерелами електроенергії. Забезпечити надійне електропостачання споживачів електроенергії в ЛЕС можливо тільки за умов наявності резервних джерел електроенергії. Це можуть бути резервні потужності ЕЕС або накопичувачі електроенергії, виробленої в ЛЕС власними електростанціями. Значення необхідної резервної потужності та електроенергії в ЛЕС залежить від складу її електростанцій, які використовують відновлювані джерела енергії, та від умов їх роботи в ЕЕС. Тут можливі два варіанти: на генерування ВДЕ не накладається ніяких обмежень крім природних, зумовлених технологією перетворення первинних енергоносіїв в електроенергію, та генерування ВДЕ за графіками, заявленими на наступну добу з врахуванням прогнозу метеопараметрів. В останньому випадку задача генерування ВДЕ формулюється наступним чином:

$$\int_{t_0}^{t_k} \frac{1}{2} \left(P_{\text{ВДЕ}}(t) - \sum_{i=1}^n P_i(t) \right)^2 dt \rightarrow \min, \quad (1)$$

де $P_{\text{ВДЕ}}(t)$ – заявлений графік сумарного генерування ВДЕ в ЛЕС; $P_i(t)$ – графік генерування i -го ВДЕ на часовому інтервалі t_0 – t_k ; n – кількість ВДЕ в ЛЕС, які працюють за графіками і мають забезпечувати $P_{\text{ВДЕ}}(t)$.

Визначаючи пріоритетність розв'язання задач в ЛЕС, відмітимо балансову надійність як надійність ЛЕС, за якої забезпечується баланс між споживанням і генеруванням електроенергії з врахуванням зовнішнього надходження енергії. Від того, якими способами і засобами забезпечується балансова надійність, залежить як успішно розв'язуються інші задачі [6–10]. На процес балансування потужності в ЛЕС суттєво впливає нестабільність генерування ВДЕ, зокрема ФЕС і ВЕС. Нестабільність генерування ФЕС і ВЕС компенсується потужністю, яка поступає в ЛЕС з ЕЕС. На сьогодні забезпечення балансу лежить суто на централізованій системі електропостачання [11]. Проте, поступово відбуваються зміни в механізмах функціонування енергоринку України, що спонукатимуть власників ВДЕ працювати за заявленим (заданим) графіком. Для роботи за графіком потрібно перш за все дослідити потенційні можливості джерел генерування щодо покриття графіка навантаження. На основі статистичних даних по генеруванню, якщо станція вже експлуатується, або прогнозних по виробітку електроенергії, якщо станція ще не введена в експлуатацію, можна отримати вихідну інформацію щодо визначення потужності накопичувача, як елемента дотримання графіка генерування, а отже і балансування в електричній мережі, до якої приєднана станція.

Постановка завдань. Оскільки можливі відновлювані джерела в ЛЕС відрізняються своїми імовірнісними характеристиками щодо генерування електроенергії i , відповідно, впливом на процес забезпечення балансової надійності, то досліджувати їх потрібно окремо.

Метою даної роботи є оцінювання впливу фотоелектричних станцій на балансову надійність локальної електричної системи та визначення ємності та графіка роботи накопичувача електроенергії

Викладення основного матеріалу. Коефіцієнт забезпечення балансової надійності ЛЕС $k_{\text{бн}}$ визначається на основі оцінювання потенційних можливостей генерування ФЕС задовольняти попит на електроенергію в ЛЕС. Оскільки таке генерування має імовірнісний характер, то доцільно говорити про імовірність забезпечення балансу між спожитою в ЛЕС та генерованою ФЕС електроенергією. Найбільш точно визначити таку імовірність можна на основі оцінювання імовірнісних характеристик процесів генерування та електроспоживання в ЛЕС.

Аналіз статистичних даних щодо потужностей генерування ФЕС та навантаження ЛЕС виконується в програмному середовищі STATISTICA 10. Для визначення імовірнісних характеристик потужностей використовуються типові гістограми густин розподілу. На рис. 2, як приклад, в розрізі кожної доби в проміжок часу 12:30–13:00 протягом року для підстанції «Ямпіль 110/10 кВ» побудовані гістограми густин генерування і споживання потужностей (потужності

подані у відносних одиницях, де за базис прийнято їх номінальні значення). З рис. 1 видно, що розподіл генерування ФЕС та навантаження – полімодальний. В тих випадках, коли «форму» розподілу не вдається описати одним розподілом, то її можна описати за допомогою суміші розподілів. Серед інших, можна виділити модель гаусової суміші, яка представляє собою зважену суму k компонентів, густина розподілу якого має вигляд:

$$p(x) = \sum_{j=1}^m w_j p_j(x), \quad (2)$$

де $p_j(x)$ – функція густини розподілу j -ї компоненти суміші; w_j – вага j -ї компоненти суміші (апріорна імовірність) $\sum_{j=1}^k w_j = 1, w_j \geq 0, j = 1 \dots k$ – кількість компонент в суміші.

Функція густини розподілу має вигляд:

$$p_j(x) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{k}{2}} |\zeta_j|^{\frac{1}{2}}} e^{\left(-\frac{1}{2} (x - \mu_j)^T \zeta_j^{-1} (x - \mu_j) \right)}, \quad (3)$$

де μ_j – математичне очікування j -ї компоненти; $|\zeta_j|$ – визначник коваріаційної матриці j -ї компоненти суміші; k – кількість компонент в суміші.

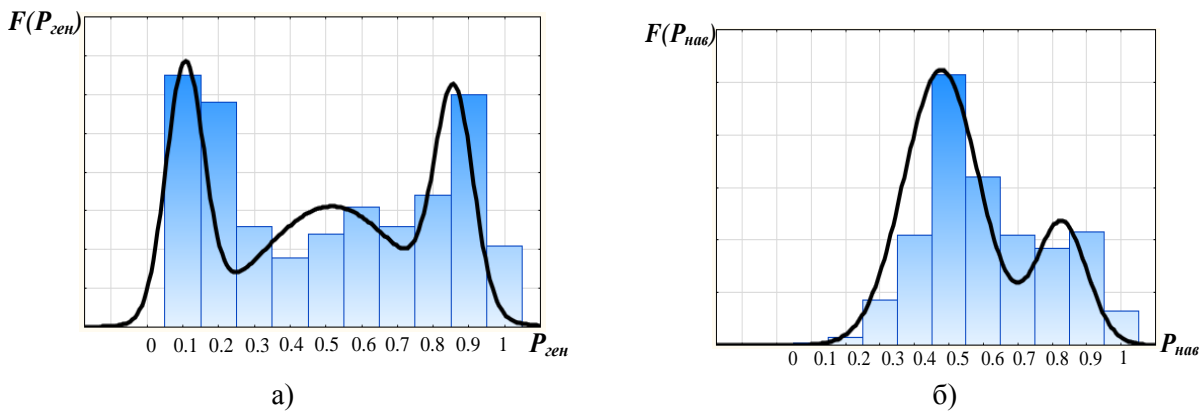


Рис. 1. – Модель гаусової суміші для потужності генерування ФЕС (а) та для навантаження (б)

В задачі визначення розподілу випадкової величини на певному проміжку часу загальна математична модель розподілу буде описуватись рівнянням (2). Розщеплення гаусової суміші пропонується проводити за допомогою методу оцінки-максимізації (expectation-maximization) правдоподібності. ЕМ-алгоритм складається з ітераційного повторення двох кроків. На Е-кроці враховуємо очікуване значення (expectation) вектора прихованих параметрів G за поточним наближенням вектора параметрів Θ . На М-кроці вирішується задача максимізації правдоподібності (maximization) і знаходиться наступне наближення вектора Θ , за поточними значеннями векторів G та Θ .

Е-крок. Позначимо густину імовірності як $p(x, \theta_j)$, того що об'єкт x отриманий з j -ї компоненти суміші. Згідно з формулою умовної імовірності:

$$p(x, \theta_j) = p(x) P(\theta_j | x) = w_j p_j(x). \quad (4)$$

Позначимо, $g_{ij} = P(\theta_j | x_i)$ – як невідому апостеріорну імовірність того, що x_i отриманий з j -ї компоненти суміші. Приймаємо ці величини в якості прихованих змінних, тобто $G = (g_{ij}) = (g_1 \dots g_j)$, де g_j – j -й стовпець матриці G .

М-крок. Визначивши за формулою Байєса значення прихованих змінних g_{ij} , вирішуємо оптимізаційну задачу:

$$Q(\Theta) = \ln \prod_{i=1}^m p(x_i) = \sum_{i=1}^m \ln \sum_{j=1}^k w_j p_j(x_i) \rightarrow \max(\Theta). \quad (5)$$

Результатом розв'язування оптимізаційної задачі, за критерієм максимуму правдоподібності, є імовірнісні характеристики процесів генерування та навантаження. Маючи такі характеристики, визначено закон розподілу випадкових потужностей генерування ФЕС (рис. 1а) та навантаження ЛЕС (рис. 1б). На основі визначених характеристик, маючи вагу кожної компоненти генерування та навантаження, можна визначити імовірність видачі певної потужності генерування ФЕС та навантаження.

Для цього пропонується розбити кожну компоненту генерування та навантаження на складові з певним кроком (чим менший крок, тим точність розрахунку вища) та знайти імовірність їх появи за допомогою інтегралу імовірності:

$$F(X_u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{X_u}^{X_{u+1}} e^{-\frac{r^2}{2}} dX_u, \quad (6)$$

де $r = \frac{(X_u - \mu)}{\sigma}$, а X_u відповідно приймає значення X_u та X_{u+1} кожної складової компоненти генерування ФЕС чи споживання; μ – математичне очікування; σ – середньоквадратичне відхилення.

Визначивши імовірність появи u -ї складової компоненти генерування $p_{ген_u}$ та навантаження $p_{нав_u}$, визначаємо імовірність покриття u -тої компоненти навантаження генеруванням ФЕС:

$$p_{покр_u} = p_{нав_u} \cdot \sum_{\substack{z=1 \\ p_{нав_u} \leq p_{ген_z}}}^f p_{ген_z}, \quad (7)$$

де f – кількість складових компонент генерування; t – часовий проміжок, на якому визначається імовірність покриття споживання генеруванням ФЕС.

Коефіцієнт стабільності, що має зміст імовірності покриття навантаження генеруванням ФЕС на заданому часовому проміжку, дорівнює сумі імовірностей покриття всіх складових компонент навантаження:

$$k_{стаб_t} = \frac{1}{b} \sum p_{покр_u}, \quad (8)$$

де t – часовий проміжок, на якому оцінюється стабільність генерування ФЕС; b – кількість часових проміжків, протягом яких оцінюється стабільність генерування ФЕС.

На основі оцінювання стабільності генерування ФЕС запропонований алгоритм визначення імовірностей покриття та не покриття графіка навантаження (див. рис. 2).

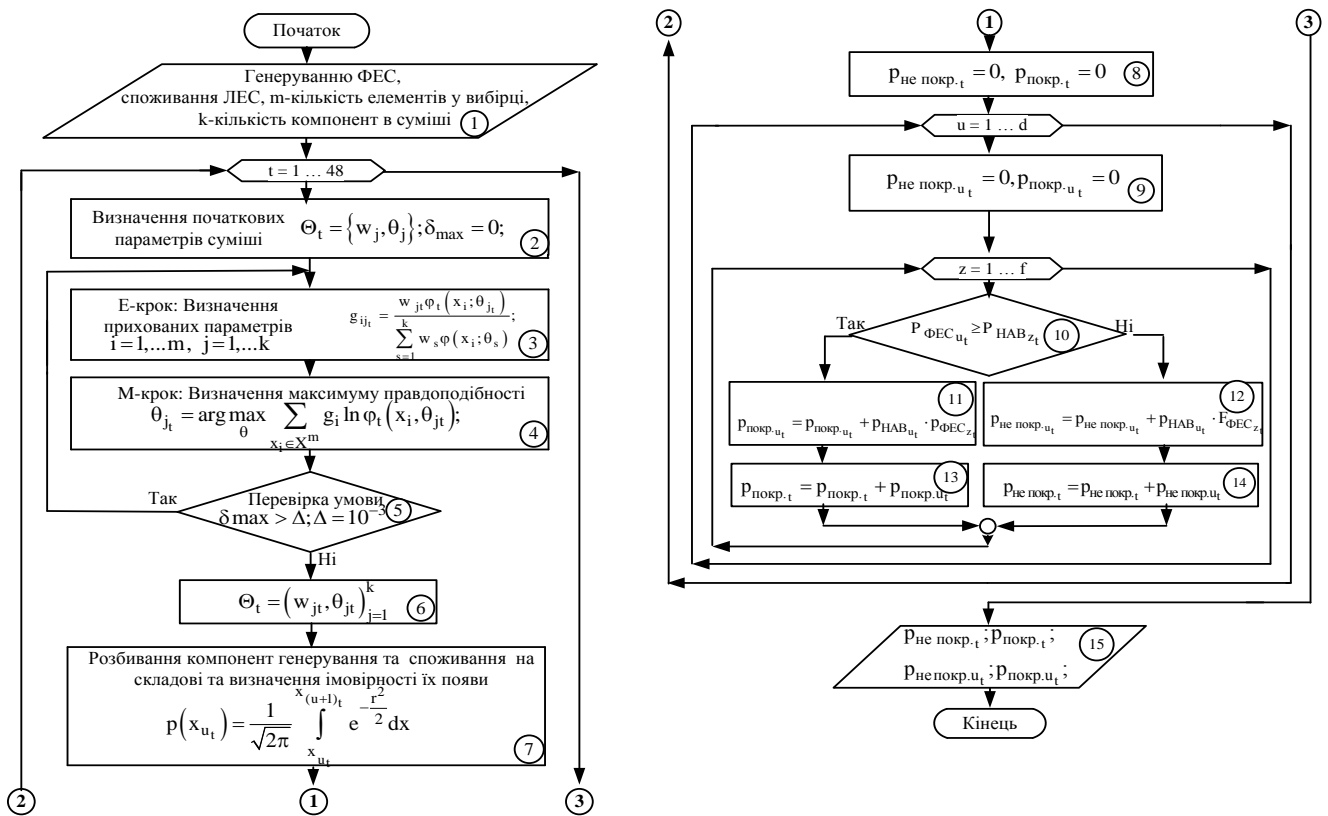


Рис. 2. Алгоритм визначення імовірності покриття графіка навантаження ЛЕС генеруванням ФЕС

Відповідно до EM-алгоритму (блоки 1–6), маючи початкові дані процесів генерування та електроспоживання (блок 1) та початкове наближення параметрів сумішей і критерій зупинки (блок 2), визначаються параметри суміші гаусових розподілів (математичне очікування, середньоквадратичне відхилення та вага компоненти суміші). В блоці 3 визначається $g_{ij} = F(\theta_j | x)$ – невідома апостеріорна імовірність того, що елемент вибірки взято з j -ої компоненти суміші. Таку імовірність можна визначити, використовуючи формулу Байєса. В блоці 4 визначаються оптимальні ваги компонентів суміші w_j за критерієм максимуму правдоподібності. Ітераційний процес зупиняється, коли значення функціоналу $Q(\Theta) = \ln \prod_{i=1}^m p(x_i) = \sum_{i=1}^m \ln \sum_{j=1}^k w_j p_j(x_i) \rightarrow \max(\Theta)$

або значення прихованих змінних G перестають суттєво змінюватись (блок 5). Отримані параметри суміші розподілів генерування ФЕС та електроспоживання (блок 6) за допомогою інтегралу імовірності розбираються на складові з певним кроком (блок 7). Слід зауважити, що чим менший крок розбиття суміші, тим точність розрахунку більша.

В блоках 8, 9 задаються початкові наближення імовірності покриття та не покриття графіка навантаження власним генеруванням ФЕС. Якщо складова компоненти суміші генерування більша за складову компоненти суміші графіка електричного навантаження (блок 10), то визначається імовірність покриття ГЕН (блок 11) і, відповідно, не покриття ГЕН (блок 12). В блоках 13, 14 визначається сумарна імовірність покриття та не покриття графіка навантаження генеруванням ФЕС. У блоці 15 виводяться імовірності, визначені в блоках 11-14.

Імовірності покриття та не покриття графіка навантаження, визначені за (7), дозволяють обчислити математичне очікування надлишку та дефіциту потужності на t -му проміжку часу доби:

$$M_{над_t} = \sum_u \overrightarrow{P_{покр_{t_u}}} \cdot \overrightarrow{P_{нав_{t_u}}} \quad \text{та} \quad M_{деф_t} = \sum_u \overrightarrow{P_{непокр_{t_u}}} \cdot \overrightarrow{P_{нав_{t_u}}}, \quad (9)$$

де $P_{покр_u}$ – імовірність покриття графіка навантаження, $P_{непокр_u}$ – імовірність не покриття графіка навантаження, $P_{нав_u}$ – потужність навантаження.

Для проведення розрахунку, щодо визначення ємності накопичувача аналізувався фрагмент схеми Ямпільської розподільної електричної мережі, яку можна вважати локальною електричною системою, оскільки має потужну ФЕС, що живить споживачів. Генерування на даній електростанції відбувається з використанням стрінгових інверторів SMA, а також мультикристалічних кремнієвих модулів. До інверторів підключено по 76 фотоелектричних модулів (ФЕМ) сумарною потужністю 17,68 кВт. Всі ФЕМ розділені на 4 паралельні групи з 19 модулів, з'єднаних послідовно. Така конфігурація забезпечує оптимальну роботу ФЕС. Сонячні панелі генерують електроенергію постійного струму, далі через інвертори вона надходить на 2 КТП: КТП 0,4/10 – 630 кВА та 0,4/10 – 1000 кВА. Нормальна схема видачі потужності електростанцією передбачає, що електроенергія, генерована ФЕС, через КТП 0,4/10 – 630 кВА та 0,4/10 – 1000кВА лінією 27–23 видається в мережу, яка з'єднана з підстанцією «Ямпіль 110/10» (рис. 3). Протяжність ліній фідера 15 ПС 110/10 «Ямпіль» становить 18 км. Даний фідер містить: 37 вузлів, 16 трансформаторних підстанцій, Гальжбіївську ФЕС потужністю 1431 кВт. Сумарна потужність трансформаторних підстанцій від яких живляться споживачі становить 2 149 кВт.

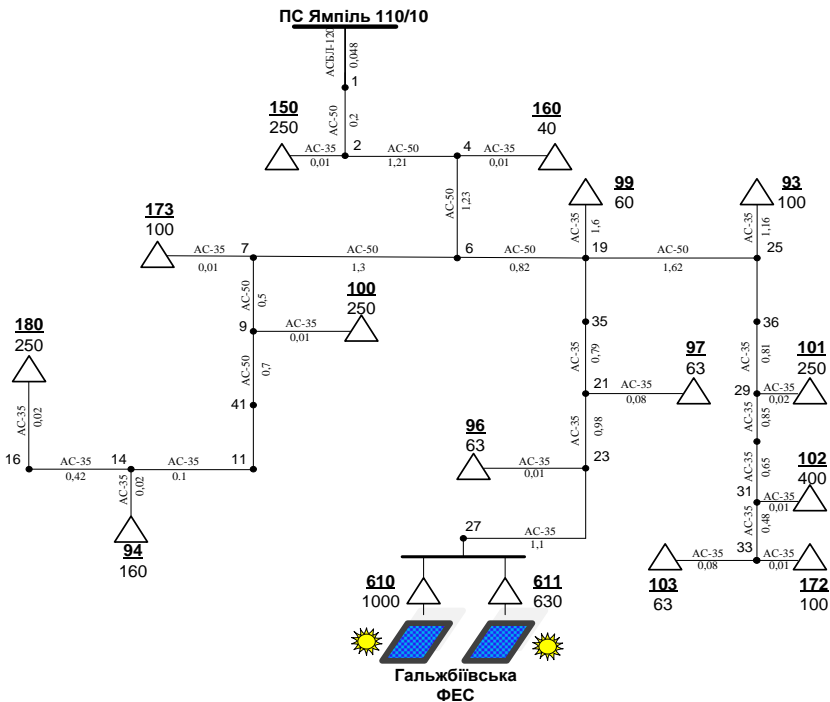


Рис. 3. Схема живильного фідера 15 Ямпільських РЕМ

На рисунку 4, проілюстровано математичні очікування надлишків та дефіцити потужності у вигляді графіка, що відображає значення можливості накопичення певної величини ємності – $Q(t)$ за умови, що початкова ємність накопичувача $Q(t) = 0$.

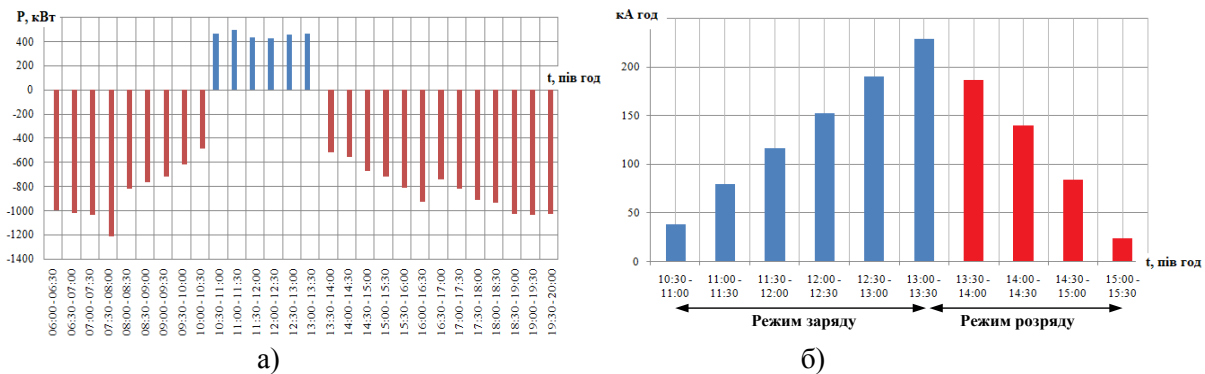


Рис. 4. – а) зміна математичного очікування дефіциту та надлишку генерування Гальжбіївської ФЕС протягом доби, б) графік роботи накопичувача повного циклу «заряд/розряд»

В кожний момент часу ємність накопичувача електроенергії буде визначатись як сума двох складових – заряду на початку роботи $Q_0(t)$ та енергії, яку накопичено на поточний момент часу:

$$Q(t) = Q_0(t) + \frac{W_{над}(t)}{U_{н-ч}}, \quad (10)$$

де $W_{над}(t)$ – надлишкова енергія, яку можна накопичити; $U_{н-ч}$ – напруга на затискачах накопичувача, для розрахунку приймається $U_{н-ч} = 12$ В.

З (рис. 4а) видно, що для даної потужності генерування ФЕС, $M_{над} > M_{деф}$, на проміжку часу з 10:30 по 13:30. Надлишкову енергію можна визначити: $W_{над} = \sum_t P_t$. Таким чином, для встановленої потужності генерування Гальжбіївської ФЕС, ємність накопичувача буде дорівнювати:

$$Q(t) = \frac{W_{над}(t)}{U_{н-ч}} = \frac{2756.35}{12} = 230 \text{ кА} \cdot \text{год}$$

За рахунок заряду, який можна накопичити в години надлишку генерування ФЕС з 10:30 по 13:30, можна збільшити кількість годин, в які ФЕС буде самостійно забезпечувати баланс між генеруванням і електроспоживанням ЛЕС (рис. 4б). Ще однією перевагою використання накопичувачів є те, що надлишок генерування не призведе до збільшення додаткових втрат активної потужності та погіршення якості електроенергії в електричній мережі.

В разі встановлення такого накопичувача, що працюватиме з заданим графіком (рис. 5б), можна значно підвищити балансову надійність ЛЕС. Отож, для ЛЕС з фотоелектричною станцією без накопичувача $k_{стаб} = 0.43$, з урахуванням роботи накопичувача, ємність якого розрахована по математичному очікуванню надлишків генерування та дефіцитів $k_{стаб} = 0.64$, чого, звичайно, недостатньо для підтримання якісного електропостачання споживачів. Але в нинішніх умовах вартість накопичувачів досить висока (приблизно 270 \$/кВт год), а кількість циклів «заряд-розряд» (<10000 циклів) обмежена, що значно ускладнює їх впровадження. Виходячи з цього, для підтримання відповідного рівня балансової надійності потрібно задіяти резерв потужності для ЛЕС з урахуванням надходження електроенергії від централізованих джерел живлення. Так з урахуванням зовнішніх надходжень електроенергії $k_{стаб} = 0.91$.

Висновки. Імовірнісні характеристики як процесу генерування електроенергії на ФЕС, так і процесу її споживання достатньо точно визначаються за допомогою математичної моделі, побудованої на ос-нові гаусової суміші. За отриманими характеристиками відносно просто можна отримати імовірність покриття графіка навантаження джерелом відновлюваної енергії і визначити імовірність забезпечення балансової надійності в локальній електричній системі. Оцінювання імовірності забезпечення графіка навантаження доцільно робити за годинними інтервалами, на які розбивається доба. Це дозволяє зменшити похибки аналізу, які зумовлені природними умовами генерування електроенергії відновлюваними джерелами, та врахувати особливості графіків її споживання.

Список використаних джерел:

1. Кириленко О.В., Петергеря Ю.С., Терещенко Т.О., Жуйков В.Я. Интеллектуальные системы керування потоками електроенергії у локальних об'єктах. – Київ: Медіа ПРЕС, 2005. – 212 с.
2. Кобец Б.В., Волкова И.О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. – Москва: ИАЦ Энергия, 2010. – 208 с.
3. C. L. T. Borges and D. M. Falcao, "Optimal distributed generation allocation for reliability, losses, and voltage improvement," Int. J. Elect Power Energy Syst., vol. 28, no. 6, pp. 413–420, Jul. 2006.
4. Q. Jiang, G. Geng, C. Guo, and Y. Cao "An efficient implementation of automatic differentiation in interior point optimal power flow," IEEE Trans. Power Syst., vol. 25, no. 1, pp. 147–155, Feb. 2010.
5. Интеллектуальные электричні мережі: елементи та режими / За ред. О.В. Кириленка. – Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. – 400 с.
6. Попов В. А. Алгоритм многокритериального управления режимами работы микросетей / В. Попов, Е. Ярмолюк, П. Замковой // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 2. – Р. 61-68.

– doi: 10.15587/1729-4061.2014.23158.

7. Кириленко О. В. Керування режимом роботи електростанції з відновлюваними джерелами енергії в умовах зміни частоти в енергосистемі / О.В. Кириленко, В.В. Павловський, О.С. Яндутьський, А.О. Стелюк // Технічна електродинаміка. — 2012. — № 4. — С. 52–57.

8. Яндутьський О.С., Труніна Г.О., Нестерко А.Б. Оптиміальне регулювання напруги в розподільній електричній мережі з джерелом розосередженого генерування з урахуванням їх належності одному власнику при використанні резерву активної потужності // Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського. - 2015. - Вип. 2. - С. 50-54. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkdpu_2015_2_9

9. Рубаненко О.Є Оптиміальне керування нормальними режимами ЕЕС з врахуванням технічного стану трансформаторів з РПН/ О.С. Рубаненко, В.О. Лесько// Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2013. Спеціальний випуск. – С.154-161. ISSN 1727-9895.

10. Burykin, O.B. Optimization of the functioning of the renewable energy sources in the local electrical systems / O.B. Burykin, J.V. Malogulko, Y.V. Tomashevskiy, P. Komada, N.A. Orshubekov, M. Kozhamberdiyeva, A. Sagymbekova // PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY. - R. 93. - NR 3/2017. - P. 97-102. - ISSN 0033-2097. - doi:10.15199/48.2017.03.23

11. Лежнюк, П.Д., Комар В.О., Кравчук С.В. Визначення оптимальної потужності резерву для забезпечення балансової надійності локальної електричної системи // Вісник НТУ «ХП», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХП». – 2016. – № 42 (1214). – С. 69-75. – doi: 10.20998/2413-4295.2016.42.11.

12. Айвазян С.А. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности / С.А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с. ISBN 5-279-00054-Х.

Стаття надійшла до редакції 19.03.2019

УДК 621.316.1

П.Д. Лежнюк¹, В.О. Комар¹, С.В. Кравчук¹, І.О. Бандура²
Вінницький національний технічний університет¹
Луцький національний технічний університет²

ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ СТАНЦІЇ ЯК ЗАСІБ РЕГУЛЮВАННЯ ПЕРЕТОКІВ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ СИСТЕМІ

В статті аналізується можливість застосування фотоелектричних станцій в задачі підвищення якості електропостачання. На основі аналізу векторної діаграми інвертора та виконаного імітаційного моделювання підтверджено технічну можливість фотоелектричних станцій впливати на перетоки реактивної потужності в електричній системі. Показано позитивні результати такого впливу на економічність режиму розподільної електричної мережі. Показана необхідність обґрунтування вимог щодо участі фотоелектричних станцій в забезпеченні якості електроенергії.

Ключові слова: електричні мережі, фотоелектричні станції, якість електропостачання, якість електричної енергії.

П.Д. Лежнюк, В.О. Комар, С.В. Кравчук, І.О. Бандура ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ КАК СРЕДСТВО РЕГУЛИРОВАНИЕ ПЕРЕТОКОВ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В статье анализируется возможность применения фотоэлектрических станций в задачи повышения качества электроснабжения. На основе анализа векторной диаграммы инвертора и выполненного имитационного моделирования подтверждено техническую возможность фотоэлектрических станций влиять на перетоки реактивной мощности в электрической системе. Показано положительные результаты такого воздействия на экономичность режима распределительной электрической сети. Показана необходимость обоснования требований по участию фотоэлектрических станций в обеспечении качества электроэнергии.

Ключевые слова: электрические сети, фотоэлектрические станции, качество электроснабжения, качество электрической энергии.

P. Lezhnyuk, V. Komar, S. Kravchuk, I. Bandura PHOTOELECTRIC STATION AS A MEANS OF REGULATION OF REACTIVE POWER CONNECTIONS IN THE ELECTRICAL SYSTEM

The article analyzes the possibility of using photovoltaic stations in the task of improving the quality of power supply. Based on the analysis of the vector diagram of the inverter and the simulated simulation carried out, the technical feasibility of the photoelectric stations to influence the flow of reactive power in the electric system has been confirmed. Positive results of such an impact on the economical nature of the distribution grid regime are shown. The necessity of justification of requirements on participation of photoelectric stations in providing of quality of electric power is shown.

Keywords: electrical networks, photovoltaic stations, quality of electricity supply, quality of electric energy.

Постановка проблеми. В електроенергетичній галузі здійснюється перехід до децентралізованого електропостачання за рахунок збільшення в балансі електричної енергії складової розосередженого генерування (РГ). Основну частину РГ становлять відновлювані джерела енергії, до яких відносяться фотоелектричні станції (ФЕС).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Це має як позитивні наслідки (зменшення впливу на екологію, розвантаження мереж вищих класів напруг), так і ряд негативних наслідків, в основному пов'язаних з нестабільністю генерування цими джерелами [1, 2]. Для зменшення негативного впливу РГ, зокрема фотоелектричних електричних станцій, в законі України про ринок електричної енергії [3] передбачено механізм, відповідно до якого такі відновлювані джерела енергії як фото та вітрові електричні станції повинні заявляти свій графік генерування на добу вперед. Це дозволить забезпечити достатній рівень якості електропостачання, який відповідно до статті 18 закону України про ринок електричної енергії [3] характеризується надійністю (безперервністю) електропостачання, комерційною якістю надання послуг з передачі, розподілу та постачання електричної енергії, а також якістю електричної енергії.

Постановка завдань. Щодо впливу на якість електричної енергії, то розбудова ФЕС має неоднозначний результат, особливо що стосується несинусоїдності напруг і струмів та відхилень напруги [2]. Забезпечення якості електроенергії на пряму залежить від забезпечення балансу по активній та реактивній потужності в електричній системі. Як джерело електричної енергії фотоелектричні станції є елементом, який здатен впливати на забезпечення якості електропостачання. Щодо балансу по активній потужності, то на законодавчому рівні передбачено необхідність прогнозування добового графіка по активній потужності на добу вперед. Щодо

балансу по реактивній потужності, то оскільки ФЕС не є її джерелом, тому не можна говорити вплив на баланс. Однак технічна здатність інвертора впливати на кут між струмом і напругою на його виході дозволяє впливати на перетоки реактивної потужності в електричній системі.

Метою дослідження є аналіз можливості використання ФЕС для впливу на перетоки реактивної потужності в електричній системі.

Викладення основного матеріалу. Оскільки одним з основних елементів фотоелектричної станції є інвертор, то з його можливих режимів почнемо аналіз. На рис. 1 показано фрагмент електричної схеми з інвертором з ШІМ керуванням і векторну діаграму до неї.

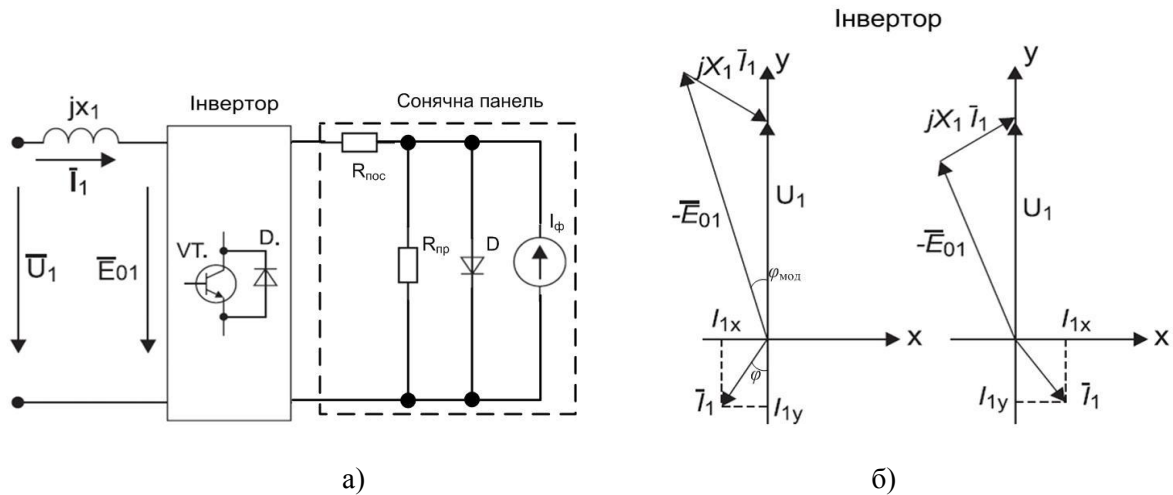


Рис. 1. Фрагмент електричної схеми а) та векторна діаграма б)

Рівняння, складене за другим законом Кіргофа для схеми (рис. 1 а), запишеться так:

$$\bar{U}_1 = \bar{E}_0 + jx_1 \bar{I}_1, \quad (1)$$

де \bar{E}_0 , \bar{U}_1 , \bar{I}_1 – результуючі вектори е.р.с. на виході інвертора, напруги мережі і струму,

$$\bar{E}_0 = \mu U_0 e^{j\varphi_{мод}}, \quad (2)$$

де μ – коефіцієнт модуляції, $\varphi_{мод}$ – фаза напруги модуляції по відношенню до напруги мережі.

В живлячій мережі збільшення \bar{E}_0 порівняно з \bar{U}_1 призводить до ефекту, що відповідає появі емнісних струмів в точці приєднання ФЕС до електричної мережі. Зменшення \bar{E}_0 порівняно з \bar{U}_1 – індуктивних струмів в мережі.

Отже можна говорити про те, що за рахунок зміни кута запалювання тиристорів інвертора можна досягати різних кутів між струмом і напругою, що в електричній мережі буде спричиняти зміну перетоків реактивної потужності.

Для підтвердження цих висновків виконано математичне моделювання в середовищі Simulink Matlab R2015a. За основу взято модель представлену в базі прикладів Matlab (див. рис. 2) – 'power_PVarray_grid_det' [4]. Оскільки ця модель відпрацьовувала лише один з можливих режимів, які реалізують сучасні інвертори, то вдосконалено модель системи керування інвертором для можливості реалізації режиму видачі активної потужності при коефіцієнті потужності рівному одиниці. Модель дозволяє також підтримувати задане його значення, відмінне від одиниці, і підтримувати заданий рівень реактивної потужності в точці приєднання ФЕС. Крім цього параметри моделі були змінені у відповідності з параметрами реальної ФЕС для перевірки адекватності моделі (дані по сонячній інсоляції і температурі сонячних панелей взяті для середньостатистичного дня без опадів, значної хмарності та вітру).

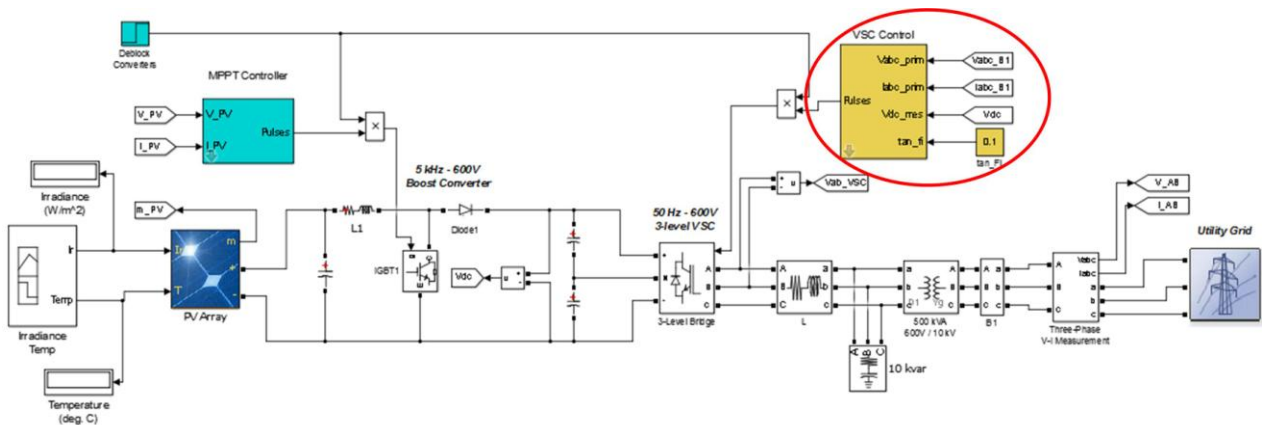


Рис. 2. Simulink-модель з вдосконаленою системою керування інвертором

На рис. 3 показано результати моделювання режиму підтримання коефіцієнту потужності на рівні 0,995. Крива 1 відповідає зміні генерованої активної потужності в точці приєднання станції (на стороні 10 кВ трансформатора).

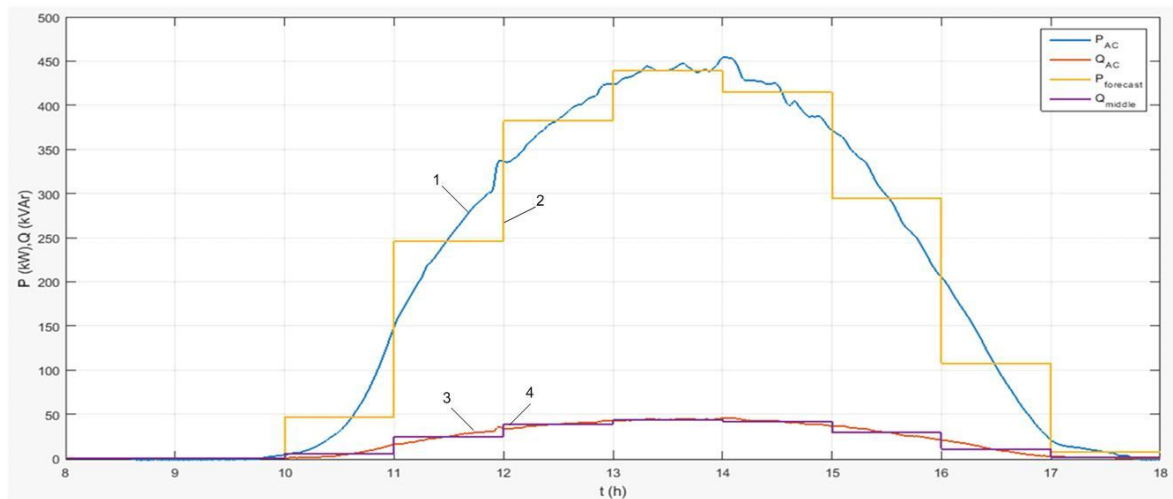


Рис. 3. Результати моделювання в режимі підтримання $\cos\varphi = 0,995$

Крива 2 відповідає заявленому графіку генерування активної потужності, а криві 3 і 4 відповідають зміні значень реактивної потужності та усереднених на годинних інтервалах. Оскільки джерела реактивної енергії в інверторі немає, то такий результат можна пояснити зміною потоків реактивної потужності в електричній мережі в наслідок зміни кута між струмом і напругою в точці приєднання фотоелектричної станції.

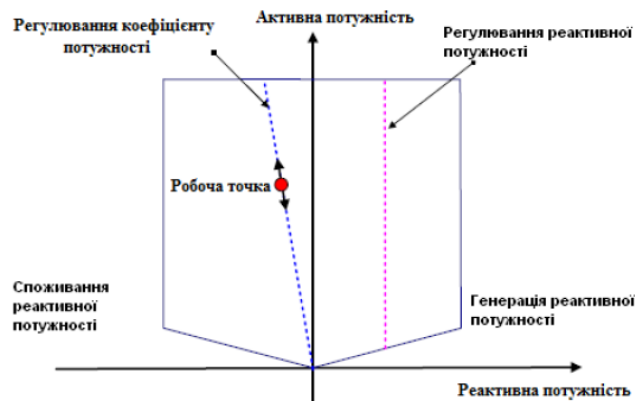


Рис. 4. Функція регулювання реактивної потужності для фотоелектричної станції

Отже фотоелектричні станції мають технічну можливість впливати на перетоки реактивної потужності в електричній системі. В залежності від потужності і класу напруги електричної мережі, до якої підключається ФЕС, можна забезпечити різні режими щодо впливу на перетоки реактивної потужності. На рис. 4 показано схематично область можливих впливів.

Зміна перетоків реактивної потужності впливає на втрати активної потужності в мережі, тобто фотоелектричні станції можна використати для підвищення економічності електричних систем.

Для фрагменту розподільної електричної мережі, показаної на рис. 5, було проведено аналіз режимів для різних режимів фотоелектричної станції Гальжбіївська (1,86 МВт).

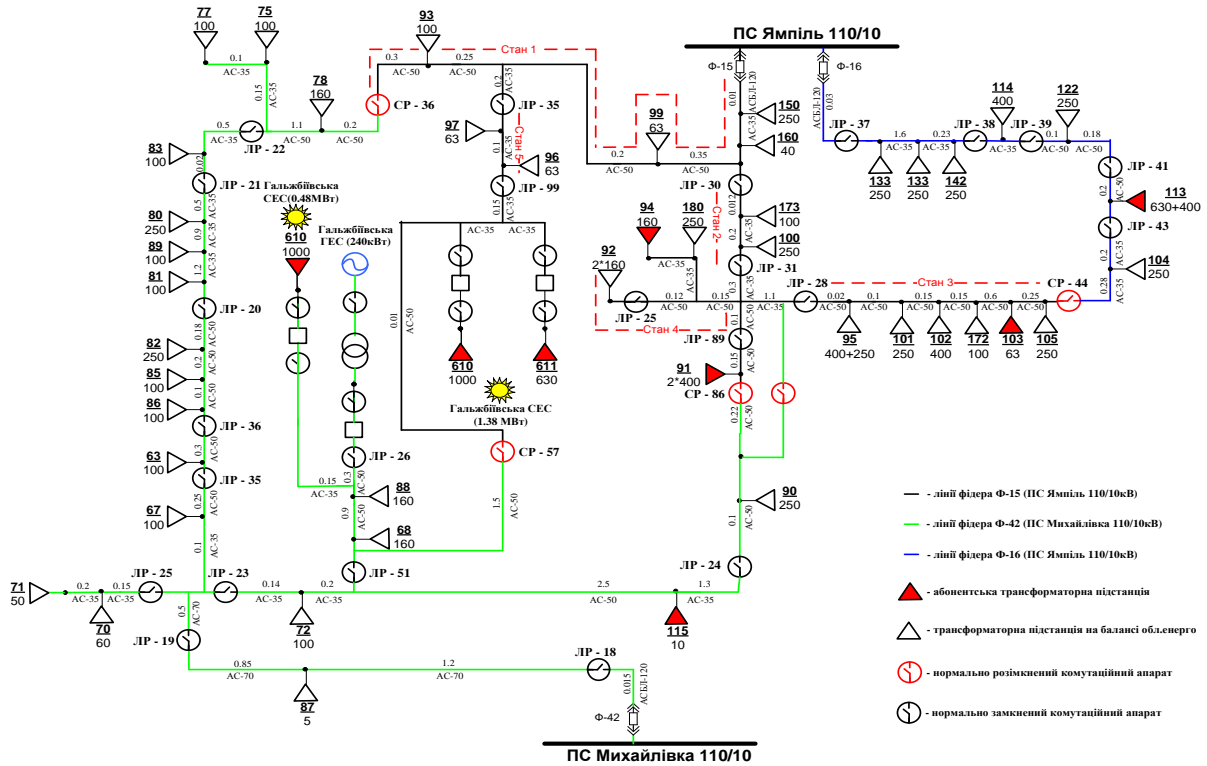


Рис. 5. Фрагмент розподільної електричної мережі

Результати розрахунків наведено в таблиці 1.

Таблиця 1.

Результати розрахунку втрат активної потужності для різних режимів ФЕС

Режим	Втрати активної потужності ΔP , % від сумарного споживання
без генерування ФЕС	5,7
генерування 1500 кВт ($\tan(\varphi)=0, \cos(\varphi)=1$)	5,5
генерування 1500 кВт ($\tan(\varphi)=0.1, \cos(\varphi)=0.995$)	5,0
генерування 1500 кВт ($\tan(\varphi)=0.33, \cos(\varphi)=0.95$)	4,7
генерування 1500 кВт ($\tan(\varphi)=0.48, \cos(\varphi)=0.9$)	5,1
генерування 1500 кВт ($\tan(\varphi)=0.75, \cos(\varphi)=0.8$)	5,7

Висновки. Отже з отриманих в роботі результатів можна зробити висновок про технічну можливість застосування таких джерел електричної енергії як ФЕС в підтримання необхідного рівня якості електропостачання шляхом використання інверторів в режимах, що дозволяють впливати на перетоки реактивної потужності в електричній системі. В результаті можна впливати не лише на відхилення напруги у вузлах мережі, а також і на їх економічність.

Список використаних джерел:

1. Кириленко О.В., Праховник А.В. Енергетика сталого розвитку: виклики та шляхи по-будови // Праці Інституту електродинаміки. Спеціальний випуск. – 2010. – С. 10 – 16.
2. Кириленко О.В., Павловський В.В., Лук'яненко Л.М. Технічні аспекти впровадження джерел розподіленої генерації в електричних мережах // Технічна електродинаміка. – 2011. – С. 46 – 53.
3. Закон України про ринок електричної енергії – <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2019-19>
4. <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/detailed-model-of-a-100-kw-grid-connected-pv-array.html?requestedDomain=true>

Стаття надійшла до редакції 18.03.2019

УДК 656.13

О.О. Лобашов, О.В. Прасоленко, Д.Л. Бурко*Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова***ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗМІНИ ЧАСУ РЕАКЦІЇ ВОДІЯ У ТЕМНУ ПОРУ ДОБИ**

Виявлені закономірності зміни часу реакції водія у темну пору доби. Виявлено, що час реакції залежить від емоційного напруження водія, освітлення та кількості небезпечних дорожніх ситуацій на маршруті пересування. При незадовільному освітленні водії знижують швидкість руху і гірше реагують на небезпечні дорожні ситуації. При зменшенні емоційного напруження відбувається стрімке збільшення часу реакції водія.

Ключові слова: час реакції, індекс напруги, пішоход, сутінки, час руху.

А.О. Лобашов, А.В. Прасоленко, Д.Л. Бурко*Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова***ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ВРЕМЕНИ РЕАКЦИИ ВОДИТЕЛЯ В ТЁМНОЕ ВРЕМЯ СУТОК**

Установлены закономерности изменения времени реакции водителя в темное время суток. Выведено, что время реакции зависит от эмоционального напряжения водителя, освещения и количества опасных дорожных ситуаций на маршруте движения. При неудовлетворительном освещении водители снижают скорость движения и хуже реагируют на опасные дорожные ситуации. При уменьшении эмоционального напряжения происходит стремительное увеличение времени реакции водителя.

Ключевые слова: время реакции, индекс напряжения, пешеход, сумерки, время движения.

O. Lobashov, O. Prasolenko, D. Burko*O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv***REGULARITIES OF CHANGING THE TIME OF THE DRIVER'S REACTION DURING THE DARK TIME OF THE DAY**

The regularities of changes in lighting and the probability of pedestrians passing while driving along the route are established. It was revealed that with a decrease in illumination and the onset of the dark time of day until the moment when the street lighting was turned on, the probability of passing pedestrians decreases. Presents regularities of changing the time of the driver's reaction in the dark. Revealed that the reaction time depends on the emotional stress of the driver, lighting and the number of dangerous driving situations on the route. With poor lighting drivers reduce the speed of movement and thereby reduce the emotional stress. With a decrease in emotional stress, there is a rapid increase in the reaction time of the driver.

Keywords: reaction time, stress index, pedestrian, twilight, time of movement.

Постановка проблеми. Згідно із статистичними даними, більше 80% дорожно-транспортних пригод (ДТП) відбувається з вини водія. Особливо необхідно вказати ДТП під час темряви та в умовах вечірніх сутінок в осінньо-зимовий період. Цей період часу характеризується зменшенням світлового часу дня і швидким початком темряви. В цих умовах очі водія не встигають пристосуватись до швидких різких змін освітленості [1, 2]. Це приводить до погіршення візуального сприйняття елементів дорожньої обстановки. Особливою проблемою безпеки руху в темну пору доби є рух пішоходів. Складність розпізнавання пішоходів у водіїв виникає, коли освітлення різко змінюється з 300 до 20 люкс протягом 10-15 хвилин. Протягом цього періоду часу, згідно з дослідженнями [3, 4], ризики ДТП та тяжкість наслідків збільшуються в декілька разів. Причиною цього є швидка зміна освітленості. Як правило, вмикання освітлення в місті займає деякий час і не враховує фізіологію водія. Зміна освітлення призводить до засліплення водіїв. Водії в умовах засліплення бачать пішоходів погано, не встигають вчасно зреагувати, тому імовірність наїзду на пішохода зростає. Саме час реакції водія важливий в таких ситуаціях. У статті розглянуто закономірності зміни часу реакції водія в темну пору доби.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Статистика ДТП свідчить про підвищення небезпеки руху в темну пору доби. З даними транспортних досліджень кількість дорожно-транспортних пригод на 100 тисяч транспортних одиниць складає: в ранкові сутінки – 26; світлий час дня – 2; вечірні сутінки – 63; вночі – 4 од. відповідно. Тому, незважаючи на різкий спад інтенсивності руху, кількість дорожно-транспортних пригод в темний час доби непропорційно велика. Основною проблемою підвищення безпеки руху в темний час доби є різке зниження ефективності зорового сприйняття водіями середовища руху, що обумовлюється фізіологічними особливостями зору людини. Водій отримує більше 90% інформації, на основі переробки якої відбувається оцінка дорожньої обстановки. Невірна оцінка дорожньої обстановки в темну пору викликає зниження надійності водія і збільшення ймовірності ДТП. Збільшення тяжкості наслідків

ДТП в темну пору доби викликано тим, що водій пізніше, ніж вдень, бачить перешкоди, а отже не встигає знизити швидкість руху чи виконати певний маневр. Час реакції водія в вищезгаданих ситуаціях є вирішальним. Час реакції залежить від напруги, уваги водія та інших факторів. Раптова поява небезпеки значно збільшує час реакції. Відомо, що час реакції складається з декількох складових: сприйняття подразника, прийняття рішення та дії. На всі перераховані складові водієві може знадобитись від 0,7 до 2,5 секунди часу.

Основними причинами дорожньо-транспортних пригод вночі є: зменшення видимості та поганого освітлення доріг [3], засліплення водіїв фарами зустрічних автомобілів [4], відмова зовнішніх освітлювальних пристроїв або неналежне їх використання [4], зниження продуктивності водіїв вночі [1, 5]. Кожна з цих причин є результатом неправильної взаємодії в складній динамічній системі «водій–транспортний засіб–автомобіль» [2]. Аналізуючи характеристики всіх підсистем, можна стверджувати, що головним в системі «водій–транспортний засіб–автомобіль» є водій, який визначає напрямок і швидкість транспортного засобу в кожний момент руху [5].

Низький трафік вночі дає водію відчуття помилкової безпеки та самозаспокоєння. З'являються сонливість і млявість, уповільнюється сприйняття дорожньої ситуації [6,7], збільшується час прийняття рішень [8], увага зменшується [9]. Цей стан значною мірою визначається порушенням добового біоритму вночі, внаслідок чого знижується рівень психофізіологічних функцій, швидше розвивається стомлюваність, знижується ефективність [10]. Увага особливо знижується з 10 вечора до 6 ранку. У цей час різко порушується здатність водія швидко діяти, що ґрунтується на особливому стані його нервових процесів, що забезпечує негайні та доцільні дії в небезпечних ситуаціях водіння. Відсутність такої готовності призводить до того, що небезпечна ситуація для водія виявляється несподіваною, і він не в змозі зреагувати на неї досить швидко і правильно. Таким чином, взаємодія між водієм та іншими учасниками дорожнього руху та пішоходами в темряві (сутінках) є дуже актуальною.

Видимість вночі на неосвітлених дорогах забезпечується фарами (дальнє світло - на відстані 100-150 м., з вмиканням ближнього світла - 30-60 м). Чим більше швидкість, тим далі від машини водій зосереджує свою увагу, перекладаючи погляди на ділянки дороги, які гірше освітлені. Як наслідок, для сприйняття об'єктів потрібно більше часу, що збільшує тривалість реакцій [8]. При освітленні дороги фарами, обмежена ширина зони видимості створює небезпеку наїзду на пішохода, який, наближаючись до меж світлового конуса фар, довго не може потрапити в освітлену область [4].

Мета дослідження. Для встановлення закономірностей зміни часу реакції водія в темний час доби необхідно вирішити наступні проблеми:

- дослідити закономірності зміни освітлення при русі водія по маршруту;
- визначити значення вірогідності пропуску пішоходів водіями в умовах змінної освітленості;
- визначити закономірності зміни часу реакції водія в залежності від параметрів, що характеризують середовище руху, стан водія та маршрут руху..

Для вирішення цих проблем використовується датчик світла Neulog, реєстратор руху "Racelogic" використовується для вивчення часу реакції водія та параметрів руху транспортного засобу.

Основні матеріали дослідження. На першому етапі дослідження при русі водія запропонованим маршрутом фіксувалися показники освітлення та поряд з цим вірогідність пропуску пішоходів на нерегульованих пішохідних переходах (рис.1). Встановлено, що зі зменшенням освітленості та настанням темного періоду доби до моменту включення вуличного освітлення, водії припускаються помилок – не надають права перетину проїзної частини пішоходам в місцях, визначених правилами дорожнього руху. За експериментальними даними визначені закономірності зміни освітленості та вірогідності пропуску пішоходів на нерегульованих пішохідних переходах в залежності від часу руху по маршруту. Для цього використовувався статистичний пакет Statgraphics Centurion та отримані наступні рівняння регресії:

- зміни освітлення L_x :

$$L_x = EXP(6,33 - 0,00155 \cdot T_{рух}^2), \quad (1)$$

де $T_{рух}$ - часу руху водія по маршруту, хв.

- зміни вірогідності пропуску пішоходів P_p :

$$P_p = EXP(4,61 - 0,000365 \cdot T_{пyx}^2), \quad (2)$$

Статистичні оцінки отриманих рівнянь регресії наступні: (1) - F-критерій=3024,1, коефіцієнт кореляції $R = 0,99$, середня помилка апроксимації $\varepsilon = 9,4\%$; (2) - F-критерій=280,2, коефіцієнт кореляції $R = 0,97$, середня помилка апроксимації $\varepsilon = 7,6\%$. Представлені характеристики рівнянь свідчать про їхню високу інформаційну спроможність, майже функціональний зв'язок між залежною та незалежною змінними, та можливість використання в практичних розрахунках для визначення зміни освітлення та вірогідності пропуску пішоходів (рис. 1).

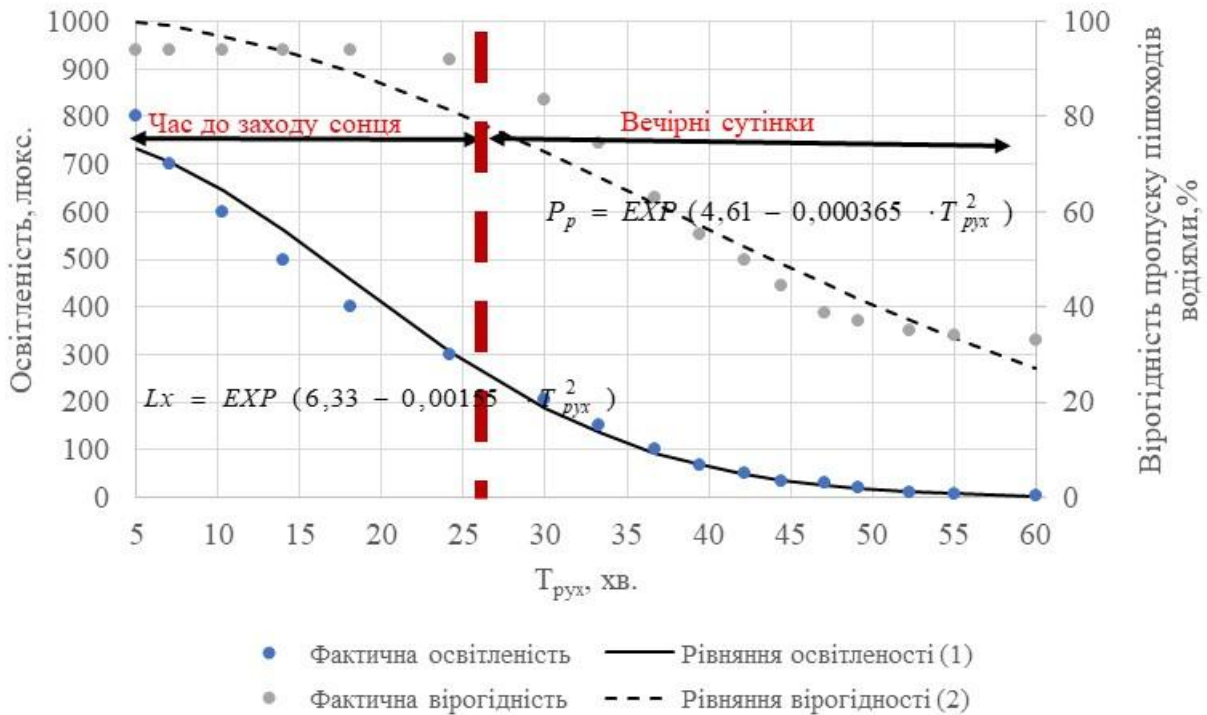


Рис. 1. Закономірності зміни освітлення та вірогідності пропуску пішоходів водіями

Для визначення коливань функціонально стану водія в процесі руху на маршруті з урахуванням освітленості будемо використовувати метод ECG [7]. В якості показника варіабельності серцевого ритму будемо використовувати індекс напруження регуляторних систем організму водія (IN). Саме серцевий ритм є стабільним і точним індикатором функціонального стану. В процесі дослідження використовувався показник зсуву індексу напруження (відношення фактичного індексу напруження водія до його фоного значення)

$$\Delta IN = \frac{IN_R}{IN_f} \quad (3)$$

де ΔIN – відношення фактичного індексу напруження водія до його фоного значення;

IN_R – індекс напруження на дорозі під час руху;

IN_f – індекс напруження у фоновому стані, коли водій лежить відкинувшись на сидінні із заплющеними очима перед поїздкою 10 хвилин..

Індекс напруження визначається за формулою:

$$IN = AM_o / 2\Delta X M_o, \quad (4)$$

де AM_o – амплітуда моди розподілу RR - інтервалів, %;

ΔX – варіаційний розмах RR – інтервалів;

M_o – діапазон значень RR - інтервалів, що найбільш часто зустрічаються (мода розподілу), с.

Для виконання експериментальних досліджень часу реакції ми підібрали групу водіїв. Стаж керування водіїв автомобілем складав від 3 до 7 років. Вибір водіїв зі стажем 5 (± 2) роки оснований на тому, що за статистикою такі водії найбільше потрапляють в ДТП[1]. Для водіїв зі стажем 5 (± 2) роки також характерне «імпульсивне» поведіння на дорозі. Дані водії більше схильні до ризиків та не можуть на декілька кроків наперед прораховувати дорожню ситуацію та характер її зміни. Для даної групи водіїв характерно перевищення швидкості руху та інші порушення правил дорожнього руху [5]. Саме необдуманість, ситуації її неусвідомлення мабуть і викликає у водіїв ці характерні вище названі ознаки. Оцінка небезпеки, що викликана появою пішохода, зустрічним автомобілем, автомобілем, що гальмує попереду і ін. у водіїв даної групи завжди недооцінена і має дуже хибні судження. Крім того, складні дорожні ситуації як магніт притягують водіїв-новачків. Навпаки водії з більшим стажем прагнуть не потрапляти в такі ситуації [2].

Мінімально необхідна кількість водіїв для випробування визначалась за формулою:

$$\eta = \frac{\sigma^2 \cdot t^2}{p^2} = \frac{6^2 \cdot 2^2}{5^2} = 6 \text{ водіїв.} \quad (5)$$

де σ – максимально можливе середньоквадратичне відхилення показників, стану водіїв в основних умовах руху ($\sigma = 6\%$);

p – точність фіксації показників стану водіїв.

Так, як помилка вимірів за допомогою апаратури, що використовувалася, не перевищує 5%, то $p = 5$; $t = 2$ при 95% забезпеченості результатів опитів.

Для визначення стресу водіїв ми виконали попередні заміри фонових станів. Фоновий стан ми замірлювали у кожного водія перед поїздкою, в положенні лежачи на сидінні з заплющеними очима. Це стан перед поїздкою, водії як правило менш напружені та спокійні. Перед поїздкою реєструвався індекс напруження. В табл. 1 представлені дані для водіїв різних груп.

Таблиця 1.

Параметри випробування в фоновому стані на основі показників серцевого ритму

№ водія	Пульс	AM_o	ΔX	M_o	IN_f
1	74	29	195	750	96
2	76	31	196	760	111
3	63	46	144	900	88
4	62	44	112	950	67
5	69	45	138	870	78
6	64	43	131	920	72

Суть експерименту була в наступному. Група водіїв отримувала завдання рухатись з бажаними швидкостями руху по маршруту. Ми свідомо обрали представлену ділянку маршруту для визначення часу реакції водія. Вона найнебезпечніша, вимагає від водія концентрації уваги, вибору траєкторії та в разі небезпеки – миттєвої зміни швидкості руху. Окрім зміни траєкторії на цій ділянці також присутній нерегульований рух пішоходів. Все це значно ускладнює умови праці водія.

Далі ми задалися питанням: «Чи впливає отриманий стрес водієм під час небезпечних ситуацій на цій ділянці дороги на час реакції водія?» Для цього використовувалася наступна схема. Під час руху ми тестували водіїв на час простої реакції. Водіям за інструкцією потрібно було рухатись в правому ряду. Інструктор, що знаходився поруч з водієм, за допомогою мобільного телефону, та заздалегідь записаному звуковому сигналу, вмикав сигнал. Сигнал подавався, коли було зручно і безпечно виконати тест. Водієві потрібно було різко натиснути педаль гальма та утримати вповільнення автомобіля декілька секунд. Зазвичай воно складало до - 0,4 G. На рис. 2 представлено схему небезпечних ділянок маршруту руху та структуру гальмування.



Рис.2. Схема небезпечних ділянок маршруту руху та структура гальмування водієм

В результаті проведених експериментальних досліджень було отримано дані щодо зміни часу реакції водія, показників освітлення, кількості взаємодій з пішоходами, індексу напруги та часу руху водія по маршруту. Після обробки таких даних за допомогою прикладного статистичного пакету Statgraphics Centurion отримано наступне нелінійне рівняння регресії по визначенню часу реакції водія в залежності від перелічених вище параметрів:

$$T_p = -1,09 \cdot Lx^{0,119} + 2,26 \cdot e^{0,0068Np} + 0,025 \cdot e^{0,89\Delta N} + 1,99 \cdot e^{0,068T_{пyx}} \quad (6)$$

де Np - кількості взаємодій з пішоходами, од.;

Характеристики представленого рівняння наступні: коефіцієнт детермінації $R^2=0,98$, коефіцієнт кореляції $R=0,99$, середня помилка апроксимації $\varepsilon = 3,77\%$.

За характеристиками рівняння можна зробити висновок щодо можливості його використання для визначення зміни часу реакції водія в залежності від параметрів, що характеризують середовище руху, стан водія та маршрут руху мають практичне значення.

Висновки. В роботі були визначені закономірності зміни часу реакції водія у темну пору доби в умовах сутінок. Дослідження показало, що час реакції залежить від емоційного напруження водія, освітлення та кількості небезпечних дорожніх ситуацій на маршруті пересування. При незадовільному освітленні водії знижують швидкість руху і гірше реагують на небезпечні дорожні ситуації. При зменшенні емоційного напруження відбувається стрімке збільшення часу реакції водія. Представлена модель зміни часу реакції водія побудована для умов вечірніх сутінок. В моделі враховані такі фактори: освітленість середовища, час пересування з урахуванням зниження освітлення, зміна функціонального стану та кількість взаємодій з пішоходами на маршруті пересування. Отримана модель адекватна, похибка апроксимації склала – 3,77 %, коефіцієнт кореляції – 99%.

Список використаних джерел

1. Гаврилов Э. В. Теоретические основы проектирования и организации условий дорожного движения с учетом закономерностей поведения водителей [Текст] :дис. ... докт. техн. наук / Э. В. Гаврилов. – К. : КАДИ, 1992. – 300 с.
2. Гаврилов Э. В. Эргономика на автомобильном транспорте. / Э. В.Гаврилов – К.: Техника, 1976. – 152 с.
3. Бегма И. В. Учет психофизиологии водителей при проектировании автомобильных дорог / И. В. Бегма, Э. В. Гаврилов, Я. А. Калужский. — М. : Транспорт, 1976. — 88 с.
4. Дьяков А. Б. Автомобильная светотехника и безопасность движения. / А. Б. Дьяков– М.: Транспорт, 1973. – 125 с.
5. Лобанов Е. М. Проектирование дорожной организации движения с учетом психофизиологии водителя / Е. М. Лобанов. – М. :Транспорт, 1980. – 311 с.

6. Хворост М. В., Прасоленко О. В. Вплив факторів дорожнього руху на емоційний стан водія //Коммунальное хозяйство городов. – 2017. – №. 137. – С. 49-54.
7. Prasolenko, O., Lobashov, O., & Galkin, A. (2015). The Human Factor in Road Traffic City. International Journal of Automation, Control and Intelligent Systems, 1(3), 77-84.
8. Gyulyev, N., Lobashov, O., Prasolenko, O., & Burko, D. (2018). Research of Changing the Driver's Reaction Time in the Traffic Jam. International Journal of Engineering & Technology, 7(4.3), 308-314.
9. Taylor, D. H. (1964). Drivers galvanic skin response and the risk of accident. Ergonomics, 7(4), 439-451.
10. Villarejo, M. V., Zapirain, B. G., & Zorrilla, A. M. (2012). A stress sensor based on Galvanic Skin Response (GSR) controlled by ZigBee. Sensors, 12(5), 6075-6101.

Рецензенти:

Давідіч Ю.О., доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, професор кафедри «Транспортних систем і логістики», Харків, Україна.

Огар О.М., доктор технічних наук, професор, Український державний університет залізничного транспорту, завідувач кафедри «Залізничні станції та вузли», Харків, Україна.

Стаття надійшла до редакції 20.03.2019

УДК 629.113-5920

С.П. Мазін, Г.М. Маренко, І.Л. Страшний
Національна академія Національної гвардії України
ПРОПОЗИЦІЇ З УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ
ПРИВОДУ РОБОЧИХ ГАЛЬМІВНИХ СИСТЕМ АВТОБРОНЕТАНКОВОЇ ТЕХНІКИ

Гальмівні системи з пневматичним та комбінованим приводом, встановлені на спеціальних військових автомобілях та бронетранспортерах, мають відносно низьке значення коефіцієнта корисної дії приводу й суттєві енергетичні витрати на привод компресора.

Обґрунтовано конструкцію робочої гальмівної системи, у складі якої пропонується використання гідравлічного приводу з насосом, що приводиться в дію від двигуна внутрішнього згоряння машини.

Ключові слова: гальмівна система, привод гальмівної системи, гідравлічний привод з насосом.

С.П. Мазин, Г.Н. Маренко, И.Л. Страшный
Национальная академия Национальной гвардии Украины
ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ КОНСТРУКЦИИ
ПРИВОДА РАБОЧИХ ТОРМОЗНЫХ СИСТЕМ АВТОБРОНЕТАНКОВОЙ ТЕХНИКИ

Тормозные системы с пневматическим и комбинированным приводом, установленные на специальных военных автомобилях и бронетранспортерах, имеют относительно низкое значение коэффициента полезного действия привода и существенные энергетические затраты на привод компрессора.

Обоснована конструкция рабочей тормозной системы, в составе которой предлагается использования гидравлического привода с насосом, который приводится в действие от двигателя внутреннего сгорания машины.

Ключевые слова: тормозная система, привод тормозной системы, гидравлический привод с насосом.

S.P. Mazin, G.M. Marenko, I.L. Strashnyi
National Academy of the National Guard of Ukraine
PROPOSALS FOR THE DESIGN OF THE WATER CANNON SPECIAL MACHINE
FOR UNITS FOR THE PROTECTION OF PUBLIC ORDER

Braking systems with pneumatic and combined reason, installed on special military vehicles and armored troop-carriers, have a relatively low value of the drive efficiency and significant energy costs for driving the compressor.

A design of the working brake system has been substantiated, which includes the use of a hydraulic drive with a pump, which is driven by the internal combustion engine of the machine.

Key words: brake system, brake system drive, hydraulic drive with pump.

Постановка проблеми. Відносно високі швидкості й корисні навантаження сучасних зразків автобронетанкової техніки, розмаїтість дорожніх і кліматичних умов експлуатації пред'являють гальмівним системам особливі вимоги в аспекті безпеки руху.

Гальмівне керування є найважливішим засобом забезпечення активної безпеки автотранспортного засобу. Основні вимоги до сучасного гальмівного керування можна сформулювати таким чином [1]: гальмівне керування повинне в будь-який момент часу забезпечити максимально можливу в даних умовах ефективність гальмування, тобто зупинити автотранспортний засіб із мінімальним гальмівним шляхом; гальмівне керування повинне працювати так, щоб під час гальмування воно не було причиною втрати автотранспортним засобом стабільності руху; гальмівне керування повинне мати підвищену надійність й навіть за відмови будь-якого його елемента повинно бути забезпечене гальмування автотранспортного засобу з достатньою ефективністю. Конструктивне забезпечення надійності гальм ґрунтується на допущенні, що у гальмівному керуванні одночасно не може відбутися більше однієї відмови.

Слід зазначити, що наряду з важливими аспектами енергетичної кризи і впливу на навколишнє середовище, однією з найбільш важливих проблем автомобільного транспорту є забезпечення безпеки на дорогах, яка значною мірою залежить від якості автомобільних гальмівних систем. Тому питання удосконалення конструкції гальмівних систем є достатньо актуальним.

Однією з суттєвих проблем стосовно гальмівних систем спеціальних військових автомобілів та бронетранспортерів з пневматичним та комбінованим приводом є відносно низькі значення коефіцієнта корисної дії (ККД) приводів гальмівних систем й підвищені енергетичні затрати та витрата пального на привод компресорів, які мають низький ККД.

Вирішення проблеми може полягати в розробці нових конструкцій гальмівних систем, у складі яких пропонується використання гідравлічного приводу з насосом, що приводиться в дію

від двигуна внутрішнього згоряння машини.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Питання теорії, розрахунку і конструювання автомобільних гальмівних систем з достатньою глибиною висвітлені в чисельних публікаціях, зокрема у працях [1-7].

Так у працях [1, 7] наводяться відомості про структуру, робочі процеси, типові конструкції та розрахунок гальмівного керування.

У статті [2] виконано аналіз схемних рішень модуляторів гідравлічних гальмівних систем, проаналізовано їх переваги та недоліки, запропоновано схемну реалізацію модулятора для антиблокувальної системи гальм великовантажних автомобілів. Також наведений приклад конструкції приводу гальм з зовнішнім джерелом енергії у вигляді гідравлічного насоса високого тиску в сполученні з гідравлічним акумулятором, а також зазначено, що такий привод має велику швидкодію.

У статті [3] визначено закономірність зміни технічного стану барабанних гальмівних механізмів автомобілів під час експлуатації залежно від зміни коефіцієнта розподілу гальмівних сил між осями, їх геометричних параметрів та режиму роботи.

В підручнику [4] викладено методику розрахунку параметрів автомобіля, які забезпечують задані експлуатаційні властивості автомобіля, включаючи і його гальмівні властивості.

У працях [5, 6] розглянуті можливі схеми насосно-акумуляторного гідравлічного приводу гальмівної системи та визначені їх основні переваги й недоліки.

Слід зазначити, що питання розрахунку гідравлічного приводу з насосом, який приводиться в дію від двигуна внутрішнього згоряння машини у вказаній літературі не розглядаються.

Метою статті є обґрунтування нової конструкції робочої гальмівної системи спеціальних військових автомобілів і бронетранспортерів, у складі якої пропонується використання гідравлічного приводу з насосом, що приводиться в дію від двигуна внутрішнього згоряння машини.

Виклад основного матеріалу. Гальмівні приводи підрозділяють на механічні, гідравлічні, пневматичні, електричні і комбіновані [1]. В гальмівних приводах більшості спеціальних військових автомобілів і бронетранспортерів використовують механізми, що створюють запас енергії (компресори, вакуумні насоси тощо). У цьому випадку водій під час гальмування лише регулює її подачу до гальм.

На більшості вантажних автомобілів великої вантажопідйомності і автобусів використовують пневматичний гальмівний привод. З метою зменшення часу спрацювання гальм за збереження необхідного притискного зусилля у гальмівних механізмах на ряді автомобілів великої вантажопідйомності і на бронетранспортерах використовують гідравлічний гальмівний привод з пневматичним підсилювачем (комбінований гідропневматичний гальмівний привод).

Як зазначено у праці [5], ККД механічного приводу складає 0,8...0,85, гідравлічного – 0,92, ККД пневматичного компресора складає 0,4.

Виходячи з цього, в режимі спільної роботи компресора та гідравлічної частини приводу ККД гідропневматичного гальмівного приводу визначається за формулою

$$\eta_{\text{гпп}} = \eta_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{гп}} = 0,4 \cdot 0,92 = 0,368,$$

де $\eta_{\text{гпп}}$ – ККД гідропневматичного гальмівного приводу; $\eta_{\text{к}}$ – ККД компресора; $\eta_{\text{гп}}$ – ККД гідравлічної частини гальмівного приводу.

Таке значення ККД гідропневматичного гальмівного приводу додатково свідчить на користь доцільності розробки конструкції гідравлічного приводу з насосом, що приводиться в дію від двигуна внутрішнього згоряння машини. Причому така конструкція не тільки прогнозовано зменшить енергетичні затрати на привод гальм, а й суттєво зменшить час на спрацювання приводу, що призведе до суттєвого скорочення гальмівного шляху й підвищення безпеки руху.

На рис. 1 наведені схеми гідравлічного приводу робочої гальмівної системи автотранспортного засобу з використанням енергії від стороннього джерела.

Оливний насос 4 (шестерний або лопатевий), що приводиться у дію від двигуна автомобіля, нагнітає оливу з резервуара 5 у газово-гідравлічний акумулятор 3. Акумулятор 3 підключений послідовно до крана керування 2 або до двох допоміжних акумуляторів 8 і 9 у разі роздільного приводу на передні й задні колеса. Натисканням на педаль 1 за допомогою крана 2 регулюється тиск у магістралі колісних гальмових циліндрів 6 і 7, а отже, й ефективність гальмування.

У разі роздільного приводу (рис. 1, б) на передні й задні колеса, крани 2 включаються через зрівнювальний важіль 10. Роздільний привод на передні й задні колеса підвищує надійність

роботи системи, оскільки у випадку виходу з ладу одного привода не порушується працездатність іншого.

Під час гальмування автомобіля сила, прикладена до педалі керування, стискає пружину 7 крана й переміщує вліво (по рис. 2) поршень 5. Спочатку поршень упирається в клапан 1 і канал 6 зливу від'єднується від каналу 2, зв'язаного магістраллю з колісними гальмовими циліндрами. Під час подальшого ходу поршня 5 відкривається клапан 1 і з акумулятора через канали 4 і 2 рідина під тиском подається в магістраль.

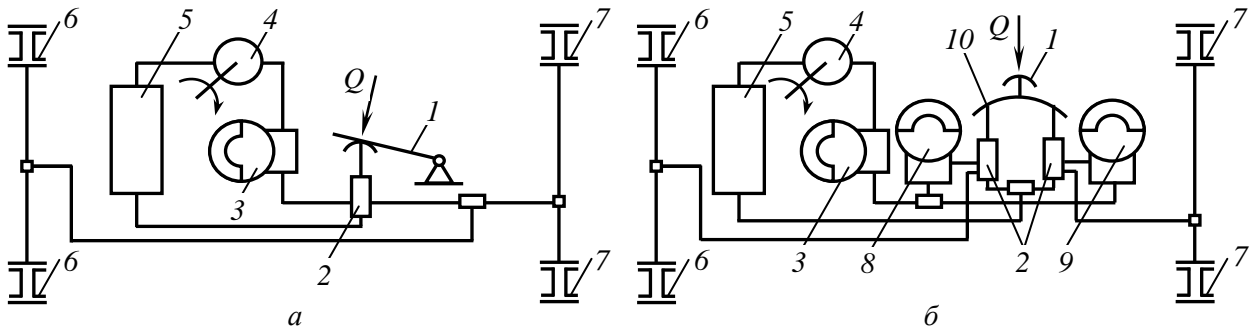


Рис. 1. Схеми гідравлічних приводів з насосом:

a – привод на всі колеса; ***б*** – роздільний привод на передні й задні колеса; **1** – педаль; **2** – кран керування; **3** – газопо-гідравлічний акумулятор; **4** – оливний насос; **5** – резервуар; **6, 7** – колісні гальмові циліндри; **8, 9** – допоміжні акумулятори; **10** – зрівнювальний важіль

Газопо-гідравлічний акумулятор являє собою сталеву кулю, розділену діафрагмою на дві порожнини. Порожнина над діафрагмою заповнюється азотом, а під діафрагмою – гальмівною рідиною. Під час роботи насоса в акумулятор нагнітається рідина й повітря над діафрагмою стискається до тиску p_{\max} , забезпечуючи максимальний тиск у магістралі акумулятор – гальмівний кран 2.

Конструкція крана управління гідроприводу з насосом наведена на рис. 2.

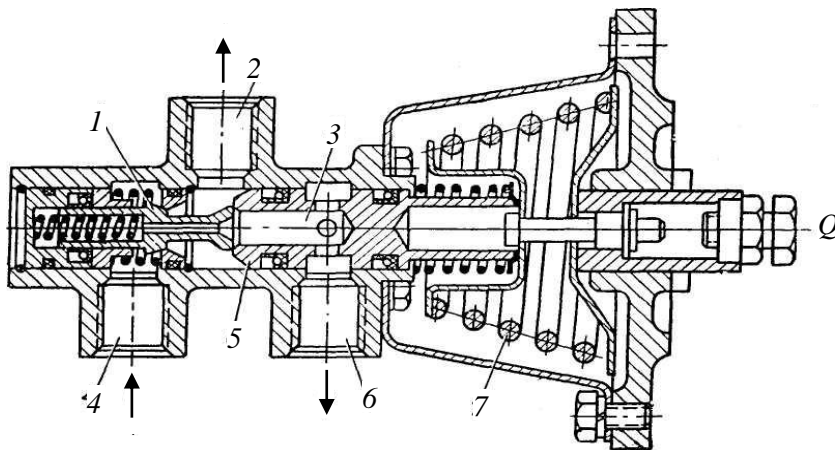


Рис. 2. Кран керування гідравлічного приводу з насосом:

1 – клапан; **2, 4, 6** – канали; **3** – свердління; **5** – поршень; **7** – пружина

Тиск рідини на поршень 5 урівноважується пружиною 7, натяг якої залежить від ходу педалі. За деякого зусилля Q у магістралі встановлюється тиск, що врівноважує натяг пружини 7. У цьому разі поршень 5 зміщується вправо й клапан 1 перекриє канал 4. Таким чином забезпечується силова слідкуюча дія приводу. Для подальшого підвищення тиску в магістралі й збільшення ефективності гальмування необхідно збільшити силу Q натискання на педаль.

За відпущеної гальмівної педалі поршень 5 займає крайнє праве положення й канал 2 з'єднується з каналом 6 зливу через свердління 3 у поршні. Рідина з гальмівної магістралі перетікає в резервуар 5 (див. рис. 1), тиск в магістралі гальмових циліндрів падає – відбувається

розгальмування.

Таким чином, конструктивно гідравлічний привод з насосом є достатньо простим, у порівнянні з пневматичним та комбінованим приводами має значно меншу кількість елементів і його технічна реалізація на об'єктах автобронетанкової техніки є цілком можливою.

Однак слід зазначити, що при виконанні конструкторських робіт основною невизначеною величиною є необхідна продуктивність гідравлічного насосу.

Пропонується продуктивність гідравлічного насосу визначати з формули

$$A_{гн} = V_{пн} \cdot S_{пн} \cdot n_{пн},$$

де $A_{гн}$ – продуктивність гідравлічного насосу, м³/с; $V_{пн}$ – швидкість руху поршня робочого циліндру гальмівного механізму, м/с; $S_{пн}$ – площа поршня робочого циліндру, м²; $n_{пн}$ – кількість робочих циліндрів гальмівної системи.

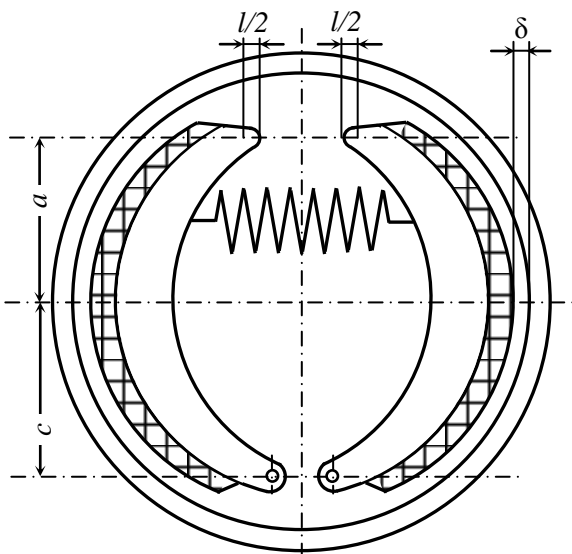


Рис. 3. Розрахункова схема гальмівного механізму

Швидкість руху поршня робочого циліндру гальмівного механізму пропонується визначати з формули

$$V_{пн} = l / t,$$

де l – хід поршнів робочого циліндру гальмівного механізму (див. рис. 3), м; t – час спрацювання гідравлічного гальмівного приводу ($t = 0,2$ с [5]).

З рис. 3 при $c = a$ маємо $l = 2\delta$. Приймавши $\delta = 0,6$ мм, отримуємо

$$l = 2 \cdot 0,6 = 1,2 \text{ мм} = 0,0012 \text{ м}.$$

$$\text{Тоді } V_{пн} = 0,0012 / 0,2 = 0,006 \text{ м/с}.$$

Площа $S_{пн}$ поршня робочого циліндру гальмівного механізму визначається за формулою

$$S_{пн} = (\pi d^2) / 4 = 3,14 \cdot 0,03^2 / 4 = 0,0007 \text{ м}^2,$$

де d – діаметр робочого гальмового циліндру (приймаємо з аналогу $d = 30$ мм).

Тоді для бронетранспортера

$$A_{гн} = 0,006 \cdot 0,0007 \cdot 8 = 0,0000336 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Потужність, яку витрачає двигун бронетранспортера на привод гальмівної системи визначаємо з формули

$$N_{гн} = p \cdot A_{гн},$$

де p – тиск гідравлічної рідини, згідно рекомендацій [5] приймаємо $p = 0,7$ МПа ($7 \cdot 10^6$ Н/м²). Тоді

$$N_{гн} = 7 \cdot 10^6 \cdot 3,36 \cdot 10^{-5} = 235 \text{ Вт} (0,32 \text{ к.с}).$$

Питоме зменшення енергетичних затрат, а, відповідно, й зменшення витрати палива $q_{гн}$ на гідравлічний привод гальмівної системи з використанням енергії від стороннього джерела визначимо з формули

$$q_{гн} = \frac{\eta_{гн} - \eta_{гнп}}{\eta_{гн}} \cdot 100\% = \frac{0,92 - 0,368}{0,92} \cdot 100\% = 60\%.$$

Таким чином, результати розрахунків свідчать, що потужність, яку витрачає двигун на привод гальмівної системи запропонованої конструкції відповідає показникам [5] (0,7...3,0 к.с) й залежно від типу бронетранспортерів Національної гвардії України складає від 0,07% до 0,2% максимальної потужності двигуна машини.

Висновки

1. Гідравлічний привод, конструкція якого пропонується, є достатньо простим у порівнянні з пневматичним та комбінованим приводами робочої гальмівної системи, має значно меншу кількість елементів, що зменшує вартість й підвищує надійність гальмівної системи.

2. Конструкція гідравлічного приводу з насосом і газово-гідравлічними акумуляторами забезпечує суттєве зменшення часу спрацювання приводу й, як наслідок, покращення гальмівних

властивостей бронетранспортерів та спеціальних військових автомобілів.

3. За результатами виконаних розрахунків зниження енергетичних затрат на привод гальмівної системи у порівнянні з затратами у гальмівних системах з пневмоприводом складає 60%, що додатково свідчить про доцільність розробки і використання гідравлічного приводу з насосом у робочій гальмівній системі бронетранспортерів та спеціальних військових автомобілів.

Список використаних джерел

1. Гуревич Л. В., Меламуд Р. А. Тормозное управление автомобиля. – М.: Транспорт, 1978. – 152 с., ил., табл.
2. Жилевич М.И. Модулятор гидравлического тормозного привода с большим расходом рабочей жидкости / М.И. Жилевич, С.В. Ермилов, П.Р. Бартош, П.Н. Кишкевич // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета и Северо-Восточного научного центра Транспортной академии Украины. Сборник трудов. Выпуск 75. – Харьков, 2016. – С. 83 – 88.
3. Назаров О.И. Зниження швидкості зношування контртіл барабаних гальмівних механізмів, встановлених на передній осі двовісних автомобілів / О.И. Назаров, В.І. Назаров // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета и Северо-Восточного научного центра Транспортной академии Украины. Сборник трудов. Выпуск 75 – Харьков, 2016. – С. 89 – 94.
4. Гришкевич А.И. Автомобили: Теория: Учебник для вузов. – Мн.: Выш. шк., 1986. – 208 с., ил.
5. Автомобили: Конструкция, конструирование и расчет. Системы управления и ходовая часть: Учеб. пособие для вузов / А.И. Гришкевич, Д.М. Ломако и др.; Под ред. А.И. Гришкевича. – Мн.: Выш. шк., 1987. – 200 с.; ил.
6. 5. Гольд Б. В. Конструирование и расчет автомобиля: Ученик для вузов. Узд. 2-е перераб. и доп. – М., Машгиз, 1962. – 464 с., ил.
7. Армейские автомобили. Конструкция и расчет. Часть II / Запрягаев М.М., Крылов Л.К., Магидович Е.И., Щукин М.М. – М.: Воениздат, 1970. – 480 с.

Рецензенти:

Герасимов Сергій Вікторович, заступник начальника кафедри Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, доктор технічних наук, старший науковий співробітник.

Забула Олег Євгенович, доцент кафедри Національної академії Національної гвардії України, кандидат технічних наук, доцент.

Стаття надійшла до редакції 15.03.2019

УДК 629.113.004

И.А. Мармут*Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет***К ВОПРОСУ ВЫБОРА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ГИБРИДНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ И ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ**

Для воспроизведения ездовых циклов при испытаниях автомобилей, особенно гибридных и электромобилей необходимы универсальные или мощностные стенды, которые имитируют реальные силовые и скоростные режимы работы автомобиля. Для снижения металлоёмкости и стоимости такого оборудования нужно подобрать оптимальный тип нагрузочно-приводного устройства. Альтернативой электрическим машинам могут быть гидравлические насос-моторы.

Ключевые слова: Ездовой цикл, мощностной роликовый стенд, расход топлива, токсичность, нагрузочно-приводное устройство.

I.A. Marmut*Харківський національний автомобільно-дорожній університет***ДО ПИТАННЯ ВИБОРУ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ГІБРИДНИХ АВТОМОБІЛІВ ТА ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ**

Для відтворення їздових циклів при випробуваннях автомобілів, особливо гібридних та електромобілів необхідні універсальні або динамометричні стенди, які імітують реальні силові і швидкісні режими роботи автомобіля. Для зниження металоємності і вартості такого обладнання потрібно підібрати оптимальний тип навантажувально-приводного пристрою. Альтернативою електричним машинам можуть бути гідравлічні насос-мотори.

Ключові слова: Їздовий цикл, динамометричний роликовий стенд, витрата палива, токсичність, навантажувально-приводний пристрій.

I. Marmut*Kharkov National Automobile and Highway University***TO THE QUESTION OF THE SELECTION OF EQUIPMENT FOR THE DIAGNOSIS OF HYBRID CARS AND ELECTRIC CARS**

Recently, the number of hybrid cars and electric vehicles has increased significantly. New design solutions for power plants require the development and improvement of equipment for diagnosing the above-mentioned vehicles. If you have the appropriate equipment, you can determine the main indicators of the car in real time. To measure fuel consumption, exhaust emissions of conventional and hybrid cars, as well as measurements of electric power consumption and power reserve in electric vehicles, driving cycles are used. Reproduction of the above modes is possible on the power roller stands. The aim of the research is to improve the method of selecting the main element of the power stand – the load-driving device according to the criterion of reducing the metal intensity and overall dimensions of the equipment. An alternative to electric machines can be hydraulic pump-motors, which are used as elements of the hydraulic drive in the machine tool industry.

Keywords: Driving cycle, power roller stand, fuel consumption, toxicity, load-drive device.

Введение. В последнее время количество гибридных автомобилей и электромобилей значительно возросло. Новые конструктивные решения силовых установок автомобилей требуют разработки и совершенствования оборудования для диагностирования вышеупомянутых транспортных средств.

Анализ последних публикаций и достижений. Как известно, у гибридного автомобиля в качестве первичного источника энергии используется двигатель внутреннего сгорания (ДВС), а вторичным является электрический накопитель энергии, связанный с электромеханической системой привода ведущих колес. Основные схемы силовых установок гибридных автомобилей рассмотрены в монографии [1]. У электромобилей ДВС вообще отсутствует и основным источником энергии является тяговая батарея. Диагностирование традиционных систем и узлов (тормозная система, ходовая часть, рулевое управление и т.д.) таких автомобилей осуществляется такими же стендами и методами, как и у обычных автомобилей. Отличительной особенностью является электрическая составляющая силовой установки (батареи, инверторы, коммуникации, блоки управления и т.д.). Диагностирование электрической части гибридных автомобилей и электромобилей заключается прежде всего в оценке состояния аккумуляторной батареи [2].

При наличии соответствующего оборудования можно в режиме реального времени определять основные показатели работы автомобиля, а именно [3]:

- мощность силовой установки;
- заряд аккумуляторной батареи,

- пройденную дистанцию;
- время работы и остановки двигателей;
- положение педали акселератора и тормоза;
- средний и мгновенный расход топлива;
- среднюю эмиссию CO₂.

Для измерения расхода топлива, токсичности отработавших газов обычных и гибридных автомобилей, а также замеры расхода электроэнергии и запаса хода у электромобилей используются ездовые циклы [4-7].

1. *Европейский ездовой цикл NEDC (New European Driving Cycle)* [6]. Этот измерительный цикл начал использоваться с 1-го января 2000 года. Он описывает движение в городе и на трассе. В целом цикл NEDC рассчитан на прохождение дистанции в 11 км за время около 20 минут. Средняя скорость измерительного цикла составляет 33,6 км/ч; на протяжении всего цикла выполняется 12 остановок и разгонов.

2. *Японский измерительный цикл JC08* [6]. С начала 2011 года измерительный цикл JC08 стал единственным для Японии. Этот цикл длится 1205 секунд, за данное время автомобиль проезжает 8,17 км. Средняя скорость во время измерительного цикла JC08 составляет 24,4 км/ч; максимальная скорость достигает 81,6 км/ч.

3. *Американский измерительный цикл EPA FTP-75 (Federal Test Procedure 75)* [6]. Этот измерительный цикл ещё имеет название EPA: от названия организации EPA (Environmental Protection Agency), которая его создала. Этот цикл подразумевает общее время тестирования 31 минуту и дистанцию пробега 17,8 км, за это время автомобиль делает 22 остановки с последующим разгоном. Однако время простоя здесь наименьшее – около 20% от общей длительности измерительного цикла. Максимальная скорость достигает 91,2 км/ч; средняя скорость во время цикла EPA достигает почти 35 км/ч. Также предусмотрен отдельный цикл замера расхода топлива при движении по трассе, где средняя скорость составляет почти 78 км/ч.

4. *Мировой цикл WLTC (Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle)* [6]. Введен с 2017 года и фактически является заменой вышеперечисленных циклов. Цикл WLTC достаточно обширный: его продолжительность составляет 30 минут; тестовая дистанция превышает 23 км; уровень ускорения (динамики разгона) будет наивысшей среди всех описанных циклов замера. WLTC состоит из четырех частей: по паре для описания городской и трассовой езды. В ходе двух частей «городские поездки» автомобиль разгоняется до 56,5 км/ч и до 76,6 км/ч; в ходе двух частей «трассовой поездки» максимальные скорости достигают 97,4 км/ч и даже 131,6 км/ч.

Воспроизведение вышеперечисленных режимов возможно на мощностных роликовых стендах. На рынке Украины поставщиком таких стендов является немецкая фирма МАНА [8]. Это самое дорогое и металлоемкое оборудование станции диагностики.

Цель и постановка задачи. В ХНАДУ на кафедре технической эксплуатации и сервиса автомобилей разработан универсальный тягово-тормозной стенд, который позволяет проводить нагрузочные испытания и моделировать различные условия движения автомобиля, а также выполнять проверку состояния тормозной системы. Металлоемкость мощностного стенда в большой степени определяется типом нагрузочно-приводного устройства (НПУ). Рассмотрим возможность снижения массы НПУ за счет применения различных конструкций приводов.

Основной материал исследования. НПУ роликового стенда предназначено для раскручивания роликов при проверке тормозов ведомых колес автомобиля, а также для создания тарированной нагрузки при проведении тяговых испытаний, замерах расхода топлива и токсичности выбросов автомобиля под нагрузкой, при воспроизведении ездовых циклов. Таким образом, привод роликового стенда должен обеспечивать два режима работы: нагрузочный (генераторный) и приводной (двигательный).

При выборе НПУ вначале необходимо определить мощность, требуемую для нагрузочного режима. Скорость движения автомобиля в км/ч при частоте вращения коленчатого вала, соответствующей номинальному крутящему моменту, вычисляется по формуле

$$V = 0,377 \frac{n_{дв} \cdot r_k}{i_0 \cdot i_{кв}}, \quad (1)$$

где $n_{дв}$ – частота вращения коленчатого вала двигателя, мин⁻¹; i_0 – передаточное число главной передачи; $i_{кв}$ – передаточное число высшей передачи коробки передач.

Эта скорость является скоростью тяговых испытаний. Мощность двигателя при номинальном крутящем моменте, кВт:

$$N_{\text{дв}} = \frac{M_{\text{кр}} \cdot n_{\text{дв}}}{9545}. \quad (2)$$

На стенде эта мощность расходуется на преодоление сил трения в трансмиссии автомобиля $N_{\text{тр}}$ и стенде $N_{\text{тс}}$, сил сопротивления качению шины по роликам $N_{\text{кр}}$ и нагрузки, создаваемой нагрузочным устройством стенда $N_{\text{н}}$, кВт:

$$N_{\text{дв}} = N_{\text{тр}} + N_{\text{тс}} + N_{\text{кр}} + N_{\text{н}}. \quad (3)$$

Потери в трансмиссии автомобиля, кВт, определяются по формуле

$$N_{\text{тр}} = N_{\text{дв}}(1 - \eta_{\text{тр}}), \quad (4)$$

где $\eta_{\text{тр}}$ – КПД трансмиссии.

Потери мощности на стенде составляют, кВт:

$$N_{\text{тс}} = \frac{(G_{\text{р}} + 2G_{\text{к}} / \cos \alpha) V \cdot f_{\text{тс}}}{3600}, \quad (5)$$

где $G_{\text{р}}$ – суммарный вес роликов и других вращающихся элементов стенда, Н; $G_{\text{к}}$ – нагрузка на ведущее колесо в снаряженном состоянии, Н; α – угол между вертикалью и линией, соединяющей центры колеса и ролика, град; $f_{\text{тс}}$ – приведенный коэффициент потерь в стенде, учитывающий трение в подшипниках и трение вращающихся элементов о воздух.

Потери на качение по роликам стенда, кВт, определяются по формуле

$$N_{\text{кр}} = 2G_{\text{к}} \cdot f_{\text{кр}} \frac{V}{3600}, \quad (6)$$

где $f_{\text{кр}}$ – коэффициент потерь на качение шины по роликам.

На первом этапе расчета, когда вес элементов стенда еще не известен, можно пользоваться упрощенной формулой

$$N_{\text{тс}} + N_{\text{кр}} = 2G_{\text{к}} \cdot f_{\text{с}} \frac{V}{3600}, \quad (7)$$

где $f_{\text{с}} = f_{\text{тс}} + f_{\text{кр}}$ – суммарный коэффициент потерь на качение колес по роликам и трение в стенде.

Из формулы (3) определяется мощность нагрузочного устройства, кВт:

$$N_{\text{н}} = N_{\text{дв}} - N_{\text{тр}} - (N_{\text{тс}} + N_{\text{кр}}). \quad (8)$$

Затем определяем мощность приводного устройства $N_{\text{пр}}$. Она должна быть достаточной для того, чтобы разогнать стенд и колеса автомобиля до скорости начала торможения за время $t_{\text{р}}$, которое для легковых автомобилей должно составлять 15...25 с.

При разгоне ведущих колес (наиболее тяжелый случай) приводом стенда, потери в трансмиссии составляют до 30% от потерь на качение $N_{\text{кр}}$. Несмотря на то, что можно ведущие колеса раскручивать двигателем проверяемого автомобиля, необходимо при расчетах исходить из более тяжелого случая (при этом будет некоторый запас мощности в случае разгона ведомых колес).

Мощность, кВт, необходимая для разгона ведущих колес приводом стенда, определяется по формуле

$$N_{\text{пр}} = (1...1,3)N_{\text{кр}} + N_{\text{тс}} + N_{\text{р}}, \quad (9)$$

где $N_{\text{р}}$ – мощность, затрачиваемая на разгон стенда, кВт.

$$N_{\text{р}} = (m_{\text{ст}} + 2m_{\text{к}}) \frac{V_0^2}{12960t_{\text{р}}}, \quad (10)$$

где $m_{\text{ст}}$ – приведенная инерционная масса стенда, кг; $m_{\text{к}}$ – приведенная инерционная масса колеса, кг; V_0 – скорость начала торможения, км/ч; $t_{\text{р}}$ – время разгона ведущих колес, с.

Потери мощности на качение колес по роликам $N_{\text{кр}}$ определяются по формуле (6), а потери на трение в стенде $N_{\text{тс}}$ – из формулы (7).

Для проверки полной мощности двигателя автомобиля мощность НПУ должна быть больше мощности N_k , подведенной к колесам автомобиля. Это требование ведет к увеличению массы НПУ, а следовательно, и всего стенда. В отличие от этого силового метода проверки, возможна проверка в неустановившемся режиме (инерционно-силовым методом). При этом используется полная величина мощности нагрузочного устройства N_n , а если подводимая мощность к колёсам автомобиля N_k больше, чем N_n , расчет ведется по величине ускорения a или времени разгона t_p от одной скорости V_1 до другой V_2 . Величина ускорения, м/с², определяется по формуле

$$a = \frac{N_k - N_n}{V_1(m_{ст} + 2m_k)}, \quad (11)$$

где V_1 – скорость начала проверки, м/с.

Разгон от V_1 до V_2 осуществляется при полной подаче топлива (в режиме внешней скоростной характеристики двигателя). Величину ускорения a можно заменить временем разгона t_p , с:

$$t_p = (V_2 - V_1)/a = \Delta V / a, \quad (12)$$

где ΔV – разность скоростей разгона ($V_2 - V_1$), км/ч.

Таким образом, зная ΔV и измерив t_p , можно найти значение мощности на колесах (учитывая формулы (11) и (12)):

$$N_k = \frac{\Delta V}{t_p} V_1(m_{ст} + 2m_k) + N_n, \quad (13)$$

или тяговой силы на колесах, Н:

$$F_k = \frac{\Delta V}{t_p} (m_{ст} + 2m_k) + F_n, \quad (14)$$

где F_n – сила, создаваемая нагрузочным устройством, Н.

Из формулы (14) находим время разгона, с:

$$t_p = \frac{\Delta V(m_{ст} + 2m_k)}{3,6(F_k - F_n)}. \quad (15)$$

По рассчитанной мощности нагрузочного устройства подбирается его тип. НПУ бывают электрические, гидравлические и механические. Наибольшее распространение получили электрические НПУ (для тяговых, тормозных и комбинированных стендов) и гидравлические (для тяговых стендов).

НПУ должно обеспечивать изменение оборотов и крутящих моментов в широком диапазоне. Обязательны также стабильные и жесткие характеристики, т. е. колебания момента на валу НПУ не должны влиять на скорость вращения.

Для тягово-тормозных стендов наиболее подходящие характеристики имеют машины постоянного и переменного тока. Однако электропривод постоянного тока имеет более стабильные показатели. Это относится, прежде всего, к управлению и к стабильности электромеханических характеристик.

На рис. 1 и 2 представлены характеристики наиболее распространенных в качестве НПУ электрических машин.

Как видно из рис. 1 и 2, машины постоянного тока с параллельным возбуждением имеют достаточно жесткие внешние скоростные характеристики. При изменении крутящего момента на величину ΔM обороты практически не меняются ($\approx 0,5\%$) – см. рис. 1б, в отличие от электромашин переменного тока с фазным ротором, у которых обороты изменяются значительно ($\approx 15..20\%$) – см. рис. 1а.

Однако, несмотря на хорошие эксплуатационные характеристики, электрические машины постоянного и переменного тока имеют большую массу и габариты.

Поэтому они применяются на стационарных диагностических стендах. Использовать эти машины в качестве НПУ на стендах для мобильных диагностических станций (МДС) неудобно также по причине обеспечения энергоснабжением (380 В). Поэтому для МДС необходимо подобрать НПУ другого типа.

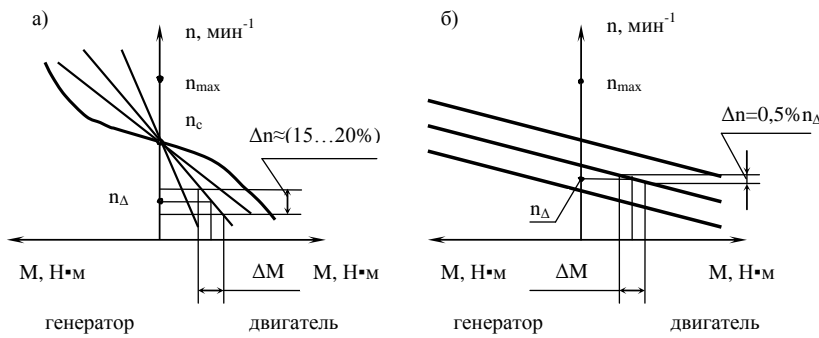


Рис. 1. Электромеханические характеристики электрических машин: а) машины переменного тока с фазным ротором; б) машины постоянного тока с параллельным возбуждением

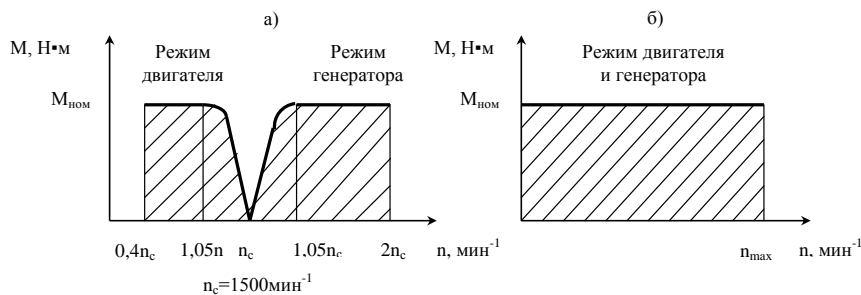


Рис. 2. Обкаточно-тормозные характеристики электрических машин: а) машины переменного тока с фазным ротором; б) машины постоянного тока с параллельным возбуждением

Альтернативой электрическим машинам могут быть гидравлические насос-моторы, которые применяются как элементы гидропривода в станкостроении. Наиболее подходящими для НПУ диагностического стенда являются аксиально-поршневые насос-моторы серии МНА или Bosch Rexroth серии А6VM [9]. Силовые характеристики этих гидромашин зависят от рабочего объема и номинального давления. Эти устройства могут работать как в насосном режиме, т.е. в качестве тормозного устройства (генераторный у электромашин), так и в режиме гидромотора (двигательный режим). Преимущества гидропривода – высокая энергоемкость, малые габариты и масса. На рис. 3 представлены сравнительные габаритные размеры электромашин и гидромашин, имеющих приблизительно одинаковые мощностные характеристики.

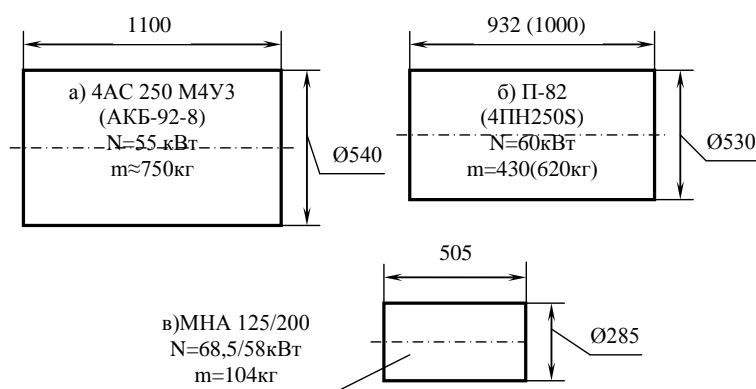


Рис. 3. Сравнительная характеристика типов НПУ: а) – асинхронный электродвигатель с фазным ротором; б) – машина постоянного тока; в) – насос-мотор

На рис. 4. представлены скоростные характеристики гидромашин. Насос-моторы серии МНА имеют жесткую скоростную характеристику (постоянство момента во всем диапазоне частот

вращения). Поэтому, в совокупности с небольшими габаритами и массой, их целесообразно использовать в качестве НПУ роликового стенда для МДС.

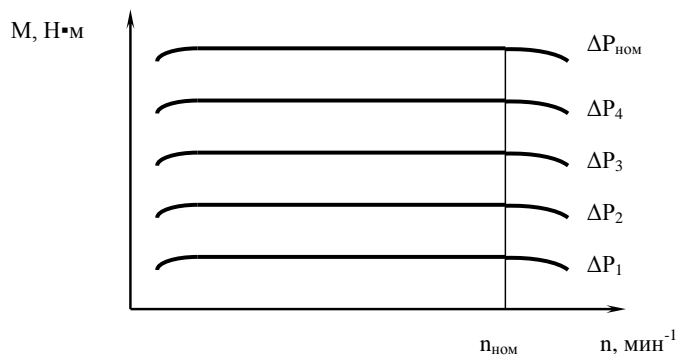


Рис. 4. Зависимость крутящего момента насос-моторов серии МНА от частоты вращения для различных значений перепада давлений при работе в режиме мотора: ΔP – перепад давления на входе-выходе гидромашины

Выводы. 1. Моделирование и воспроизведение реальных условий эксплуатации автомобилей, особенно гибридных и электромобилей по ездовым циклам возможно на универсальных или на мощностных роликовых стендах. 2. На массу и металлоемкость роликовых стендов влияют: величина приведенной массы стенда (момент инерции); диаметр роликов; тип НПУ. Конструкция НПУ является наиболее существенной в этом вопросе. 3. Оптимальным типом нагрузочно-приводного устройства для роликового стенда является обратимая гидравлическая машина (насос-мотор серии МНА или Bosch Rexroth серии А6VM).

Список использованных источников:

1. Гібридні автомобілі / [Бажинов О.В., Смирнов О.П., Серіков С.А. та ін.] – Х.: ХНАДУ, 2008. – 327 с.
2. Бажинов А.В. Особенности оценки технического состояния гибридных автомобилей / А.В. Бажинов, Ю.А. Нечитайло // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 121. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь, 2011. – С. 34-37.
3. Попов И.В. Исследование экономических и экологических показателей гибридного автомобиля в различных условиях эксплуатации / И.В. Попов, П.В. Толмачев, Р.Н. Хмелев // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2016. – № 1. – С. 66-75.
4. What is WLTP and how does it work? [Электронный ресурс] – 2018. – Режим доступа: <http://www.WLTPfacts.eu>.
5. Romain Nicolas. The different driving cycles. [Электронный ресурс] – 2013. – Режим доступа: <http://www.car-engineer.com/the-different-driving-cycles/>.
6. Запас хода электромобиля: ездовые циклы NEDC, EPA, WLTC и JC08 – какой правильнее? [Электронный ресурс] – 2016. – Режим доступа: <https://ecotechnica.com.ua/stati/1854-zapas-khoda-elektromobilya-ezdovye-tsikly-nedc-epa-wltc-i-jc08-kakoj-pravilnee.html>.
7. Christ T., Lins F., Bohne W., Modellbasierte Regelungskonzepte fuer Hybridantriebsstraenge // Automotive and Engine Technology: 10th Stuttgart International Symposium, Stuttgart. – 2010. – Vol. 1. – P. 47–62.
8. MSR 500/2 PKW ALLRAD (LPS 3000). [Электронный ресурс] – 2018. – Режим доступа: <https://www.maha.de/scheitelrollen-leistungspruefstand-msr-500-2-pkw-allrad-lps-3000.htm>.
9. Гидромоторы аксиально-поршневые Bosch Rexroth серии А6VM. [Электронный ресурс] – 2017. – Режим доступа: https://hydromotor.com.ua/radialno_porshnevye_hydromotory/bosch-rexroth.

Рецензенты:

Волков В.П., докт. техн. наук, профессор, ХНАДУ

Шаша И.К., докт. техн. наук, профессор, НАНГУ

Стаття надійшла до редакції 15.03.2019

УДК 629.113.004

С.М. Мастепан*Харківський національний автомобільно дорожній університет***ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИТРАТ НА ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПОСЛУГ АВТОСЕРВІСУ**

На основі аналізу попереднього досвіду і теоретичних досліджень розроблена модель визначення витрат та раціональних напрямків підвищення і забезпечення якості виробничого процесу підприємства автосервісу і, як результат, якості сервісної послуги. Розглянуто та визначено вимоги та формування моделей визначення вартісного показника напрямків підвищення якості. Представлено моделі визначення вартісного показника витрат на якість.

Ключові слова: оцінка, ефективність, якість, витрати, технічне обслуговування, ремонт, виробничий процес.

С.М. Мастепан**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАТРАТ НА ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА АВТОСЕРВИСА**

На основе анализа предыдущего опыта и теоретических исследований разработана модель определения затрат и рациональных направлений повышения и обеспечения качества производственного процесса предприятия автосервиса и, как результат, качества сервисной услуги. Рассмотрены и определены требования и формирования моделей определения стоимостного показателя направлений повышения качества. Представлены модели определения стоимостных показателей затрат на качество.

Ключевые слова: оценка, эффективность, качество, затраты, техническое обслуживание, ремонт, производственный процесс.

S. Mastepan**THE EVALUATION OF COST EFFICIENCY TO QUALITY IMPROVEMENT OF THE CAR-CARE CENTER**

Sweeping development of service network strengthens a competitive struggle on services market and forms practically for all autoservice enterprises the problem of quality improvement of production and service. Quality improvement requires economical justifications of the directions of technical, technological and organizational development of production of qualitative services, and defines researches relevance.

On the basis of analysis of the previous experience and theoretical researches the model of definition of expenditures and rational directions of increase and quality assurance of production of the car-care center enterprise and, as result, quality of service is developed. Requirements and formation of the models of definition of cost index of the directions of quality improvement are considered and determined. The models of definition of cost indexes of expenditures to quality are presented.

Keywords: evaluation, efficiency, quality, expenditure, maintenance, repair, production.

Постановка проблеми. Значна частина інфраструктури автомобільного транспорту пов'язана з розвитком транспорту і призначена для підтримки та відновлення технічного стану автомобілів протягом всього терміну його експлуатації. Розвиток автомобільного транспорту визначається соціально-економічним станом країни, дорожньою інфраструктурою, рівнем розвитку автомобілебудування тощо.

Автосервісні підприємства (АСП) є складовою інфраструктури автомобільного транспорту і основною ланкою з надання комплексу послуг автосервісом споживачу. Вони несуть основне навантаження по задоволенню потреб автовласників у послугах з технічного обслуговування і ремонту автомобілів.

Учасниками ринку послуг автосервісу є множина приватних і державних суб'єктів господарювання. Взаємовідносини, які складаються між виробниками і споживачами послуг, визначаються балансом пропозиції і попиту, якістю і ціною послуги. Якість і ціна в сукупності формують цінність сервісної послуги для споживача.

Стрімкий розвиток сервісної мережі посилює конкурентну боротьбу на ринку послуг і формує практично для всіх автосервісних підприємств проблему підвищення якості виробничого процесу і сервісної послуги. Підвищення якості потребує економічних обґрунтувань напрямків технічного, технологічного і організаційного розвитку виробництва якісних послуг, що і визначає актуальність досліджень.

Аналіз досліджень і публікацій. Відповідно до Міжнародного Стандарту ISO 9001 якість це сукупність характеристик продукту, що відносяться до його здатності задовольняти встановлені і передбачувані потреби споживача [1]. Основним характеристикам процесу обслуговування, що

визначають як якість послуги, так і якість виробничого процесу необхідно приділяти постійно увагу.

При дослідженнях систем управління якістю постійно аналізуються економічність витрат на проведення заходів в області підвищення і забезпечення якості [2, 3, 4].

В управлінні якістю послуг головним є співставлення об'єкта якості в часі і просторі з проектними характеристиками. На процес витрат на забезпечення якості впливає значна частина властивостей, які послуга отримує в процесі виробництва. В сукупності вони формують ефективність процесу виробництва якісної послуги [5, 6].

Найбільшу популярність у дослідників і практиків має така класифікація витрат на якість [1, 7, 8]:

попереджувальні витрати - витрати на дослідження, попередження і зниження ризику невідповідності послуги;

оціночні витрати - вартість оцінки досягнення необхідної якості, що включає, наприклад, вартість контролю, що здійснюється на будь-якому етапі життєвого циклу продукції;

витрати внаслідок внутрішніх відмов - витрати через невідповідності або дефекти, виявлені усередині процесу на будь-якому етапі;

витрати внаслідок зовнішніх відмов - витрати через невідповідність або дефекти, виявлені після передачі об'єкта обслуговування споживачеві.

В роботах багатьох учених і практиків особлива увага приділяється ролі виробничого процесу в підвищенні якості послуг, визначенню умов створення ефективного виробництва, визначенню перспектив підвищення якості послуг.

Постановка завдань. Метою досліджень є підвищення якості автосервісних послуг за рахунок організації більш ефективного використання матеріальних ресурсів на покращення процесу технічного обслуговування і ремонту автомобілів.

Викладення основного матеріалу. Управління витратами на підвищення та забезпечення якості може бути ефективним при системному підході до проблеми. Необхідно налагодити роботу системи управління витратами на якість таким чином, щоб були сформовані найбільш вагомі напрямки вкладання коштів в якість. Має бути розроблений механізм аналізу витрат, які здійснюються на кожному етапі виробництва і по кожному напрямку, а також принципи оцінки, моніторингу, планування, корегування і управління витратами. Необхідно розробити порядок вибору найбільш ефективних напрямків, регламентувати порядок збирання, обробки інформації про всі види витрат на якість, розробити процедури її обробки та аналізу.

Основними показниками якості послуг: відношення до споживача працівників станції, гарантії якості послуги, доступність послуги [2, 5]. Ці показники визначають сприйняття послуги споживачем.

Сукупність очікуваних споживачем параметрів якості послуги, залежить від якості, досконалості, ефективності виробничого процесу.

Підвищення якості автосервісних послуг потребує глибокого аналізу, додаткових витрат інтелектуальної праці, достатньо високих матеріальних витрат. Досвід розвинутих країн показує, що в світі сформувалася стійка тенденція до зростання вкладень в поліпшення якості продукції і послуг. Але важливо, щоб додаткові витрати, пов'язані з підвищенням якості були економічно обгрунтованими і доцільними. Попит на послуги в майбутньому повинен компенсувати витрати на якість. Інколи, для відшкодування витрат на якість, можна збільшувати ціну, але бажано несуттєво.

Перевищення доходів над витратами, понесеними в зв'язку з підвищенням якості послуг, може бути різним. Виникає потреба у визначенні оптимального рівня витрат на якість.

Реалізація логістичної функції підприємства – планування витрат на якість – потребує рішення задачі раціоналізації напрямків підвищення якості і розмірів витрат на них.

Основними напрямками підвищення якості виробництва автосервісних послуг є сукупність різнопланових напрямків, які включають:

Технічні: розробка і впровадження, засобів контролю і вимірювань показників якості; впровадження новітніх технологічного устаткування і оснащення; підвищення технічного стану технологічного устаткування; механізація виробничих процесів.

Технологічні: впровадження новітніх технологій; вдосконалення окремих складових технологічних процесів; використання якісних матеріалів і ресурсів; впровадження, удосконалення системи нормативного забезпечення виробничого процесу.

Організаційні: впровадження сучасних форм і методів організації виробництва; оптимізація системи управління виробництвом; впровадження формалізованих методів управління; впровадження і оптимізація систем управління якістю; впровадження і удосконалення системи моніторингу виробничого процесу.

Економічні: забезпечення цінової конкурентоспроможності послуги; визначення оптимальних напрямків інвестування якості послуг; оптимізація рівня витрат на забезпечення якості за напрямками діяльності; удосконалення методів економічного аналізу забезпечення якості послуг.

Соціально-психологічні: забезпечення ефективності підбору і використання кадрів; забезпечення підвищення кваліфікації працівників; мотивація підвищення якості послуг; підвищення трудової і виконавської дисципліни; створення умов для повного використання потенціалу окремих працівників і цілого трудового колективу

Оцінити ефективність вкладень в якість і більш точно визначити напрямки і розміри витрат можна за допомогою загальновідомого методу АВС.

Методом АВС вирішується завдання визначення ефективних напрямків і обсягів витрат на якість. Метод базується на побудові діаграми Парето. Відповідно до методу усі напрямки витрат на підвищення якості поділяються на групи А, В, С: перша група А – напрямки, за якими витрати мають велику ефективність, В – середню і С – витрати незначної ефективності.

Для реалізації методу необхідно спочатку ввести єдиний вартісний показник C_i , який показує усі види витрат, пов'язані з i – м напрямком підвищення та забезпечення якості. Цей показник розраховується для кожного напрямку матеріальних вкладень в підвищення якості виробництва послуг за груповою методикою.

Наведені вище напрямки (технічні, технологічні, організаційні та інші) доцільно згрупувати в окремі групи, відповідно до методичних підходів визначення економічної ефективності витрат на якість. Можна всі напрямки підвищення якості поділити на чотири групи:

В першу групу ввійдуть напрямки підвищення якості, ефективність яких формується за рахунок збільшення обсягів виробництва і зниження собівартості одиниці послуги. Це такі напрямки: створення нових виробничих потужностей; впровадження новітніх технологічного устаткування і оснащення; механізація виробничих процесів; впровадження сучасних форм і методів організації виробництва; впровадження формалізованих методів управління; впровадження і удосконалення системи моніторингу виробничого процесу.

Для напрямків першої групи підвищення якості єдиний вартісний показник C_i визначається за формулою:

$$C_i = (Q_i + \Delta Q_i) \cdot (S_b - \Delta S_i + \Delta S_{bi} + E_f \frac{K_{bi}}{Q_i + \Delta Q_i}), \quad (1)$$

де Q_i – обсяг виробництва сервісних послуг за визначений період, люд.-год.;

ΔQ_i – прирощення обсягів виробництва послуг за визначений період які призводять до зниженню собівартості робіт за i - м напрямком (здешевлення послуги), люд.-год.;

S_b – базова собівартість виробництва одиниці послуги, грн.;

ΔS_i – зниження собівартості виробництва одиниці послуги за рахунок удосконалення виробничої бази послуг за i - м напрямком, грн.;

ΔS_{bi} – підвищення собівартості виробництва одиниці послуги за рахунок збільшення експлуатаційних витрат на посилену виробничу базу послуг за i - м напрямком, грн.;

E_f – коефіцієнт економічної ефективності, $E_f = 0,12 - 0,15$;

K_{bi} – капітальні вкладення на посилення виробничої бази послуг за i - м напрямком, грн.

Друга група об'єднує напрямки підвищення та забезпечення якості виробництва послуг, ефективність яких залежить від обсягів виробництва і продуктивності праці (інтенсифікація виробництва): впровадження новітніх, більш продуктивних технологічних процесів та організаційних форм; підвищення кваліфікації робітників; удосконалення організації робіт, методів оплати праці, впровадження нових форм мотивації; оптимізація системи управління трудовим потенціалом; впровадження і удосконалення системи моніторингу використання трудового потенціалу; підвищення трудової і виконавської дисципліни; створення умов для

повного використання потенціалу окремих працівників і цілого трудового колективу. Єдиний вартісний показник C_i для напрямків цієї групи визначається за формулою:

$$C_i = (Q_i + \Delta Q_i) \cdot (S_b - \Delta P_i + \frac{B_{bi}}{Q_i + \Delta Q_i}), \quad (2)$$

де ΔP_i – зниження собівартості виробництва одиниці послуги за рахунок збільшення продуктивності праці робітників післявкладень на якість за даним напрямком, грн.;

B_{bi} – витрати на організаційні заходи по підвищенні якості послуг за i -м напрямком, грн.

В третю групу можна об'єднати напрямки, пов'язані з підвищенням якості за результатами покращання входу та інформаційного забезпечення виробничого процесу: використання якісних матеріалів і ресурсів; впровадження, удосконалення системи нормативного забезпечення виробничого процесу; впровадження сучасних форм і методів забезпечення інформацією виробництва; забезпечення цінової конкурентоспроможності послуги; визначення оптимальних напрямків інвестування якості послуг; удосконалення методів економічного аналізу забезпечення якості послуг; вивчення та аналіз ринку послуг. Ефективність підвищення та забезпечення якості визначається за певний період і на його основі розраховується єдиний вартісний показник C_i за формулою:

$$C_i = (Q_i + \Delta Q_i) \cdot (S_b - \Delta S_o - \Delta S_{im} + \frac{D_{bi}}{Q_i + \Delta Q_i}), \quad (3)$$

Де ΔS_o – зниження собівартості виробництва одиниці послуги за рахунок зменшення витрат, пов'язаних з організацією процесів після матеріальних вкладень на підвищення якості за i -м напрямком, грн.;

ΔS_{im} – зниження собівартості виробництва одиниці послуги за рахунок зменшення витрат на виправлення неякісних послуг після матеріальних вкладень на підвищення якості за i -м напрямком, грн.;

D_{bi} – витрати на управлінські та організаційні заходи по підвищенні якості послуг за i -м напрямком, грн.

Четверта група включає напрямки, які напряму пов'язані з підвищенням якості. Це такі напрямки: розробка і впровадження, засобів контролю і вимірювань показників якості; впровадження новітніх технологічного устаткування і оснащення; вдосконалення окремих складових технологічних процесів; впровадження і оптимізація систем управління якістю; мотивація підвищення якості послуг. Єдиний вартісний показник C_i ефективності підвищення та забезпечення якості визначається за формулою:

$$C_i = Q_i \cdot (S_b - \Delta S_\tau - \Delta S_{im} + E_f \frac{K_{ai}}{Q_i}), \quad (4)$$

де ΔS_τ – зниження собівартості виробництва одиниці послуги за рахунок зменшення витрат за використання більш сучасних технологій після матеріальних вкладень на підвищення якості за i -м напрямком, грн.;

ΔS_{im} – зниження собівартості виробництва одиниці послуги за рахунок зменшення витрат на виправлення неякісних послуг після матеріальних вкладень на підвищення якості за i -м напрямком, грн.;

K_{ai} – витрати на удосконалення технологій, впровадження новітніх вимірювальних приладів для підвищення якості послуг за i -м напрямком, грн.

Отримані за формулами (1-4) значення вартісних показників C_i ранжируються, спочатку в зростаючій послідовності CS , а потім в убутній послідовності CR , за допомогою відповідних математичних операторів.

$$C_a \geq C_b \geq \dots \geq C_i \geq \dots \geq C_m. \quad (5)$$

І відбувається присвоєння нових індексів: $a = 1, b = 2, \dots, m = N$, де N – номенклатура витрат на забезпечення якості, тобто CR .

$$C_1 \geq C_2 \geq \dots \geq C_i \geq \dots \geq C_N. \quad (6)$$

Для зручності розрахунків вводяться відносні величини розглянутих вартісних показників q_i (у відсотках), тим самим робимо нормування показників.

$$q_i = \frac{C_i}{\sum_{i=1}^N C_i} \times 100\%. \quad (7)$$

Величини q_i підсумовуються наростаючим підсумком $q \sum i = \sum q_i$ і надаються у вигляді графіка (рис. 1).

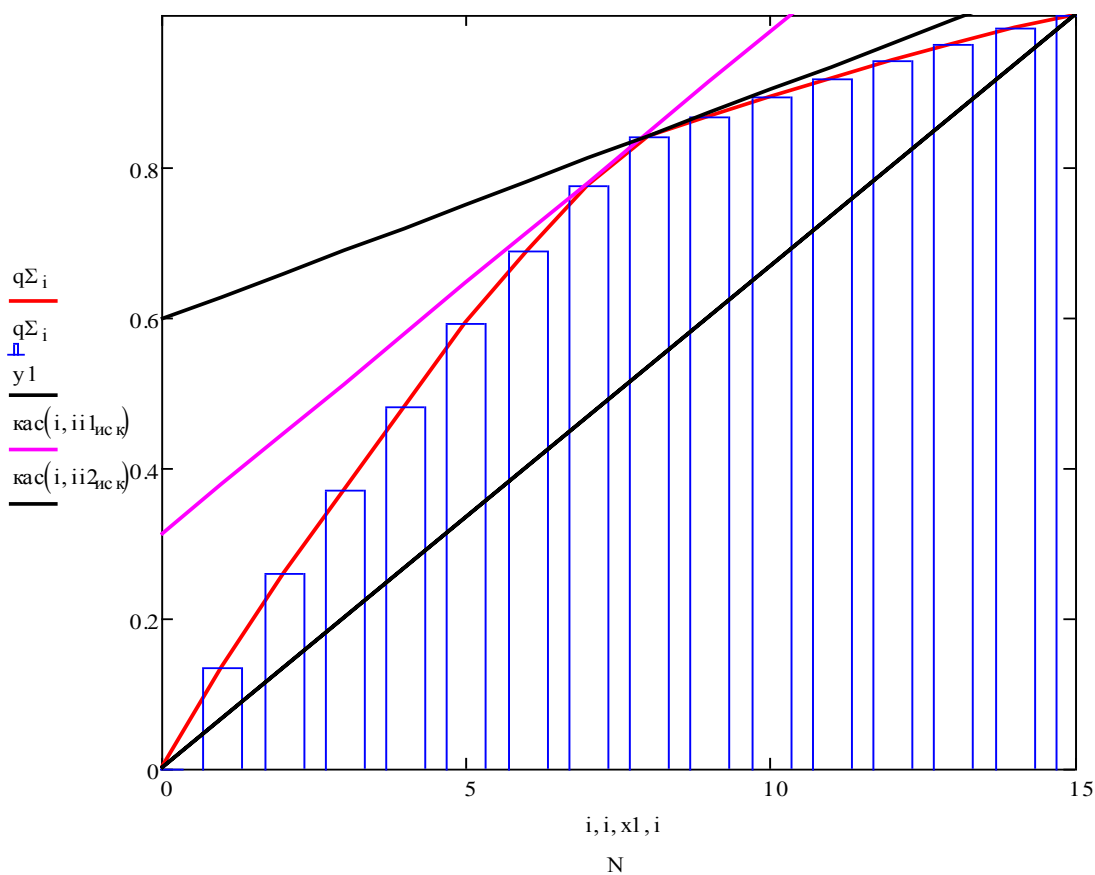


Рис. 1. Формування груп А, В, С ефективності напрямків підвищення якості послуг

Висновки. Запропоновано методикку оцінки і визначення ефективних напрямків підвищення та забезпечення якості послуг. Напрямки витрат поділено на чотири групи і для кожної групи розроблено модель визначення вартісних показників якості за різними напрямками витрат на якість.

Список використаних джерел:

1. Глудкин О.П. Всеобщее Управление качеством: Учебник для вузов / О.П. Глудкин, Н.М. Горбунов, А.И. Гуров, Ю.В. Зорин ; Под ред. О.П. Глудкина. – М.: Радио и связь, 1999. – 600 с.: ил.
2. Волгин В.В. Автомобильный дилер: практическое пособие по маркетингу и менеджменту сервиса и запасных частей. / В.В.Волгин-М.: Ось-89, 1997-224с.
3. Пархоменко Е.Л. Качество инновационного продукта / Е.Л. Пархоменко, Б.И. Герасимов, Л.В. Пархоменко. -Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. 116с.

4. Лебедев В.Г. Управление затратами на предприятиях. Учебник. / В.Г. Лебедев, Т.Г. Дроздова, В.П. Кустарёв и др.: Под общ. ред. Г.А. Краюхина. – СПб.: Издательский дом "Бизнес-пресса", 2000. – 277 с.: ил.
5. Кузнецов Е.С. Управление техническими системами. Учебное пособие/Е.С. Кузнецов МАДИ (ТУ). – М.: Моск.автом-дорожн.ин-тут, 1998. – 202 с.
6. Новицкий Н.И. Организация производства на предприятиях / Н.И. Новицкий- М.: Финансы статистика, 2002. – 39с.
7. ДСТУ ISO-9004-2-95. Управління якістю та елементи системи якості: частина 2. Вказівки по послугах.
8. Шоттміллер Джон Витрати на якість стимулюють процеси безперервного вдосконалення / Джон Шоттміллер/ Методи менеджменту якості. - 2003. - № 2. - С. 62-65.

Рецензенти:

Волков Володимир Петрович – професор, завідувач кафедри технічної експлуатації та сервісу автомобілів ім. М.Я. Говорушенка Харківського національного автомобільно дорожнього університету, докт. техн. наук.

Мигаль Василь Дмитрович – професор кафедри тракторів та автомобілів Харківського національного університету сільського господарства ім. П. Василенка, докт. техн. наук.

Стаття надійшла до редакції 20.03.2019

УДК 534.29+539.32

В.А. Мащенко*Одеська державна академія технічного регулювання та якості***ВИЗНАЧЕННЯ МОДУЛІВ ПРУЖНОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ ТА ГЕТЕРОГЕННИХ МАТЕРІАЛІВ УЛЬТРАЗВУКОВИМ МЕТОДОМ**

В роботі розглянуто можливості іммерсійного ультразвукового методу вимірювання швидкостей поширення поздовжньої і поперечної хвиль у зразках конструкційних і гетерогенних матеріалів. За експериментальними значеннями густини та акустичних параметрів визначені модулі Юнга, модулі зсуву, модулі об'ємної деформації і коефіцієнти Пуассона різних типів конструкційних і гетерогенних матеріалів. Для отриманих значень проведено порівняльний аналіз із відповідними величинами при вимірюваннях механічними методами.

Ключові слова: ультразвуковий метод, поздовжня та поширення хвилі, швидкість поширення, коефіцієнт Пуассона, модуль Юнга, модуль зсуву, об'ємний модуль деформації.

В.А. Мащенко**ОПЕРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ И ГЕТЕРОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ**

В работе рассмотрено возможности иммерсионного ультразвукового метода измерений скоростей распространения продольной и поперечной волн в образцах конструкционных и гетерогенных материалов. На основании экспериментальных значений плотности и акустических параметров определены модули Юнга, модули сдвига, модули объемной деформации и коэффициенты Пуассона различных типов конструкционных и гетерогенных материалов. Для полученных значений проведен сравнительный анализ с соответствующими величинами при измерениях механическими методами.

Ключевые слова: ультразвуковой метод, продольная и поперечная волны, скорость распространения, коэффициент Пуассона, модуль Юнга, модуль сдвига, объемный модуль деформации.

V. Mashchenko**DETERMINATION OF ELASTICITY MODULES OF CONSTRUCTIONAL AND HETEROGENEOUS MATERIALS BY ULTRASONIC METHOD**

The article considers the possibilities of the immersion ultrasonic method of measuring the velocities of propagation of longitudinal and transverse waves in samples of structural and heterogeneous materials. According to the experimental values of density and acoustic parameters, Young's modules, shears modules, volumetric deformation modules and Poisson's ratio of various types of structural and heterogeneous materials are defined. For the obtained values a comparative analysis with the corresponding values at measurements by mechanical methods was carried out.

Key words: ultrasonic method, longitudinal and transverse waves, propagation velocity, Poisson's ratio, Young's module, shear module, volumetric deformation module.

Постановка проблеми. У сучасному приладобудуванні і гірничій механіці, при оцінці стійкості об'єктів геотехнічних систем, важливим фактором є визначення механічних властивостей конструкційних та гетерогенних матеріалів. Найбільш інформативними параметрами, які дозволяють оцінити механічні характеристики конструкційного або гетерогенного матеріалу як твердого тіла за співвідношеннями теорії пружності, є швидкості поширення ультразвукових (УЗ) коливань різного типу, зокрема поздовжніх (l) та поперечних (t) [1]. Ультразвукові методи давно займають ведучі позиції в арсеналі експериментаторів, які займаються визначенням пружних властивостей (модуль Юнга, модуль зсуву, модуль об'ємної деформації) різного типу матеріалів. Суть УЗ-методу полягає в тому, що елементарний об'єм твердого тіла періодично певним чином деформується і при цьому змінюються пружні характеристики матеріалу та втрати енергії. Отримані таким чином результати співставляються із фізичним процесами, що проходять у зразку.

Якщо у матеріалі зовнішнє джерело ультразвуку збуджує коливання, то вони не залишаються обмеженими біля центра виникнення, а створюють у середовищі пружні напруження, що у свою чергу, надають руху сусіднім структурним одиницям. Через малу амплітуду коливань при таких рухах компоненти тензора напруг і деформацій не виходять за межі закону Гука.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Для вимірювання швидкостей поширення ультразвукових коливань в зразках матеріалів використовується іммерсійний метод [2–4], що дозволяє визначити значення поздовжньої (v_l) та поперечної (v_t) УЗ-хвиль. В роботах [3–6] на основі експериментальних вимірювань v_l та v_t визначенні механічні характеристики окремих матеріалів.

Постановка завдань. Метою роботи було визначити практичний аспект застосування УЗ-методу при вимірюваннях швидкостей поширення поздовжньої та поперечної хвиль для визначення коефіцієнта Пуассона та модулів пружності ряду конструкційних та гетерогенних матеріалів.

Виклад основного матеріалу. Визначення швидкості поширення поздовжньої УЗ-хвилі базується на порівнянні результатів прямих вимірювань часів поширення зондуєчого імпульсу через імерсійну рідину при відсутності зразка (τ) та при наявності зразка (τ_l) між випромінювачем і приймачем сигналів. При відомій різниці між часовими інтервалами $\Delta\tau_l$ ($\Delta\tau_l = \tau - \tau_l$), значення v_l визначають із співвідношення:

$$v_l = \frac{v_p d}{d - \Delta\tau_l v_p}, \quad (1)$$

де v_p – швидкість поширення УЗ-хвилі у імерсійній рідині, d – товщина зразка матеріалу із строго паралельним поверхнями.

Вимірювання швидкості поперечної УЗ-хвилі базується на тому, що при падінні поздовжньої хвилі під деяким кутом (θ) на межу поділу рідина – тверде тіло в останньому в загальному випадку поширюються дві хвилі: поздовжня і поперечна. Метод обертової пластини дозволяє визначити критичний кут ($\theta_{кр.}$), при якому поздовжня хвиля трансформується у поверхневу, а у зразку поширюється тільки поперечна хвиля. Величину v_l в такому випадку розраховують за співвідношенням:

$$v_l = \frac{v_p}{\sqrt{\sin^2(\theta_{эд.}) + \left(\cos(\theta_{эд.}) - \frac{v_p \Delta\tau_l}{d}\right)^2}}, \quad (2)$$

де $\Delta\tau_l$ – різниця між часом проходження зондуєчого імпульсу при відсутності зразка та при наявності зразка (τ_l), розміщеного кутом $\theta_{кр.}$ до напрямку падіння.

Одним із основних параметрів матеріалу є коефіцієнт Пуассона (ν), який при відомих значеннях v_l та v_t визначається наступним чином [7]:

$$\nu = \frac{2 - \left(\frac{v_l}{v_t}\right)^2}{2 \left(1 - \left(\frac{v_l}{v_t}\right)^2\right)}. \quad (3)$$

Без врахування внутрішніх втрат енергії на проходження УЗ-хвиль через зразок матеріалу модуль Юнга (E), модуль зсуву (μ) та модуль об'ємної деформації (k) за співвідношеннями теорії пружності визначаються наступним чином [3, 7]:

$$E = \rho v_l^2 \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu}; \quad (4)$$

$$\mu = \rho v_t^2; \quad (5)$$

$$k = E - \frac{4}{3}\mu, \quad (6)$$

де ρ – густина матеріалу.

Коли поперечні розміри елементарного об'єму твердого тіла, в якому поширюється поздовжня УЗ-хвиля, малі у порівнянні із довжиною хвилі величину E визначають за співвідношенням [1]:

$$E = \rho v_l^2. \quad (7)$$

У випадку, коли не можна знехтувати затуханням поздовжньої та поперечної УЗ-хвиль у зразку досліджуваного матеріалу, визначають комплексні модулі пружності. Дійсні та уявні частини комплексних модулів розраховують за наступними співвідношеннями [8]:

$$E' = \rho v_l^2 \frac{1 - \frac{\alpha_l^2 v_l^2}{\omega^2}}{\left(1 + \frac{\alpha_l^2 v_l^2}{\omega^2}\right)^2}; \quad (8)$$

$$E'' = \rho v_l^2 \frac{2\alpha_l v_l}{\left(1 + \frac{\alpha_l^2 v_l^2}{\omega^2}\right)^2}; \quad (9)$$

$$\mu' = \rho v_t^2 \frac{1 - \frac{\alpha_t^2 v_t^2}{\omega^2}}{\left(1 + \frac{\alpha_t^2 v_t^2}{\omega^2}\right)^2}; \quad (10)$$

$$\mu'' = \rho v_t^2 \frac{2\alpha_t v_t}{\left(1 + \frac{\alpha_t^2 v_t^2}{\omega^2}\right)^2}; \quad (11)$$

$$k' = E' - \frac{4}{3}\mu'; \quad (12)$$

$$k'' = E'' - \frac{4}{3}\mu'', \quad (13)$$

де α_l і α_t – коефіцієнти поглинання поздовжньої і поперечної хвиль, ω – циклічна частота ультразвукової хвилі.

Для відомих значення дійсних і уявних частин модулів пружності доцільно визначати статичні модулі E , μ та k за наступними співвідношеннями [9]:

$$E = (E'^2 + E''^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (14)$$

$$\mu = (\mu'^2 + \mu''^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (15)$$

$$k = (k'^2 + k''^2)^{\frac{1}{2}}. \quad (16)$$

Результати та обговорення. Вимірювання швидкостей поширення поздовжніх та поперечних хвиль та коефіцієнтів їх поглинання проведено на експериментальній установці [2] при частоті ультразвуку $\omega = 1884$ кГц для ряду гірських порід: аргіліту, алевроліту, пісковиків Прикарпаття, Криму та поліської серії, які з точки зору структурної організації є гетерогенними матеріалами, і основних конструкційних полімерних матеріалів: поліетилену високого тиску (ПЕВТ), поліетилену низького тиску (ПЕНТ), полівінілхлориду (ПВХ), полівінбутиралу (ПВБ), поліметилметакрилату (ПММА), полікарбонат (ПК), полістирол (ПС). Густина зразків вимірювали методом гідростатичного зважування. Експериментальні значення v_l і v_t для деяких металів та сплавів взяті із робіт [3, 9–12].

Для металів і сплавів розрахунки величин E , μ і k проводили за співвідношеннями (4)–(6). Для гетерогенних матеріалів і конструкційних полімерних матеріалів розрахунки модулів пружності проводили за співвідношеннями (7)–(16). Значення ρ , величин v_l , v_t та модулів пружності представлено в табл. 1.

Проведемо порівняння значень модулів Юнга і зсуву матеріалів розрахованих на основі структурно-акустичних параметрів та виміряних механічними методами [13, 14] (табл. 2). Для металів, сплавів та гірських порід спостерігається хороша кореляція результатів при різних методах вимірювання.

Порівняльний аналіз величин E для основних полімерних матеріалів показав, що за результатами вимірювань УЗ-методом отримуємо значення модуля Юнга в 6–7 разів більше для ПЕ, в 2,9 рази – для ПММА, в 2,3 рази – для ПВХ та ПК і в 1,8 рази – для ПС у порівнянні із значеннями отриманими при механічних вимірюваннях.

Для модуля зсуву маємо 6-ти кратне збільшення величин μ для ПЕНТ і 9-ти кратне – для ПЕВТ при вимірюваннях УЗ-методом у порівнянні із механічним методом.

Такі результати можна пояснити різною будовою металів, гірських порід і аморфних полімерів та фізичними процесами поширення УЗ-коливань у структурній організації останніх.

Таблиця. 1

Густина, швидкості поширення поздовжніх і поперечних хвиль і модулі пружності конструкційних і гетерогенних матеріалів

Матеріал	ρ , кг/м ³	v_l , м/с	v_t , м/с	ν	$E \cdot 10^{-9}$, Н/м ²	$\mu \cdot 10^{-9}$, Н/м ²	$k \cdot 10^{-9}$, Н/м ²	
Метали і сплави								
Алюміній 6061	2700	6207 [3] 6375 [10]	2916 [3] 3150 [10]	0,36 0,34	62,5 71,2	23,0 26,8	31,9 36,0	
Латунь 360	8490	4500 [3] 4430 [9]	2227 [3]	0,34	112,7	42,1	56,6	
Латунь (жовта)	8470	4160 [3]	1878 [3]	0,37	82,0	29,9	42,1	
Мідь	8920	4752 [3] 4660 [9]	2271 [3] 2337 [9]	0,35 0,33	124,4 129,8	46,0 48,7	63,1 64,8	
Сталь 304	7999	5728 [3] 5920 [11]	3057 [3] 3141 [11]	0,30 0,30	194,4 205,8	74,8 78,9	94,7 100,6	
Сталь 316	8000	5823 [3] 5720 [11]	3023 [3] 3272 [11]	0,32 0,26	192,4 215,3	73,1 85,7	94,9 101,1	
Сталь 1018	7800	5841 [3] 5890 [9]	3104 [3]	0,30	195,9	75,2	95,7	
Титан	4506	6102 [3] 6100 [9]	3085 [3]	0,33	113,9	42,9	56,7	
Гетерогенні матеріали								
Скло (Borofloat)	2220	5506 [3]	3395 [3]	0,19	61,1	25,6	26,9	
Плавлений кварц	2203	5750	3510	0,20	65,3	27,1	39,1	
		5983 [3]	3573 [3]	0,22	68,8	28,12	31,3	
		5570 [12]	3515 [12]	0,17	63,6	27,2	27,3	
Скло (Pyroceram)	2550	6548 [3]	3601 [3]	0,28	84,8	33,1	40,7	
Аргіліт	2950	3540	2030	0,26	36,2	12,1	20,2	
Алевроліт	2440	3125	1960	0,18	23,1	9,3	11,0	
Пісковик	2150 2200 2320 2460	3180	2090	0,12	21,7	9,4	9,2	
		3280	2060	0,17	23,7	9,3	11,2	
		3390	1995	0,24	26,7	9,2	14,4	
		3430	1780	0,32	28,9	7,8	18,6	
Конструкційні полімерні матеріали								
ПЕВТ	950	2410	1050	0,38	5,5	1,0	4,1	
		2561 [3] 2460 [9]	1113 [3]	0,38	6,2	1,2	4,7	
ПЕНТ	915	2165	945	0,38	4,3	0,8	3,2	
		2182 [3] 2080 [9]	820 [3]	0,42	4,4	0,6	3,5	
ПВХ	1397	2310	1095	0,36	7,4	1,7	5,2	
ПВБ	1146	2390	1060	0,38	6,5	1,3	4,8	
ПММА	1190 1180	2710	1375	0,33	8,7	2,3	5,7	
		2724 [3] 2730 [9]	1377 [3]	0,33	8,8	2,2	5,8	
			1430 [11]					
		2670 [12]	1121 [12]	0,39	8,4	1,5	6,4	
ПК	1210	2235	935	0,39	6,0	1,1	4,6	
		2250 [3] 2268 [10]	948 [3]	0,39	6,1	1,1	4,7	
ПС	1040	2340	1135	0,35	5,7	1,4	3,9	
		2346 [3] 2340 [9]	1157 [3]	0,34	5,7	1,4	3,9	
			1143 [10]					
		2350 [12]	1120 [12]	0,35	5,7	1,3	4,0	

Таблиця 2.

Модуль пружності ряду матеріалів визначені різними методами

Матеріал	$E \cdot 10^{-9}$, Н/м ²		$\mu \cdot 10^{-9}$, Н/м ²	
	УЗ-метод	Механічний метод	УЗ-метод	Механічний метод
Алюміній	62,5–71,2	70	23–26,8	24–28
Мідь	124	117	46	45
Сталь	192–215	180–200	73–86	75–79
Скло	61–85	50–90	26–33	26,2
Аргіліт	36,2	45	12,1	–
Алевроліт	23,1	20	9,3	–
Пісковик	21–29	20–40	7,4–9,3	–
ПЕВТ	5,5–6,2	0,8	1,0–1,2	0,12
ПЕНТ	4,3–4,4	0,7	0,6–0,8	0,12
ПВХ	7,4	2,4–4,1	1,7	–
ПММА	8,4–8,8	2,4–3,4	1,5–2,3	–
ПК	6,0–6,1	2,6	1,1	–
ПС	5,7	3–3,5	1,3–1,4	–

Висновки. Проведені експериментальні дослідження та порівняльний аналіз показали, що імерсійний ультразвуковий метод вимірювання швидкостей поширення поздовжньої та поперечної УЗ-хвиль у зразках ряду конструкційних та гетерогенних матеріалів має перспективи технологічного застосування для визначення коефіцієнта Пуассона, модуля Юнга, модуля зсуву та модуля об'ємної деформації.

Практичне впровадження ультразвукового методу може бути використане у промисловості та державних органах метрологічного контролю для створення бази даних конструкційних матеріалів. Дослідження механічних властивостей зразків масиву гірських порід, в межах гірничих виробок геотехнічних систем, дозволить прогнозувати негативні явища техногенного характеру з метою їх запобігання.

Список використаних джерел:

1. Физическая акустика / Под. ред. У. Мезон. Т. I. – М.: Мир, 1966. – 592 с.
2. Машенко В. А. Експериментальна установка для вимірювання пружних параметрів гірських порід / В. А. Машенко, О. О. Панчук, І. О. Садовенко, М. А. Бордюк // Вісник інженерної академії України. – 2012. – Вип. 3–4. – С. 60–64.
3. Ginzl E. Determining Approximate Acoustic Properties of Materials / E. Ginzl, B. Turnbull // e-Journal of Nondestructive Testing. – 2016. – N. 12. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.ndt.net/article/ndtnet/2016/17_Ginzl.pdf.
4. Franko E. E. Measurement of Elastic Properties of Materials by the Ultrasonic Through-Transmission Technique / E. E. Franko, J. M. Meza, F. Buiocchi // Dyna . – 2011. – N. 168. – P. 59–64.
5. A study of PC-based ultrasonic goniometer system of surface properties and characterization of materials / S. Sani, M. H. Md. Saad, N. Jamaludin, M. P Ismail and other // Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018 – 298. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/298/1/.../pdf>.
6. Characterization of material damage by ultrasonic immersion test / A. Castellano, P. Foti, A. Fraddosio, U. Galietti and other // Procedia Engineering. – 2015. –N. 109. – P. 395–402.
7. Ландау Л. Д. Теория упругости / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука, 1985. – 245 с.
8. Колупаев Б. С. Релаксационные и термические свойства наполненных полимерных систем. – Львов: Вища школа, 1980. – 204 с.
9. V. V. Klepko, Contribution of Surface Rayleigh Waves to the Heat Capacity of Poly(vinyl chloride) / V. V. Klepko, B. B. Kolupaev, E. V. Lebedev, V. A. Mashchenko // Polymer Science. – Ser. A. – 2009. – V. 51. – N 9. – P. 986–990.
9. ONDT [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/thickness-gage/appendices-velocities/>
10. Advanced UT [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.advanced-ndt.co.uk/index.htm_files/Reference%20Chart%20-%20Velocity%20Chart.pdf
11. GE Sensing [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.instrumart.com/assets/ge-sound-speeds-and-pipe-size-data.pdf>
12. Таблицы физических величин. Справочник / Под. ред. акад. И. К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
13. The Engineering Toolbox [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus_417.html.
14. Баклашов И. В. Механика подземных сооружений и конструкций крепей / И. В. Баклашов, Б. А. Картозия. – М.: Недра, 1984. – 415 с.

Стаття надійшла до редакції 20.03.2019

УДК 629.113

Н.И. Мисюра¹, Е.М. Шпинда¹, В.А. Цыбульский¹*Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет***ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО ВАРИАНТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОРМОЗНЫХ СИЛ
МЕЖДУ ОСЯМИ ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ LANOS SENS**

Предлагаемый способ регулирования тормозных сил между осями легкового автомобиля, тормозная система которого оборудована регуляторами давления, обеспечивает повышение энергонагруженности тормозных механизмов задней оси при всех эксплуатационных условиях служебных и экстренных торможений, а также курсовую устойчивость. На основании предложенного способа рационального распределения тормозных сил между осями легковых автомобилей Lanos Sens, не оборудованных ABS, достигнута практически одинаковая энергонагруженность передних и задних тормозов при экстренных торможениях.

Ключевые слова: легковой автомобиль, торможение, эксплуатационные условия, энергонагруженность.

М.І. Мисюра¹, Є.М.Шпінда¹, В.А. Цибульський¹*Харківський національний автомобільно-дорожній університет***ВИБІР РАЦІОНАЛЬНОГО ВАРІАНТУ РОЗПОДІЛУ ГАЛЬМІВНИХ СИЛ МІЖ ОСЯМИ
ЛЕГКОВОГО АВТОМОБІЛЯ LANOS SENS**

Пропонований спосіб регулювання гальмівних сил між осями легкового автомобіля, гальмівна система якого обладнана регуляторами тиску, забезпечує підвищення енергонавантаження гальмівних механізмів задньої осі при всіх експлуатаційних умовах службових і екстрених гальмувань, а також курсову стійкість. На підставі запропонованого способу раціонального розподілу гальмівних сил між осями легкових автомобілів Lanos Sens, не обладнаних ABS, досягнуто практично однакове енергонавантаження передніх і задніх гальм при екстрених гальмуваннях.

Ключові слова: легковий автомобіль, гальмування, експлуатаційні умови, енергонавантаження.

M.I. Mysjura¹, E.M. Spinda¹, V.A. Tsybulsky*Harkiv National Automobile and Highway University***RATIONAL ARBITRIUM GENERA DIVISAE COPIAE BRAKING INTER SUBTER
BASI UNA CARS LANOS SENS**

The appearance of brake systems that use disc brakes on the front wheels and drum brakes on the rear ones led to a dramatic increase in the load characteristics of the front brakes, which leads to increased wear of the linings and the brake rotor. This difference in efficiency is due not only to the characteristic well-known and structurally defined parameters, but also to the functional features of the work of different types of braking mechanisms, united in a common braking system and controlled without these features.

The proposed method of regulating the braking forces between the axles of a passenger car, the brake system of which is equipped with pressure regulators, provides an increase in the energy load of the brake mechanisms of the rear axle of the Lanos Sens, not equipped with ABS, under all operating conditions of service and emergency braking, as well as directional stability.

Keywords: passenger car, braking, operating conditions, energy load.

Постановка проблеми. Вопросам исследования энергонагруженности тормозных механизмов в период эксплуатации легковых автомобилей посвящено значительное количество научных работ [1-8].

Появление тормозных систем, использующих дисковые тормоза на передних колесах, а барабанные – на задних, привело к резкому увеличению нагрузочных характеристик передних (дисковых) тормозных механизмов, которые, обладая меньшей массой и большей эффективностью, поглощают кинетической энергии и больше, чем барабанные, что приводит к повышенному износу их поверхностей трения. Это различие обусловлено не только характерными известными и конструктивно заданными параметрами, но и функциональными особенностями работы разнотипных тормозных механизмов, объединенных в общую тормозную систему и управляемыми без учета этих особенностей [8–11].

Поиск альтернативных решений, направленных на улучшение качества управления разнотипными тормозами и повышение эффективности барабанных тормозных механизмов, привел к внедрению в гидравлические контуры передних дисковых тормозных механизмов клапанов [12–14], обеспечивающих одновременное начало срабатывания передних и задних тормозов. Это вызвало снижение быстродействия тормозной системы и не привело к желаемому результату.

Кроме того, все известные конструкции таких клапанов задержки обладают существенной нестабильностью характеристик. Современные тормозные системы с отдельным приводом и

разнотипними тормозними механізмами, с различной длиной тормозных магистралей и гибких шлангов, использующие сложные конструкции главных тормозных цилиндров, представляют собой динамические системы, свойства которых в значительной мере оказывают влияние на качество управления процессом торможения[13].

Проблема решалась в соответствии с планом научно-исследовательских работ по направлению «Исследование эффективности функционирования тормозных механизмов эксплуатируемых легковых автомобилей».

Анализ последних исследований и публикаций. В литературных источниках [2–14] указывается, что широкое распространение тормозных систем с дисковыми передними и барабанными задними тормозными механизмами, многовариантность схем разделения контуров тормозного привода и способов его конструктивного осуществления, выдвигают ряд научных и технических задач, решение которых позволит определить возможные направления совершенствования существующих тормозных систем.

Существующие в нашей стране и за рубежом методики проектирования тормозов способствуют получению более нагруженных передних и менее нагруженных задних тормозов. Это приводит к перегреву и потере эффективности передних тормозных механизмов при циклических торможениях и, особенно, торможениях на горных склонах[15–18].

Попытка усилить задние тормозные механизмы по известным методикам не дает значительного повышения по энергоемкости тормозных механизмов, а также приводит к потере курсовой устойчивости и невыполнению требований стандартов[9,10].

С анализа научных работ [2, 7, 8] известен факт о том, что необходимость обеспечения максимальной эффективности торможения при сохранении требуемой курсовой устойчивости и приводит к тому, что передние тормоза поглощают до 70 % всей кинетической энергии автомобиля, рассеиваемой при торможении. Такое распределение поглощаемой энергии сохраняется и при служебных торможениях, составляющих большинство от общего числа торможений, но происходящих при меньшем динамическом перераспределении нагрузок и с меньшей эффективностью[13].

Широкий диапазон исследований режимов работы тормозных систем легковых автомобилей позволяет с достаточной точностью оценить их энергонагруженность при наиболее характерных условиях движения. Наибольшее количество торможений в горных условиях осуществляется при давлении в приводе около 1,0 МПа, а в городах и на загородных дорогах — около 1,5 МПа[3, 13].

Цель и постановка задачи. Целью работы является совершенствование тормозного привода легковых автомобилей путем распределения тормозных сил между осями по условию равной энергонагруженности передних и задних тормозов, как при служебных, так и при экстренных торможениях.

Математическая модель и алгоритм решения задачи. Сопоставляя результаты исследований энергонагруженности тормозных механизмов легковых автомобилей[7, 8], совершающих торможения в равнинном и горном районах в различные периоды года нетрудно видеть, что максимальная нагруженность дисковых передних тормозов соответствует режиму циклических служебных торможений, когда давление в приводе не превышает 1,5 МПа.

Наиболее часто используемым режимом работы тормозных систем является режим служебных торможений.

Известно, что энергонагруженность тормозных механизмов определяется долями рассеиваемой ими кинетической энергии автомобиля и зависит от величины действительных тормозных моментов, развиваемых тормозами в процессе торможения, которые определяются величиной давления в приводе, и предельных тормозных моментов, зависящих от величины нормальных нагрузок [4–6, 15–17].

В реальных условиях эксплуатации легковых автомобилей изменение предельных тормозных моментов, развиваемых передними и задними тормозами, в зависимости от эксплуатационных условий может быть представлено с помощью идеальных распределений тормозных сил (рис. 1), аналитическое описание которых приведено в табл.1.

Представленные в графическом виде кривые 1 и 2 распределений тормозных сил (давления в тормозном приводе) ограничивают область наиболее вероятных его значений, при которых происходит рассеивание кинетической энергии автомобиля передними и задними тормозами. Такие диапазоны соответствуют интервалам тормозных сил на отрезках АВ и ВД – при снаряженной массе, на отрезках АЕ и ЕС – при полной массе автомобиля (см. рис. 1).

Известно, что для полного поглощения кинетической энергии автомобиля при торможении необходимо создавать действительные тормозные силы, равные предельным силам по сцеплению:
 – на передней оси

$$P_{T1} = G \cdot \varphi \cdot \beta, \tag{1}$$

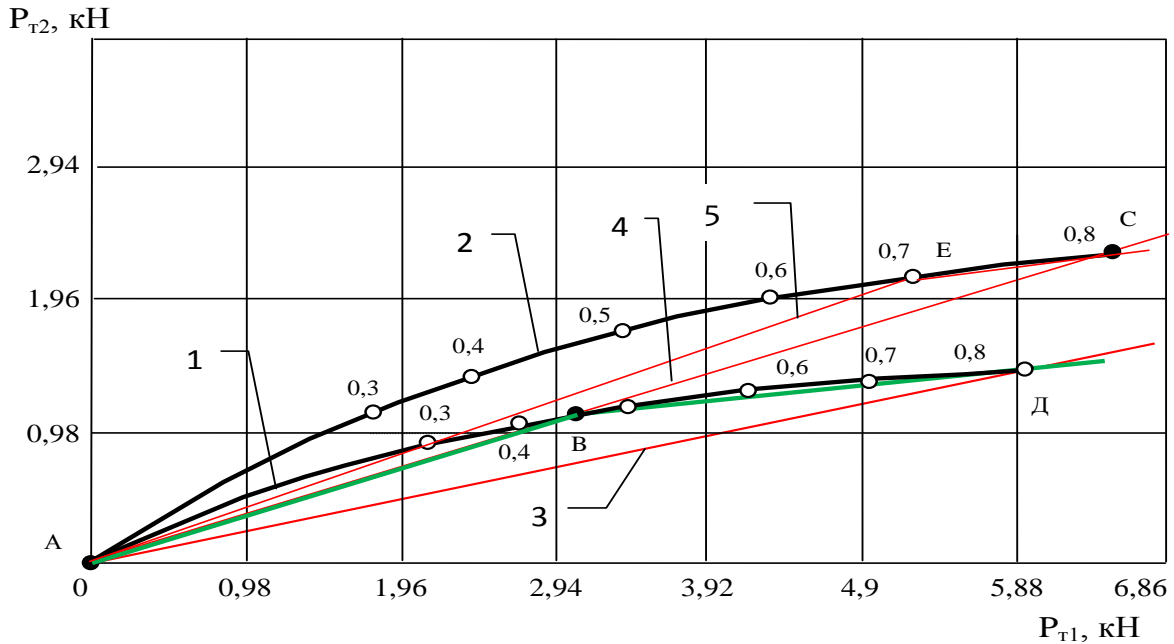
– на задней оси

$$P_{T2} = G \cdot \varphi \cdot (1 - \beta), \tag{2}$$

где G – вес автомобиля;

φ – коэффициент сцепления;

β – коэффициент распределения тормозной силы на переднюю ось.



1, 2 – кривые идеального распределения тормозных сил;
 3, 4, 5 – постоянное распределение при $\beta=0,76; \beta=0,73; \beta=0,66$ соответственно;
 АД, АС, АЕ – лучевые характеристики распределения тормозных сил;
 АВД – вариант распределения тормозных сил по предлагаемому способу для автомобилей с частичной загрузкой

Рис.1. Характеристики тормозной системы автомобиля LANOS SENS

Таблица 1

Обобщенные теоретические кривые распределения давления в тормозном приводе[13]

Условия торможения		Эмпирические зависимости
Равнинный район	лето	$f(p) = 6,36 \cdot 10^{-9} \cdot p^{11,1} \cdot e^{-0,9 \cdot p}$
	осень	$f(p) = 5,8 \cdot 10^{-6} \cdot p^{7,8} \cdot e^{-0,812 \cdot p}$
	зима	$f(p) = 1,29 \cdot 10^{-5} \cdot p^{8,64} \cdot e^{-1,02 \cdot p}$
	весна	$f(p) = 0,086 \cdot e^{-\frac{(p-13,76)^2}{42,68}}$
Горный район	лето	$f(p) = 0,002 \cdot p^{3,6} \cdot e^{-0,45 \cdot p}$

За счет снижения коэффициента распределения тормозных сил между осями автомобиля загружаем тормоза задней оси.

На рис. 1 кривые 1 и 2 соответствуют идеальному распределению тормозных сил между осями при снаряженной и полной массе автомобиля Lanos Sens.

Прямая 3 иллюстрирует существующее распределение тормозных сил $\beta=0,76$. В этом случае реализация предельных тормозных сил на передних и задних осях будет происходить в точках В и Д – при снаряженной и в точках Е и С – при полной массе.

При $\beta=0,73$ прямая 4 пересекается с кривой 2 в точке С, где происходит полная реализация тормозной силы на передних и задних колесах автомобиля с частичной загрузкой. Это значит, что при использовании предлагаемого распределения тормозных сил в реальных дорожных и нагрузочных условиях будет обеспечиваться опережающее блокирование передних колес, а снижение коэффициента распределения тормозной силы на переднюю ось приведет в начальный момент торможения к увеличению энергонагруженности тормозных механизмов задней оси (точка С), чем в точке Д – при существующем распределении.

При $\beta=0,66$ прямая 5 пересекается с кривой 2 в точке Е, где происходит полная реализация тормозной силы на передних и задних колесах автомобиля с полной загрузкой. Это значит, что при использовании предлагаемого распределения тормозных сил в реальных дорожных и нагрузочных условиях снижение коэффициента распределения тормозной силы на переднюю ось приведет в начальный момент торможения к еще большему увеличению энергонагруженности тормозных механизмов задней оси (точка Е), чем в точке Д – при существующем распределении.

Однако в процессе экстренного торможения происходит увеличение нормальной нагрузки на колесах передней оси, в силу ее динамического догружения, и снижение нормальной нагрузки на задних колесах, что требует определенного влияния на распределение действительной тормозной силы между осями автомобиля.

Известно, что для создания условий доведения до грани одновременного блокирования всех колес [1, 3, 4, 7], соответствующих максимальному использованию удельной тормозной силы автомобиля при торможении, следует изменять коэффициент идеального распределения тормозных сил между осями по следующему закону

$$\beta = \frac{b}{L} + \varphi_0 \cdot \frac{h}{L}. \quad (3)$$

Теоретические значения β , полученные по зависимости (3) для рассматриваемых эксплуатируемых легковых автомобилей, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Теоретические значения коэффициента идеального распределения тормозных сил

Автомобиль	Lanos Sens	Lada Priora	Chevrolet Aveo	Forza
со снаряженной массой	0,741	0,714	0,752	0,747
с полной массой	0,608	0,625	0,613	0,632

Проанализируем теоретическую зависимость между коэффициентом распределения приводной тормозной силы между передними и задними колесами от коэффициента торможения, изменяемого в пределах 0,2–0,8 для рассматриваемых легковых автомобилей, соотношения координат центра тяжести к продольной базе которых находятся в пределах:

- отношение расстояния до задней оси к базе 0,5–0,7;
- отношение высоты к базе 0,15–0,3.

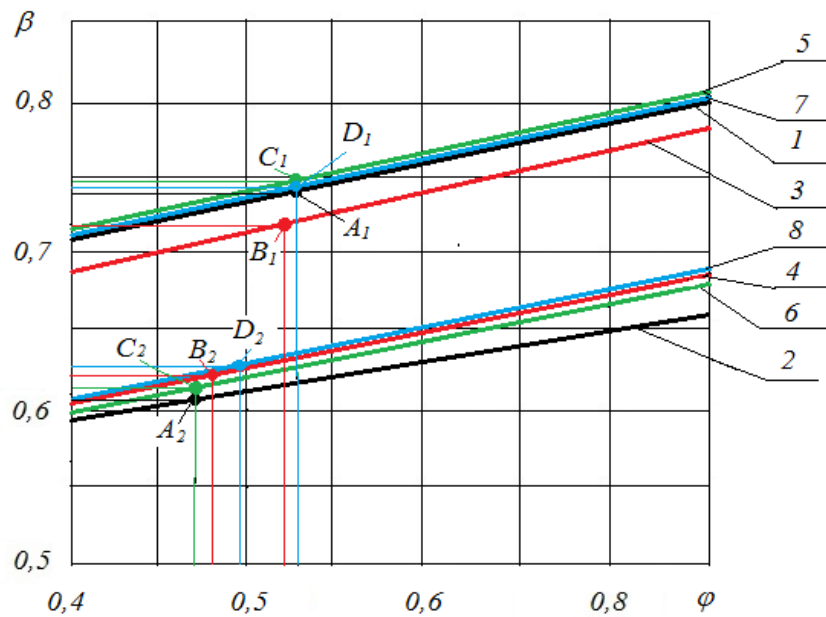
Графические зависимости показаны на рис. 2, где указаны характерные точки при соответствующих значениях коэффициента распределения тормозных сил для легковых автомобилей Lanos, Lada Priora, Chevrolet Aveo, Forza (см. табл. 2):

- а) со снаряженной массой – точки A_1, B_1, C_1, D_1 ;
- б) с полной массой – точки A_2, B_2, C_2, D_2 .

Известно [1, 3, 7], что при полном использовании удельной тормозной силы легкового автомобиля, тормозные силы на осях, и им соответствующие вертикальные реакции при условии, что на всех колесах одноимённых осей коэффициенты сцепления равны, соотносятся как

$$\frac{P_{T1}}{P_{T2}} = \frac{b + \varphi_1 \cdot h}{a - \varphi_2 \cdot h}, \quad (4)$$

где φ_1 и φ_2 – коэффициенты сцепления между опорной поверхностью и колесами передней и задней осей соответственно.



- 1 – легковий автомобіль Lanos со снаряженою масою: $b=0,62L$, $h=0,22L$
 2 – легковий автомобіль Lanos с повною масою: $b=0,53L$, $h=0,16L$
 3 – легковий автомобіль Ladaco снаряженою масою: $b=0,59L$, $h=0,23L$
 4 – легковий автомобіль Lada с повною масою: $b=0,54L$, $h=0,17L$
 5 – легковий автомобіль Chevrolet со снаряженою масою: $b=0,62L$, $h=0,24L$
 6 – легковий автомобіль Chevrolet с повною масою: $b=0,53L$, $h=0,17L$
 7 – легковий автомобіль Forza со снаряженою масою: $b=0,62L$, $h=0,23L$
 8 – легковий автомобіль Forza с повною масою: $b=0,52L$, $h=0,16L$

Рис. 2. Изменение коэффициента распределения тормозных сил

Если коэффициенты сцепления на всех колесах обеих осей принять равными, то в таком случае оптимальное соотношение между осевыми тормозными силами, как известно, равно соотношению суммарных нормальных реакций на колесах передней и задней осей автомобиля.

Это объясняется тем, что, во-первых, коэффициент сцепления достигает своего максимума при определенной величине скольжения, соответствующей переходу продольных сил, развиваемых на колесах каждой из осей, максимально возможным по сцеплению. Когда такая величина скольжения наблюдается у всех колес, то тормозная сила на каждом из них будет максимально возможной. В результате этого будет реализовываться максимально возможный тормозной момент, что приведет к повышению энергонагруженности тормозов.

Если у колес какой-либо оси оптимальная величина скольжения будет достигнута раньше, нежели у других, то у последних тормозные силы не достигнут своего максимального значения. Дальнейшее нажатие на тормозную педаль с целью увеличения тормозных сил на колесах, которые еще не достигли оптимальной величины скольжения, приведут к увеличению скольжения колес, которые первыми достигли предела блокирования.

Кроме того, качение такого колеса со скольжением, больше оптимального, является не устойчивым. Даже при неизменном значении тормозного момента на колесе, если скорость скольжения увеличивается, то колесо блокируется. При этом коэффициент сцепления снижается, предельная тормозная сила уменьшается, энергонагруженность тормозов снижается.

Во-вторых, на процесс торможения особое влияние оказывает способность тормозящих колес противостоять боковым силам без скольжения[1]. К ним относятся поперечная составляющая силы веса автомобиля, которая возникает из-за поперечного наклона дороги, действия бокового ветра (составляющей аэродинамической силы), разности тормозных сил колес левого и правого борта автомобиля (межбортовая неравномерность), действия центробежной силы инерции при движении по дороге с фиксированным радиусом кривизны[15, 16].

Способность затормаживаемого колеса противостоять боковым силам тем больше, чем меньше величина скольжения, возникающая в результате действия тормозного момента[1]. При полном скольжении колеса не воспринимают боковую силу. Поэтому, когда колеса какой-либо оси достигают такой величины скольжения, при которой боковые силы вызывают поперечное

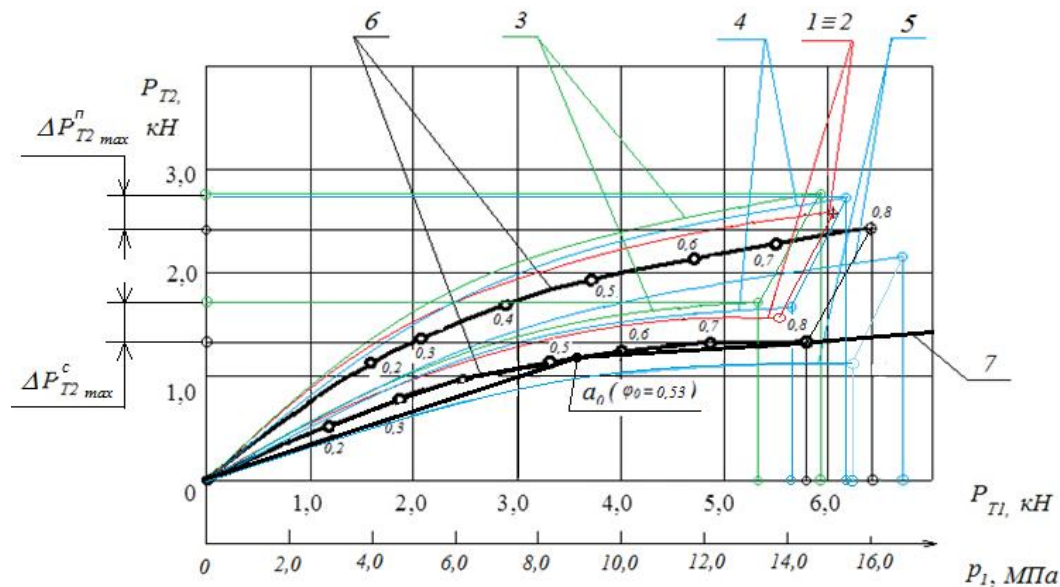
скольжение оси, водитель, чтобы избежать потери курсовой устойчивости автомобиля, должен уменьшить усилие на тормозной педали, даже если тормозные силы на других колесах не достигли максимального значения по сцеплению.

Все аргументы, входящие в правую часть уравнения (4), являются переменными, так как координаты центра тяжести легкового автомобиля изменяются с изменением весового состояния автомобиля, а коэффициент сцепления различный для разного дорожного покрытия [1,3].

Следовательно, рациональное соотношение тормозных сил на колесах различных осей эксплуатируемых легковых автомобилей должно быть переменным, что возможно при лучевой характеристике их распределения.

Известно [1–8], что фактическое распределение тормозных моментов (сил) между осями легкового автомобиля, обеспечиваемых тормозными механизмами, постоянное и зависит от конструктивных и весовых особенностей конкретного автомобиля, а также [17] влияния аэродинамического фактора.

Анализ эффективности применения предлагаемого распределения тормозных сил между осями рассмотрим на примере исследуемых легковых автомобилей Lanos Sens (рис. 3), оборудованных регуляторами тормозных сил, обеспечивающими лучевые характеристики с компенсационными прямыми (см. рис. 1), с учетом аэродинамического фактора.



- 1 - идеальное для ровной горизонтальной дороги;
- 2 - идеальное для дороги с поперечным уклоном;
- 3 - идеальное для дороги с подъемом;
- 4 - идеальное для дороги с фиксированным радиусом кривизны;
- 5 - идеальное для дороги со спуском;
- 6 - идеальное распределение тормозных сил при снаряженной и полной массе автомобиля;
- 7 - при распределении тормозных сил $\beta=0,73$.

Рис. 3. Теоретическое распределение тормозных сил между осями легкового автомобиля Lanos Sens с учетом аэродинамики

При этом изменение теоретических характеристик распределения тормозных сил между осями легковых автомобилей Lanos Sens, включает действие аэродинамических факторов, которые учитываются при движении (см. рис. 3): 1 – по ровной горизонтальной дороге [16,18]; 2 – по ровной дороге с поперечным уклоном; 3 – по дороге с подъемом; 4 – по дороге с фиксированным радиусом кривизны; 5 – по дороге со спуском.

Анализ предлагаемых теоретических характеристик распределений тормозных сил между осями легковых автомобилей Lanos Sens (см. рис. 3) позволяет сделать выводы о том, что при снижении коэффициента распределения тормозных сил с $\beta=0,76$ до $\beta=0,66$ увеличивается реализация тормозной силы на колесах задней оси в зависимости от степени загрузки автомобиля на $\Delta P_{T2\max}^c = 17,6\%$ – при снаряженной массе и $\Delta P_{T2\max}^n = 11,1\%$ – при полной, что приводит к увеличению энергонагруженности тормозных механизмов задней оси.

Выводы. Реализация варианта распределения тормозных сил между осями легковых автомобилей, которое обеспечивает лучевую характеристику совместно с компенсационной прямой, приводит к снижению коэффициента распределения тормозных сил между осями легковых автомобилей Lanos Sens на 13%, что с учетом аэродинамики торможения позволяет повысить энергонагруженность тормозов задней оси на 11,1–17,6% при сохранении устойчивости.

Список использованных источников:

1. Исследование потенциальных возможностей автомобиля при действии боковой силы в процессе торможения / А.С. Федосов, М.А. Подригало // Автомобильный транспорт. – Киев: Техника, 1980. – Вып.17. – С. 73-78.
2. Русановский А.Е. Влияние эксплуатационных факторов на тормозную динамику автомобиля, оборудованного регуляторами тормозных сил [Текст]: автореф. дис. на соискание наук, степени канд. техн. наук: спец. 05.22.20 «Эксплуатация и ремонт средств транспорта»/ А.Е. Русановский. – Волгоград, 1982. – 18 с.
3. Стабильность эксплуатационных свойств колесных машин / [Подригало М.А., Волков В.П., Карпенко В.А. и др.]; под ред. М.А. Подригало. – Харьков: ХНАДУ, 2003. – 614с.
4. Подригало М.А. Анализ неравномерности вертикальных реакций на колесах и ее влияние на эксплуатационные свойства автомобиля [Текст] / Подригало М.А. // Автомобильный транспорт: проблемы и перспективы: IV-аямеждународ. научно-техн. конф., 11-15 апр. 2000 г. – Севастополь: СевГТУ, 2000. – С. 76-79.
5. Карпенко В.А. Влияние межколесного дифференциала на динамические характеристики автомобиля при неравномерном распределении вертикальной нагрузки между колесами / В.А. Карпенко // Механіка та машинобудування. – 2000. – №1. – С. 67-71.
6. Влияние тяговых моментов на динамическое распределение вертикальных реакций между колесами автомобиля / [Подригало М.А., Клец Д.М., Назарько О.А., Потапов Н.Н.] // Вестник НТУ «ХПИ». – 2010. – Вып.39. – С. 64-74.
7. Булгаков Н.А. Исследование динамики торможения автомобиля. Научное сообщение №18/ Булгаков Н.А., Гредескул А.Б., Ломака С.И. – Харьков: Изд-во госуниверситета им. А.М. Горького, 1962. – 36 с.
8. Расчет конструкций, испытания и эксплуатация автобусов и троллейбусов, их агрегатов и узлов / Труды ВКЭИ автобуспрома. – Львов: Высшая школа, 1975. – С. 95-110.
9. Колісні транспортні засоби. Вимоги щодо безпечності технічного стану та методи контролювання (БЗ №11-12-2010/436): ДСТУ 3649: 2010. – Офіц. вид. – [Чинний від 28.11.2010]. – К.: Держспоживстандарт України, 2011. – 26 с. – (Національний стандарт України).
10. Автотранспортні засоби. Гальмівні властивості. Терміни та визначення: ДСТУ 2886-94. – Офіц. вид. – [Чинний від 1996-01-01]. – К.: Держстандарт України, 1995. – 24 с. – (Державний стандарт України).
11. Говорущенко Н.Я. Основы теории эксплуатации автомобилей / Говорущенко Н.Я. – К.: Выща школа, 1971. – 232с.
12. Скутнев В.М. Исследование регулирования тормозных сил легковых автомобилей [Текст]: дис. ...канд.техн.наук: 05.05.03 / Скутнев Василий Михайлович. – Харьков, 1975. – 160 с.
13. Волков В.П. Оценка стабильности распределения тормозных сил между осями колесной машины / Волков В.П. // Автомобильный транспорт. – Харьков: РИО ХНАДУ, 2001. – №7. – С. 72–74.
14. Papashev, O.Kh. Regulators of brake forces of passenger automobiles / Papashev, O.Kh., Filipenko, S.V., Podrigalo, M.A., Volkov, V.P., Nazarov, A.I. // AvtomobilnayaPromyshlennost, - Moskau, 2004. - №12. – pp. 17-19
15. Назаров В.І. Математичне моделювання перерозподілу реакцій на осях під час екстреного гальмування на дорозі з нахилом / Назаров В.І., Назаров О.І., Назаров І.О. // Вісник НТУ «ХПІ»: Серія «Математичне моделювання в техніці та технологіях». – Харків, 2014. - №39(1082). – С. 134-140.
16. Покращення гальмівних властивостей легкових автомобілів із врахуванням експлуатаційних умов: матеріали наук.-практ. конференції [«Новітні технології розвитку автомобільного автотранспорту»], (ХНАДУ, 16-19 жовт. 2018 р.)/ [Клец Д.М., Назаров О.І., Шпінда Є.М., Лях М.С., Нижник М.О.]. – Харків: ХНАДУ, 2018. - С. 119-121.
17. Назаров І.О. Підвищення безпеки використання легкових автомобілів у експлуатаційних умовах: [міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки»] / [Назаров І.О., Назаров О.І., Клец Д.М., Цибульський В.А.]. – Луцьк: ЛНТУ, 2018. – Вип. 61. – С. 162-168.
18. Клец Д.М. Потенційна можливість реалізації прирощення вповільнення легковими автомобілями під час екстреного гальмування в різних експлуатаційних умовах: [міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки»] / Д.М. Клец, О.І. Назаров, Є.М. Шпінда. – Луцьк: ЛНТУ, 2018. – Вип. 64. – С. 81-86.

Рецензенты:

Волков В.П., докт. техн.. наук, профессор ХНАДУ

Бондаренко А.И., докт. техн.. наук, доцент, НТУ «ХПИ»

Стаття надійшла до редакції 11.03.2019

УДК 539.3

О.А. Мікуліч

Луцький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОВПЛИВУ ДЕФЕКТІВ У ПЛАСТИНЧАСТИХ ЕЛЕМЕНТАХ ЗА НЕСТАЦІОНАРНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

У роботі досліджено вплив відбиття хвиль від границь дефектів у пластинчастих елементах за дії змінного у часі навантаження на основі вивчення напруженого стану двозв'язних тіл, що послаблені системою кругових отворів однакового розміру. За використання перетворення Фур'є за часом та модифікованого методу граничних інтегральних рівнянь розв'язання нестационарної задачі зведено до системи сингулярних рівнянь, що розв'язувалися числово за використання методу механічних квадратур. Визначення кільцевих напружень на границі отворів та радіальних напружень у пластинчастих елементах проводилися на основі побудованих інтегральних залежностей. Аналіз числових розрахунків показав, що за дії імпульсного навантаження при зближенні отворів відбувається зростання кільцевих напружень на їх границі та зменшення радіальних напружень у внутрішніх точках пластинчастих елементів.

Ключові слова: пластинчасті елементи, нестационарне навантаження, плоска задача.

Е.А. Микулич

Луцкий национальный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ В ПЛАСТИНЧАТЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ОТ НЕСТАЦИОНАРНОЙ НАГРУЗКИ

В работе исследовано влияние отражения волн от границ дефектов в пластинчатых элементах от действия переменной во времени нагрузки на основе изучения напряженного состояния двухсвязных тел, которые ослаблены системой круговых отверстий одинакового размера. При использовании преобразования Фурье по времени и модифицированного метода граничных интегральных уравнений решения нестационарной задачи сведено к системе сингулярных уравнений, которые решались численно при использовании метода механических квадратур. Определение кольцевых напряжений на границе отверстий и радиальных напряжений в пластинчатых элементах проводились на основе построенных интегральных зависимостей. Анализ числовых расчетов показал, что от действия импульсной нагрузки при сближении отверстий происходит рост кольцевых напряжений на их границах и уменьшения радиальных напряжений во внутренних точках пластинчатых элементов.

Ключевые слова: пластинчатые элементы, нестационарная нагрузка, плоская задача.

O.A. Mikulich

Lutsk National Technical University

INVESTIGATION OF DEFECT INTERACTION IN PLATE ELEMENTS UNDER NON-STATIONARY LOAD

The effect of wave reflection from the defect boundaries in plate elements under the action of the time domain load was investigated. For the solution of this problem the stress state of bi-boundaries bodies, which are weakened by a system of circular holes of identical dimensions was investigated. Using the Fourier transform over time and the modified boundary integral equation method the solution of the non-stationary problem was reduced to the system of singular equations, which were solved numerically by using the method of mechanical quadratures. For the determination of hoop stresses at the boundary of holes and radial stresses in plate elements the integral dependencies was built. The analysis of numerical calculations had shown that under the action of impulse load in case of the decrease of the distance between of the hole's boundaries the hoop stresses increased. But the radial stresses decreased at the internal points of the plate elements.

Keywords: plate elements, non-stationary load, plane problem.

Постановка проблеми та аналіз публікацій. Для випадку усталених коливань у роботах О.М. Гузя, В.Д. Кубенка [1] на основі отриманого методом рядів аналітичного розв'язку задачі про дослідження напруженого стану пластинки з двома круговими отворами однакового радіусу, до границь яких прикладений гармонійний тиск, встановлено, що залежність радіальних напружень в точці, яка рівновіддалена від обох границь отворів та розміщена на ділянці, що має найменшу довжину, від частоти (довжини хвилі, хвильового числа) подібна до амплітудно-частотної характеристику поблизу резонансу одномасової коливальні системи з демпфуванням, де амплітуда зростає. Виявлене явище зростання радіальних напружень у [1] названо «місцевим резонансом» та встановлено для випадку, коли відстань між отворами у пластинці рівна радіусу отвору.

Проте, аналогічні ефекти зростання радіальних напружень у внутрішніх точках однозв'язних пластинок ні у випадку усталених коливань [1-3], ні за дії нестационарного навантаження [1, 4, 5] не спостерігаються.

Числові розрахунки показали, що за змінного у часі ударного навантаження у випадку, коли відстань між отворами у пластинці рівна радіусу отвору, також відбувається зростання динамічних радіальних напружень у 1,5 рази [6].

Явище «місцевого резонансу» характерне для пластинчастих елементів з кількома відбиваючими границями. Його виникнення пояснюється тим, що хвилі, які виникають у тілі за дії змінного у часі навантаження накладаються і тим спричиняють істотне зростання напружень у пластинці.

З інженерної точки зору, при розрахунку та проектуванні пластинчастих елементів конструкцій з декількома отворами необхідно враховувати, що при динамічних навантаженнях концентрація напружень не змінюється монотонно при зближенні отворів, як це відбувається за статичних навантажень, а визначається складнішою залежністю. Концентрація напружень може навіть зменшуватися при зближенні отворів.

Для випадку дії змінного у часі навантаження, що спричиняє виникнення осесиметричного тиску на границі отворів, аналітичний розв'язок не можна записати у замкненому вигляді. Проте ця задача має важливе інженерне значення.

Метою дослідження є вивчення взаємовпливу отворів через вивчення відбиття хвиль від їх границь за дії імпульсного навантаження на основі дослідження динамічного напруженого стану пластинчастих елементів конструкцій.

Постановка завдань. Розглянемо пластинчастий елемент, що послаблений системою кругових отворів радіусу R , відстань між якими становить δ . Віднесемо його до декартової системи координат $Ox_1x_2x_3$, яку розмістимо у центрі ваги тіла так, щоб вісь Ox_3 була перпендикулярною до площини елемента (рис. 1). Область, яку займає переріз у площині Ox_1x_2 (серединній площині) позначимо через Ω . Граничні контури у перерізі, перпендикулярному до осі Ox_3 , позначимо через L_1 та L_2 .

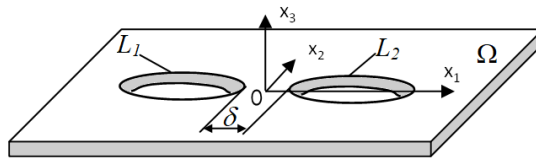


Рис. 1. Об'єкт дослідження

Дослідимо розподіл динамічних кільцевих напружень на границі отворів та радіальних напружень у внутрішніх точках пластинчастого елемента за дії пружного слабкого імпульсу, що прикладений до границі отворів у площині Ox_1x_2 та зумовлює виникнення осесиметричного тиску у випадку, коли $\delta \leq R$.

Для плоского напруженого стану граничні умови задачі записуються у вигляді:

$$\sigma_n|_{L_1, L_2} = -\sigma_0 \varphi(t), \quad \tau_{sn}|_{L_1, L_2} = 0 \quad (1)$$

де $\varphi(t)$ — функція зміни інтенсивності пружного імпульсу з часом t , σ_0 — стала, що залежить від інтенсивності навантаження. За числових розрахунків зміну інтенсивності імпульсу з часом представимо у вигляді слабкої ударної хвилі [7]:

$$\varphi(\tau) = p_* \tau^{n_*} e^{-\alpha_* \tau}, \quad \tau > 0, \quad n_* \geq 0, \quad (2)$$

де p_* , n_* , α_* — сталі, $\tau = t \cdot c_l / a$ — безрозмірний часовий параметр, a — деякий характерний розмір, $c_l = \sqrt{(\lambda + 2\mu) / \rho}$ — швидкість хвиль розширення, λ , μ — сталі Ляме, ρ — густина матеріалу.

Викладення основного матеріалу. Для розв'язання нестационарної задачі використаємо підхід, що базується на сумісному застосуванні перетворення Фур'є за часом та методу граничних інтегральних рівнянь [6].

Для двозв'язних областей зображення для переміщень за відсутності об'ємних сил можна записати у вигляді [5]:

$$\hat{u}_j = \int_L p_i \cdot U_{ji}^{*(cl)} dL, \quad (3)$$

де $\hat{\mathbf{u}} = (\hat{u}_1, \hat{u}_2)$ — зображення вектору переміщень, $U_{ji}^{*(cl)}$ — фундаментальні функції, що визначаються за формулами [4]:

$$U_{kj}^{*(cl)} = \frac{1}{2\pi\mu} \left(K_0(\kappa_\tau r) \delta_{kj} + \frac{\partial_k \partial_j}{\kappa_\tau^2} (K_0(\kappa_l r) - K_0(\kappa_\tau r)) \right),$$

де $\kappa_\tau = i\omega/c_\tau$, $\kappa_l = i\omega/c_l$ — хвильові числа, $c_\tau = \sqrt{\mu/\rho}$ — швидкість хвиль зсуву, $\mathbf{p} = \{p_i^{(1)}, p_i^{(2)}\}$ — невідомі потенціальні функції, $i, j = 1, 2$, $L = L_1 + L_2$.

Підставляючи потенціальне зображення для переміщень (3) у формули для розрахунку напружень [7], отримуємо інтегральні залежності:

$$\hat{\sigma}_n^{(k)} = \int_L f_j^{(cl)(k)}(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) p_j^{(k)} dL(\mathbf{x}^0); \quad \hat{\tau}_{sn}^{(k)} = \int_L g_j^{(cl)(k)}(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) p_j^{(k)} dL(\mathbf{x}^0); \quad (4)$$

де $f_j^{(cl)(k)}(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0)$, $g_j^{(cl)(k)}(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0)$ — відомі функції, вирази яких у операторному вигляді записуються:

$$f_j^{(cl)(k)} = \frac{1}{2\pi\mu} \left(\alpha_1^{(j)} K_0(\kappa_\tau r) + \alpha_2^{(j)} \frac{1}{\kappa_\tau^2} (K_0(\kappa_l r) - K_0(\kappa_\tau r)) \right);$$

$$g_j^{(cl)(k)} = \frac{i}{2\pi\mu} \left(\beta_1^{(j)} K_0(\kappa_\tau r) + \beta_2^{(j)} \frac{1}{\kappa_\tau^2} (K_0(\kappa_l r) - K_0(\kappa_\tau r)) \right).$$

Тут

$$\alpha_1^{(1)} = \frac{\lambda}{\mu} \partial_1 + (1 + e^{2i\alpha}) \partial_z + (1 + e^{-2i\alpha}) \partial_{\bar{z}}; \quad \alpha_1^{(2)} = \frac{\lambda}{\mu} \partial_2 + i((1 - e^{2i\alpha}) \partial_z - (1 - e^{-2i\alpha}) \partial_{\bar{z}});$$

$$\alpha_2^{(1)} = \partial_1 (\Delta + 2(e^{2i\alpha} \partial_z^2 + e^{-2i\alpha} \partial_{\bar{z}}^2)); \quad \alpha_2^{(2)} = \partial_2 (\Delta + 2(e^{2i\alpha} \partial_z^2 + e^{-2i\alpha} \partial_{\bar{z}}^2));$$

$$\beta_1^{(1)} = e^{2i\alpha} \partial_z - e^{-2i\alpha} \partial_{\bar{z}}; \quad \beta_1^{(2)} = -i(e^{2i\alpha} \partial_z + e^{-2i\alpha} \partial_{\bar{z}});$$

$$\beta_2^{(1)} = 2\partial_1 (e^{2i\alpha} \partial_z^2 - e^{-2i\alpha} \partial_{\bar{z}}^2); \quad \beta_2^{(2)} = 2\partial_2 (e^{2i\alpha} \partial_z^2 - e^{-2i\alpha} \partial_{\bar{z}}^2);$$

де $\partial_z = \frac{\partial}{\partial z}$, $\partial_{\bar{z}} = \frac{\partial}{\partial \bar{z}}$, $z = x_1 + ix_2$, $\bar{z} = x_1 - ix_2$, Δ — оператор Лапласа, α — кут між нормаллю \mathbf{n} до площинки та віссю Ox_1 .

Для задоволення граничних умов (1) виділимо нерегулярні складові у підінтегральних функціях представлень (4). Використовуючи формули Племеля-Сохоцького [7] при граничному переході, інтегральні рівняння записуються у вигляді:

$$\frac{1}{2} \text{Re}\{\mathbf{q}\} + \mathbf{v.p.} \int_L \left(\{\mathbf{f}_1^q(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0)\} \{\mathbf{q}\} d\zeta + \{\mathbf{f}_2^{\bar{q}}(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0)\} \{\bar{\mathbf{q}}\} d\bar{\zeta} \right) = \{\bar{\sigma}_n\};$$

$$\frac{1}{2} \text{Im}\{\mathbf{q}\} + \mathbf{v.p.} \int_L \left(\{\mathbf{g}_1^q(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0)\} \{\mathbf{q}\} d\zeta + \{\mathbf{g}_2^{\bar{q}}(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0)\} \{\bar{\mathbf{q}}\} d\bar{\zeta} \right) = \{\bar{\tau}_{sn}\}; \quad (5)$$

де $\{\mathbf{f}_1^q(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0)\} = \{f_1^{q^{(cl)(k)}}(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0)\}$, $\{\mathbf{f}_2^{\bar{q}}(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0)\} = \{f_2^{\bar{q}^{(cl)(k)}}(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0)\}$, $\{\mathbf{g}_1^q(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0)\} = \{g_1^{q^{(cl)(k)}}(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0)\}$,

$\{\mathbf{g}_2^{\bar{q}}(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0)\} = \{g_2^{\bar{q}^{(cl)(k)}}(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0)\}$ - відомі функції, $\{\bar{\sigma}_n\} = \{\bar{\sigma}_n^{(k)}\}$, $\{\bar{\tau}_{sn}\} = \{\bar{\tau}_{sn}^{(k)}\}$ - відомі напруження

від дії заданого навантаження, $\{\mathbf{q}\} = \{q^{(k)}\}$, $q^{(k)} = i \cdot p^{(k)} dL/d\zeta$; $p^{(k)} = p_1^{(k)} + ip_2^{(k)}$ — невідомі функції. Тут інтеграли будемо розуміти у сенсі їх головного значення.

Система інтегральних рівнянь (5) розв'язувалася числово. Для цього параметричне представлення граничних контурів отворів задавалося за допомогою функцій, що використовуються при конформному відображенні одиничного кола на задану область у вигляді:

$$z^{(k)} = w^{(k)}(\xi), \quad \zeta^{(k)} = \tilde{w}^{(k)}(\tilde{\xi}),$$

де параметр $\xi, \tilde{\xi}$ вибирався на основі нелінійного перетворення Сіді [8].

Використовуючи метод механічних квадратур [9] та квадратурні формули [10], система інтегральних рівнянь (5) зводиться до системи лінійних алгебраїчних рівнянь виду:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \operatorname{Re}\{\mathbf{q}_s^{(k)}\} I_K + h \sum_{k, \tilde{s}} [f_{1_{\tilde{s}\tilde{s}}}^{q(k)}] \{\mathbf{q}_{\tilde{s}}^{(k)} \cdot \mathbf{w}'_{\tilde{s}}{}^{(k)}\} + h \sum [f_{2_{\tilde{s}\tilde{s}}}^{\bar{q}(k)}] \{\bar{\mathbf{q}}_{\tilde{s}}^{(k)} \cdot \bar{\mathbf{w}}'_{\tilde{s}}{}^{(k)}\} &= \left\{ \sigma_s^{(k)} \right\}; \\ \frac{1}{2} \operatorname{Im}\{\mathbf{q}_s^{(k)}\} I_K + h \sum_{k, \tilde{s}} [g_{1_{\tilde{s}\tilde{s}}}^{q(k)}] \{\mathbf{q}_{\tilde{s}}^{(k)} \cdot \mathbf{w}'_{\tilde{s}}{}^{(k)}\} + h \sum [g_{2_{\tilde{s}\tilde{s}}}^{\bar{q}(k)}] \{\bar{\mathbf{q}}_{\tilde{s}}^{(k)} \cdot \bar{\mathbf{w}}'_{\tilde{s}}{}^{(k)}\} &= \left\{ \tau_s^{(k)} \right\}; \end{aligned} \quad (6)$$

де $f_{1_{\tilde{s}\tilde{s}}}^{q(k)} = f_1^{q(\text{cl})}(\mathbf{x}_s^{(k)}, \mathbf{x}_{\tilde{s}}^{0(k)})$, $f_{2_{\tilde{s}\tilde{s}}}^{\bar{q}(k)} = f_2^{\bar{q}(\text{cl})}(\mathbf{x}_s^{(k)}, \mathbf{x}_{\tilde{s}}^{0(k)})$, $g_{1_{\tilde{s}\tilde{s}}}^{q(k)} = g_1^{q(\text{cl})}(\mathbf{x}_s^{(k)}, \mathbf{x}_{\tilde{s}}^{0(k)})$, $g_{2_{\tilde{s}\tilde{s}}}^{\bar{q}(k)} = g_2^{\bar{q}(\text{cl})}(\mathbf{x}_s^{(k)}, \mathbf{x}_{\tilde{s}}^{0(k)})$, $\mathbf{q}_s^{(k)} = \mathbf{q}(\xi_s^{(k)})$, $\bar{\mathbf{q}}_s^{(k)} = \mathbf{q}(\tilde{\xi}_s^{(k)})$, $\mathbf{w}'_{\tilde{s}}{}^{(k)} = \mathbf{w}'(\tilde{\xi}_{\tilde{s}}^{(k)})$, $\tilde{\xi}_{\tilde{s}}^{(k)} = h \cdot \tilde{s}$, $\xi_s^{(k)} = \tilde{\xi}_s^{(k)} + h/2$, $s, \tilde{s} = \overline{1, N}$, $h = 2\pi/N$, N — кількість точок розбиття границі, I_K — одинична матриця розмірності K . Система (6) розв'язувалася числово на основі модифікованого методу Гаусса [11], що дає змогу мінімізувати час обчислень.

Для визначення зображень кільцевих напружень на границі порожнин та радіальних напружень у середовищі побудуємо інтегральні залежності, використовуючи підхід, запропонований у [6]. Підставимо потенціальне зображення переміщень (3) з урахуванням виразів фундаментальних функцій $U_{ji}^{*(\text{cl})}$ у формули для визначення кільцевих та радіальних напружень [7]. Отримаємо інтегральні залежності виду:

$$\hat{\sigma}_{\theta}^{(k)} = \int_L h_j^{(\text{cl})(k)}(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) p_j^{(k)} dL(\mathbf{x}^0); \quad \hat{\sigma}_r^{(k)} = \int_L H_j^{(\text{cl})(k)}(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) p_j^{(k)} dL(\mathbf{x}^0); \quad (8)$$

де $h_j^{(\text{cl})(k)}(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0)$, $H_j^{(\text{cl})(k)}(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0)$ — відомі функції, вирази для яких у операторному вигляді записуються:

$$\begin{aligned} h_j^{(\text{cl})(k)} &= \frac{1}{2\pi\mu} \left(\gamma_1^{(j)} K_0(\kappa_r r) + \gamma_2^{(j)} \frac{1}{\kappa_r^2} (K_0(\kappa_l r) - K_0(\kappa_r r)) \right); \\ H_j^{(\text{cl})(k)} &= \frac{i}{2\pi\mu} \left(\varsigma_1^{(j)} K_0(\kappa_r r) + \varsigma_2^{(j)} \frac{1}{\kappa_r^2} (K_0(\kappa_l r) - K_0(\kappa_r r)) \right); \end{aligned}$$

причому

$$\begin{aligned} \gamma_1^{(1)} &= (1 - e^{-2i\theta}) \partial_z + (1 - e^{-2i\theta}) \partial_{\bar{z}} + \frac{\lambda}{\mu} \partial_1; & \gamma_1^{(2)} &= i \left((1 + e^{2i\theta}) \partial_z - (1 + e^{-2i\theta}) \partial_{\bar{z}} \right) + \frac{\lambda}{\mu} \partial_2; \\ \gamma_2^{(1)} &= \partial_1 \left(\Delta - 2(e^{2i\theta} \partial_z^2 + e^{-2i\theta} \partial_{\bar{z}}^2) \right); & \gamma_2^{(2)} &= \partial_2 \left(\Delta - 2(e^{2i\theta} \partial_z^2 + e^{-2i\theta} \partial_{\bar{z}}^2) \right); \\ \varsigma_1^{(1)} &= \left(\frac{\lambda}{\mu} + 1 \right) \partial_1 + \partial_z e^{2i\alpha} + \partial_{\bar{z}} e^{-2i\alpha}; & \varsigma_1^{(2)} &= \left(\frac{\lambda}{\mu} + 1 \right) \partial_2 + i \left(e^{2i\alpha} \partial_z + e^{-2i\alpha} \partial_{\bar{z}} \right); \\ \varsigma_2^{(1)} &= \partial_1 \left(\Delta + 2(e^{2i\alpha} \partial_z^2 + e^{-2i\alpha} \partial_{\bar{z}}^2) \right); & \varsigma_2^{(2)} &= \partial_2 \left(\Delta + 2(e^{2i\alpha} \partial_z^2 + e^{-2i\alpha} \partial_{\bar{z}}^2) \right). \end{aligned}$$

Виділимо нерегулярні складові, що мають особливості типу Коші, у підінтегральних функціях залежностей (8) при малих значеннях аргументу. Використовуючи формули Племеля-Сохоцького [7] при граничному переході можна записати інтегральні залежності для визначення кільцевих напружень на границі порожнин та радіальних напружень у середовищі у вигляді:

$$\hat{\sigma}_{\theta}^{(k)} = \frac{\mathcal{G}}{4} \operatorname{Re}\{\mathbf{q}\} + \mathbf{v} \cdot \mathbf{p} \cdot \int_L \left(\{\mathbf{h}_1(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0)\} \{\mathbf{q}\} d\zeta + \{\mathbf{h}_2(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0)\} \{\bar{\mathbf{q}}\} d\bar{\zeta} \right); \quad (9)$$

$$\hat{\sigma}_r = \mathbf{v} \cdot \mathbf{p} \cdot \int_L \left(\{\mathbf{H}_1(\mathbf{x}^\delta, \mathbf{x}^0)\} \{\mathbf{q}\} d\zeta + \{\mathbf{H}_2(\mathbf{x}^\delta, \mathbf{x}^0)\} \{\bar{\mathbf{q}}\} d\bar{\zeta} \right); \quad (10)$$

де $\mathcal{G} = \frac{1}{2} - \frac{c_\tau^2}{c_l^2}$, $\{\mathbf{h}_1(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0)\} = \{h_1^{q(\text{cl})(k)}(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0)\}$, $\{\mathbf{h}_2(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0)\} = \{h_2^{\bar{q}(\text{cl})(k)}(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0)\}$, $\{\mathbf{H}_1(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0)\} = \{H_1^{q(\text{cl})(k)}(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0)\}$, $\{\mathbf{H}_2(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0)\} = \{H_2^{\bar{q}(\text{cl})(k)}(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0)\}$.

Для розрахунку оригіналів отриманих напружень використаємо обернене перетворення Фур'є [12], що за числових розрахунків реалізовувалося на основі алгоритму швидкого перетворення Кулі-Тьюкі [13].

Результати числових розрахунків. Використовуючи описаний вище підхід дослідимо динамічний напружений стан пластинчастого елемента, що послаблений двома круговими отворами однакового радіусу R . Результати числових розрахунків максимальних значень відносних кільцевих напружень на границі отворів для випадку, коли відстань між ними становить $\delta = R$ (крива 1), $\delta = 0,5R$ (крива 2) та $\delta = 0,25R$ (крива 3) наведено на рис. 2. Значення відносних радіальних напружень у точці пластинчастого елемента, що знаходиться на ділянці, що має найменшу довжину та рівновіддалена від обох границь отворів — точці O , наведено на рис. 3 для аналогічних значень відстаней між границями отворів.

Розрахунок динамічних напружень проведено матеріалу, що має наступні фізичні характеристики: густина $\rho = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, модуль Юнга $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,27$. Тут $\bar{\sigma}_\theta = \sigma_\theta / \sigma_0$, $\bar{\sigma}_r = \sigma_r / \sigma_0$, $\bar{t} = t \cdot c_1 / a$. За числових розрахунків вибрано 80 вузлових точок на границі кожного отвору та 512 елементів дискретної вибірки у оберненому перетворенні Фур'є. Для задання навантаження у формі (2) приймалися наступні значення сталих: $p_* = 272$; $\alpha_* = 10$; $n_* = 2$.

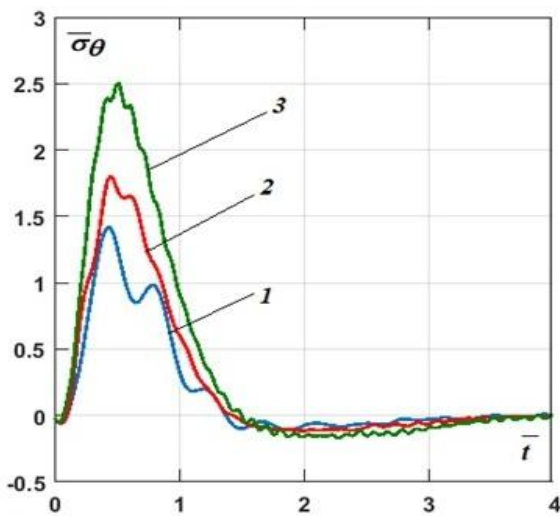


Рис. 2. Розподіл відносних кільцевих напружень на границі отворів у точках А та В

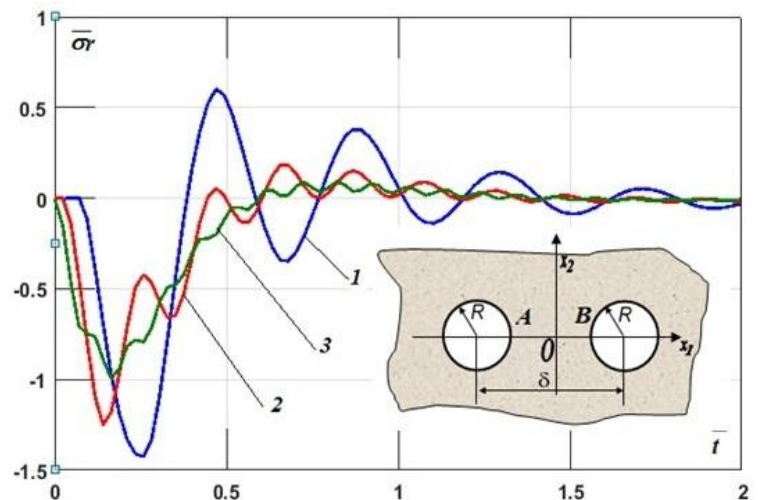


Рис. 3. Розподіл відносних радіальних напружень у точці О

З аналізу кривих рис. 2 видно, що при зменшенні відстані між границями отворів відбувається істотне зростання кільцевих напружень: для випадку, коли $\delta = 0,25R$ динамічні кільцеві напруження перевищують прикладене до границі навантаження у 2,5 рази.

Проте, аналіз кривих рис. 3 показує, що при зближенні дефектів відбувається зменшення радіальних напружень у точці O . Це пояснюється тим, що у випадку, коли $\delta = 0,25R$, накладання хвиль, що виникають за нестационарного навантаження не відбувається, оскільки імпульс хвилі, який виникає за дії змінного у часі навантаження на границі одного отвору «не встигає» пройти половину відстані δ до «зустрічі» з імпульсом другої хвилі, що виникає від дії навантаження на границі другого отвору. Такі результати дають можливість проводити оптимальне проектування пластинчастих елементів конструкцій, що експлуатуються за змінного у часі навантаження та послаблені системами отворів.

Висновки. В статті на основі аналізу числових розрахунків динамічного напруженого стану пластинчастого елемента, який послаблений системою кругових отворів, встановлено, що за дії змінного у часі імпульсного навантаження при зближенні отворів відбувається зростання кільцевих напружень на їх границі та зменшення радіальних напружень у внутрішніх точках пластинчастих елементів, що розміщені на ділянці, яка має найменшу довжину.

Використання розробленого підходу дає можливість проводити повний аналіз перебігу нестационарних хвильових процесів у елементах конструкцій, що містять отвори практично довільної форми.

Список використаних джерел:

1. Гузь А.Н., Кубенко В.Д., Черевко М.А. Дифракция упругих волн. К.: Наук. думка, 1978. 308 с.
2. Максимович В.М., Мікуліч О.А. Усталені коливання одно- та двозв'язних пластинок від дії зосереджених сил. // Наукові нотатки. — 2008. Вип. 23. — С. 179-187.
3. Максимович В.М., Мікуліч О.А. Усталені коливання пластинок з системою отворів. Тези XXIII науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу «Актуальні проблеми та перспективи науки і виробництва». — Луцьк, 2008. — С. 139-140.
4. Mikulich, O. A., Shab'yuk, V.I. Interaction of weak shock waves with rectangular meshes in plate. // Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. PRASTI. — 2016. — vol. 2(49), PP. 104-110.
5. Mikulich, O., Shvabjuk, V. Investigation of the impact of the shock waves on the dynamic stress state of the medium with the system of tunnel cavities. // Scientific Journal of the Ternopil National Technical University. — 2007. — 3(87). — PP. 12-20.
6. Mikulich, O., Shvabyuk, V., Sulym, H. Dynamic Stress Concentration at the Boundary of an Incision at the Plate under the Action of Weak Shock Waves. // Acta Mechanica et Automatica. — 2017. — 11(3). — PP. 217-221.
7. Божидарнік В.В., Сулим Г.Т. Елементи теорії пружності. Л.: Світ, 1994. 560с.
8. Sidi, A. Extension of a class of periodizing variable transformations for numerical integration. // Mathematics Computation. — 2006. — 75(253). — PP. 327-343.
9. Саврук М. П. Двумерные задачи упругости для тел с трещинами. К.: Наук. думка, 1981. 324 с.
10. Kolm, P., Rokhlin, V. Numerical Quadratures for Singular and Hypersingular Integrals. // Computers and Mathematics with Applications. — 2001. — 41. — PP. 327-352.
11. Noor-A-Alam Siddiki Md. The Solution of Large System of Linear Equations by using several Methods and its applications. // IJSET - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology. — 2015. — 2(8). — PP. 1008-1014.
12. Ramamohan, K.; Kim, D.; Hwang, J. Fast Fourier Transform: Algorithms and Applications, Springer, New York, 2010.
13. Сидорова Т. В., Зыкова Т. В., Сафонов К. В. О модификации быстрого одномерного преобразования Фурье по алгоритму Кули-Тьюки. // Вестник СибГАУ. — 2015. — Т. 16, № 2. — С. 360-363.

Стаття надійшла до редакції 25.12.2018

УДК 621.762.4.04

А.В. Мініцький¹, Л.О. Сосновський², П.І. Лобода¹, Ю.Й. Бесарабець¹¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна²Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ, Україна**ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ПРОЦЕС ВІЛЬНОЇ ОСАДКИ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ЗАЛІЗА**

З метою дослідження умов зниження пористості порошкових матеріалів, проводили вільну осадку брикетів із заліза і його суміші з 1,6% графіту. Брикети отримували пресуванням при 700 МПа з наступним відпалом у водні при 800 °С. Вільну осадку брикетів здійснювали при одному зусиллі 200 кН при трьох температурах: при кімнатній температурі, після охолодження в рідкому азоті, після нагрівання в порошку графіту при 800 °С, тобто при 20 °С, вище -196 °С і нижче 800 °С. Встановлено, що деформація при осіданні брикетів знижується в температурному ряду: кімнатна – нижче 800 °С – вище -196 °С. Відповідно підвищується залишкова пористість брикетів. Показано, що осадка брикетів в сталевих обичайках дозволяє формувати щільні і якісні заготовки під наступний гарячий передел.

Ключові слова: порошок, залізо, графіт, осадка, температура, пористість

А.В. Миницкий, Л.А. Сосновский, П.И. Лобода, Ю.И. Бесарабев**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ПРОЦЕСС СВОБОДНОЙ ОСАДКИ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА**

С целью исследования условий снижения пористости порошковых материалов, проводили свободную осадку брикетов из железа и его смеси с 1,6 % графита. Брикеты получали прессованием при 700 МПа с последующим отжигом в водороде при 800 °С. Свободную осадку брикетов осуществляли при одном усилии 200 кН при трех температурах: при комнатной температуре, после охлаждения в жидком азоте, после нагрева в порошке графита при 800 °С, т.е. при 20 °С, выше -196 °С и ниже 800 °С. Установлено, что деформация при осадке брикетов снижается в температурном ряду: комнатная – ниже 800 °С – выше -196 °С. Соответственно повышается остаточная пористость брикетов. Показано, что осадка брикетов в стальных обечайках позволяет формировать плотные и качественные заготовки под последующий горячий передел.

Ключевые слова: порошок, железо, графит, осадка, температура, пористость

A.V. Minitsky, L.A. Sosnovsky, P.I. Loboda, Y.I. Besarabec**EFFECT OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON THE PROCESS OF FREE DRAFT OF POWDER MATERIALS ON THE BASIS OF IRON**

In order to study the conditions for reducing the porosity of powdered materials, briquettes made of iron and its mixture with 1.6% graphite were free precipitated. Briquettes were obtained by pressing at 700 MPa, followed by annealing in hydrogen at 800 °C. The free draft of briquettes was carried out with one effort of 200 kN at three temperatures: at room temperature, after cooling in liquid nitrogen, after heating in graphite powder at 800 °C, i.e. at 20 °C, above -196 °C and below 800 °C. It is established that the deformation during the precipitation of briquettes decreases in the temperature range: room - below 800 °C - above -196 °C. Respective porosity of briquettes increases accordingly. It is shown that the draft of briquettes in steel shells allows forming dense and high-quality billets for subsequent hot processing.

Keywords: powder, iron, graphite, draft, temperature, porosity

Постановка проблеми. Ефективність процесу деформації порошкових матеріалів істотно залежить від точності вибору геометрії і пористості вихідної заготовки, а також схеми деформації, які повинні забезпечувати при обробці тиском пластичне формозмінення і ущільнення зразка без руйнування. Відомо, що одними із найбільш перспективних технологій, які забезпечують отримання порошкових заготовок із високою щільністю є динамічне гаряче пресування, гаряча штамповка та гаряче ізостатичне пресування [1-3].

Від даних методів вільна осадка відрізняється тим, що заготовка не обмежена боковою поверхнею робочого інструменту [4]. Хоча процес вільного осадження порошкових пористих заготовок є ідентичним осадженню компактного матеріалу, проте наявність пористості обумовлює відмінність пластичної деформації брикетів. Для порошкових матеріалів коефіцієнт Пуассону менше 0,5 і, відповідно, радіальне розширення під час деформації менше ніж для компактного [5]. Пори зминаються під дією навантаження і зменшують бокову деформацію зразків, що знижує розтягуючі напруження матеріалу. Але водночас, пористість перешкоджає пластичній течії матеріалу, що неоднозначно впливає на утворення периферійних тріщин під час вільного осадження зразків. Проте, холодна вільна осадка порошкових заготовок забезпечує, при відносно

невеликих зусиллях, зниження пористості до 2–4 % [6–10], що пояснюється найбільш інтенсивним закриттям пор, яке ефективно відбувається саме при зсувних деформаціях.

Постановка задач. Не дивлячись на безперечні переваги методу вільної осадки (відсутність у потребі спеціальної прес-оснастки, можливість використання стандартного пресового обладнання та створення великих зсувних деформацій) він практично не застосовується для виготовлення щільних порошкових матеріалів конструкційного призначення з високими функціональними властивостями. Метою даної роботи є вивчення впливу технологічних режимів процесу вільної осадки порошкових матеріалів на основі залізу на їх властивості.

Викладення основного матеріалу. Використовували залізний порошок марки ПЖРВ 200.28 та його суміш із порошком графіту марки ГС-4 (1,6 %). Проводили попереднє пресування брикетів висотою 16–18 мм складу (мас. %): а) Fe–100; б) Fe–98,4, графіт–1,6 при тиску 700 МПа у нероз'ємній прес-формі діаметром 12 мм, після чого проводили відпал у середовищі водню при температурі 800 °С для зняття деформаційного зміцнення після пресування. Вихідна пористість пресовок складала 12–13 % для залізу та 7–8 % для суміші залізу з добавкою графіту (1,6 %).

Вільну осадку відпалених брикетів проводили на гідравлічному пресі між двома сталевими пластинами вздовж напрямку пресування при зусиллі 50–250 кН. На першому етапі проводили осадку при кімнатній температурі та визначали пористість брикетів методом гідростатичного зважування та відносну деформацію зразків, яку визначали за відношенням різниці висоти пресовки до осадки та після до вихідної висоти (рис.1).

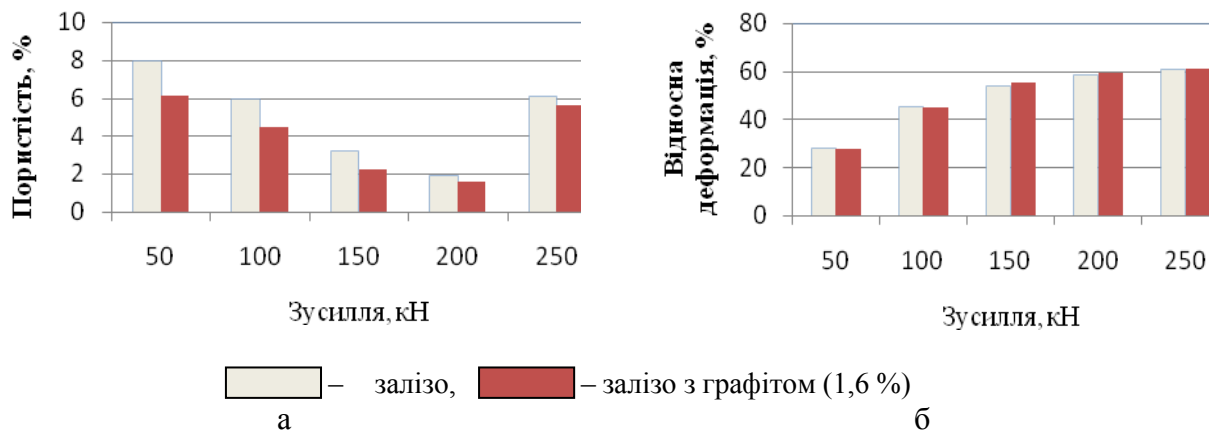


Рис. 1. Пористість (а) та відносна деформація зразків (б) в залежності від зусилля вільної осадки при температурі 20 °С

Встановлено, що вільна осадка зразків при зусиллях 150–200 кН дозволяє отримати заготовки з залишковою пористістю в межах 1,5–3 % (рис. 1 а). Подальше збільшення зусилля осадки до 250 кН приводить до формального зростання пористості, що пов'язано з появою тріщин по периферії зразків. Незначна залишкова пористість після вільної осадки підтверджується також металографічним аналізом (рис. 2). Мікроструктура зразків показує суттєву деформацію зерен у напрямку перпендикулярному прикладеному зусиллю осадки. Слід зазначити, що добавка графіту (1,6 %) принципово не впливає на пористість зразків, що піддавали осадці, що може бути обумовлено наступним. Графіт сприяє кращому ущільненню порошоків залізу в умовах статичного пресування за рахунок змащуючих властивостей [11]. Проте, в процесі спікання, вуглець частково розчиняється в залізі, підвищує його міцність і, відповідно, збільшує опір спеченого брикету деформації при осадці.

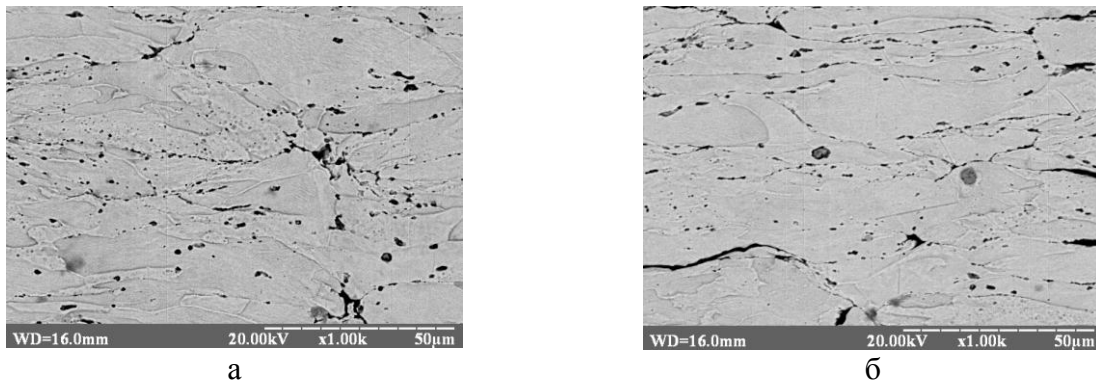


Рис. 2. Мікроструктура зразків підданих вільній осадці при зусиллі 200 кН при температурі 20 °С: а – Fe, б) Fe+1,6 графіту.

Досліджували вільну осадку при різних температурах при одному зусиллі 200 кН. При виборі температур осадки було враховано, що нагрів зразків на основі залізу до температури 800 °С збільшує пластичність матеріалу і, навпаки, охолодження у рідкому азоті (– 196 °С) знижує пластичність матеріалів з ОЦК граткою [12]. Тому було проведено порівняльний експеримент де частина брикетів була охолоджена у рідкому азоті. Другу частину брикетів нагрівали на повітрі у засипці із терморозширеного графіту при 800 °С протягом 15 хвилин. Зрозуміло, що при розміщенні зразків між пластинами, температура першої частини брикетів частково підвищувалась, а другої – знижувалась.

На рисунку 3 показано пористість та відносна деформація порошкових брикетів при різних температурах вільної осадки при зусиллі 200 кН.

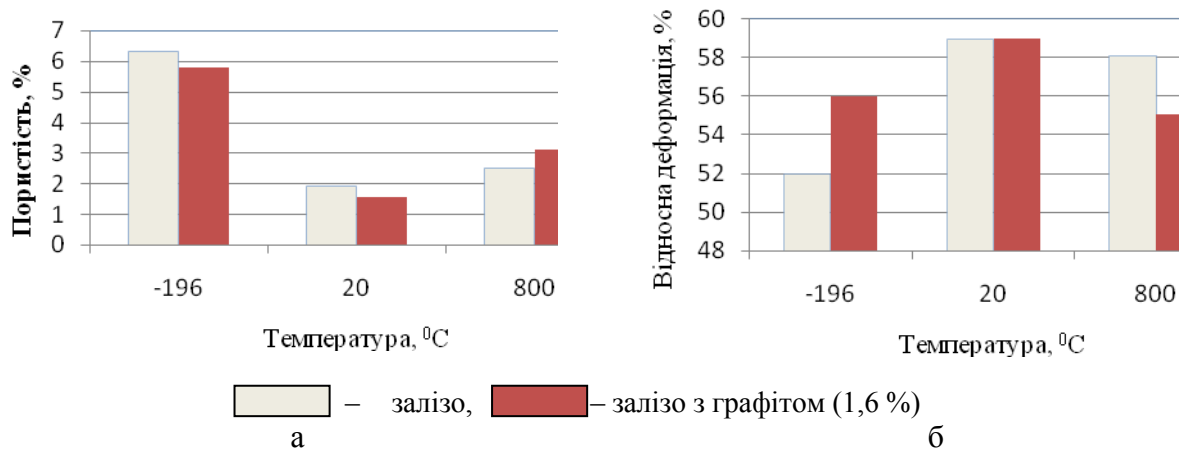


Рис. 3. Пористість (а) та відносна деформація (б) зразків при зусиллі вільної осадки 200 кН при температурах – 196, 20, та 800 °С.

Результати цих експериментів показали, що при однаковому зусиллі осадки відмінність пористості обумовлено зміною пластичності зразків і, відповідно, різним ступенем деформації, що залежать від температури. Так, найменша пористість (1,5–2 %) спостерігається для зразків підданих осадці при кімнатній температурі, висока пластичність яких обумовлена попереднім відпалом. Нагрів зразків до 800 °С априорно повинен був забезпечити меншу пористість через більш високу пластичність за рахунок нагріву. Проте, як показали результати досліджень, залишкова пористість зразків складає 2–3 %, тобто залишається на рівні зразків підданих осадці при кімнатній температурі (рис. 3 а). Це може бути пояснено тим, що брикети нагрівали у засипці із терморозширеного графіту у графітовому тиглі (для запобігання від окиснення), через що відбулося додаткове науглецювання залізних пресовок з утворенням цементиту(рис.4) і збільшення гарячої міцності розчину Fe–C, що перешкоджає осадці брикетів.

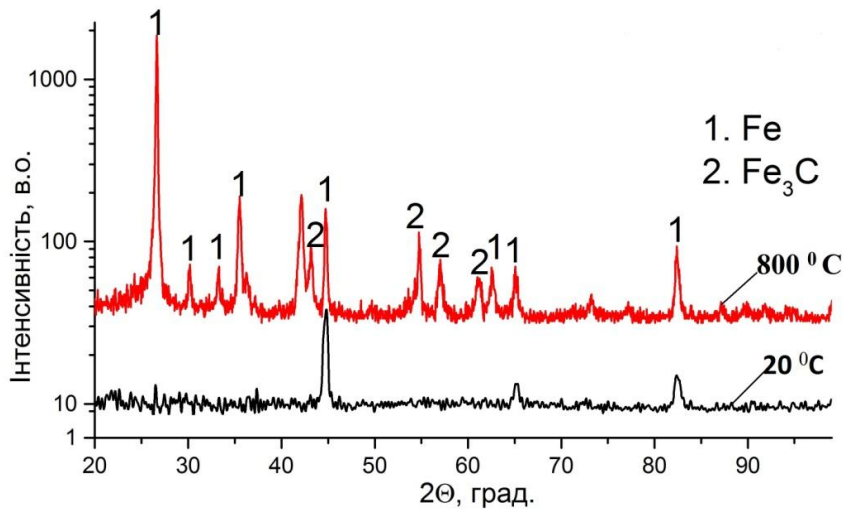


Рис. 4. Спектри рентгенівської дифракції сплаву Fe–C (1,6 %) після осадки зразків при 200 кН за різних температурах та охолодження до кімнатної температури

Результати наведені на рисунку 4 показали, що в процесі відпалу пресовок у водні науглецювання залізу графітом, що міститься у брикетах, несуттєво (нижній спектр). Навпаки, для тих же брикетів відбувається інтенсивне науглецювання при нагріві на повітрі у терморозширеному графіті і вміст Fe_3C в них значно вище (верхній спектр). Ця розбіжність обумовлено тим, що науглецювання проходить за рахунок реакції диспропорціювання молекул CO на поверхні залізу. Парціальний тиск CO в першому випадку (відпал у водні) є несуттєвим і швидкість транспортування вуглецю до залізу, відповідно, сповільнено.

Пористість зразків після вільної осадки при низьких температурах складає 5–7 %, тобто охолодження у рідкому азоті знизило пластичність та привело до зменшення деформації зразків (рис 3 б). При цьому більший ступінь деформації спостерігався для зразків, що містять графіт, який виконує роль мастила і сприяє проковзуванню залізних зерен в умовах деформації при вільній осадці.

ДюрOMETричні дослідження матеріалів, що піддавалися вільній осадці, також показали відмінність за характеристиками в залежності від температури (табл. 1).

Таблиця 1

Твердість зразків при різних температурах осадки

Стан	Безосадки		Після осадки	
	Температура, °C	20°C	20°C	800°C
Склад	Твердість, HRB			
Fe	23	94	92	68
Fe+1,6% графіту	20	90	90	73

Встановлено, що найбільшу твердість мають зразки отримані після осадки при кімнатній температурі 90–94 HRB, близькими до них по значенню твердості є зразки отримані при нагріві 800 °C: 90–92 HRB (табл. 1). Вплив пористості на твердість матеріалів проявився для зразків, що піддавалися осадці після охолодження у рідкому азоті. Збільшення пористості до 5–7 % привело до зниження твердості зразків до 68–73 HRB.

Мікротвердість матеріалів приведена в таблиці 2, показало, що мікротвердість знаходиться в діапазоні 8,5–11,3 ГПа, тобто вільна осадка при всіх температурних режимах збільшує інтегральну мікротвердість фазових складових в 4–5 разів відносно вихідної мікротвердості матеріалу на основі залізу.

Таблиця 2

Мікротвердість зразків при різних температурах осадки

Стан	Без осадки		Після осадки	
	Температура, °C	20°C	20°C	800°C
Склад	Мікротвердість, ГПа			
Fe	1,5	7,5	9,2	10,9
Fe+1,6% графіту	1,7	8,1	10,5	11,3

Імовірно, таке суттєве збільшення мікротвердості може бути пов'язано із зміною напруженого стану матеріалу в результаті вільної осадки. Визначення залишкових напружень методом $\sin^2\psi$ за допомогою рентгеноструктурного аналізу проведено на рентгенівському дифрактометрі "Rigaku Ultima IV". Встановлено, що при осадці зразків при температурі 20 °С значення залишкових стискаючих напружень складає $-1356 (\pm 281)$ МПа, а при температурі 800 °С відбувається збільшення стискаючих залишкових напружень в три рази: $-3696 (\pm 883)$ МПа.

Результати проведених досліджень показали перспективність процесу вільної осадки для отримання високощільних заготовок з високою твердістю. Одним з недоліків способу є значна зміна геометричних параметрів та розтріскування периферійної частини зразків при великих зусиллях, що приводить до формального зростання пористості (рис. 1 а) та практично знижує вихід годного порошкового матеріалу. Для подолання цього недоліку була використана трубна обичайка з низьковуглецевої сталі, яка є аналогом контейнеру, що використовується при синтезі алмазів у КВТ [13]. В обичайку розміщали відпалений зразок висотою 16–18 мм (відповідає висоті обичайці) і внутрішнім діаметром близько 30 мм. На рисунку 5 приведено фотографії зборок брикет – обичайка до- та після їх осадки, яка перетворює вихідну зборку в шайбу із закругленими кромками.



Рис. 5. Зразки на основі залізу з добавкою графіту 1,6 % в обичайці (вихідні та після осадки при зусиллі 600 кН)

Пористість брикетів, що піддавали осадці в обичайці, визначали шляхом окремого зважування брикету та беспористої обичайки. Після осадки, отриману шайбу повторно зважували, обміряли та розраховували загальний об'єм із якого віднімали об'єм обичайки для визначення об'єму брикету та, відповідно, його пористості. Отримані значення пористості та відносної деформації представлені на рисунку 6.

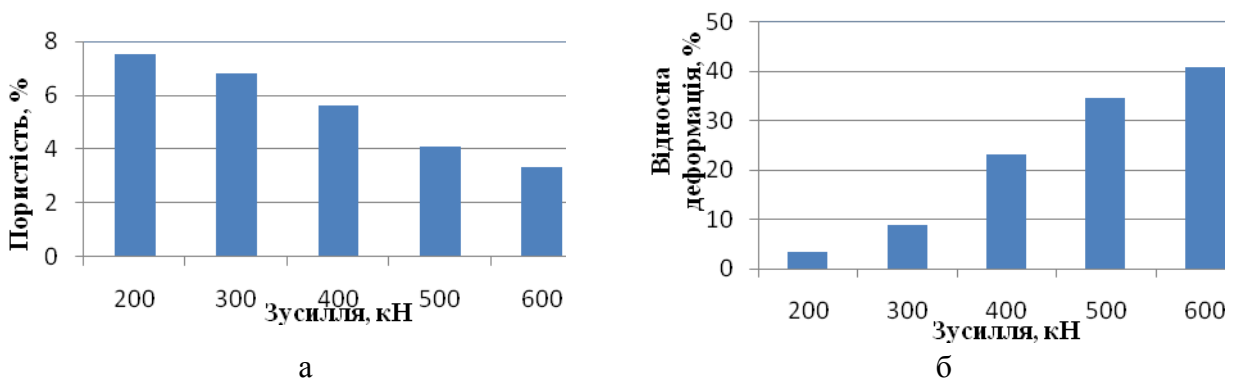


Рис. 6. Пористість та відносна деформація зразків на основі залізу з добавкою графіту (1,6 %) від зусилля вільної осадки при температурі 20 °С в обичайці.

Приведені результати процесу осадки порошкових зразків в обичайці показало можливість отримання рівномірних компактних заготовок, що мають пористість близько 3 % при відносній деформації близько 40 % при 600 кН (рис.6). Встановлено, що в досліджуваному діапазоні зусиль осадки відбувається рівномірна деформація зразку разом із обичайкою. Обичайка, фактично,

виконує роль захисної оболонки порошкового брикету і запобігає появі тріщин на периферії зразків.

Можна констатувати, що проведення осадки із частковим обмеженням її свободи дозволяє формувати комбіновані бездефектні заготовки, що складаються із щільної і міцної периферійної частини і малопористої проте не міцної серцевини. Достатньо очевидно, що для надання матеріалу серцевини високих фізико-механічних властивостей, отриману заготовку можна піддавати спіканню або гарячій деформації шляхом осадки, ковки чи штамповки. При цьому доцільно використовувати обичайку як невід'ємну частину кінцевого продукту.

Висновки

1. Вільна осадка відпалених брикетів обох складів приводить до підвищення їх щільності, яка залежить від температури: максимальна осадка при кімнатній температурі, мінімальна після охолодження брикетів у рідкому азоті.

2. Зниження деформації брикетів нагрітих у графіті при 800 °С обумовлено їх науглецюванням при нагріві, що приводить до їх зміцнення через розчинення вуглецю в залізі.

3. Встановлено, що утворення тріщин в периферійній зоні брикетів, підданих осадці при кімнатній температурі, усувається шляхом розміщення брикетів у сталевій обичайці і відповідно, проведенням їх сумісної осадки.

Список використаних джерел:

1. Дорофеев Ю. Г. Промышленная технология горячего прессования порошковых изделий / Дорофеев Ю. Г., Гасанов Б. Г., Дорофеев В. Ю. [и др.]. – М. : Металлургия, 1990. – 206 с.
2. Баглюк Г.А., Хоменко А.И. Сравнительный анализ деформированного состояния пористых заготовок при штамповке в закрытом и открытом штампах // Обработка материалов давлением. – 2012. – №2(31). – С.147–153
3. Лисенко Н.А., Клочихин В.В., Наумик В.В. Структура и свойства пустотелых отливок лопаток турбины из никелевых сплавов после горячего изостатического прессования // Авиационно-космическая техника и технология, 2015. - №10(127). – С. 19-27
4. Артамонов А.Я. Влияние условий обработки на физико-механическое состояние металлокерамических материалов. Киев: Наук. Думка, 1965. – 263 с.
5. Кун Х. А. Основные принципы штамповки порошковых заготовок / Х. А. Кун // Порошковая металлургия материалов специального назначения. – М. : Металлургия, 1977. – С. 143–158.
6. Мينيцкий А.В., Сосновский Л.А., Быков А.И., Лобода П.И. Процессы вторичного уплотнения брикетов на основе порошка железа // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». Луцьк, 2017. – №58. – С. 248–254
7. Рябичева Л. А. Исследование свободной осадки порошковых медно-титановых материалов / Л. А. Рябичева, О.П. Гапонова // Наукові праці ДонНТУ. Металургія.– 2008.– Вип. 10 (141).– С. 236–240.
8. Лукашкин Н.Д., Кохан Л.С., Роберов И.Г., Кондрашов А.А. Выбор технологических параметров при осадке спеченных заготовок из металлических порошков//Технология металлов. — М. Наука и технологии, 2005. – №7. – с. 22-25.
9. Лукашкин Н. Д., Кохан Л. С., Роберов И. Г. Теория обработки давлением скомпактированных спеченных металлических порошков. М.: МГВМИ, 2005. – 311с.
10. Гурских А.В. Поведение спеченной алюминиевой бронзы // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение, 2018. – т. 20, №1. – С. 18–26
11. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения. Справочник. / И.М. Федорченко, И.Н. Францевич, И.Д. Радомысельский и др. Киев: Наук. Думка, 1985. – 624 с.
12. Лебедев А.А., Ламашевский В.П., Маковецкий И.В. Деформирование и прочность легированных сталей при низких температурах в условиях сложного напряженного состояния // Проблемы прочности, 2010, №4, – С. 28–37
13. Синтетические сверхтвердые материалы: В 3-х т. Т.1. Синтез сверхтвердых материалов / Редкол.: Новиков Н.В. (отв. ред.) и др. – Киев: Наукова думка, 1986. –280 с.

Стаття надійшла до редакції 19.03.2019

УДК 519.766.4:004.942

Є.А. Недашківський
ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ АНАЛІЗУ ТА
ПРОГНОЗУВАННЯ ФІНАНСОВИХ ЧАСОВИХ РЯДІВ НА ОСНОВІ ЛІНГВІСТИЧНОГО
МОДЕЛЮВАННЯ

У роботі виконана програмна реалізація інформаційної технології для аналізу та прогнозування фінансових часових рядів на основі лінгвістичного моделювання. Здійснено проектування програми для аналізу та прогнозування фінансових часових рядів на основі лінгвістичного моделювання, яка дозволяє здійснювати виконання аналізу фінансових часових рядів різного виду, автоматизацію процесу виведення результату, автоматизацію процесу проведення аналізу та прогнозування фінансових часових рядів.

Ключові слова: програмна реалізація, фінансові часові ряди, лінгвістичне моделювання, інформаційна технологія, фрактальний аналіз.

Е.А. Недашковский
ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ АНАЛИЗА
И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ФИНАНСОВЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ НА ОСНОВЕ
ЛИНГВИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В работе выполнена программная реализация информационной технологии для анализа и прогнозирования финансовых временных рядов на основе лингвистического моделирования. Осуществлено проектирование программы для анализа и прогнозирования финансовых временных рядов на основе лингвистического моделирования, которая позволяет осуществлять анализ финансовых временных рядов различного вида, автоматизацию процесса вывода результата, автоматизацию процесса проведения анализа и прогнозирования финансовых временных рядов.

Ключевые слова: программная реализация, финансовые временные ряды, лингвистическое моделирование, информационные технологии, фрактальный анализ.

Y.A. Nedashkivskyi
SOFTWARE IMPLEMENTATION OF INFORMATION TECHNOLOGY FOR ANALYZING
AND FORECASTING FINANCIAL TIME SERIES BASED ON LINGUISTIC MODELING

The work is carried out software implementation of information technology for analyzing and forecasting financial time series based on linguistic modeling. The developed method of quantitative assessment and visualization of the results of the assessment of groups (subgroups) of signs allows you to compare indicators and calculate a generalized indicator. For a better analysis, each indicator or measure (co-dimension, scaling of the time series, systematically, proportionality, etc.) are divided into modules that are needed to form a general forecast level. A program has been designed for analyzing and forecasting financial time series based on linguistic modeling, which allows performing analysis of financial time series of various types, automating the result output process, automating the analysis process and forecasting financial time series. The proposed model for the synthesis of the plan, analysis and forecasting of time series with fractal properties allows you to adapt the planning process of forecasting financial time series to change the tasks, the level of formation of the initial series.

Keywords: software implementation, financial time series, linguistic modeling, information technology, fractal analysis.

Постановка проблеми. В економічній теорії проблема аналізу накопичених даних криється в складності опису ринкових систем, заснованих на фінансових показниках, які часто розглядаються як випадкові величини [1]. Саме, виходячи з цього, більшість підходів до аналізу та прогнозування часових рядів з фрактальними властивостями, засновано на статистичних методах і моделях. Однак, не дивлячись на актуальність і масштабність даного підходу, він не є досить точним, в силу відсутності розуміння природи мінливості ринків капіталу і механізму передбачення коливання цін.

У більшості випадків, результат виникнення зовнішніх факторів здійснює вплив на динаміку часових рядів з фрактальними властивостями, а саме відбувається порушення структури, при цьому попередні дані залишаються незмінними. Це є особливістю практично будь-якого фінансового часового ряду. Тому в умовах сучасної ринкової економіки актуальним питанням є розробка теоретико-методологічних аспектів прогнозування часових рядів з фрактальними властивостями на основі лінгвістичного моделювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В рамках нинішньої теорії економічних систем, багато вчених пропонують спиратися на теорію динамічних систем [2], або теорію хаосу [3, 4]. Даний підхід, порівняно молодий, проте спираючись на дослідження [5,6] є можливість стверджувати про злиття методів нелінійної динаміки з існуючими економічними дослідженнями, що в комплексі призведе до створення нових моделей ринків капіталу.

Аналіз часових рядів [7, 8], в умовах нинішньої економічної науки, відноситься до розділу математичної фізики, який активно розвивається і поглинає як методи теорії динамічних систем так і методи фрактального аналізу [9]. Як окрема структурна одиниця, даний механізм аналізу активно застосовується в економіці для аналізу інформації у вигляді часових рядів котирувань акцій компаній. Алгоритм підходу базується на нестабільності ринку цінних паперів, що призводить до значних коливань і як наслідок, до виникнення хаотичних динамічних систем. Хаос в динамічних системах, це ніщо інше, як експонентний розкид близьких траєкторій для класу хаотичних атракторів. Рівень експоненціального розкиду характеризується старшим показником Ляпунова, а рівень «безладу» – ентропією. Наслідок знаходження будь-якої з цих величин, є значенням горизонту прогнозу для аналізованого часового ряду. Так само знаходження розмірності вкладення, тобто мінімальне число динамічних змінних, які однозначно описують спостережуваний процес, можна знайти використовуючи фундаментальні аспекти теорії динамічних систем.

В силу того, що процеси коливання фінансового ринку мають динамічний характер, механізм отримання додаткової інформації несе неоціненний вклад в точність і правильність прийнятих рішень, що вкрай важливо для більшості акціонерних компаній. Саме спираючись на дане судження, слід підкреслити, що методи аналізу часових рядів, які прийшли з нелінійної динаміки, мають пріоритетний вплив на коректний прогноз відносно ринку цінних паперів.

На сьогодні, формування та побудова моделей спрямованих на відображення динаміки фінансових часових рядів [10] є однією з головних проблем при аналізі та прогнозуванні часових рядів з фрактальними властивостями.

Оскільки зовнішні фактори здійснюють вплив на динаміку часових рядів з фрактальними властивостями з порушенням структури і незмінністю попередніх даних, в силу присутності нелінійності використання методів типу MACD або ARIMA стає неефективним та викликає систематичні помилки у прогнозі.

Проблемам автоматизації системи аналізу та прогнозування часових рядів з фрактальними властивостями присвячено роботи як вітчизняних так і зарубіжних учених, до їх числа варто віднести: П.І. Бідюка, О.І. Савенкова, І.В. Баклана [10], А.К. Лопатина [11, 12], О.Ю. Берзлеву [13], А.С. Нечипоренка [14], І.А. Ликова, С.А. Мисливціва [15], А.В. Матвійчука [16], І.Г. Лук'яненко, В.М. Жука [17], G. Koop, D. Korobilis [18], VercellisCarlo [19], Pandit S.M., Wu, S.-M [20] та ін.

Автоматизований підхід розкривають такі відомі вчені як Є.О. Глотов, О.М.Попова [21] та І.І. Чайковська [22].

Саме Е. Найман [23] відокремив основні напрямки розрахунку показника Херста з метою виявлення персенстенції.

Такі автори як В.Ю. Дубницький [24] та К.І. Крицун [25] надають вичерпну інформацію по складанню інформаційних матриць та методології системного аналізу в рамках досліджуваної системи.

Проведений аналіз сучасних наукових робіт у галузі автоматизації процесів аналізу та прогнозування часових рядів з фрактальними властивостями, розробки спеціалізованих програмних додатків інформаційної підтримки процесів аналізу та прогнозування фінансових часових рядів показує, що на сьогоднішній день основні напрямки дослідження науковців направлені на розробку комплексних інтеграційних рішень, які могли б враховувати вплив людського фактору на всіх етапах життєвого циклу виробу.

Однак, варто зазначити, що досліджені розробки та досягнення не враховують існуючий і дуже важливий взаємозв'язок між аналізом часових рядів та їх подальшим прогнозуванням з урахуванням фрактальних особливостей.

Тому, існує нагальна потреба в подальшому дослідженні методів, принципів та механізмів реалізації, формалізації та алгоритмізації процесу аналізу та прогнозування часових рядів з фрактальними властивостями в системі управління інформаційними технологіями економічного спектру.

Постановка завдання. У даній статті необхідно розробити програмну реалізацію інформаційної технології для аналізу та прогнозування фінансових часових рядів на основі лінгвістичного моделювання.

Викладення основного матеріалу. Автоматизована система аналізу та прогнозування фінансового часового ряду (АС ПФЧР) за допомогою лінгвістичного моделювання спрямована на рішення завдань прогнозування часових рядів з фрактальними властивостями, яка фактично є

експертною системою підтримки прийняття рішень (ЕСППР), що розробляється, побудована на базі інструментальної оболонки і призначена для оцінювання стану складних систем (об'єктів) за наявності значної кількості значущих чинників чи на базі системи фінансових ризиків. При цьому передбачається наявність взаємозв'язків і взаємозалежностей між чинниками, які на початку використання системи можуть бути явно не задані. Схема інформаційних зв'язків при застосуванні АС ПФЧР зображена на рис.1.



Рис. 1. Схема інформаційних зв'язків в АС ПФЧР

АС ПФЧР є програмним комплексом (ПК), який призначено для аналізу та прогнозування фінансового часового ряду за допомогою лінгвістичного моделювання. Користувачами АС ПФЧР можуть бути особи трьох категорій: системний адміністратор і особа чи група осіб, які є кінцевими користувачами.

Складовими АС ПФЧР (рис. 2) є наступні програмні модулі:

- модуль авторизації, який використовується для надання користувачеві дозвіл на виконання певних дій, а також для підтвердження одержання цього дозволу при спробі виконати ці дії;
- модуль управління, який слугує для нагляду за цілісністю інформаційного поля та даних, що забезпечує відповідність нормам безпеки та прийнятний рівень працездатності комп'ютерів і програмного забезпечення;
- модуль обліку результатів, який виконує відповідальні функції, а саме:
 - адміністратор та користувачі можуть ознайомитися з існуючими на теперішній час нормативами;
 - користувачі можуть вибрати прийнятні на їхню думку, часові норми та ознайомитися з результатами формування прогнозної вибірки;
 - модуль обробки результатів, який призначений для того, щоб оцінити результати поставленої задачі;
 - модуль відображення результатів, який призначений для того, щоб особи, які є прямими користувачами системи могли ознайомитися з курсом, який діє на сьогодні, ввести свої персональні дані та потім, після закінчення дій, ознайомитися з їх результатами;

- довідкова система, яка призначена для обміну інформацією в інтерактивному режимі між усіма модулями АС ПФЧР;
- база даних, яка призначена для збереження даних (фінансових даних і результатів, паролів доступу та ін.).



Рис. 2. Узагальнена структура програмних модулів автоматизованої системи аналізу та прогнозування фінансового часового ряду

Процес управління прогнозуванням складається з процесів планування, організації, контролю, обліку та аналізування. Таким чином можна визначити місце запропонованої АС системах економічного прогнозування (рис. 3).

Принципи узгодженості, відповідності й ортогональності, економічності, повноти та відкритості, що використовувалися під час розробки АС, гарантують створення ефективного, надійного і перспективного програмного комплексу в системі економічного прогнозування.

Форма подання прогнозних значень визначається моделлю, і у випадку значень з фрактальними властивостями результат представляється у лінгвістичній формі для рівнів, типів та інтенсивностей елементарної тенденції, а для отримання числової оцінки прогнозу застосовується операція визначення характеристик кожної окремої одиниці числового ряду.

Таким чином, у запропонованій моделі є можливість отримання багаторівневого прогнозу, що включає оцінку прогнозних типів та інтенсивність елементарних тенденцій (змін), що відрізняє її від відомих моделей.

Підкреслюючи вплив ліквідності і інвестиційних горизонтів на поведінку інвесторів, гіпотеза фрактального ринку, на протиположну гіпотезі ефективного ринку, припускає, що:

- ринок стабільний, коли він складається з інвесторів, що охоплюють велику кількість інвестиційних горизонтів. Це гарантує остатню ліквідність для трейдерів;
- інформаційна складова більше пов'язана з настроєм ринку і технічними факторами у короткостроковій перспективі, ніж у більш довгостроковій перспективі. У міру збільшення інвестиційних горизонтів домінує більш довгострокова фундаментальна інформація. Таким чином, зміни ціни можуть відображати інформацію, важливу тільки для цього інвестиційного горизонту;
- якщо відбувається подія, яка ставить під сумнів дійсність фундаментальної інформації, довгострокові інвестори або припиняють участь на ринку, або починають торгувати на підставі короткострокової інформаційної безлічі. Коли загальний інвестиційний горизонт ринку скорочується до однорідного рівня, ринок стає нестабільним. Немає довгострокових інвесторів, щоб стабілізувати ринок, пропонуючи ліквідність короткостроковим інвесторам;

- ціни відображають поєднання короткострокової технічної торгівлі і довгострокової фундаментальної оцінки. Таким чином, ймовірно, що короткострокові зміни цін будуть більш волатильними або "більш гучними", ніж довгострокові. Основна тенденція на ринку відображає зміни в очікуваному доході на підставі економічного середовища, що змінюється. Короткострокові тенденції, більш ймовірно, є результатом поведінки натовпу. Нема причин думати, що довжина короткострокових тенденцій пов'язана з довгостроковою економічною тенденцією.

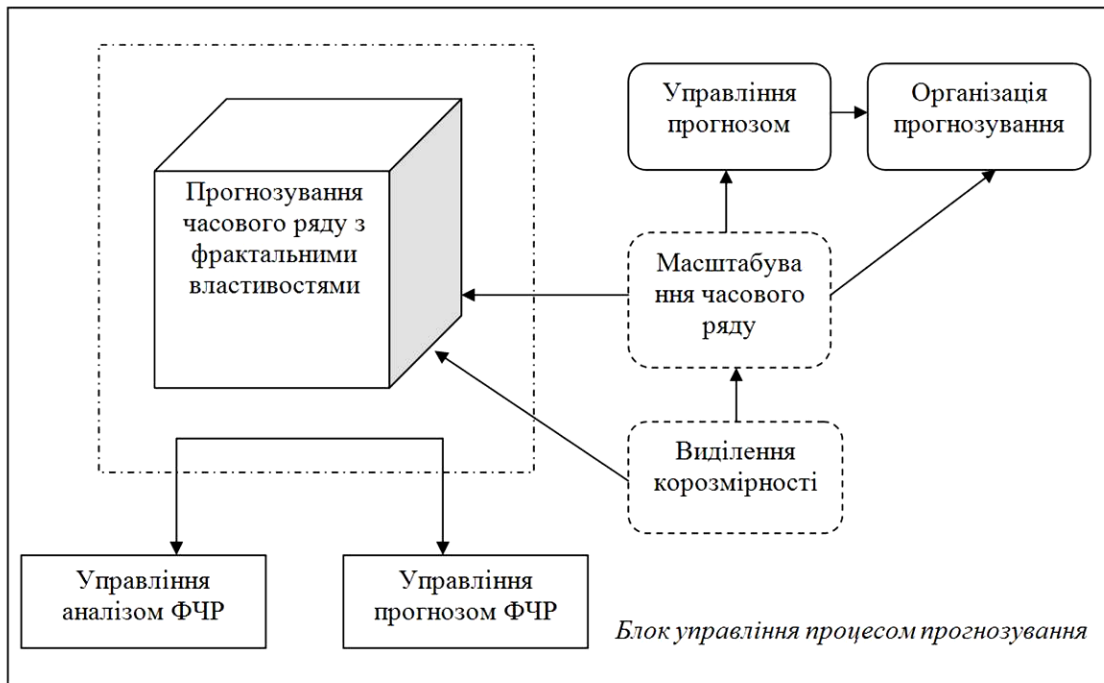


Рис. 3. Місце запропонованої АС в сучасних системах економічного прогнозування

Таким чином, на відміну від гіпотези ефективного ринку, інформація оцінюється згідно з інвестиційним горизонтом інвестора.

Оскільки різні інвестиційні горизонти оцінюють інформацію по-різному, поширення інформації також буде нерівним.

Характеристиками кожного з окремих заходів прогнозу M_i за певний час проведення $t_{M_i}^\pi$ є наступні:

- корозмірність $K_{M_i} \in K, i = \overline{1, m}$;
- пропорційність $P_{M_i} \in P, i = \overline{1, m}$;
- систематичність $S_{M_i} \in S, i = \overline{1, m}$;
- залишок Z_{M_i} .

Загальна формула обчислення рівня прогнозу $H_{M_i}^\pi$, згідно наведеного графічного представлення, має наступний вигляд:

$$H_{M_i}^\pi = f(K_{M_i}, P_{M_i}, S_{M_i}).$$

Будь-який захід M_i створює інформаційну базу з певним коефіцієнтом K (за кожною з компонент $K_{M_i}, P_{M_i}, S_{M_i}$), яка є інформаційним полем для інших заходів прогнозу

У разі комплексного прогнозу часових рядів з фрактальними властивостями, спостерігається злиття кожного з компонент $K_{M_i}, P_{M_i}, S_{M_i}$) з наступним та передуючим, за умови, що $i > 1$.

Описаний процес трансформується у залежність $H_{M_i}^{\Pi}$ відповідно до значень $K_{M_i/M}, P_{M_i/M}, S_{M_i/M}$.

З урахуванням цих факторів, зазначений вираз прийме вигляд:

$$H_{M_i/M}^{\Pi} = f(K_{M_i/M}, P_{M_i/M}, S_{M_i/M}). \quad (1)$$

Отже, враховуючи показники інформаційної бази, складеної на основі попередньо проведених заходів прогнозуванні часових рядів з фрактальними властивостями з множини M та приймаючи до уваги дію матриць суміжності коефіцієнтів взаємного впливу, які формує кожен захід прогнозу M_i , запишемо:

$$K_{M_i/M} = K_{M_i} + \sum_{j=1}^m K_{M_j} B_{K_{M_j}} \quad (2)$$

$$P_{M_i/M} = P_{M_i} + \sum_{j=1}^m P_{M_j} B_{P_{M_j}} \quad (3)$$

$$S_{M_i/M} = S_{M_i} + \sum_{j=1}^m S_{M_j} B_{S_{M_j}} \quad (4)$$

З урахуванням визначення окремих коефіцієнтів відповідно до матриць суміжності, попередній вираз запишемо як:

$$Q_{M_i/M}^{\Pi} = f\left(K_{M_i} + \sum_{j=1}^m K_{M_j} B_{K_{M_j}}, P_{M_i} + \sum_{j=1}^m P_{M_j} B_{P_{M_j}}, S_{M_i} + \sum_{j=1}^m S_{M_j} B_{S_{M_j}}\right). \quad (5)$$

Використовуючи вирази 2-5 можна визначити рівень прогнозування часових рядів з фрактальними властивостями $Q_{M_i/M}^{\Pi}$ з урахуванням інформаційної бази, отриманої від проведених раніше заходів прогнозу з множини M для будь-якого заходу M_i при плануванні процесу прогнозування. В деяких випадках можемо спостерігати, що в процесі складання плану прогнозування часових рядів з фрактальними властивостями без урахування моделі, що відповідає процесу формування аналізу, значення рівня прогнозу Q^{Π} є нижчим, ніж мінімальне Q_{\min}^{Π} (рис. 4).

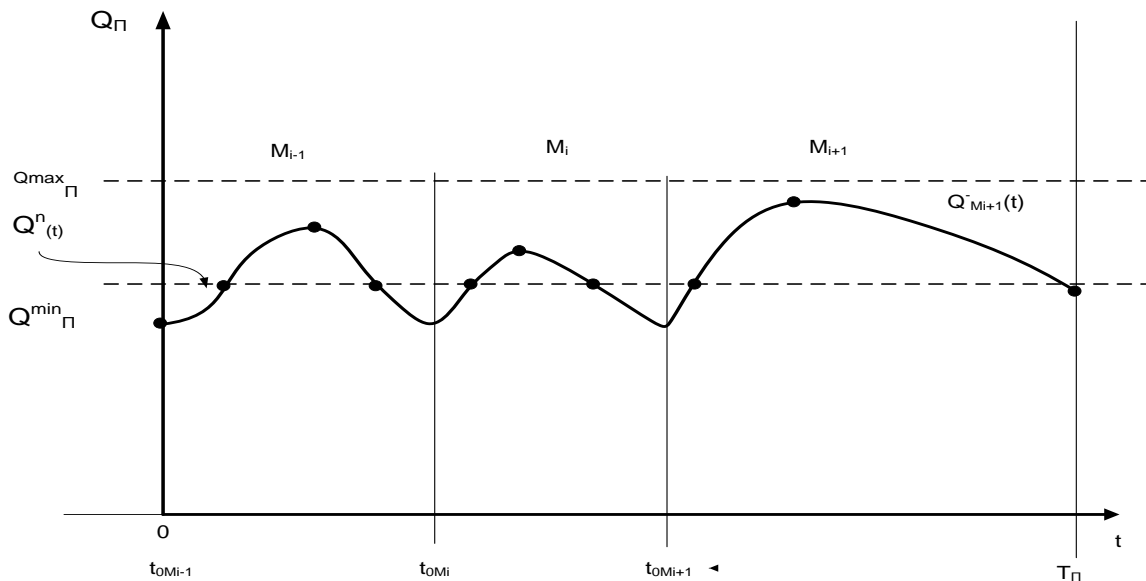


Рис. 4. Зміна рівня прогнозу Q^{Π} як функція від часу

Рівні прогнозу визначаються на основі використання запропонованої моделі формування прогнозу часових рядів з фрактальними властивостями залежно від часу – в загальному випадку: модель накопичення і втрати інформації [28].

Адаптуємо апарат теоретичних понять до термів лінгвістичного моделювання. Кожен захід M_i у плані прогнозу має час початку $t_{M_i}^0$ та тривалість заходу аналізу – час $t_{M_i}^{\Pi}$. Після проведення прогнозування її рівень збільшується на величину $Q_{M_i}^{\Pi}$ за час $t = t_{M_i}^0 + t_{M_i}^{\Pi}$. Зростання рівня прогнозу $Q_{M_i}^{\Pi}$ можна описати функцією $Q_{M_i}^{\Pi+}$. Зрозуміло, що після виконання заходу прогнозування M_i рівень достовірності прогнозу $Q_{M_i}^{\Pi}$ починає знижуватися, що відображається функцією втрат $Q_{M_i}^{\Pi-}$ (рис. 5).

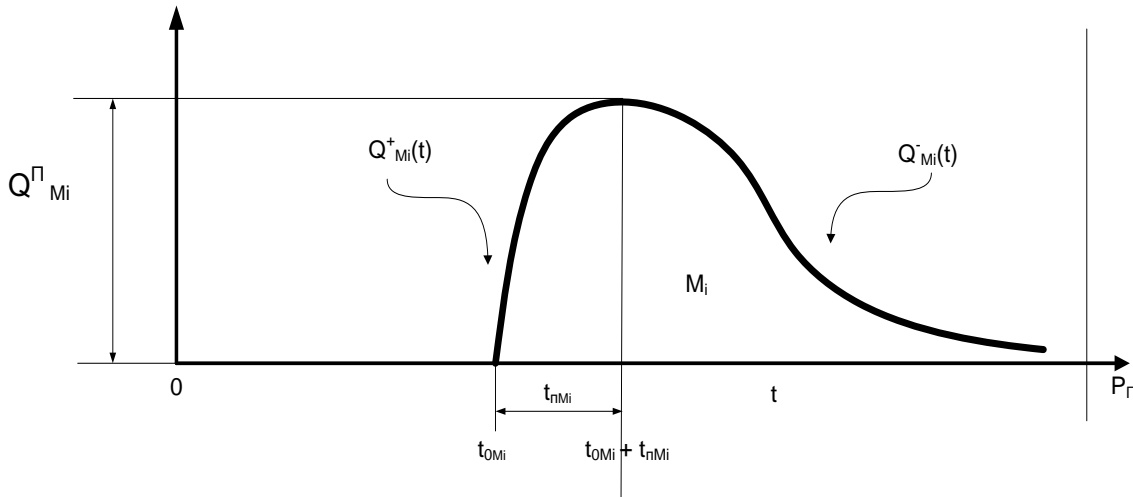


Рис. 5. Рівень достовірності прогнозу Q^{Π} часових рядів з фрактальними властивостями як функція від часу

Математична складова визначення рівня $Q_{M_i}^{\Pi}$ залежно від t :

$$Q_{M_i}^{\Pi}(t) = \begin{cases} 0, & t = t_{M_i}^0 \\ Q_{M_i}^{\Pi+}, & \text{якщо } t_{M_i}^0 < t < (t_{M_i}^0 + t_{M_i}^{\Pi}) \\ Q_{M_i}^{\Pi-}, & \text{якщо } t > (t_{M_i}^0 + t_{M_i}^{\Pi}) \end{cases} \quad (6)$$

Отже, з наведеного вище виразу (6), зробимо наступний висновок. Під час проведення M_i заходу прогнозу, рівень достовірності прогнозу Q^{Π} зростає в певний період часу $t = t_{M_i}^0$ за законом функції приросту $Q_{M_i}^{\Pi+}$ потім же Q^{Π} зменшується відповідно до функції $Q_{M_i}^{\Pi-}$.

Коли для кожного з заходів прогнозу M_i відомі функції $Q_{M_i}^{\Pi+}$, $Q_{M_i}^{\Pi-}$ і тривалість заходу $t_{M_i}^{\Pi}$, доволі просто визначити за кожним з елементів оптимальний час початку $t_{M_i}^0$, коли виконується умова $Q_{\min}^{\Pi} \leq Q^{\Pi} \leq Q_{\max}^{\Pi}$, або як мінімум $Q_{\min}^{\Pi} \leq Q^{\Pi} \leq$. При плануванні заходу обов'язково рівень $Q_{M_i}^{\Pi}$ для кожного M_i заходу вираховувати з раніше отриманих даних, що складають інформаційну базу і безпосередньо здійснюють вплив на ефективність його проведення. Такий алгоритм дозволяє підвищити рівень прогнозу часових рядів з фрактальними властивостями без зростання витрат на проведення кожного з заходів прогнозу M_i [27].

Стає цілком зрозумілим, що рівень $Q_{M_i}^{\Pi} / M$ прогнозу M_i заходів з урахуванням інформації від попередньо проведених заходів буде вищим, ніж, якщо ігнорувати отримані на попередніх етапах дані. Отже, збільшиться проміжок часу до наступного заходу в плані прогнозу. Приходимо до висновку, що $Q_{M_i}^{\Pi}$ потрібно розраховувати як $Q_{M_i}^{\Pi} / M$.

Таким чином, модель синтезу плану аналізу та прогнозування часових рядів з фрактальними властивостями, що пропонується, дозволяє адаптувати процес планування прогнозу фінансових часових рядів до зміни завдань, рівня сформованості початкового ряду.

Висновки. У роботі представлено результати прогнозування за фактичними даними на основі запропонованої моделі прогнозування фінансових часових рядів за допомогою лінгвістичного моделювання. Наведені результати розрахунків показників якості прогнозів для лінгвістичної моделі. З наведених результатів видно, що запропонована модель дає кращий прогноз за всіма показниками.

Розроблена методика кількісного оцінювання і візуалізації результатів оцінювання груп (підгруп) ознак, яка дозволяє порівнювати показники і розраховувати узагальнений показник. Для кращого аналізу кожен показник / захід (корозмірність, масштабування часового ряду, систематичність, пропорційність, тощо) розподілений на модулі, які покликані сформулювати загальний рівень прогнозу.

Здійснено проектування програми для аналізу та прогнозування фінансових часових рядів за допомогою лінгвістичного моделювання, яка дозволяє здійснювати виконання аналізу фінансових часових рядів різного виду; автоматизацію процесу виведення результату; автоматизацію процесу проведення аналізу та прогнозування фінансових часових рядів за допомогою лінгвістичного моделювання. Модель синтезу плану аналізу та прогнозування часових рядів з фрактальними властивостями, що пропонується, дозволяє адаптувати процес планування прогнозу фінансових часових рядів до зміни завдань, рівня сформованості початкового ряду.

Список використаних джерел:

1. Видмант О.С. Прогнозирование финансовых временных рядов с использованием рекуррентных нейронных сетей LSTM // Общество: политика, экономика, право, 2018. – № 5. – С.63-66.
2. Кілючицька Т.В. Генезис деяких понять нелінійної динаміки в працях вітчизняних вчених (початок ХХ ст.) // Збірник наукових праць "Вісник НТУ "ХПІ": Історія науки і техніки №10. – Вестник НТУ "ХПИ", 2013. – ISBN 2079-0074
3. Коротун С.І., Каропа Г.М. Основні поняття і категорії математичної теорії хаосу // Вісник НУВГП. Економічні науки: зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2012. – Вип. 3(59). – С. 99-107.
4. Ляшенко О.І., Крицун К.І. Дослідження динаміки фондового індексу ПФТС на фінансовому ринку України на різних часових вікнах з 2001 по 2016 роки // Економіко-математичне моделювання соціально-економічних систем. – 2016. – Вип. 21. – С. 21-34.
5. Рогоза М.Є., Рамазанов С.К., Мусаєва Е.К. Нелінійні моделі та аналіз складних систем: навч. посібник 2 ч. – Полтава: РВВ ПУЕТ, 2011. – Ч. 1. – 300 с.
6. Мочерний С.В. Економічна теорія: навч. посіб. – К.: ВЦ «Академія», 2009. – 640 с.
7. Шапошнікова І.О. Аналіз часових рядів первинного ринку житлової нерухомості м. Києва // Економічний вісник університету, 2018. – Випуск № 36/1. – С. 140-147.
8. Трофименко І.В. Модель прогнозування показника надійності судових агрегатів // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2018. – № 1(55). – С. 140-145.
9. Гардер С.Є., Корніль Т.Л. Фрактальний аналіз та прогнозування тенденції фінансового часового ряду // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях, 2018. – № 3 (1279). – С. 37-40.
10. Бідюк П.І., Савенков О.І., Баклан І.В. Часові ряди: моделювання і прогнозування: монографія. – К.: ЕКМО, 2003. – 144 с
11. Лопатин А.К., Черненко О.Б. Системный анализ экономических циклов Украины, России, Германии, США на фоне мирового финансового кризиса 2007 – 2009 г.г. (статистические аспекты) // Искусственный интеллект. – 2010. – № 3. – С. 494-500.
12. Лопатин А.К., Черненко О.Б. Статистические свойства финансового рынка Украины // Актуальные проблемы экономики. – 2006. – № 10 (64). – С. 136-149.
13. Берзлев О.Ю. Сучасний стан інформаційних систем прогнозування часових рядів // Управління розвитком складних систем. – 2013. – № 1. – С. 78-82.
14. Нечипоренко А.С. Моделі, методи та інформаційні технології раннього виявлення розладань в нестационарних квазіперіодичних процесах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.06 "Інформаційні технології", Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків, 2018. – 39 с.
15. Лыков И.А., Охотников С.А. Влияние изменения функции Херста на возможности экономического прогнозирования // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10. – С. 1539–1544.
16. Матвійчук А.В. Штучний інтелект в економіці: нейронні мережі, нечітка логіка: монографія. – К.: КНЕУ, 2011. – 439 с.

17. Лук'яненко І.Г., Жук В.М. Аналіз часових рядів. Побудова Var і Vecm моделей з використанням пакета E.Views 6.0. – К.: НУКМА, 2013. – 176 с.
18. Koop G., Korobilis D. Bayesian Multivariate Time Series Methods for Empirical Macroeconomics. – Now Publishers Inc, 2010. – 94p.
19. Vercellis Carlo. Business intelligence: data mining and optimization for decision making. – John Wiley & Sons, Ltd., Publication, 2009. – 417p.
20. Pandit S.M., Wu, S.-M. Time series and system analysis with applications. – New York: Wiley, 1983. – 586p.
21. Глотов Є.О., Попова О.М. Динаміка виробництва електроенергії в Україні та її прогнозування // Бізнес Інформ. – 2018. – №1. – С. 152–160.
22. Чайковська І.І. Застосування сучасних інформаційних технологій для моделювання економічних процесів на основі фрактального аналізу // Університетські наукові записки. – 2014. – № 1. – С. 378–387.
23. Найман Э. Расчет показателя Херста с целью выявления трендовости (персистентности) финансовых рынков и макроэкономических индикаторов // Економіст. – 2009. – № 10. – С. 25–29.
24. Дубницький В.Ю. Вибір методу прогнозування вартості цінних паперів з урахуванням фрактальної вимірності ряду спостережень // Бізнес Інформ: наук. журнал. – Харків: ХНЕУ, 2011. – № 7(1). – С. 120–121.
25. Крицун К.І. Мультифрактальний аналіз динаміки фондових індексів України: ПФТС ТА UX // Ефективна економіка. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/2_2016/38.pdf
26. Imanov K.J., Fuzzy Models of Quality Assessment of Social Systems, Lambert Academic Publishing, 2013.
27. Мандельброт Б. Фракталы, случай и финансы. – М.: Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2004.
28. Ashford, Oliver M., Charnock, H., Drazin, P. G., Hunt, J. C. R. Fractals // The Collected Papers of Lewis Fry Richardson / под ред. Ashford, Oliver M.. – Cambridge University Press, 1993. – Vol. 1, «Meteorology and numerical analysis». – P. 45-46. – 1016 p.

Стаття надійшла до редакції 18.03.2019

УДК 539.3

В.М. Неміш, К.М. Березька*Тернопільський національний економічний університет***РОЗТЯГ-СТИСК ІЗОТРОПНОГО СЕРЕДОВИЩА З НЕКАНОНІЧНИМИ ПОРОЖНИНАМИ**

Проведено дослідження напруженого стану ізотропного середовища з неканонічними порожнинами у вигляді правильних шестикутників обертання з заокругленими кутами. Одержані аналітичні та числові результати для нормальних напружень як на поверхнях порожнин, так і в їх околах. Локальність поля напружень показано в точках з найменшим радіусом кривизни. Дослідження концентрації напружень проводились наближеним методом збурення форми границі.

Ключові слова: напруження, ізотропне середовище, неканонічні порожнини, метод збурення форми границі, поліноми Лежандра, коефіцієнт Пуассона.

Рис. 5. Форм. 19. Літ. 8.

В.Н. Неміш, Е.Н. Березская**РАСТЯЖЕНИЕ-СЖАТИЕ ИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ С НЕКАНОНИЧЕСКИМИ ПОЛОСТЯМИ**

Проведено исследование напряженного состояния изотропной среды с неканоническими полостями в виде правильных шестигульников вращения с скругленными углами. Получены аналитические и числовые результаты для нормальных напряжений как на поверхностях полостей, так и в их окрестностях. Локальность поля напряжений показано в точках с наименьшим радиусом кривизны. Исследование концентрации напряжений проводилось приближенным методом возмущения формы границы.

Ключевые слова: напряжение, изотропная среда, неканонические полости, метод возмущения формы границы, полиномы Лежандра, коэффициент Пуассона.

V.N. Nemish, K.M. Berezka**STRETCHING-COMPRESSION OF THE ISOTROPIC MEDIUM WITH NON-CANONICAL COCAVITIES**

The stress state of an isotropic medium with non canonical cocavities in the form of regular hexagons rotation with rounded corners is studied. Analytical and numerical results for normal stresses both on the surfaces of the cocavities and in their vicinity are obtained. The locality of the stress field is shown at points with the smallest radius of curvature. The stress concentration is studied by boundary shape perturbation method.

Keywords: stress state, isotropic medium, non-canonical cocavities, boundary shape perturbation method, Legendre polynomials, Poisson's ratio ratio.

Постановка проблеми. Дослідження напруженого стану трьохмірних деформівних тіл є однією із нелегких просторових задач математичної теорії пружності. Більшість точних розв'язків таких граничних задач одержано методом відокремлення змінних та його різними розгалуженнями: метод інтегральних перетворень, метод власних векторних функцій, метод однорідних розв'язків та ін. Розглядаючи задачі, в яких точні розв'язки одержати неможливо, виникає потреба в розробці наближених методів. До таких класів відносяться просторові крайові задачі математичної теорії пружності про дослідження концентрації напружень для неканонічних областей.

Аналіз останніх досліджень. Найбільш ефективним наближеним методом розв'язування конкретних просторових крайових задач про напружений стан деформівних тіл з різними граничними поверхнями є варіант методу збурення форми границі розробленого і апробованого в навчальному посібнику О. М. Гузя і Ю. М. Неміша [1]. В статтях [2, 3] наближений метод використовується при розв'язуванні крайових задач математичної теорії пружності для фігур, близьких до еліпсоїда обертання. В працях [4, 5, 6] проведено дослідження напруженого стану однорідного ізотропного середовища з замкнутими конічною та циліндричними порожнинами і включеннями. Розподіл максимальних напружень показано як на поверхнях, так і в їх околах. Напружений стан ізотропного середовища з включеннями у формі правильних шестикутників обертання з заокругленими кутами розглянуто в роботі [7].

Мета роботи. Дослідити напружений стан однорідного ізотропного середовища з неканонічними порожнинами у вигляді правильних шестикутників обертання з заокругленими кутами при всесторонньому розтязі-стиску.

Постановка завдань. Розглядається пружне однорідне ізотропне середовище ослаблене неканонічними порожнинами у вигляді правильних шестикутників обертання з заокругленими

кутами. Напружено-деформівний стан досліджується наближеним методом збурення форми границі.

Викладення основного матеріалу. Нехай деяка поверхня S утворена обертанням гіпотрохідної кривої Γ навколо вісі oz . В довільній меридіональній площині zo R функція

$$z + iR = r_0^{-1} \omega(\zeta) = \zeta + \varepsilon \zeta^{-k} \quad (\zeta = \rho^{i\gamma}) \tag{1}$$

конформно відображає зовнішність одиничного круга площини ζ на зовнішність контура Γ . Лінійна величина r_0 характеризує абсолютні розміри контура Γ . Значенням $k=5$, $\varepsilon = \pm \frac{1}{15}$ відповідають правильні шестикутники з заокругленими кутами, параметричні рівняння яких мають вигляд

$$\begin{aligned} z = r_0^{-1} \operatorname{Re} \omega(\zeta) \Big|_{\rho=1} &= \cos \gamma + \varepsilon \cos 5\gamma, \\ R = r_0^{-1} \operatorname{Im} \omega(\zeta) \Big|_{\rho=1} &= \sin \gamma + \varepsilon \sin 5\gamma. \end{aligned} \tag{2}$$

Тут R - відстань від довільної точки контура порожнини S , яка відповідає координатній поверхні $\rho = 1$, до вісі oz ($d_1 = 1 + |\varepsilon|, d_2 = 1 - |\varepsilon|$ відстані від центра O , до точок A і B). Просторові фігури цих ліній показані на рис. 1, 2

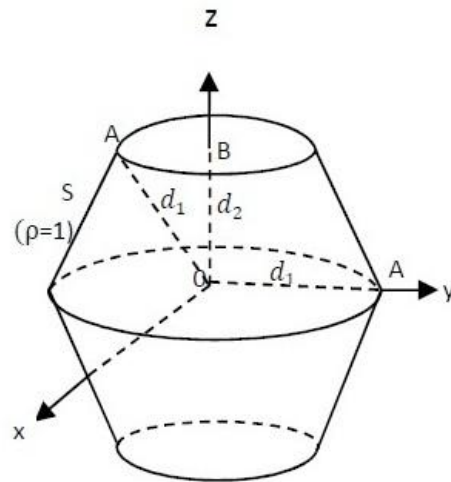
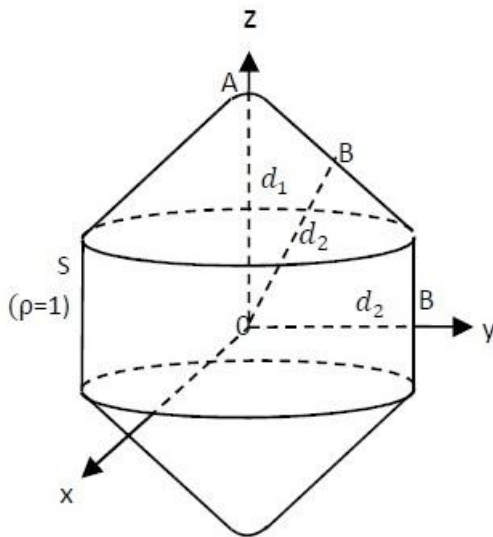


Рис. 1 Неканонічна порожнина $k = 5, \varepsilon = \frac{1}{15}$ Рис. 2 Неканонічна порожнина $k = 5, \varepsilon = -\frac{1}{15}$

Згідно з методом найменших квадратів представим компоненти, $\sigma_\rho, \sigma_\gamma, \sigma_\varphi, \sigma_{\rho\gamma}$ у вигляді рядів за степенями малого параметра ε , тобто

$$\sigma_\rho = \sum_{j=0}^{\infty} \varepsilon^j \sigma_\rho^{(j)}, \dots, \sigma_{\rho\gamma} = \sum_{j=0}^{\infty} \varepsilon^j \sigma_{\rho\gamma}^{(j)}. \tag{3}$$

Використавши формули переходу в сферичній системі координат r, θ, α до відповідних складових в криволінійній ортогональній системі координат ρ, γ, φ , розкладемо компоненти напружень в ряди вигляду (3). Прирівнявши коефіцієнти при однакових степенях параметра ε , одержимо для компонентів j -го наближення рекурентні співвідношення [1].

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{\varrho}^{(j)} \\ \sigma_{\gamma}^{(j)} \end{array} \right\} = \sum_{m=0}^j \Lambda_1^{(j-m)} \left\{ \begin{array}{l} \sigma_r^{(m)} \\ \sigma_{\theta}^{(m)} \end{array} \right\} \pm \Lambda_2^{(j-m)} (\sigma_{\theta}^{(m)} - \sigma_r^{(m)}) \pm \Lambda_3^{(j-m)} \sigma_{r\theta}^{(m)}$$

$$\sigma_{\varphi}^{(j)} = \sum_{m=0}^j \Lambda_1^{(j-m)} \sigma_a^{(m)}; \quad (4)$$

$$\sigma_{\rho\gamma}^{(j)} = \sum_{m=0}^j \left[\Lambda_4^{(j-m)} \sigma_{r\theta}^{(m)} + \frac{1}{2} \Lambda_3^{(j-m)} (\sigma_{\theta}^{(m)} - \sigma_r^{(m)}) \right]$$

Диференціальні оператори $\Lambda_i^{(j)}$ для відображаючої функції (1) в нульовому, першому та другому наближеннях, мають вигляд

$$\Lambda_1^{(0)} = \Lambda_4^{(0)} = 1; \Lambda_2^{(0)} = \Lambda_3^{(0)} = \Lambda_2^{(1)} = 0;$$

$$\Lambda_1^{(1)} = \Lambda_4^{(1)} = \frac{\cos(k+1)\gamma}{\wp^k} \frac{\partial}{\partial \wp} - \frac{\sin(k+1)\gamma}{\wp^{k+1}} \frac{\partial}{\partial \gamma};$$

$$\Lambda_3^{(1)} = \frac{2(k+1)\sin(k+1)\gamma}{\wp^{k+1}}; \Lambda_4^{(2)} = \Lambda_1^{(2)} - 2\Lambda_2^{(2)}; \quad (5)$$

$$\Lambda_1^{(2)} = \frac{1 + \cos 2(k+1)\gamma}{4\wp^{2k}} \frac{\partial^2}{\partial \wp^2} - \frac{\sin 2(k+1)\gamma}{2\wp^{2k}} \frac{\partial^2}{\partial \wp \partial \gamma} \frac{1}{\wp} + \frac{1 - \cos 2(k+1)\gamma}{4\wp^{2k+2}} \left(\frac{\partial^2}{\partial \gamma^2} + \wp \frac{\partial}{\partial \wp} \right);$$

$$\Lambda_2^{(2)} = \frac{(k+1)^2 [1 - \cos 2(k+1)\gamma]}{2\wp^{2k+2}}; \Lambda_3^{(2)} = \frac{(k^2 - 1)\sin 2(k+1)\gamma}{\wp^{2k+2}} +$$

$$+ \frac{(k+1)^2 \sin 2(k+1)\gamma}{\wp^{2k+2}} \frac{\partial}{\partial \wp} - \frac{(k+1) [1 - \cos 2(k+1)\gamma]}{\wp^{2k+2}} \frac{\partial}{\partial \gamma} +$$

$$\frac{(k+1)^2 \sin 2(k+1)\gamma}{\wp^{2k+2}} \frac{\partial}{\partial \wp} - \frac{(k+1) [1 - \cos 2(k+1)\gamma]}{\wp^{2k+2}} \frac{\partial}{\partial \gamma}$$

Компоненти $\sigma_r^{(m)}(\rho, \gamma), \sigma_{\theta}^{(m)}(\rho, \gamma), \sigma_a^{(m)}(\rho, \gamma), \sigma_{r\theta}^{(m)}(\rho, \gamma)$ записуються на основі їх представлень в безрозмірних (віднесених до величини r_0) сферичних координатах, якщо формально замінити r, θ відповідно на ρ, γ , а в довільних постійних поставити індекс (m) В розглянутому випадку для зовнішньої задачі маємо

$$\sigma_r^{(m)}(\wp, \gamma) = \frac{2G}{r_0^2} \sum_{n=0}^{\infty} \left[-\frac{n(n^2 + 3n - 2\nu)}{\wp^{n+1}} C_n^{(m)} + \frac{(n+1)(n+2)}{\wp^{n+3}} D_n^{(m)} \right] P_n(\cos \gamma);$$

$$\sigma_{\theta}^{(m)}(\wp, \gamma) = \frac{2G}{r_0^2} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \left[\frac{n(n^2 - 2n - 1 + 2\nu)}{\wp^{n+1}} C_n^{(m)} - \frac{(n+1)^2}{\wp^{n+3}} D_n^{(m)} \right] P_n(\cos \gamma) - \right.$$

$$\left. - \left[\frac{-n+4-4\nu}{\wp^{n+1}} C_n^{(m)} + \frac{1}{\wp^{n+3}} D_n^{(m)} \right] \operatorname{ctg} \gamma \frac{dP_n(\cos \gamma)}{d\gamma} \right\}$$

$$\sigma_a^{(m)}(\wp, \gamma) = \frac{2G}{r_0^2} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \left[\frac{n(n+3-4\nu+2\nu)}{\wp^{n+1}} C_n^{(m)} - \frac{n+1}{\wp^{n+3}} D_n^{(m)} \right] P_n(\cos \gamma) + \right.$$

$$\left. + \left[\frac{-n+4-4\nu}{\wp^{n+1}} C_n^{(m)} + \frac{1}{\wp^{n+3}} D_n^{(m)} \right] \operatorname{ctg} \gamma \frac{dP_n(\cos \gamma)}{d\gamma} \right\}; \quad (6)$$

$$\sigma_{r\theta}^{(m)}(\rho, \gamma) = \frac{2G}{r_0^2} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{n^2 - 2 + 2\nu}{\rho^{n+1}} C_n^{(m)} - \frac{n+2}{\rho^{n+3}} D_n^{(m)} \right] \frac{dP_n(\cos \gamma)}{d\gamma}.$$

Тут $P_n(\cos \gamma)$ - поліноми Лежандра; $C_n^{(m)}$, $D_n^{(m)}$ - довільні постійні, які знаходяться із граничних умов; ν – коефіцієнт Пуассона; G – модуль зсуву.

Для кожного конкретного значення n компоненти $\sigma_{\theta}^{(m)}(\rho, \gamma), \sigma_a^{(m)}(\rho, \gamma)$ піввідношень (6) можуть бути представлені розкладом тільки за поліномами Лежандра $P_n(\cos \gamma)$. Для цього використаємо формулу

$$\operatorname{ctg} \gamma \frac{dP_n}{d\gamma} = -nP_n - (2n-3)P_{n-2} - (2n-7)P_{n-4} - (2n-11)P_{n-6} - P'_{n-7} \quad (7)$$

яка впливає із рекурентних співвідношень [8]

$$nP_n - \cos \gamma P'_n + P'_{n-1} = 0; P'_{n+1} - P'_{n-1} = (2n+1)P_n, \quad (8)$$

Тут штрихом позначена похідна по $\cos \gamma$.

Припустимо, що однорідне ізотропне середовище з неканонічними порожнинами обертання у вигляді замкнутих правильних шестикутників обертання з заокругленими кутами (рис. 1, 2) знаходиться «на нескінченності» під дією рівномірних всесторонніх сил інтенсивності p (значення $p > 0$ відповідає розтягу, а $p < 0$ – стиску)

$$\sigma_x^{(\infty)} = \sigma_y^{(\infty)} = \sigma_z^{(\infty)} = p(\sigma_x^{(\infty)} = \sigma_y^{(\infty)} = \sigma_z^{(\infty)} = 0). \quad (9)$$

Граничні умови в довільному наближенні на вільних від напружень поверхнях розглянутих порожнин ($\rho=1$) будуть

$$(\hat{\sigma}_{\rho}^{(j)} + \sigma_{\rho}^{(j)})_{\rho=1} = 0; (\hat{\sigma}_{\rho\gamma}^{(j)} + \sigma_{\rho\gamma}^{(j)})_{\rho=1} = 0. \quad (10)$$

Тут $\hat{\sigma}_{\rho}^{(j)}, \hat{\sigma}_{\rho\gamma}^{(j)}$ – відомі величини основного напруженого стану середовища (без порожнин).

Із співвідношень (4) – (6) і крайових умов (10) одержимо

$$\frac{2G}{r_0^2} \sum_{n=0}^{\infty} \left[-n(n^2 + 3n - 2\nu)C_n^{(m)} + (n+1)(n+2)D_n^{(m)} \right] P_n(\cos \gamma) = \Phi^{(m)}(\nu, \gamma);$$

$$\frac{2G}{r_0^2} \sum_{n=0}^{\infty} \left[(n^2 - 2 + 2\nu)C_n^{(m)} - (n+2)D_n^{(m)} \right] \frac{dP_n(\cos \gamma)}{d\gamma} = \Psi^{(m)}(\nu, \gamma), \quad (11)$$

де $\Phi^{(m)}(\nu, \gamma), \Psi^{(m)}(\nu, \gamma)$ – відомі функції, які можуть бути представлені у вигляді

$$\Phi^{(m)}(\nu, \gamma) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n^{(m)}(\nu) P_n(\cos \gamma); \Psi^{(m)}(\nu, \gamma) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n^{(m)}(\nu) \frac{dP_n(\cos \gamma)}{d\gamma}. \quad (12)$$

Коефіцієнти $a_n^{(m)}(\nu), b_n^{(m)}(\nu)$ знаходяться за формулами:

$$a_n^{(m)}(\nu) = \frac{2n+1}{2} \int_0^{\pi} \Phi^{(m)}(\nu, \gamma) P_n(\cos \gamma) \sin \gamma d\gamma; \quad (13)$$

$$b_n^{(m)}(\nu) = \frac{2n+1}{2n(n+1)} \int_0^{\pi} \Psi^{(m)}(\nu, \gamma) \frac{dP_n(\cos \gamma)}{d\gamma} \sin \gamma d\gamma;$$

Замітимо, що функції $\Phi^{(m)}(\nu, \gamma)$ містять добутки $\cos k\gamma P_n(\cos \gamma)$, $\sin k\gamma \frac{d P_n(\cos \gamma)}{d\gamma}$, $\cos k\gamma \frac{d^2 P_n(\cos \gamma)}{d\gamma^2}$, а функції $\Psi^{(m)}(\nu, \gamma)$ вирази $\sin k\gamma P_n(\cos \gamma)$, $\sin k\gamma \frac{d^2 P_n(\cos \gamma)}{d\gamma^2}$, $\cos k\gamma \frac{d^2 P_n(\cos \gamma)}{d\gamma^2}$. Значить, для одержання представлень (12) потрібно попередньо використати розклади тільки за поліномами Лежандра або їх похідних, використавши співвідношення (7) і (8).

Підставивши вирази (12) у рівняння (11) після прирівнювання коефіцієнтів при однакових поліномах Лежандра і їх похідних, одержимо систему рівнянь, із якої знаходимо

$$C_n^{(m)} = -\frac{a_n^{(m)}(\nu) + (n+1)b_n^{(m)}(\nu)}{2}; D_0^{(m)} = \frac{a_0^{(m)}}{2};$$

$$D_n^{(m)} = \frac{1}{n+2} \left[(n^2 - 2 + 2\nu)C_n^{(m)} - \frac{r_0^2}{2G} b_n^{(m)}(\nu) \right] (n \geq 1). \quad (14)$$

Таким чином, вихідна гранична задача математичної теорії пружності для неканонічних поверхонь формально звелась до послідовності крайових задач для сферичних поверхонь.

Якщо розглянуті неканонічні порожнини вільні від напружень, то згідно з граничними умовами (10) одержимо

$$\hat{\sigma}_\rho^{(0)} = \hat{\sigma}_\gamma^{(0)} = \hat{\sigma}_\varphi^{(0)} = p; \hat{\sigma}_{\rho'}^{(0)} = 0; \hat{\sigma}_\rho^{(j)} = \hat{\sigma}_\gamma^{(j)} = \hat{\sigma}_\varphi^{(j)} = \hat{\sigma}_{\rho'}^{(j)} = 0 (j \geq 1). \quad (15)$$

Для напружень, з врахуванням j наближень, маємо вирази [1]

$$\sigma_i^{*(j)} = \sigma_i^{*(j-1)} + \varepsilon^j \sigma_i^{(j)} (i = \rho, \gamma, \varphi). \quad (16)$$

Тут $\sigma_i^{*(0)} = \hat{\sigma}_i^{(0)} + \sigma_i^{(0)}$, зокрема

$$\frac{\sigma_\rho^{*(0)}}{p} = 1 - \frac{1}{\rho^3}; \frac{\sigma_\gamma^{*(0)}}{p} = \frac{\sigma_\varphi^{*(0)}}{p} = 1 + \frac{1}{2\rho^3}; \frac{\sigma_{\rho'}^{*(0)}}{p} = 0. \quad (17)$$

Компоненти (17) відповідають точному розв'язку задачі для ізотропного середовища зі сферичною порожниною, зокрема на її поверхні коефіцієнти концентрації напружень рівні

$$\frac{\sigma_\gamma^{*(0)}}{p} \Big|_{\rho=1} = \frac{\sigma_\varphi^{*(0)}}{p} \Big|_{\rho=1} = 1,5. \quad (18)$$

При знаходженні компонентів напружень в наступних наближеннях задача значно ускладнюється. Аналітична структура для нормальних напружень, згідно з формулою (16) при $\nu = 0,3$, така :

$$\frac{\sigma_i^{*(2)}}{p} \Big|_{\substack{\rho=1 \\ \varepsilon=\pm\frac{1}{15}}} = \sum_{t=0}^6 a_{2t}(\nu) P_{2t}(\cos \gamma); \frac{\sigma_i^{*(2)}}{p} \Big|_{\substack{\gamma=0 \\ \varepsilon=\frac{1}{15}}} = 1 + \sum_{t=0}^6 b_{2t}(\nu) \rho^{-2t-3}, \quad (19)$$

де $a_{2t}(\nu), b_{2t}(\nu)$ – відомі вирази. Аналогічний вигляд мають напруження $\frac{\sigma_i^{*(2)}}{p}$ при

$$\gamma = \frac{\pi}{3} (\varepsilon = \frac{1}{15}); \gamma = \frac{\pi}{6} (\varepsilon = -\frac{1}{15}); \gamma = \frac{\pi}{2} (\varepsilon = -\frac{1}{15}).$$

Розподіл напружень вздовж четверті меридіальних перерізів неканонічних порожнин у вигляді правильних шестикутників обертання з заокругленими кутами показані на рис. 3 ($\nu = 0,3$; $\varepsilon = \frac{1}{15}$) і рис. 4 ($\nu = 0,3$; $\varepsilon = -\frac{1}{15}$). Штрихові лінії відповідають компонентам напруженого стану в кульовому, а суцільні – в другому наближеннях.

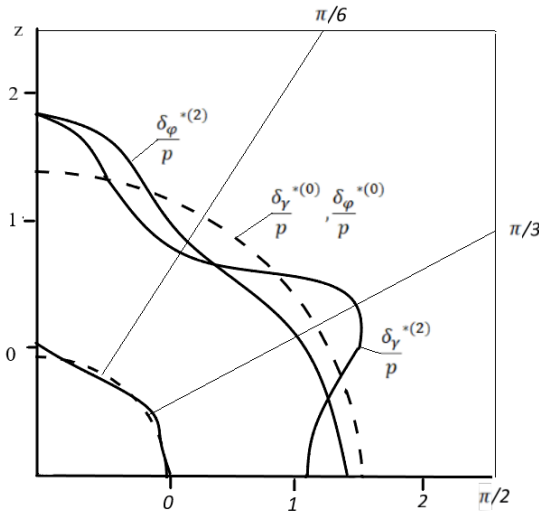


Рис. 3. Розподіл напружень вздовж чверті меридіонального перерізу порожнини ($k=5$; $\varepsilon=1/15$).

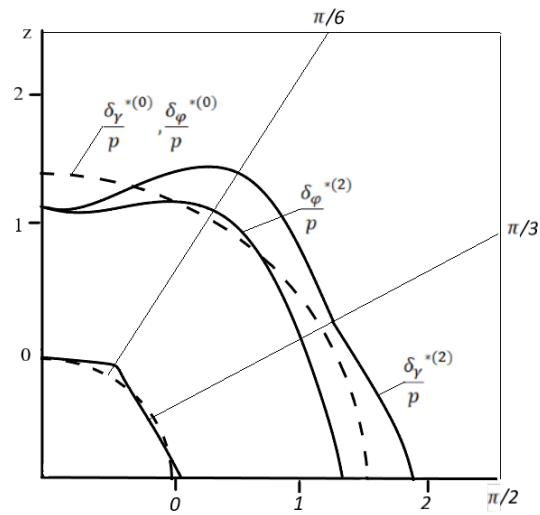


Рис. 4. Розподіл напружень вздовж чверті меридіонального перерізу порожнини ($k=5$; $\varepsilon=-1/15$).

Криві на рис. 5 побудовані для $\gamma = \frac{\pi}{6}$; $\nu = 0,3$; $\varepsilon = -\frac{1}{15}$ (штрихова лінія відповідає напруженням $\frac{\sigma_\gamma^{*(2)}}{p}, \frac{\sigma_\phi^{*(2)}}{p}$ при $\gamma = 0$; $\nu = 0,3$; $\varepsilon = \frac{1}{15}$). Графіки показують, що при незначній відстані від поверхні порожнин концентрація напружень різко зменшується. Так, максимальне значення відносних відхилень $\frac{|\sigma_l^{*(2)} - \hat{\sigma}_l|}{\hat{\sigma}_l} \cdot 100\%$ ($l = \gamma, \phi$), тобто нормальних напружень від відповідних значень для середовища без порожнини, не перевищує 5,8% при $\rho = 2$ і 1,7% при $\rho = 3$. Характер зміни напружень при $\gamma = \frac{\pi}{3}, \varepsilon = \frac{1}{15}$ і $\gamma = \frac{\pi}{2}, \varepsilon = -\frac{1}{15}$ – аналогічний.

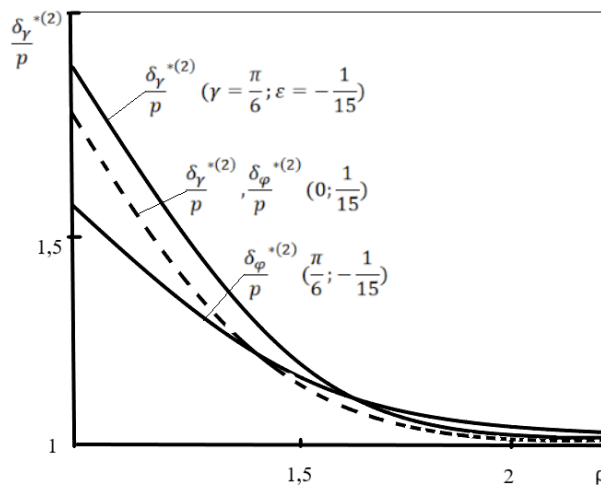


Рис. 5. Розподіл напружень в околі неканонічних порожнин

Висновки. 1. Коефіцієнти концентрації максимальних напружень на розглянутих неканонічних порожнинах в точках з найменшим радіусом кривизни суттєво відрізняються від відповідних значень у випадку сферичних граничних поверхонь.

2. Напружений стан в околі порожнин носить локальний характер, тобто при незначному віддаленні від поверхні максимальні напруження різко падають і наближаються до відповідних значень в деформівному середовищі без концентраторів напружень.

Список використаних джерел:

1. Гузь А. Н. Методы возмущений в пространственных задачах теории упругости / А. Н. Гузь, Ю. Н. Немиш. – Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1982. – 352с.
2. Подільчук Ю. Н. Приближенный метод решения краевых задач теории упругости для фигур, близких к эллипсоиду вращения / Ю. Н. Подільчук // Прикладная механика. – 1970.- Т.VI. - №9. – С. 23-30.
3. Подільчук Ю. М. Про наближений метод розв'язування крайових задач теорії пружності для фігур, близьких до еліпсоїда обертання / Ю. М. Подільчук, А. М. Кириченко // ДАН УРСР. – 1970. – Серія А. - №7. – С. 650-655.
4. Немиш Ю. Н. Распределение напряжений около неканонических поверхностей / Ю. Н. Немиш, В. Н. Немиш, П. Ф. Ярема // Прикладная механика. – 1971. – Т.7. - №12. – С. 41-50.
5. Немиш В. Н. Пространственная деформация изотропной среды с неканоническими включениями / В. Н. Немиш // Математическая физика. – 1976. - №19. – С. 104-109.
6. Неміш В. М. Напружений стан ізотропного середовища з неканонічними поверхностями // Міжнародна наукова конференція. Шості Боголюбовські читання. Чернівці, 26-30 серпня 2003 р. Матеріали конф. – Київ, 2003. – С. 159.
7. Неміш В. М., Березька К. М. Напружений стан ізотропного середовища з неканонічними включеннями // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». – ЛНТУ. – Вип. № 62. – Луцьк, 2018. – С. 169-174.
8. Гобсон Е. В. Теория сферических и эллипсоидальных функций / Гобсон Е. В. – М., ИЛ, 1952. – 476 с.

Рецензенти:

Добротвор Ігор Григорович, професор кафедри економічної кібернетики Тернопільського національного економічного університету, доктор технічних наук, професор.

Гром'як Роман Сильвестрович, доцент кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя, кандидат фізико-математичних наук, доцент.

Стаття надійшла до редакції 12.02.2019

УДК: 666.972.16

Ю.Л. Новицький, Г.Я. Шевчук, Н.І. Топилко, С.В. Топилко*Національний університет «Львівська політехніка», Інститут будівництва та інженерії довкілля***ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТА ЕКОНОМІЧНОГО ЕФЕКТИВІВ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ТОНКОСТІННИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ВИРОБІВ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ ДОБАВОК МОДИФІКАТОРІВ**

Доведена ефективність використання добавок модифікаторів при виготовленні тонкостінних густоармованих залізобетонних виробів. Встановлено покращення реологічних властивостей бетонних сумішей, зниження вдвічі енергозатрат на ТВО, підвищення механічної міцності бетону на 15-40% в усі терміни твердіння при зниженні водоцементного відношення. Економія цементу становить до 10% на 1 м³ бетонної суміші при збереженні водоцементного відношення та марки суміші за рухливістю.

Ключові слова: залізобетонні вироби, модифікуюча добавка, міцність, тепло-вологісна обробка (ТВО)

Ю.Л. Новицкий, Г.Я. Шевчук, Н.И. Топилко, С.В. Топилко**ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ТОНКОСТЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДОБАВОК МОДИФИКАТОРОВ**

Доказана ефективність використання добавок модифікаторів при изготовленні тонкостенных густоармированных изделий, соответствующих классу бетона В15-В20. Установлено, что при использовании комплексных добавок-модификаторов Лигнопан Б-2 (1 мас.%) на основе лигносульфонатов и Stachement 2061 (0,3 мас.%) на основе поликарбоксилатов наблюдается улучшение реологических свойств бетонных смесей, снижение вдвое энергозатрат на ТВО, повышение механической прочности бетона на 15-40% по всем срокам твердения при снижении водоцементного отношения, экономия цемента до 10% на 1 м³ бетонной смеси при сохранении водоцементного отношения и марки смеси за подвижностью. В случае использования ускорителя твердения ChrysoXel CS, на основе неорганических электролитов, значительного технологического и экономического улучшения не наблюдается. Кроме того, избыток неорганических электролитов приведет к сульфатной коррозии, повышения трещиноватости и ползучести бетона, возникновение коррозии стальной арматуры.

Ключевые слова: железобетонные изделия, модифицирующие добавки, прочность, тепло влажностного обработка (ТВО)

Y.L. Novyckiy, H.Ya. Shevchuk, N.I. Topylko, S.V. Topylko**OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL AND ECONOMIC EFFECTS AT MANUFACTURING OF SMALL-FERROUS CONCRETE PRODUCTS BY THE USE OF ADDED MODIFIERS**

The efficiency of the use of modifiers additives in the manufacture of thin-walled reinforced products corresponding to the concrete class B15-B20 has been proved. It was established that with the use of complex additive modifiers Lignopan B-2 (1% by weight) on the basis of lignosulfonates and Stachement 2061 (0.3% by weight) on the basis of polycarboxylates, an improvement of the rheological properties of concrete mixtures, a doubling of energy consumption on (HMT), the mechanical strength of concrete by 15-40% on all terms of hardening with a decrease in the ratio, saving cement up to 10% per 1 m³ of concrete mix while maintaining the ratio of the mixture and the mark of the mixture by mobility. In the case of using a hardening accelerator ChrysoXel CS on the basis of inorganic electrolytes, there is no significant technological and economic improvement. In addition, excess of inorganic electrolytes will lead to sulfate corrosion, increased cracking and creep of concrete, the appearance of corrosion of steel fittings.

Keywords: reinforced concrete products, modifying additive, strength, heat-moisture treatment (HMT)

Постановка проблеми. Твердіння бетону – складний фізико-хімічний процес, що супроводжується безперервною зміною властивостей цементного каменю та бетону в цілому. Оптимальний ріст міцності бетону відбувається при позитивній температурі (15-25°C) і постійній вологості. Дотримання цих умов особливо важливе в перші 10-15 діб твердіння, коли бетон інтенсивно набирає міцність[1]. Твердіння бетону при знижених температурах сповільнюється, а при від'ємних – припиняється, тому теплові способи прискорення твердіння бетону є необхідністю в технології бетону та вимагають додаткових паливно-енергетичних витрат. На заводах залізобетонних виробів для прискорення твердіння бетону застосовують тепловологу обробку (ТВО), шляхом прогріву при температурі 85-90°C при постійній вологості насиченої пари. При цьому час твердіння залізобетонних виробів до набору ними відпускної міцності (70 % від марочної міцності) скорочується до 10-16 год (при твердінні в природних умовах для цього потрібно 10-15 діб). Переважно, з метою економії коштів на ТВО, раціонального використання площ заводу, підвищення оборотності металомістких форм залізобетонних виробів застосовують комбіноване твердіння бетону: при підвищених температурах – до досягнення розопалубочної

міцності (приблизно 20% від марочної) і при природньому твердінні (на відкритому складі) – до досягнення відпускну міцності.

У той же час, прагнення відмовитися від ТВО є актуальною проблемою сучасної технології бетону. Так як, лише за статистичними даними тільки на ТВО залізобетонних виробів і конструкцій в нашій країні щорічно витрачається понад 12 млн. т умовного палива. Проте, у випадку підприємств з виготовлення залізобетонних виробів, відмова від ТВО може бути економічно виправдана лише, якщо при нормальних умовах твердіння виробу досягають відпускну та розопалубочної міцності у пришвидшені терміни. В іншому випадку – зростає потреба у загальному обсязі металевих форм (відомо, що на більшості заводів залізобетонних виробів обсяг форм повинен бути не менше обсягу випущеної заводом продукції протягом доби при штучному твердінні та у 5-7 разів більше при природньому), виробничих площах заводу, скорочується тривалість оборотності коштів.

У сучасному бетонуванні є матеріали, які протягом однієї доби нормальних умов тверднення набувають до 40-50% марочної міцності. Це досягається використанням високо марочних швидкотверднучих цементів, жорстких бетонних сумішей, застосуванням гарячих бетонних сумішей. В даний час штучний спосіб твердіння виробів за своїм техніко-економічними показниками перевершує природний. Очевидно, подальший розвиток робіт в цьому напрямку дасть можливість, в найближчі роки, відмовитись в ряді випадків від штучного твердіння. Одночасно, виготовлення тонкостінних армованих виробів вимагає використання пластичних бетонних сумішей з підвищеною витратою цементу та високою рухливістю. Відомо, що портландцементи загально будівельного призначення у бетонних сумішах з підвищеною рухливістю, характеризуються сповільненим набором міцності бетону в ранній період твердіння[1]. Крім того, висока витрата портландцементу у бетонних сумішах сприяє деформації усадження бетону, що призводить до появи тріщин на поверхні затверділого каменю, пошкодження пасивуючого шару і корозії арматури. Під час використання бетонних сумішей зі знизеним водоцементним відношенням (жорстких або з маркою за легкоукладальністю P1, P2) обов'язковою умовою є віброукладання виробів. За недостатньої тривалості вібрування спостерігається недоуцільнення бетонної суміші і зниження міцності бетону, а довготривале вібрування не забезпечує бажаної щільності і міцності бетону, крім того, можливе розшарування бетонної суміші.

Для збільшення показників міцності і довговічності бетону необхідно зменшити вміст води, а для покращення легкоукладальності, яка забезпечує щільне і однорідне укладання бетонної суміші – підвищити. Така непослідовність в технології бетону вирішується шляхом розроблення і впровадження заходів, які забезпечують отримання бетонних сумішей необхідної легкоукладальності відповідно до прийнятого способу формування[2]. Як показали багаточисленні дослідження та практичний досвід, найбільш економічним і ефективним способом, що сприяє зменшенню водовмісту бетону, є введення до його складу поверхнево-активних речовин, які завдяки своїм пластифікуючим властивостям підвищують легкоукладальність бетонної суміші без збільшення витрати води.

Вказані вище технологічні проблеми при виготовленні тонкостінних залізобетонних виробів на підприємствах визначили спосіб їх вирішення, а саме, використання комплексних добавок-модифікаторів суперпластифікатор - прискорювач твердіння. Це забезпечує ефективне виготовлення тонкостінних залізобетонних виробів: покращення реологічних властивостей бетонної суміші, підвищення оборотності форм опалубки, зниження часу та температури ТВО, зниження витрати води при сталій рухливості бетонної суміші, підвищення міцності у ранній термін та у віці 28 діб при одночасному знизенні витрати цементу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. За останні роки на ринку України чітко встановилася тенденція до використання багатокомпонентних цементних систем з використанням різного типу комплексних добавок модифікаторів на основі суперпластифікаторів, що є найефективнішим для покращення властивостей цементних систем і бетону[3]. Хімічна природа суперпластифікаторів визначає їх водоредукуючий ефект. Так, лігносульфонати технічні забезпечують водоредукуючий ефект 5-15%, нафталінсульфонати 15-25%, поліакрилати 20-30%, полікарбоксилати 25-40%.

Суперпластифікатори, змінюючи реологічні властивості цементної системи, одночасно впливають на процеси формування структури, особливо на початковій (коагуляційній) фазі завдяки зменшенню водопотреби, що в подальшому відображається на параметрах кристалізаційної структури. Таким чином, можна припустити, що механізм дії

суперпластифікаторів полягає у фізичній адсорбції макромолекул на активних центрах в'язучого, що призводить до зниження внутрішнього тертя частинок твердої фази, а також її диспергації[4]. В подальшому, внаслідок появи та накопичення в системі гідроксиду кальцію відбувається хімічна взаємодія функціональних груп суперпластифікатора з гідроксидом кальцію, що призводить до нейтралізації молекул та відведення їх з поверхні зерен.

Вважається, що полікарбоксилати та акрилові сополімери є найбільш ефективними з усіх суперпластифікаторів [4]. Вони можуть призводити до зменшення водопотреби більш ніж на 40 %. Тому, саме їх переважно використовують для виробництва високоміцного та надвисокоміцного бетонів, де водоцементне відношення повинно бути не більшим за 0,2. Загалом, ці добавки проявляють надзвичайно високі показники по збереженню величини осадки конуса. Недоліком застосування добавок є висока вартість. Проте, для однієї і тієї ж категорії бетону полікарбоксилати можуть працювати при меншій дозі, ніж лігносульфонати, тому це не впливає на собівартість бетону. Обмежений досвід роботи з цими хімічними сполуками показує, що вони добре працюють при низькому водоцементному відношенні, виявляють менше проблем сумісності, порівняно з іншими добавками.

Ефективним вважається оптимальне доповнення суперпластифікатора добавками прискорювачами тужавіння бетону, з метою скорочення часу його витримки в опалубці, збільшення показників міцності готового бетону і прискорення будівельного процесу в цілому. Впровадження прискорювачів твердіння є ефективним технологічним прийомом, який дозволяє зменшити собівартість товару і збільшити техніко-економічні дані виробництва. Одночасно, використання прискорювачів твердіння забезпечує прискорений набір міцності при понижених осінньо-весняних температурах. Відомі добавки-прискорювачі реагують з в'язучим з утворенням малорозчинних сполук[5]. У результаті реакції обміну виділяється кальцій гідроксид у розчин і підвищується розчинність силікатних складових портландцементу. Водночас, традиційні добавки-прискорювачі можуть негативно впливати як на бетони, так і арматуру, що знижує їх експлуатаційні та будівельно-технічні властивості. З урахуванням колоїдно-хімічних явищ синергізму та компатильності в цементних системах для інтенсифікування твердіння бетонів за високої рухливості доцільно використовувати комплексні модифікатори на основі пластифікаторів та прискорювачів твердіння. Особливі властивості комплексних добавок дають змогу регулювати швидкість твердіння й одночасно змінювати рухливість, однорідність, структуру цементної матриці бетону та його експлуатаційні характеристики. Одержаний ефект обумовлений формуванням однорідної субмікропористої структури з максимально рівномірним розподілом у її об'ємі аморфної та кристалічної фаз гідратних новоутворень.

В Україні нагромаджений значний досвід використання комплексних добавок модифікаторів вітчизняного (Релаксол, Амкірод, Дофен, Coral та ін.) та іноземного виробництва Cementol Omega P (Словенія), Addiment (Німеччина), Protard (США), Sika (Швейцарія). Однак, в літературних даних та рекомендаціях щодо застосування цих додатків у неповному обсязі враховані усі чинники виробництва підприємств та їх техніко-економічна ефективність.

Постановка завдань. В роботі поставлено мету – дослідити технологічний та економічний ефект під час виготовлення тонкостінних армованих виробів з використанням виробничих умов таких добавок: прискорювач твердіння, комплексний суперпластифікатор-прискорювач твердіння та гіперпластифікатор.

Викладення основного матеріалу. При одержанні бетонів класу В 15-20 для окремих видів залізобетонних виробів на ПАТ «Львівський завод залізобетонних виробів №2» використовували портландцемент ПЦ II/A-Ш-400-Н (ДСТУ Б В. 2.7-46:2010) ПАТ «Івано-Франківськцемент» з фізико-механічними показниками: початок тужавіння – 3 год., кінець тужавіння – 4 год., міцність при стиску у віці 7 діб – 30,2 МПа; дрібний заповнювач – пісок Ясинецького родовища (ДСТУ Б.В 2.7-32-95) з модулем крупності $M_{кр} = 1,28$, насипною густиною – 1390 кг/м³, істинною густиною – 2590 кг/м³, порожнистістю – 45,1 %, вмістом пилюватих та глинистих домішок – 1,2%; грубий заповнювач – щебінь гранітний Клесівського родовища (ДСТУ Б.В.2.7-75-98) фракції 5-20 мм, вміст пилюватих та глинистих часток – 0,82%, вміст зерен пластинчастої та голчастої форми – 9,81%, марка за механічною міцністю – 140 МПа, марка за морозостійкістю – 300. Для порівняння та встановлення найбільш вдалого технологічного ефекту, в якості прискорювача твердіння використовували добавку ChrysoXelCS (Польща), комплексну добавку модифікатор суперпластифікатор-прискорювач твердіння – Лігнопан Б-2 та гіперпластифікатор Stachement 2061. Усі три види добавок вводили у бетонну суміш у вигляді водного розчину робочої

концентрації. Найбільш оптимальна кількість добавки для класу бетонів В15-В20, згідно заявки виробника представлена в табл.1.

ChrysoXelCS на основі неорганічних електролітів, як каталізатор гідратації цементу, особливо за низьких температур, а отже забезпечує швидкий приріст механічної міцності. Оптимальне її дозування становить 1,5% від маси цементу. Хлорид кальцію прискорює переважно раннє тверднення цементу шляхом каталітичного впливу на процеси гідратації аліту та беліту, або через зменшення лужності порового розчину каталізує гідратацію силікатних фаз. Недоліками застосування добавки є зменшення опірності цементу сульфатній корозії (особливо у пісних бетонних сумішах) та ризик протікання хімічних реакцій між лугами та наповнювачами. Також хлорид спричиняє підвищення тріщинуватості та повзучості бетону, виникнення корозії сталевій арматури [4].

Добавка Лігнопан Б-2 є пластифікатором прискорювачем на основі фракціонованих лігносульфонатів, нафталін і меланін сульфокислоти, тіосульфату та роданіду натрію, карбонатів натрію та літію, піногасників і простих ефірів целюлози. Використання добавки Лігнопан Б-2 дозволяє знизити вміст води у бетонній суміші на 15-20%, знизити енергетичні витрати та час ТВО на 40-50%, отримати міцність бетону 75-80% від марочної на другу добу при нормальних умовах твердіння, підвищити марку за водонепроникністю на один ступінь, підвищити оборотність форм опалубки. Лігнопан Б-2 не викликає корозії арматури. Добавка вводиться у кількості 0,8-1,5% від маси цементу при цьому знижується витрата води на 10-15% при рівнорухливих сумішах.

Гіперпластифікатор Stachement 2061 на основі полікарбоксилатів, за рахунок високої диспергуючої дії, дозволяє виробляти бетони з швидким набором початкових міцностей, в тому числі і при низьких температурах. Stachement 2061 – застосовується в дозах від 0,3 до 1,50% від маси цементу. У літніх умовах виробництва добавка дозволяє виключити термообробку повністю, а у зимових умовах термообробку максимально скорочує. Ця добавка дозволяє виготовляти високоякісні вироби із збірного залізобетону, попередньо напруженого бетону і самоущільнюваного бетону з швидким зростанням початкових міцностей. Добавку можливо застосовувати і для виробництва високомарочного товарного бетону.

З метою встановлення найбільш вдалого технологічного та економічного ефектів, промисловими випробуваннями досліджено вплив вищевказаних добавок на міцність виробів. Випробування проводили в період зимових температур тому, з метою підвищення оборотності форм опалубки та продуктивності цеху по готовій продукції, природні умови твердіння було виключено. Одночасно у виробничих умовах було зменшено тривалість та температуру ТВО, що дало змогу не тільки знизити витрати на виробництво, але й досягти кращої якості виробів, оскільки основні деструктивні явища у бетоні, що пропарюється, значно інтенсифікуються за температур вищих від 60⁰С.

В результаті проведених випробувань (табл.1), встановлено, що за мінімального вмісту добавок (мінімальний оптимальний вміст для певного класу бетону, що заявлено виробником) і збереження сталої рухливості бетонної суміші знижується водоцементне відношення, що дає змогу одержати бетони вищого класу міцності. Міцність виробів вже після пропарки, тривалість та температура котрої скорочена удвічі, відповідає відпускній міцності (більше 70% від марочної міцності). Виключення спостерігається лише при введенні добавки прискорювача ChrysoXelCS (1,5 мас%), де після ТВО міцність продукції складає лише 61-69% від марочної міцності. Очевидно, що для отримання вищого результату, при використанні ChrysoXelCS, необхідно підвищити температуру та тривалість ТВО. Однак, підвищення вмісту добавки ChrysoXelCS, може призвести до сульфатної корозії, тріщинуватості та повзучості бетону, виникнення корозії сталевій арматури. Слід зазначити, що після ТВО більший приріст міцності спостерігається при введенні комплексної добавки пластифікатор-прискорювач Лігнопан Б-2 (1,0 мас.%) і складає 77-87% від марочної міцності, а при введенні гіперпластифікатора Stachement 2061 (0,3 мас%) – 75-80% від марочної міцності (табл.1). Одночасно, вищий приріст міцності показують вироби з бетону класу В 20. При використанні добавки Лігнопан Б-2 (1,0 мас.%) – 87%, Stachement 2061 (0,3 мас%) – 80 % від марочної міцності після ТВО. У виробах класу В15 при використанні добавки Лігнопан Б-2 (1,0 мас.%) одержуємо 77%, Stachement 2061 (0,3 мас%) – 75 % від марочної міцності після ТВО. Це пояснюється тим, що полікарбоксилати, котрі є в основі Stachement 2061, краще працюють на високо марочних цементах і, відповідно, на бетонах вищого класу міцності.

Використання добавок прискорювача твердіння ChrysoXelCS, комплексної добавки модифікатора суперпластифікатор-прискорювач твердіння Лігнопан Б-2 та гіперпластифікатора Stachement 2061 забезпечує основний технологічний ефект. При збереженні марки бетонної суміші за рухливістю водоцементне відношення знижується на 8-18%, а механічна міцність на усіх етапах твердіння зростає у 1,2-1,4 рази.

Таблиця 1

Результати випробувань залізобетонних виробів з комплексними добавками

Назва виробу	Клас бетону	ОК, см	В/Ц	Вміст добавки (мас.%)	Тип твердіння бетону	Границя міцності на стиск, МПа. Міцність бетону від проектної марки (%) у віці, діб				
						1*	3	7	14	28
Лотковий елемент	В 20	4	0,40	-	4 год перед ТВО+2 год ТВО за 85 ⁰ С	<u>15.0</u> (60%)	<u>18.0</u> (72%)	<u>21.0</u> (84%)	<u>23.5</u> (94%)	<u>24.5</u> (98%)
			0,38	1,5 % ChrysoXelCS	2 год перед ТВО+1 год ТВО за 45 ⁰ С	<u>17.3</u> (69%)	<u>18.3</u> (73%)	<u>19.7</u> (79%)	<u>24.3</u> (97%)	<u>25.5</u> (102%)
			0,35	1,0% Лігнопан Б-2	2 год перед ТВО+1 год ТВО за 45 ⁰ С	<u>21.8</u> (87%)	<u>23.0</u> (92%)	<u>28.5</u> (114%)	<u>33.8</u> (135%)	<u>35.8</u> (143%)
			0,33	0,3 % Stachement 2061	2 год перед ТВО+1 год ТВО за 45 ⁰ С	<u>20.0</u> (80%)	<u>21.0</u> (81%)	<u>26.0</u> (104%)	<u>23.3</u> (133%)	<u>36.0</u> (144%)
Кришка кільця каналізаційного	В15	4	0,40	-	3,5 год перед ТВО+2,5 год ТВО за 45 ⁰ С	<u>12.0</u> (60%)	<u>13.6</u> (68%)	<u>16.0</u> (80%)	<u>18.2</u> (91%)	<u>19.6</u> (98%)
			0,38	1,5 % ChrysoXelCS	1,5 год перед ТВО+1,5 год ТВО за 45 ⁰ С	<u>12.2</u> (61%)	<u>15.8</u> (79%)	<u>17.6</u> (88%)	<u>24.9</u> (124%)	<u>25.6</u> (128%)
			0,37	1% Лігнопан Б-2	1,5 год перед ТВО+1,5 год ТВО за 45 ⁰ С	<u>15.4</u> (77%)	<u>16.5</u> (83%)	<u>18.0</u> (90%)	<u>19.6</u> (98%)	<u>22.7</u> (114%)
			0,35	0,3 % Stachement 2061	1,5 год перед ТВО+1,5 год ТВО за 45 ⁰ С	<u>15.0</u> (75%)	<u>16.2</u> (80%)	<u>21.8</u> (109%)	<u>23.4</u> (117%)	<u>24.7</u> (123%)

Примітка 1* - міцність бетону після ТВО

Встановлено, що при використанні комплексної добавки модифікатора суперпластифікатор-прискорювач твердіння Лігнопан Б-2 та гіперпластифікатора Stachement 2061 у бетонних сумішах під час виготовлення тонкостінних залізобетонних виробів спостерігається вища гомогенізація та зменшення розшаровуваності бетонної суміші. При введенні прискорювача твердіння ChrysoXelCS якість бетонної суміші, практично, незмінюється. У випадку використання добавок ChrysoXelCS, Лігнопан Б-2, Stachement 2061 при збереженні водоцементного відношення, встановлено (табл. 2) зменшення витрати цементу на 5-10%, що дозволяє економити кошти на матеріалізокрема 20-65грн на кожен 1 м³ готової бетонної суміші (станом на I квартал 2019 р.).

Таблиця 2

**Економічна ефективність використання залізобетонних виробів
з комплексними добавками**

Назва продукції	Клас бетону	Вміст добавки, мас. %	Бетонна суміш				Зниження витрати цементу, %
			В/Ц	Густина, кг/м ³	Витрата цементу, кг/м ³	ОК, см	
Лотковий елемент	В20	-	0,40	2410	320	4	-
		1,5 % ChrysoXelCS	0,40	2400	311	4	2,8
		1,0% Лігнопан Б-2	0,40	2392	307	4	4,0
		0,3 % Stachement 2061	0,39	2381	301	4	6,5
Кришка кільця каналізаційного	В15	-	0,40	2405	250	4	-
		1,5 % ChrysoXelCS	0,40	2390	242	4	3,2
		1,0% Лігнопан Б-2	0,40	2385	235	4	6,0
		0,3 % Stachement 2061	0,40	2340	227	4	10

Висновки. Заводськими випробуваннями встановлено позитивний економічний та технологічний ефекти від використання пластифікатора-прискорювача Лігнопан Б-2 та гіперпластифікатора Stachement 2061 при виготовленні тонкостінних густоармованих залізобетонних виробів. При цьому покращено реологічні властивості бетонних сумішей, зменшено вдвічі енергозатрати на ТВО, підвищено механічну міцність бетону на 15-40% в усі терміни твердіння при зниженні водоцементного відношення. Економія цементу становить до 10% на 1 м³ бетонної суміші при збереженні водоцементного відношення та марки суміші за рухливістю. Встановлено, що при використанні комплексних добавок Лігнопан Б-2 (1,0 мас.%) на основі лігносульфонатів та Stachement 2061 (0,3 мас.%) на основі полікарбоксилатів при виготовленні тонкостінних залізобетонних виробів спостерігається вища однорідність бетонної суміші та зниження її розшарування. Незважаючи на високу вартість, полікарбоксилатив бетонній суміші працюють при значно меншому дозуванні, ніж лігносульфонати, тому це не впливає на собівартість бетону. У випадку використання прискорювача твердіння ChrysoXelCS, на основі неорганічних електrolітів, значного технологічного та економічного покращення не досягнуто.

Список використаних джерел:

1. Конструкційні матеріали нового покоління та технології їх впровадження у будівництво / [Р. Ф. Рунова, В. І. Гоц, М. А. Саницький та ін.]. – Київ: УВПК "ЕксОб", 2008. – 360 с. – (1).
2. Касторных Л. И. Добавки в бетоны и строительные растворы / Л. И. Касторных. – Ростов на Дону: Феникс, 2007. – 221 с. – (2).
3. Позняк О. Р. Високофункціональні бетони з комплексними модифікаторами на основі полікарбоксилатів / Оксана Романівна Позняк. // Вісник НУ "Львівська політехніка" Теорія і практика будівництва. – 2009. – №655. – С. 224-230.
4. Флейшер Г. Ю. Багатофункціональні азотвмісніхімічні добавки для цементів з продуктів переробки комунальних відходів : дис. канд. техн. наук : 05.17.11 – Техн / Флейшер Ганна Юріївна – Київ, 2016. – 213 с.
5. Вплив добавок пластифікувально-прискорювальної дії на структуроутворення та міцність бетонів / [Т. А. Мазурак, У. Д. Марущак, Ю. В. Олевич та ін.]. // Вісник НУ "Львівська політехніка" Теорія і практика будівництва. – 2015. – №823. – С. 216–221.

Рецензенти:

Новосад Петро Васильович – к.т.н., доц.кафедри будівельного виробництва ІБД, НУ «Львівська політехніка»

Бабаджанова Ольга Федорівна – к.т.н., доц. кафедри цивільного захисту та комп'ютерного моделювання екогеофізичних процесів Львівського Державного Університету Безпеки Життєдіяльності

Стаття надійшла до редакції 15.03.2019

УДК: 536.2

Б.С. Окрепкий, Н.Г. Хома*Тернопільський національний економічний університет***ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ШАРІ З УРАХУВАННЯМ ТЕПЛООБМІНУ
ЧЕРЕЗ ТОНКИЙ ПРОМІЖКОВИЙ ШАР**

Побудовано розв'язок осесиметричної температурної задачі для ізотропного шару скінченної товщини з урахуванням теплообміну між шаром і зовнішнім середовищем через тонкий проміжковий шар. Отримано формулу для визначення температурного поля в будь-якій точці шару. Досліджено вплив коефіцієнтів теплопровідності, теплообміну і контактної провідності проміжкового шару на розподіл температури в шарі.

Ключові слова: температура, проміжковий шар, коефіцієнти теплообміну і теплопровідності, контактна провідність, ізотропні матеріали

Б.С. Окрепкий, Н.Г. Хома*Тернопольский национальный экономический университет***ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В СЛОЕ С УЧЕТОМ ТЕПЛООБМЕНА
ЧЕРЕЗ ТОНКИЙ ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ СЛОЙ**

Построено решение осесиметричной температурной задачи для изотропного слоя конечной толщины с учетом теплообмена между слоем и внешней средой через тонкий промежуточный слой. Получена формула для определения температурного поля в любой точке слоя. Исследовано влияние коэффициентов теплопроводности, теплообмена и контактной проводимости промежуточного слоя на распределение температуры в слое

Ключевые слова: температура, промежуточный слой, коэффициенты теплообмена и теплопроводности, контактная проводимость, изотропные материалы

B.S. Okrepkyi, N.H. Khoma*Ternopil National Economic University***DETERMINATION OF A TEMPERATURE FIELD IN THE LAYER WITH THERMAL
EXCHANGE THROUGH A THIN INTERMEDIATE LAYER**

The solution of the axisymmetric temperature task for the layer under non ideal contact taking into account thin intermediate in the case of isotropic material has been built. Heat exchange with the outside environment occurs from the side surface of thin intermediate layer and on the free surface of the layer according to the Newton's law. The temperature in the layer is found by means of the Hankel's transformation to the Laplace's equation written in the cylinder coordinates system. Producing the boundary conditions for the temperature on the surfaces the task is reduced to the system of integral equations relatively unknown functions due to which the temperature in the layer is found. The graph of the temperature distribution for the layer temperature distribution have been investigated. It was shown that these coefficients affect sufficiently on the temperature field in the layer.

Key words: temperature, intermediate layer, coefficients of heat exchange and thermal conductivity, contact conductivity, isotropic materials.

Постановка проблеми. Визначення деформацій і напружень з урахуванням температурних факторів є важливим завданням для дослідження міцності деталей машин і елементів конструкцій у місцях їхньої взаємодії, при розрахунку конструкцій на пружній основі для раціонального використання конструкцій і несучої здатності основи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У працях [1–4] досліджено вплив температурних факторів на характер контактної взаємодії тіл. Зокрема, у роботі [3] розв'язана задача теплопровідності для системи тіл циліндр-шар при неідеальному тепловому контакті у випадку ізотропних матеріалів. Проте недостатньо вивченими є задачі теплопровідності з урахуванням теплообміну через тонкий проміжковий шар.

Мета роботи. Побудувати розв'язок осесиметричної температурної задачі для ізотропного шару скінченної товщини з урахуванням теплообміну між шаром і зовнішнім середовищем через тонкий проміжковий шар. Дослідити вплив коефіцієнтів теплопровідності, теплообміну, контактної провідності проміжкового шару на розподіл температурного поля в шарі.

Постановка задачі. Нехай задано ізотропний шар скінченної товщини L . На верхній основі шару здійснюється теплообмін шару із зовнішнім середовищем по закону Ньютона, а на нижній основі через тонкий проміжковий шар [3, 6].

При заданих припущеннях необхідно визначити температурне поле в шарі.

Викладення основного матеріалу. Введемо циліндричну систему координат r, θ, z , центр якої лежить на нижній основі шару, а вісь OZ спрямована вертикально вгору. Таким чином запропонована задача розв'язується при наступних граничних умовах:

$$\frac{\partial T}{\partial z} + H_1(T - T_0) = 0 \quad (Z = L, \quad 0 \leq r < \infty) \quad (1)$$

$$\lambda_0 \Delta \left[\left(1 + \frac{\alpha_0}{2h_0} \right) T - \frac{\lambda_z}{2h_0} \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \lambda_z \left(1 + \frac{\alpha_0}{h_0} \right) \frac{\partial T}{\partial z} + \alpha_0(T_c - T) = 0 \quad (Z = 0, \quad 0 \leq r < \infty) \quad (2)$$

Тут $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}$ – оператор Лапласа;

H, H_1 – коефіцієнти теплообміну шарів із зовнішнім середовищем;

λ_z – коефіцієнт теплопровідності шару;

λ_0, α_0 – коефіцієнти теплопровідності і теплообміну проміжкового шару;

h_0 – контактна провідність;

T_c, T_0 – температура зовнішнього середовища.

Розв'язування крайової задачі для рівняння теплопровідності.

Відомо [7], що в осесиметричному випадку температурне поле для ізотропного тіла визначається із рівняння

$$\nabla^2 T = 0. \quad (3)$$

Для визначення температурного поля в шарі введемо трансформанту Ганкеля функції $T(r, z)$ нульового порядку

$$\bar{T}(\xi, z) = \int_0^\infty r T(r, z) J_0(\xi r) dr, \quad (4)$$

за допомогою якої знаходимо вираз для $T(\rho, \zeta)$ через дві довільні функції $\varphi_1(\eta)$ і $\varphi_2(\eta)$.

$$T(\rho, \zeta) = \int_0^\infty [\varphi_1(\eta) e^{\eta \zeta} + \varphi_2(\eta) e^{-\eta \zeta}] J_0(\eta \rho) d\eta, \quad (5)$$

де $J_0(\eta \rho)$ – функція Бесселя першого роду дійсного аргументу; $\rho = \frac{r}{L}; \zeta = \frac{z}{L}; \eta = \xi L$.

Задовільнивши граничні умови (1), (2), з урахуванням (5) одержимо систему інтегральних рівнянь відносно функцій $\varphi_1(\eta)$ і $\varphi_2(\eta)$:

$$\int_0^\infty [(k_1 + \eta) e^\eta \varphi_1(\eta) + (k_1 - \eta) e^{-\eta} \varphi_2(\eta)] J_0(\eta \rho) d\eta = k_1 T_0 \quad (0 \leq \rho < \infty) \quad (6)$$

$$\int_0^\infty [f_1(\eta) \varphi_1(\eta) + f_2(\eta) \varphi_2(\eta)] J_0(\eta \rho) d\eta = -\gamma_0 T_c \quad (0 \leq \rho < \infty) \quad (7)$$

де $k_1 = H_1 L, \quad \gamma_0 = \frac{2\alpha_0 h_0 L^3}{\lambda_z \lambda_0},$

$$f_1(\eta) = \eta^3 - 2 \left(1 + \frac{\alpha_0}{2h_0} \right) \frac{h_0 L}{\lambda_z} \eta^2 + 2 \left(1 + \frac{\alpha_0}{h_0} \right) \frac{h_0 L^2}{\lambda_0} \eta - \frac{2\alpha_0 h_0 L^3}{\lambda_z \lambda_0},$$

$$f_2(\eta) = -\eta^3 - 2 \left(1 + \frac{\alpha_0}{2h_0} \right) \frac{h_0 L}{\lambda_z} \eta^2 - 2 \left(1 + \frac{\alpha_0}{h_0} \right) \frac{h_0 L^2}{\lambda_0} \eta - \frac{2\alpha_0 h_0 L^3}{\lambda_z \lambda_0}.$$

Застосувавши формулу обернення інтегрального перетворення Ганкеля до рівнянь (6), (7), одержимо систему рівнянь відносно функцій $\varphi_1(\eta)$ і $\varphi_2(\eta)$:

$$e^\eta (k_1 + \eta) \varphi_1(\eta) + (k_1 - \eta) \varphi_2(\eta) e^{-\eta} = k_1 T_0 \lim_{\Delta \rightarrow 0} \delta(\eta - \Delta), \quad (8)$$

$$f_1(\eta) \varphi_1(\eta) + f_2(\eta) \varphi_2(\eta) = -\gamma_0 T_c \lim_{\Delta \rightarrow 0} \delta(\eta - \Delta),$$

де $\delta(\alpha - \beta) = \alpha \int_0^{\infty} \xi J_0(\alpha\xi) J_0(\beta\xi) d\xi$ – дельта-функція Дірака.

Розв'язок системи рівнянь (8) матиме вигляд:

$$\begin{aligned} \varphi_2(\eta) &= -\frac{e^{2\eta}(k_1 + \eta)}{k_1 - \eta} \varphi_1(\eta) + \frac{k_1 T_0}{k_1 - \eta} e^{\eta} \lim_{\Delta \rightarrow 0} \delta(\eta - \Delta), \\ \varphi_1(\eta) &= \frac{\Delta_1(\eta)}{\Delta(\eta)}, \end{aligned} \quad (9)$$

де

$$\begin{aligned} \Delta(\eta) &= -2 \left\{ (\eta^4 + (k_1 \gamma_2 + \gamma_1)^2 + \gamma_0 k_1) \operatorname{sh} \eta + [(k_1 + \gamma_2) \eta^2 + k_1 \gamma_1 + \gamma_0] \eta \operatorname{ch} \eta \right\}, \\ \Delta_1(\eta) &= 2 \left[k_1 T_0 \lim_{\Delta \rightarrow 0} \delta(\eta - \Delta) f_2(\eta) + (k_1 - \eta) e^{-\eta} \gamma_0 T_c \lim_{\Delta \rightarrow 0} \delta(\eta - \Delta) \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

Температурне поле в шарі, згідно з формулами (5), (9), (10), знаходиться за формулою

$$\begin{aligned} T(\rho, \zeta) &= T_0 \int_0^{\infty} \frac{\Delta_1(\eta)}{\Delta(\eta)} G(\eta, \zeta) J_0(\eta \rho) d\eta = \\ &= T_0 + (T_0 - T_c) \frac{k_1(\zeta - 1) - 1}{(1 + \gamma_1 / \gamma_0) k_1 + 1} \quad (0 \leq \zeta \leq 1, 0 \leq \rho < \infty), \end{aligned} \quad (11)$$

де $G(\eta, \zeta) = k_1 \operatorname{sh}(\zeta - 1)\eta - \eta \operatorname{ch}(\zeta - 1)\eta$,

$$\gamma_0 = 2h_0^1 r_1, \quad \gamma_1 = 2(h_0^1 r_0 + r_1), \quad (12)$$

$$r_0 = \frac{\lambda_z L}{\lambda_0}, \quad r_1 = \frac{\alpha_0 L^2}{\lambda_0}, \quad h_0^1 = \frac{h_0 L^2}{\lambda_0}.$$

Зроблені числові підрахунки і побудовані графіки розподілу температур T/T_0 в шарі при фіксованих значеннях $T_c = 0$, $k_1 = \infty$.

$$\frac{T}{T_0} = 1 + (1 - \frac{T_c}{T_0}) \frac{k_1(\zeta - 1) - 1}{(1 + \gamma_1 / \gamma_0) k_1 + 1}.$$

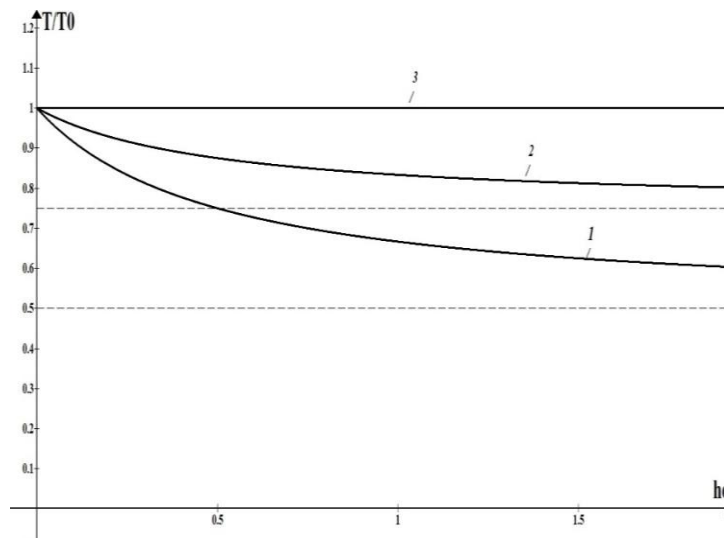


Рис. 1. Розподіл температури по товщині шару при $r_0 = 1$ та $r_1 = 1$ в залежності від контактної провідності h_0^1 . Крива 1: $\zeta = 0$; 2: $\zeta = 0,5$; 3: $\zeta = 1$.

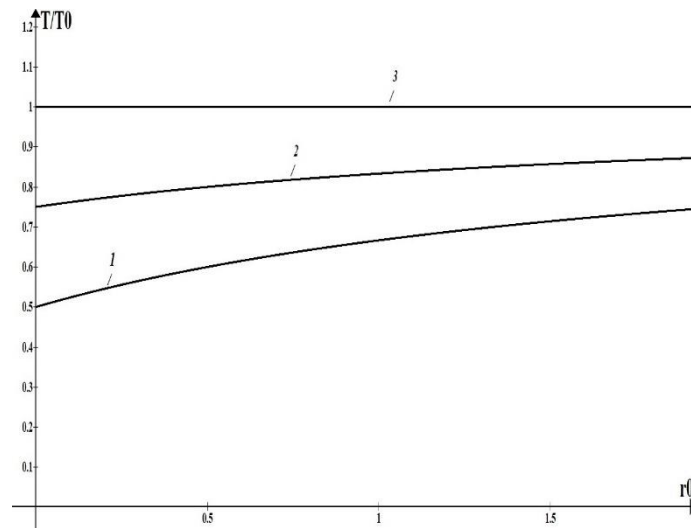


Рис. 2. Розподіл температури по товщині шару при $h_0^1 = 1$, $r_1 = 1$ в залежності від параметра r_0 . Крива 1: $\zeta = 0$; 2: $\zeta = 0,5$; 3: $\zeta = 1$.

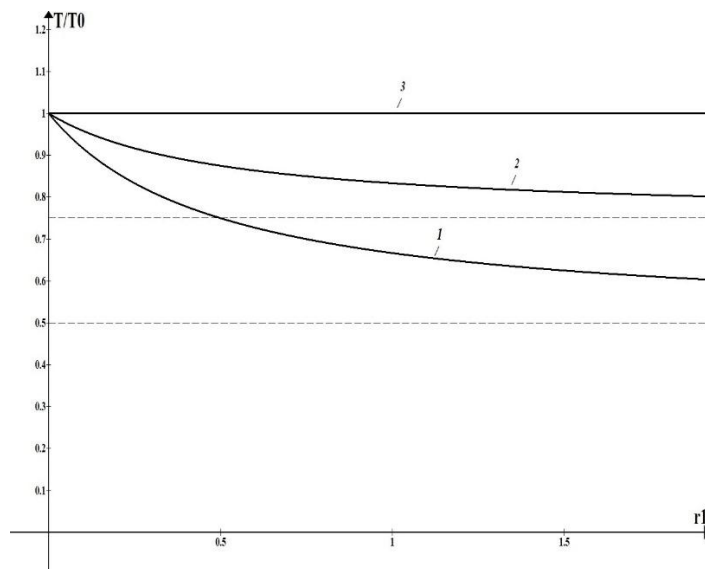


Рис. 3. Розподіл температури по товщині шару при $h_0^1 = 1$, $r_0 = 1$ в залежності від параметра r_1 . Крива 1: $\zeta = 0$; 2: $\zeta = 0,5$; 3: $\zeta = 1$

Висновки. Застосовуючи інтегральне перетворення Ганкеля температурна задача зведена до знаходження деяких функцій із системи лінійних алгебраїчних рівнянь, через які визначається температурне поле в будь-якій точці шару.

Результати підрахунків показують, що контактна провідність h_0^1 , коефіцієнти теплопровідності λ_0 і теплообміну α_0 проміжкового шару значно впливають на розподіл температури в шарі.

Список використаних джерел:

1. Грилицкий Д. В. Осесимметричные контактные задачи теории упругости и термоупругости [Текст] /Д. В. Грилицкий, Я. М. Кизыма. – Львов: Изд-во при Львов. ун-те, 1981. – 135 с.
2. Окрепкий Б. С. Осесимметрична температурна задача для системи тіл циліндр-півпростір при неідеальному тепловому контакті [Текст] /Б. С. Окрепкий, М. Я. Шелестовська //Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2005. – № 3. – С. 23-27.

3. Окрепкий Б. С. Осесиметрична температурна задача для системи тіл циліндр-шар при неідеальному тепловому контакті [Текст] /Б. С. Окрепкий, М. Я. Шелестовська //Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2010. – Т. 15. – № 3. – С. 171-176.
4. Окрепкий Б. С. Тиск циліндричного кругового штампа на пружний шар з урахуванням неідеального теплового контакту [Текст] /Б. С. Окрепкий, М. Я. Шелестовська //Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2011. – Т. 16. – № 2. – С. 42-52.
5. Подстригач Я. С. Условия теплового контакта твердых тел [Текст] /Я. С. Подстригач //ДАН УССР, Серия А. – 1963. – № 7. – С.188-192.
6. Подстригач Я. С. Температурное поле в системе твердых тел, соприкасаемых с помощью тонкого промежуточного слоя [Текст] /Я. С. Подстригач //ИФЖ – 1963. –Т. 6. – № 10. – С.129-136.
7. Коваленко А. Д. Основы термоупругости [Текст] /А. Д. Коваленко. – К.: Наук. думка, 1970. – 304с.

Рецензенти:

Пастух Олег Анатолійович, професор кафедри програмної інженерії Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, д. т. н., професор;

Березька Катерина Миколаївна, доцент кафедри прикладної математики Тернопільського національного економічного університету, к. т. н, доцент.

Стаття надійшла до редакції 24.02.2019

621.317.333.621.316.13

М.В. Романюк, В.І. Волинець, І.О. Бандура, В.В. Лишук*Луцький національний технічний університет***ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ СЕЛЕКТИВНОГО ЗАХИСНОГО
ВИМКНЕННЯ В ДВОПРОВІДНИХ МЕРЕЖАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ***Проведено дослідження похибки визначення загального омичного опору ізоляції РМПС відносно землі.**Ключові слова: контроль ізоляції, розподільні мережі постійного струму.***М.В. Романюк, В.І. Волинець, І.О. Бандура, В.В. Лишук****ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА СЕЛЕКТИВНОЙ ЗАЩИТНОГО
ОТКЛЮЧЕНИЯ В ДВУХПРОВОДНОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА***Проведено исследование погрешности определения общего омического сопротивления изоляции РСПТ относительно земли.**Ключевые слова: контроль изоляции, распределительные сети постоянного тока.***M. Romanyuk, V. Volynets, I. Bandura, V. Lyshuk****THEORETICAL GROUNDS FOR A SELECTIVE SECURITY CHANGE METHOD IN TWO-
DIRECT NETWORKS OF A PERMANENT STRUCTURE***The study of the error of determination of the total ohmic impedance of isolation of DC distributive circuits with respect to the ground is carried out.**Keywords: insulation control, distributive DC networks.*

Постановка проблеми. Людина повинна бути захищеною від ураження електричним струмом при експлуатації електроустановок. Конституція України проголошує: «Людина, її життя і здоров'я...визначаються в Україні найвищою цінністю...Обов'язок держави – захищати життя людини» [1]. Права людини як споживача електричної енергії визначені Законом України «Про енергетику» [2], а як працівника – Законом України «Про охорону праці» [3].

Про шкідливу дію електричного розряду стало відомо уже в останній чверті XVIII століття. В 1863 році француз Леруа-де-Мерклор описав виробничу травму на постійному струмі. За даними [4, 5] у країнах Європи на 1 млн жителів припадає в середньому 5,7 смертельних електротравм на рік. Для країн Азії та Африки ця цифра становить 6,3. В Україні в 1992, 1993, 1995, 2008 роках трапилось відповідно 1050, 970, 1300 і 1352 виробничих електротравм, які закінчились смертю [6, 7].

Для захисту людей від небезпечної напруги, яка може з'явитись внаслідок порушення ізоляції на металевих частинах електроустановки, що в нормальних умовах не знаходяться під напругою, облаштовують захисне заземлення. Як показує досвід експлуатації електроустановок постійного струму, найефективніше захисне заземлення не є універсальним засобом захисту від струмів витікання на землю. Дотик людини до струмоведучої частини, яка нормально знаходиться під напругою, завжди є дуже небезпечним. Особливо у виробництвах з високим рівнем вологи і великим перехідним опором між людиною та ґрунтом. Наприклад: вугільні і гірничорудні шахти, торфодобування, калійні і сірчані кар'єри, тому для забезпечення більшої безпеки експлуатації електроустановок постійного струму промислових і сільськогосподарських підприємств необхідно використовувати апарати захисного вимкнення.

Захист від витікання струму можна досягнути при вимкненні мережі при струмі витікання, який дорівнює або більше граничного короткочасно допустимого струму, або граничного довго допустимого (більше 1с) струму.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільш досконалим є пристрій захисного вимкнення [8, 9], який ґрунтується на принципі накладання оперативного змінного струму промислової частоти на контрольовану мережу з автоматичною компенсацією ємності мережі відносно землі, вимірювання струму через опір полюсів відносно землі та порівняння його з еталонною величиною. Принципова схема ПЗВ типу УЗО зображена на рис. 1 [8]. Змінний оперативний струм з першої вторинної обмотки проміжного трансформатора ТЛ через випрямляч VD2 накладається до ізоляції полюсів мережі через ємнісний фільтр C_0 між полюсами мережі та землею. Струм у виконавчому органі (реле KL) пропорційний загальному опору полюсів мережі відносно землі. Вимірювання ємності мережі полюсів відносно землі здійснюють за допомогою LC генератора, який отримує живлення від VD3 виконано на одному транзисторі з ємнісно-

активним зворотнім зв'язком, на виході має підсилювач П. В схемі (рис. 1) ємність полюсів мережі відносно землі С через фільтр приєднання C_0 , конденсатор C_2 та додаткову індуктивність W_d приєднується паралельно активному опорю зворотного зв'язку генератора LC. Напруга, що знімається з активного опорю зворотного зв'язку, підсилюється і потрапляє на обмотку керування W_k дроселя $L_{др}$, індуктивність якого буде змінюватись залежно від ємності мережі. Обмотка $W_{др}$ [9] має дві секції, розташовані на крайніх стержнях Ш-подібного осердя дроселя, які включені зустрічно для компенсації змінної ЕРС в обмотці керування. Змінюючи струм в обмотці керування, можна змінювати індуктивність дроселя. При налагодженні параметрів дроселя $L_{др}$ в резонанс з ємністю мережі відносно землі струм в реагуючому органі буде мінімальним і визначиться тільки активним опором мережі відносно землі. Для усунення залишкового струму в обмотці реле KL , який зумовлений втратами в дроселі через діоди випрямляча $VD1$, пропускається струм від випрямляча $VD2$, який регулюють за допомогою резистора R_2 . Внаслідок цього всі діоди моста $VD1$ відкриваються і струм в реле буде визначатись різницею між струмом в першій обмотці трансформатора TL і струмом, що пропускається діодом в зворотному напрямку. Короткозамкнута обмотка використовується для зменшення впливу перехідного процесу.

Якщо вважати, що досягнута повна компенсація ємності мережі, та знехтувати ємністю фільтра приєднання C_0 , то струм у вимірювальному органі складе

$$I_{в.о.} = U_{\sim} \cdot \sqrt{1/R_{із}^2 + (2\omega C - k_{LC}/\omega L_{оп})^2}, \quad (1)$$

Де U_{\sim} – напруга змінного струму, що накладається на мережу (друга обмотка TL);

$R_{із}$ – загальний активний опір ізоляції полюсів мережі відносно землі;

$L_{оп}$ – індуктивність дроселя;

k_{LC} – коефіцієнт перетворення генератора LC.

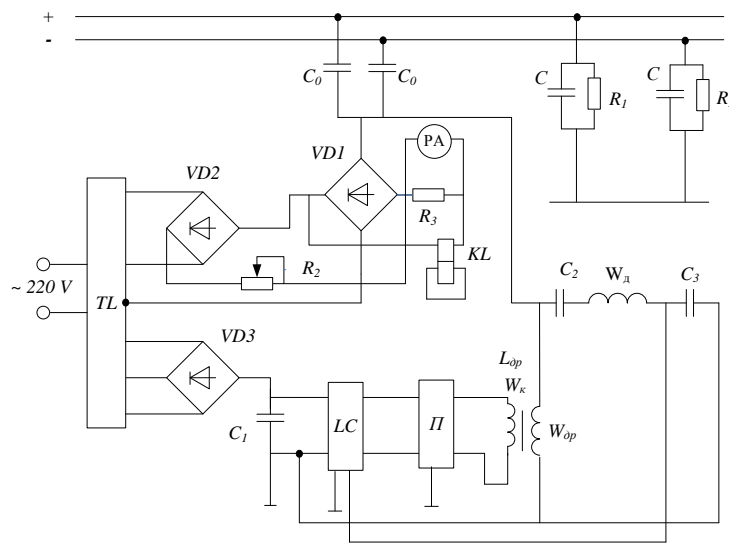


Рис. 1. Принципова схема УЗО

Якщо має місце резонансне налагодження, то $2\omega C = k_{LC}/\omega L_{оп}$ і пристрій забезпечує безперервний контроль загального активного опорю полюсів мережі відносно землі. Уставка спрацювання ПЗВ [8] вибирається як:

$$R_{із} = 0,25 \cdot \frac{U_0}{I_{h\ доп}}, \quad (2)$$

де U_0 – напруга джерела постійного струму;

$I_{h\text{ доп}}$ – допустимий струм через тіло людини у випадку, коли час його дії $t \geq 1$ с.

У разі такої уставки спрацювання реле можна забезпечити безпеку експлуатації мережі, але вона є надлишковою і призводить до невикористаних відключень машин і механізмів на всьому реально можливому діапазоні зміни опору ізоляції полюсів мережі відносно землі.

З метою усунення цього недоліку запропоновано комбінований метод контролю струму витікання у випадку дотику людини до струмоведучої частини обладнання [10-12]. Доведено, що ustalена величина струму через тіло людини може бути представлена рівнянням

$$I_h = i_h(0) \cdot \frac{R_{i3}}{R'_{i3}}, \quad (3)$$

де $i_h(0)$ – максимальне значення струму через тіло людини при $t=0$;

R'_{i3}, R_{i3} – відповідно активний опір ізоляції полюсів мережі відносно землі до моменту дотику людини (до утворення шунтувального зв'язку) до полюсів мережі та після нього.

Недолік цього методу полягає у складності узгодження захисної характеристики перехідного процесу перезаряду ємностей при виникненні шунтувального зв'язку і захисної характеристики при використанні принципу накладання змінного струму промислової частоти..

Викладення основного матеріалу. Метод селективного захисту [13] передбачає застосування загального захисного вимкнення двопровідної мережі 1 (рис. 2) та індивідуального ПЗВ, який розташований на кожному приєднанні, і його запускають від загального при виникненні шунтувального зв'язку. Індивідуальний пристрій вимірює величину активної складової струму через ізоляцію приєднання до моменту виникнення шунтувального зв'язку $I_{\phi a}$ та після виникнення шунтувального зв'язку $I'_{\phi a}$ і порівнює їх абсолютні значення (рис. 2). Порівняння здійснюється за сигналом від загального захисту 1. На пошкодженому фідері повинна завжди виконуватись умова $I'_{\phi ka} > I_{\phi ka}$, де $k=1, m$ – кількість приєднань, а на непошкодженому струм через приєднання від джерела змінного струму залишається практично незмінним, тобто $I'_{\phi ka} \approx I_{\phi ka}$. Ця ознака застосовується для визначення фідера, в якому виникає шунтувальний зв'язок, а момент порівняння визначає загальний захист, який контролює величину струму через шунтувальний зв'язок і порівнює його з допустимим значенням (нормою).

В розрахунковій схемі (рис. 2)

$$R_{ек1} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}; \quad R_{ек2} = \frac{R_{31} \cdot R_{32}}{R_{31} + R_{32}},$$

де R_1, R_2 – активний опір ізоляцій полюсів першого приєднання;

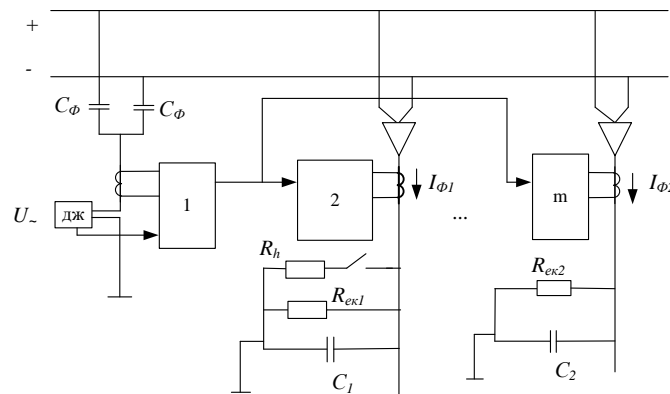


Рис. 2. Розрахункова схема для визначення струму в приєднанні при накладанні на РМПС джерела змінного струму

R_{31}, R_{32} – активні опори ізоляцій полюсів відносно землі всіх інших приєднань. Комплекс струму через джерело живлення можна визначити як:

$$i = \frac{\dot{U}_c}{\frac{1}{2j\omega C_\phi} + \frac{Z_{ek1} \cdot Z_{ek2}}{Z_{ek1} + Z_{ek2}}}, \quad (4)$$

$$\text{де } Z_{ek1} = \frac{R_{ek1}}{1 + 2j\omega C_1 R_{ek1}}; \quad Z_{ek2} = \frac{R_{ek2}}{1 + 2j\omega C_2 R_{ek2}};$$

$\dot{U}_c = U_m \cdot e^{j\varphi}$ – відповідно, комплекси опорів та напруги джерела живлення.

Комплекс струму через перше приєднання до виникнення шунтувального зв'язку

$$i_{\phi 1} = \frac{\dot{U}_c - i \frac{1}{2j\omega C_\phi}}{Z_{ek1}} = \frac{2U_c \cdot Z_{ek2} \cdot j\omega C_\phi}{Z_{ek1} + Z_{ek2} + Z_{ek1} \cdot Z_{ek2} \cdot 2j\omega C_\phi}. \quad (5)$$

Визначимо комплекс струму через перше приєднання після виникнення в ньому шунтувального зв'язку через опір R_h (рис. 3). Отримаємо:

$$i'_{\phi 1} = \frac{\dot{U}_c \cdot Z_{ek2} \cdot 2j\omega C_\phi}{Z'_{ek1} + Z_{ek2} + Z'_{ek1} \cdot Z_{ek2} \cdot 2j\omega C_\phi}, \quad (6)$$

$$\text{де } Z'_{ek1} = \frac{Z_{ek1} \cdot R_h}{Z_{ek1} + R_h}; \quad R'_{ek1} = \frac{R_{ek1} \cdot R_h (R_{ek1} + R_h)}{(R_{ek1} + R_h)^2 + \omega^2 C^2 R_{ek1}^2 R_h^2};$$

Після підстановки значень $Z_{ek1}, Z_{ek2}, Z'_{ek1}$ у вирази (5), (6) отримаємо:

$$i_{\phi 1} = \frac{\dot{U}_c \cdot 4\omega^2 C_\phi (R_{ek2} (C_2 + C_\phi) - 4C_1 R_{ek1})}{R_{ek1} \left[\frac{(R_{ek1} + R_{ek2})^2}{R_{ek1}^2 \cdot R_{ek2}} + 4 \cdot (C_1 + C_2 + C_\phi)^2 \omega^2 R_{ek2} \right]} + \quad (7)$$

$$+ j \frac{2\dot{U}_c \cdot \omega C_\phi R_{ek2} (4C_1 (C_1 + C_2 + C_\phi) R_{ek1}^2 \cdot R_{ek2} \omega^2 + R_{ek1} + R_{ek2})}{(R_{ek1} + R_{ek2})^2 + 4 \cdot (C_1 + C_2 + C_\phi)^2 R_{ek2}^2 R_{ek1}^2 \omega^2};$$

$$i'_{\phi 1} = \frac{\dot{U}_c \cdot 4\omega^2 C_\phi \left(R_{ek2} (C_2 + C_\phi) - C_1 \frac{R_h \cdot R_{ek1}}{R_h + R_{ek1}} \right)}{R'_{ek1} \left[\frac{(R_{ek1} + R_{ek2})^2}{R_{ek1}^2 \cdot R_{ek2}} + 2 \frac{R_{ek1} + R_{ek2}}{R_h \cdot R_{ek1}} + \frac{R_{ek2}}{R_h^2} + 4(C_1 + C_2 + C_\phi)^2 \omega^2 R_{ek2} \right]} +$$

$$+ j \frac{2\dot{U}_c \cdot 2\omega C_\phi R_{ek2} \left[4R_h^2 R_{ek1}^2 R_{ek2} \omega^2 (C_1 C_\phi + C_1^2 + C_1 C_2) + \left[(R_{ek1} + R_{ek2}) R_h + R_{ek1} \cdot R_{ek2} \right]^2 + \left[2(C_1 + C_2 + C_\phi) R_{ek1} \cdot R_{ek2} R_h \omega \right]^2 \dots \right]}{\dots \left[(R_h + R_{ek1}) (R_h (R_{ek1} + R_{ek2}) + R_{ek1} \cdot R_{ek2}) \right]}. \quad (8)$$

Із виразів (7) і (8) видно, що активна складова струму $I_{\phi 1a}$ до моменту виникнення шунтувального зв'язку зворотно пропорційна загальному активному опору $R_{ек1}$, а після виникнення шунтувального зв'язку $-R'_{ек}$. Проведемо дослідження впливу параметрів $C_\phi, C_1, C_2, R_{ек1}, R_{ек2}$ розрахункової схеми (рис. 2) на методичну похибку визначення активної складової струмів $I_{\phi 1a}, I'_{\phi 1a}$.

Методична похибка визначення може бути представлена як [74]:

$$\varepsilon_{I_{\phi a}} = \frac{|I_{\phi 1a}| - |I_D|}{|I_D|}, \quad (9)$$

де $I_D = \frac{U_c}{R_{ек1}}$ – дійсне значення активної складової струму з врахуванням (7).

$$\varepsilon_{I_{\phi a}} = \left| \frac{4\omega^2 C_\phi (R_{ек2} (C_2 + C_\phi) - 4C_1 R_{ек1})}{(R_{ек1} + R_{ек2})^2 + 4(C_1 + C_2 + C_\phi)^2 \omega^2 R_{ек2}} - 1 \right| \cdot 100\%. \quad (10)$$

Аналогічно методичну похибку для активної складової струму першого приєднання після виникнення шунтувального зв'язку визначимо із (4) з врахуванням (8), тоді отримаємо:

$$\varepsilon_{I_{\phi a}} = \left| \frac{4\omega^2 C_\phi \left(R_{ек2} (C_2 + C_\phi) - C_1 \frac{R_h \cdot R_{ек1}}{R_h + R_{ек1}} \right)}{\frac{(R_{ек1} + R_{ек2})^2}{R_{ек1} \cdot R_{ек2}} + 2 \frac{R_{ек1} + R_{ек2}}{R_h \cdot R_{ек1}} + \frac{R_{ек2}}{R_h^2} + 4(C_1 + C_2 + C_\phi)^2 \omega^2 R_{ек2}} - 1 \right| \times 100\%. \quad (11)$$

Досвід експлуатації показав, що для промислових підприємств ємність окремого приєднання не перевищує 0,1 мкФ, а загальна ємність РМПС – 1 мкФ; активний опір ізоляції окремих приєднань може змінюватись в широких межах – від 30 до 1000 кОм. Допустиме значення опору шунтувального зв'язку для РМПС напругою 220 В може бути визначено за рівняннями як $R_h = 0,55 \div 7,33$ кОм. Допустиме симетричне зниження ізоляції РМПС $R_c = 12,48$ кОм.

Виходячи із значення цих параметрів, розрахункові значення залежності $\varepsilon_{I_{\phi a}} = f(R_{ек1}, R_{ек2})$ при $C_1 = 0,1$ мкФ, $C_2 = 1$ мкФ для двох можливих значень $C_\phi = 20$ і 100 мкФ, а також $\varepsilon_{I_{\phi a}} = f(R_{ек1}, R_{ек2})$ і різних значеннях $R_h = 0,55; 1; 7,33$ кОм. Геометрична інтерпретація цих залежностей показана на рис. 4 і 5.

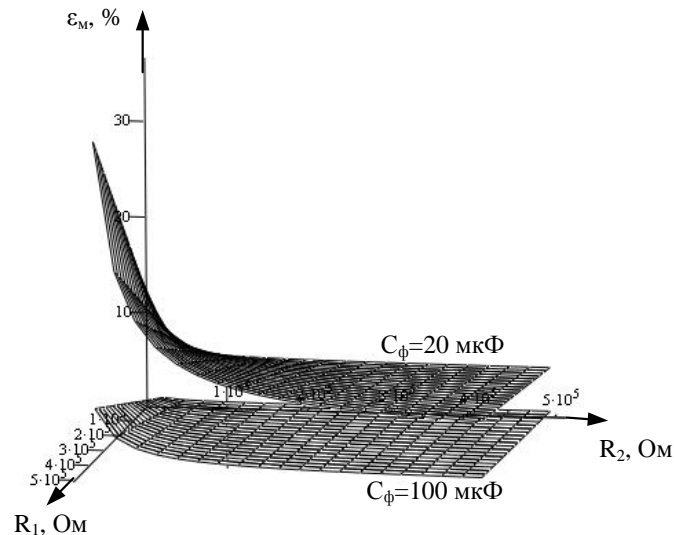


Рис. 3. Залежність методичної похибки визначення активної складової струму на першому присьднанні від активного опору $\varepsilon_m = f(R_{ек1}, R_{ек2})$, $C_1 = 0,1$ мкФ, $C_2 = 1$ мкФ при двох значеннях ємності фільтра присьднання $C_\phi = 20, 100$ (мкФ)

Аналіз отриманих результатів показав, що методична похибка визначення активної складової струму $I_{\phi 1a}$ до моменту виникнення шунтувального зв'язку, в основному, залежить від величини ємності фільтра. При збільшенні ємності фільтра від 20 до 100 мкФ відносна похибка зменшується від 5% до 1%. Методична похибка визначення активної складової струму $I'_{\phi 1a}$ — після виникнення шунтувального зв'язку, в основному, залежить від величини опору шунтувального зв'язку та при зміні $0,55 < R_h < 7,33$ (кОм), при яких спрацьовує ПЗВ, знаходиться в межах $(1 < \varepsilon < 1,25)\%$.

Величина струму на непошкодженому присьднанні до моменту виникнення пошкодження на першому присьднанні може бути визначена як: (рис. 2)

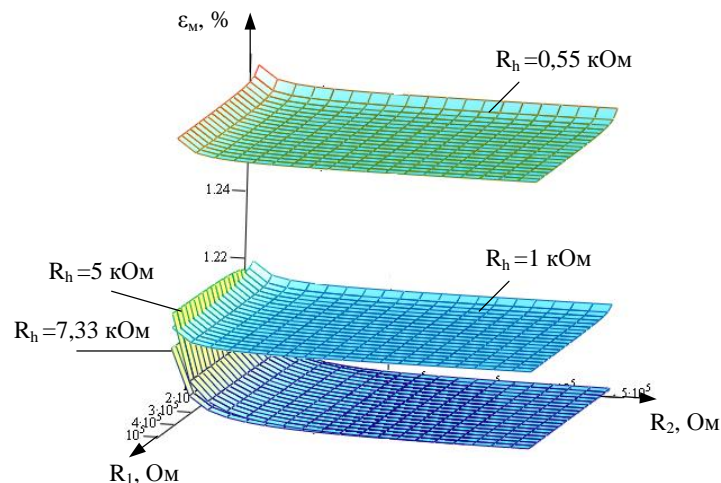


Рис. 4. Залежність методичної похибки визначення активної складової струму на першому присьднанні при виникненні шунтувального зв'язку для $0,55 < R_h < 7,33$ (кОм), $C_1 = 0,1$ мкФ, $C_2 = 1$ мкФ, $C_\phi = 100$ мкФ

$$\dot{I}_{\Phi 2} = \frac{\dot{U}_c - i \frac{1}{2j\omega C_{\Phi}}}{Z_{ек2}} = U_c \frac{Z_{ек1} \cdot 2j\omega C_{\Phi}}{Z_{ек1} \cdot Z_{ек2} + 2j\omega C_{\Phi} \cdot Z_{ек1} \cdot Z_{ек2}} \quad (12)$$

Після виникнення пошкодження на першому приєднанні

$$\dot{I}'_{\Phi 2} = \frac{U_c \cdot Z'_{ек1} \cdot 2j\omega C_{\Phi}}{Z'_{ек1} + Z_{ек2} + Z'_{ек1} \cdot Z_{ек2} \cdot 2j\omega C_{\Phi}} \quad (13)$$

Після підстановки значень $Z_{ек1}$, $Z_{ек2}$, $Z'_{ек1}$, в (8), (9) отримуємо:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{\Phi 2} = & \frac{U_c}{R_{ек2}} \frac{4\omega^2 C_{\Phi} (R_{ек1} (C_2 + C_{\Phi}) - 4C_2 R_{ек2})}{\left[\frac{(R_{ек1} + R_{ек2})^2}{R_{ек2}^2 \cdot R_{ек1}} + 4(C_1 + C_2 + C_{\Phi})^2 \omega^2 R_{ек1} \right]} + \\ & + j \frac{2U_c \cdot \omega C_{\Phi} R_{ек1} (4C_2 (C_1 + C_2 + C_{\Phi}) R_{ек1} R_{ек2}^2 \omega^2 + R_{ек1} + R_{ек2})}{(R_{ек1} + R_{ек2})^2 + 4(C_1 + C_2 + C_{\Phi})^2 \omega^2 R_{ек1} R_{ек2}^2} \end{aligned} \quad (14)$$

Аналогічно для струму $I'_{\Phi 2}$

$$\begin{aligned} \dot{I}'_{\Phi 2} = & \frac{\dot{U}_c}{R_{ек2}} \left[\frac{4\omega^2 C_{\Phi} \left(C_{\Phi} - C_2 \left(\frac{R_{ек2}}{R_h} + \frac{R_{ек2}}{R_{ек1}} \right) \right)}{\left(1 + \frac{R_{ек2}}{R_h} + \frac{R_{ек2}}{R_{ек1}} \right)^2 \frac{1}{R_{ек2}^2} + 4\omega^2 (C_{\Phi} + C_2)^2} - \right. \\ & \left. - 2j \frac{\omega C_{\Phi} R_{ек2} \left(4\omega^2 R_{ек2}^2 (C_{\Phi} + C_2) C_2 - 1 - \frac{R_{ек2}}{R_h} - \frac{R_{ек2}}{R_{ек1}} \right)}{\left(1 + \frac{R_{ек2}}{R_h} + \frac{R_{ек2}}{R_{ек1}} \right)^2 + 4\omega^2 R_{ек2}^2 (C_{\Phi} + C_2)^2} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

Різниця модулів активної складової струму до моменту виникнення шунтувального зв'язку $|\dot{I}_{a\Phi 2}|$ та після його виникнення $|\dot{I}'_{a\Phi 2}|$ може бути визначена із рівнянь (14) і (15) як:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{I}_{a\Phi 2} = & \left| \frac{\dot{I}_{a\Phi 2} - \dot{I}'_{a\Phi 2}}{\dot{I}_{a\Phi 2}} \right| \cdot 100\% = \left| 1 - \frac{\dot{I}'_{a\Phi 2}}{\dot{I}_{a\Phi 2}} \right| \cdot 100\% = \\ = & \left| 1 - \frac{\left(C_{\Phi} - C_2 \left(\frac{R_{ек2}}{R_h} + \frac{R_{ек2}}{R_{ек1}} \right) \right) (R_{ек1} + R_{ек2})^2 + 4(C_1 + C_2 + C_{\Phi})^2 \omega^2 R_{ек1}^2 \cdot R_{ек2}^2}{R_{ек1}^2 \left[R_{ек1} (C_2 + C_{\Phi}) - 4C_2 R_{ек2} \right] \left[\left(1 + \frac{R_{ек2}}{R_h} + \frac{R_{ек2}}{R_{ек1}} \right)^2 + 4\omega^2 (C_{\Phi} + C_2)^2 R_{ек2}^2 \right]} \right| \times 100\% \end{aligned} \quad (16)$$

На рис. 5 побудована залежність відносної різниці струмів від величини $R_{ек1}$ і $R_{ек2}$ при $C_2 = 1 \text{ мкФ}$, $C_{\Phi} = 500 \text{ мкФ}$ і зміні $R_h = 0,55; 1; 5; 7,33 \text{ Ом}$.

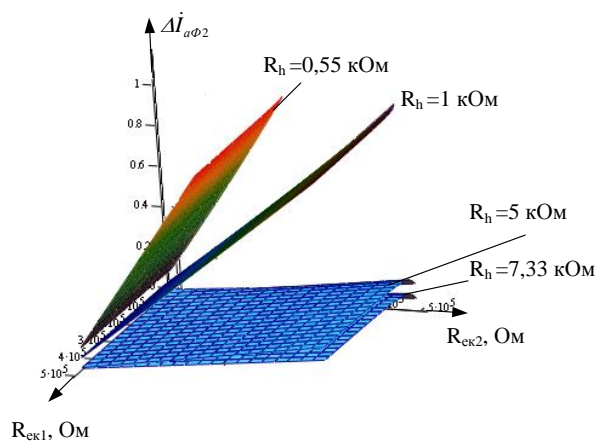


Рис. 5. Залежність відносної різниці струмів $\Delta I_{\alpha\phi 2}$ в % на пошкодженому відгалуженні від зміни опору шунтувального зв'язку на пошкодженому приєднанні

Відхилення модуля струмів при зміні $0,55 \leq R_h \leq 7,33$ не перевищує 1%.

Висновки. Безперервний контроль ізоляції необхідно доповнити періодичним контролем омичного опору ізоляції окремих полюсів відносно землі. Для розв'язання цієї задачі запропоновано метод накладання постійного струму різної полярності. Цей метод дозволяє виключити вплив ємності мережі відносно землі на результати вимірювання, і в найбільш несприятливих умовах вимірювання для середнього класу вимірювальних пристроїв ($\epsilon=1\%$) похибка контролю не перевищує $\epsilon \leq 10\%$. Для підвищення точності вимірювання омичного опору ізоляції полюсів в двопровідній мережі постійного струму доцільно застосовувати комбінацію статичної і динамічної характеристики вимірювального експерименту і дублювання. Це дозволяє зменшити вплив ємності мережі на результати вимірювань і похибку від неспівпадаючих з часом вимірювань при коливанні напруги і зміні навантаження двопровідної мережі постійного струму.

Список використаних джерел:

1. Конституція України: Прийнята на п'ятій сесії Верховної Ради України 28 червня 1996р. – К.: Преса України, 1997 – 80 с.
2. Закон України “Про захист енергетику” від 16 жовтня 1997 р. №375/97-ВР.
3. Закон України “Про охорону праці” //Охорона праці.– 2003.– №1 С.3—11.
4. Нарада з проблем електротравматизму в Міненерго України, 19 листопада 1996 р., Київ.
5. Манойлов В. Е. Основы электробезопасности / В. Е. Манойлов. — 4-е изд. — Ленинград : Энергоатомиздат, 1985. — 384 с.
6. Корякин Р.Н. Научные концепции электробезопасности элект-роустановок жилых зданий / Р.Н. Корякин // Промышленния энергетика. — 1995. — № 5. — С. 29—34.
7. Нарада з проблем електротравматизму в Міненерго України. 19 листопада 1996 р., Київ.
8. Кононенко В.П. Исследование и разработка защиты от утечек в подземных изолированных от земли электрических сетях постоянного тока: Дис. на соискание канд. техн. наук: спец 05.09.03 – “Электро-оборудование горного производства” / Кононенко Владимир Петрович.– Донецк: Донецкий Ордена Трудового Красного знамени
9. А.с. 246641 СССР. Устройство автоматического контроля изоляции сетей постоянного тока; / В.С. Дзюбан, В.П. Кононенко; – 3892243/21-21; Заявлено 25.05.69; Опубл. 12.03.70, Бюл. №2. С.53.
10. А.с. 1339732 СССР. Способ защитного отключение двухпроводной сети постоянного тока при прикосновении к ней человека; / В.М.Кутин; – 4735830/07; Заявл. 05.09.89; Опубл. 07.10.92, Бюл. №37. – 7 с.
11. Кутин В.М. Усовершенствованное устройство защитного отключения для сетей постоянного тока до 1000 В / В. М. Кутин // Электричество. — 1989. — № 5. – С. 64—68.
12. Кутин В. М. Метод измерения тока через утечку по параметрам переходного процесса в двухпроводных сетях постоянного тока / В.М.Кутин, Шахид Умар // Проблемы преобразовательной техники. Тез.докл. н-т конф. –Ч.І — Киев, 1991. — С. 223.
13. Добровольська Л.Н. Селективний контроль омичного опору ізо-ляції в лвопровідних мережах постійного струму / Л.Н. Добровольська , М.В. Романюк // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Випуск 3/2010 (62). Ча-стина 2. – Кременчук, 2010. – С. 90–94.

Стаття надійшла до редакції 18.03.2019

УДК 685.34.02

Р.В. Росул, Т.М. Садовнікова, Т.Т. Рейс*Мукачівський державний університет, Україна***СТАН ТА МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ВИГОТОВЛЕННЯ КОМФОРТНОГО ВЗУТТЯ**

В роботі розглянуто які властивості взуття є визначальними для створення якісного та конкурентоспроможного взуття, а також основні напрямки споживчих вимог, пред'явлених до взуттєвих виробів. За допомогою процесу дослідження та удосконалення факторів, які обумовлюють комфортність досліджуваного об'єкту та визначення параметрів, які забезпечують психологічний комфорт споживачеві для подальшого вдосконалення моделювання взуття. Актуалізовано питання якості взуття, що визначається широким комплексом властивостей, серед яких одне з перших місць по вагомості займають ергономічні властивості, які обумовлюють комфортність виробу. Виявлено, що найважливішою функцією взуття є захист ніг від несприятливих факторів зовнішнього середовища: пониженої чи високої температури, води, вітру, дощу, снігу, надмірної сонячної радіації. Зроблена спроба характеристики комфортності взуття у вигляді трьох рівнів: перший – первинна зручність, яка формується на основі антропометричних і психофізіологічних вимог до взуття. Вони є достатніми при виборі або придбанні взуття, оскільки припускають відповідність конструкції взуття формі і розмірам стопи в статичній, позитивне емоційне сприйняття, зручність при надяганні і знятті; другий – оптимальний комфорт окрім названих властивостей об'єднує такі, які проявляються в процесі експлуатації взуття. До них відносяться силові взаємодії стопи зі взуттям, властивості, що визначають мікроклімат стопи, що забезпечують захищеність, від дій зовнішнього середовища; третій – підвищений комфорт об'єднує властивості, які виключають локальні механічні дії на окремі ділянки стопи, а також сприяють створенню профілактичних і оздоровчих умов. Встановлено, що естетичність взуття обумовлює необхідність гармонійного поєднання матеріалів, легкості і міцності конструкції, елегантності і відповідного колористичного оформлення, вибору прикрас, ретельності виготовлення і відповідності моді. Ці критерії відносяться до взуття усіх статевих-вікових груп різного призначення, оскільки естетичне взуття забезпечує, крім іншого, і гарне самопочуття людини. Таким чином, проаналізувавши споживчі потреби, можна стверджувати, що забезпечення комфортності при носінні не є основною функцією взуття, оскільки психологічний комфорт зумовлюється різними чинниками. Необхідно визначити, що є пріоритетним напрямком споживачів при виборі взуття для того, щоб виробники могли підвищити рівень конкурентоспроможності своїх виробів.

Ключові слова: взуття, комфортність, конструкція, ергономічні властивості, матеріал, відчуття, зручність, фізико-механічні властивості, психологічні фактори, форма, розмір.

Р.В. Росул, Т.М. Садовнікова, Т.Т. Рейс*Мукачевський державний університет, Україна***СОСТОЯНИЕ И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЕ КОМФОРТНОЙ ОБУВИ**

В работе рассмотрены какие свойства обуви являются определяющими для создания качественного и конкурентоспособного обуви, а также основные направления потребительских требований, предъявляемых к обувным изделиям. С помощью процесса исследования и усовершенствования факторов, обуславливающих комфортность исследуемого объекта и определение параметров, которые обеспечивают психологический комфорт потребителю для дальнейшего совершенствования моделирования обуви. Актуализирован вопрос качества обуви, определяемый широким комплексом свойств, среди которых одно из первых мест по значимости занимают эргономические свойства, которые обуславливают комфортность изделия. Выведено, что важнейшей функцией обуви является защита ног от вредных факторов внешней среды: пониженной или высокой температуры, воды, ветра, дождя, снега, избыточной солнечной радиации. Сделана попытка характеристики комфортности обуви в виде трех уровней: первый - первичное удобство, которое формируется на основе антропометрических и психофизиологических требований к обуви. Они являются достаточными при выборе или приобретении обуви, поскольку предполагают соответствие конструкции обуви форме и размерам стопы в статике, позитивное эмоциональное восприятие, удобство при одевании и снятии, второй - оптимальный комфорт кроме названных особенностей объединяет такие, которые проявляются в процессе эксплуатации обуви. К ним относятся силовые взаимодействия стопы с обувью, свойства, определяющие микроклимат стопы, обеспечивают защиту, от действий внешней среды; третий - повышенный комфорт объединяет свойства, которые исключают локальные механические действия на отдельные участки стопы, а также способствуют образованию профилактических и оздоровительных условий. Установлено, что эстетичность обуви обуславливает необходимость гармоничного сочетания материалов, легкости и прочности конструкции, элегантности и соответствующего колористического оформления, выбора украшений, тщательности изготовления и соответствия моде. Эти критерии относятся к обуви всех половых-возрастных групп разного назначения, поскольку эстетичная обувь обеспечивает, помимо прочего, и хорошее самочувствие человека. Таким образом, проанализировав потребительские требования, можно утверждать, что обеспечение комфортности при ношении не является основной функцией обуви, поскольку психологический комфорт обусловлен различными факторами. Необходимо определить, что является пріоритетным направлением потребителей при выборе обуви для того, чтобы производители могли повысить уровень конкурентности своих изделий.

Ключевые слова: обувь, комфортность, конструкция, эргономические свойства, материал, ощущение, удобство, физико-механические свойства, психологические факторы, форма, размер.

R. Rosul, T. Sadovnikova, T. Rejs

Mukachevo State University, Ukraine

STATE AND METHODS OF IMPROVING PRODUCTION COMFORTABLE FOOTWEAR

The work considers the properties of shoes are crucial for the creation of high-quality and competitive shoes, as well as the main directions of consumer requirements imposed on shoe products. Through the process of research and improvement of factors that determine the comfort of the object under investigation and determine the parameters that provide psychological comfort to the consumer for further improvement of shoe modeling. The issue of quality of shoes, which is determined by a wide range of properties, is among the most important among them, which occupy ergonomic properties that determine the comfort of the product. It is revealed that the most important function of footwear is to protect against the unfavorable factors of the external surface: low or high temperature, water, wind, rain, snow, excessive solar radiation. The attempt is made to characterize the comfort of the shoes in the form of three levels: the first one is the essential comfort, which is formed on the basis of anthropometric and psycho-physiological requirements for footwear. They are sufficient for the selection or purchase of shoes, since they assume conformity of the construction of the footwear of the form and the size of the foot in the static, positive emotional perception, the convenience of wearing and removing; the second - the optimal comfort among the properties mentioned is united in the manner that is manifested in the stage of exploitation of footwear. The optimum comfort of the named properties combines such as appear in the stage of exploitation of shoes. These include the strong interaction of foot with footwear, the properties that determine the microclimate of the foot, which protects the protection, from the action of the outer surface, and thirdly, the higher comfort combines properties that exclude local mechanical actions on the areas of the foot, and also contribute to the development of prophylactic and It is established that the aesthetic nature of the shoes determines the non-occurrence of the harmonious combination of materials, lightness and structure of the structure, the lightness and color of the corresponding design, the choice of jewelry, the reproducibility of the fabrication, and, accordingly, ti mode. These criteria refer to shoes of all age groups of different purposes, since aesthetic shoe prevents, after another, and a good state of health of a person. Thus, after analyzing consumer demand, it can be argued that comfort in wearing is not the main function of shoes, because psychological comfort is caused by different factors. It is imperative to determine what is the priority direction of consumers when choosing shoes in order for producers to increase the level of competitiveness of their products.

Key words: shoes, comfort, design, ergonomic properties, material, feelings, convenience, physical and mechanical properties, psychological factors, shape, size.

Легка промисловість займає одне з перших місць серед галузей промисловості, які забезпечують людину усім необхідним для нормальної життєдіяльності. Пріоритетні завдання легкої промисловості – формування і розміщення державних замовлень та державних контрактів, координування діяльності підприємств, пов'язане з виконанням цього завдання, розробка цільових програм перспективного розвитку нових видів сировини, збалансованого розвитку підгалузей. Основним функціональним призначенням виробів легкої промисловості являється захист організму людини від дії зовнішніх факторів: підвищених та понижених температур, вітру, дощу і т.д. Взуттєва промисловість після текстильної є найважливішою підгалуззю легкої промисловості. Після становлення України як незалежної держави динаміка функціонування підприємств даної галузі зменшувалася. На сьогоднішній день більшість функціонуючих підприємств випускають взуття невеликими за обсягом партіями. Для зросту показників випуску виробів взуттєвої промисловості необхідно підвищувати їх якість. Якість взуття визначається широким комплексом властивостей, серед яких одне з перших місць по вагомості займають ергономічні властивості, які обумовлюють комфортність виробу.

Аналіз різних джерел показав, що питанню підвищення комфортності приділено мало уваги. Надзвичайно рідко проводять опитування серед споживачів для визначення їх пріоритетів при покупці взуття і в більшості випадків керуються лише напрямком моди та застарілими даними подібних соціопитувань.

Ергономічні властивості задовольняють фізіологічні і психологічні потреби споживача відповідно з певними характеристиками. Залежно від цих характеристик ергономічні властивості підрозділяють на підгрупи: антропометричні, психологічні та психолого-фізіологічні.

Незалежно від поділу ергономічних властивостей взуттєвих виробів, в загальному підсумку вони повинні забезпечувати споживачеві психологічний комфорт.

Велика кількість виробників на сьогоднішній день намагається спростити процес виробництва на різних його етапах. Це призводить до пониження якості взуття і відповідно його комфортності.

Досвід країн з високорозвинутою системою свідчить, що найбільш повне задоволення потреб населення досягається шляхом виявлення цільового споживача і вивчення специфіки його вимог до виробів. Орієнтація на конкретні групи населення дозволяє встановити першорівневі властивості товару і направити зусилля на їх формування. Врахування особливостей найбільш вірогідного споживача найважливіше при виробництві виробів, розрахованих на безпосередній

контакт з тілом людини, розміри і форма яких визначається розмірами і формою органів, які вони покривають. Серед таких виробів продукція взуттєвого виробництва займає особливе місце.

Взуття – це предмет особистого споживання, який знаходиться майже в найтіснішому контакті з тілом людини, тобто в більшості випадків закріплюється і утримується на стопі тільки дякуючи силам тертя, які виникають при визначенні стиснення її поверхневих тканин.

Зручність взуття обумовлюється великою кількістю чинників. Сучасне виготовлення взуття як вітчизняними виробниками, так і іноземними, в основному спрямовується на різноманіття моделей, фасонів та кольорів. Але суттєвим недоліком є те, що в гонитві за естетичними якостями, упускаються найважливіші завдання: забезпечення споживачів взуттям, яке захищає стопу від зовнішніх впливів та є комфортним при носінні.

Мета дослідження.

Визначення факторів, які забезпечують психологічний комфорт споживачеві для подальшого вдосконалення моделювання взуття.

Методи дослідження.

Визначення, аналіз та дослідження показників з метою підвищення комфортності взуття, які можуть застосовуватися при виготовленні виробів.

Об'єкт, предмет та методи дослідження.

Об'єктом дослідження є процес дослідження та удосконалення факторів, які обумовлюють комфортність взуття.

Предмет дослідження – фактори комфортності взуття.

Виклад основного матеріалу

Ергономічні властивості і їх роль в формуванні комфортного взуття

Взуття є одним з найважливіших товарів, які випускаються легкою промисловістю України та імпортується з-за кордону, і від того наскільки правильно визначено, яка кількість взуття залежно від орієнтації на різні статево-вікові групи та якої якості моделі повинна виробляти промисловість чи закупляти торгівля, наскільки їх асортимент конкурентоспроможний та задовольняє потреби споживачів, залежить рівень попиту, а також прибутковість підприємств [1].

Найважливішою функцією взуття є захист ніг від несприятливих факторів зовнішнього середовища: пониженої чи високої температури, води, вітру, дощу, снігу, надмірної сонячної радіації.

В процесі експлуатації взуття захищає стопу людини від пилу, бруду, мікроорганізмів. Але водночас воно повинно бути комфортним та забезпечувати певний мікроклімат навколо стопи людини і не викликати дискомфортних відчуттів [2].

Комфортність взуття визначає загальний стан людини, а також його працездатність. Створення комфортного взуття відповідного виду і призначення є комплексною проблемою, яка залежить від вирішення завдань в області конструювання, технології і матеріалознавства. При цьому основну роль відіграють достовірні антропометричні параметри стоп, які враховуються при проектуванні колодки. Колодка на стадії виготовлення взуття формує внутрішній об'єм взуття і форму опорної поверхні [3].

Підвищення комфортності взуття неможливе без об'єктивної оцінки номенклатури показників властивостей, що визначають якість виробу. За останні роки, проведений ряд робіт [4-5], спрямованих на розробку вимог і розробку номенклатури показників, що характеризують якість взуття.

Відповідно до ГОСТ під терміном “комфортність” мається на увазі найбільша відповідність сукупності умов експлуатації виробу функціональним особливостям людського організму”. В роботі [6] зроблена спроба характеристики комфортності взуття у вигляді трьох рівнів:

- перший – первинна зручність, яка формується на основі антропометричних і психофізіологічних вимог до взуття. Вони є достатніми при виборі або придбанні взуття, оскільки припускають відповідність конструкції взуттю формі і розмірам стопи в статиці, позитивне емоційне сприйняття, зручність при надяганні і знятті;

- другий – оптимальний комфорт окрім названих властивостей об'єднує такі, які проявляються в процесі експлуатації взуття. До них відносяться силові взаємодії стопи зі взуттям, властивості, що визначають мікроклімат стопи, що забезпечують захищеність, від дій зовнішнього середовища;

- третій – підвищений комфорт об'єднує властивості, які виключають локальні механічні дії на окремі ділянки стопи, а також сприяють створенню профілактичних і оздоровчих умов.

На наш погляд цей поділ недоцільний, оскільки формулювання ГОСТ за визначенням "комфортності" поглинає ці три рівні, тобто взуття може бути комфортним або некомфортним.

У роботі [7] представлена класифікація показників ергономічних властивостей взуття для характеристики її комфортності (рис. 1.).

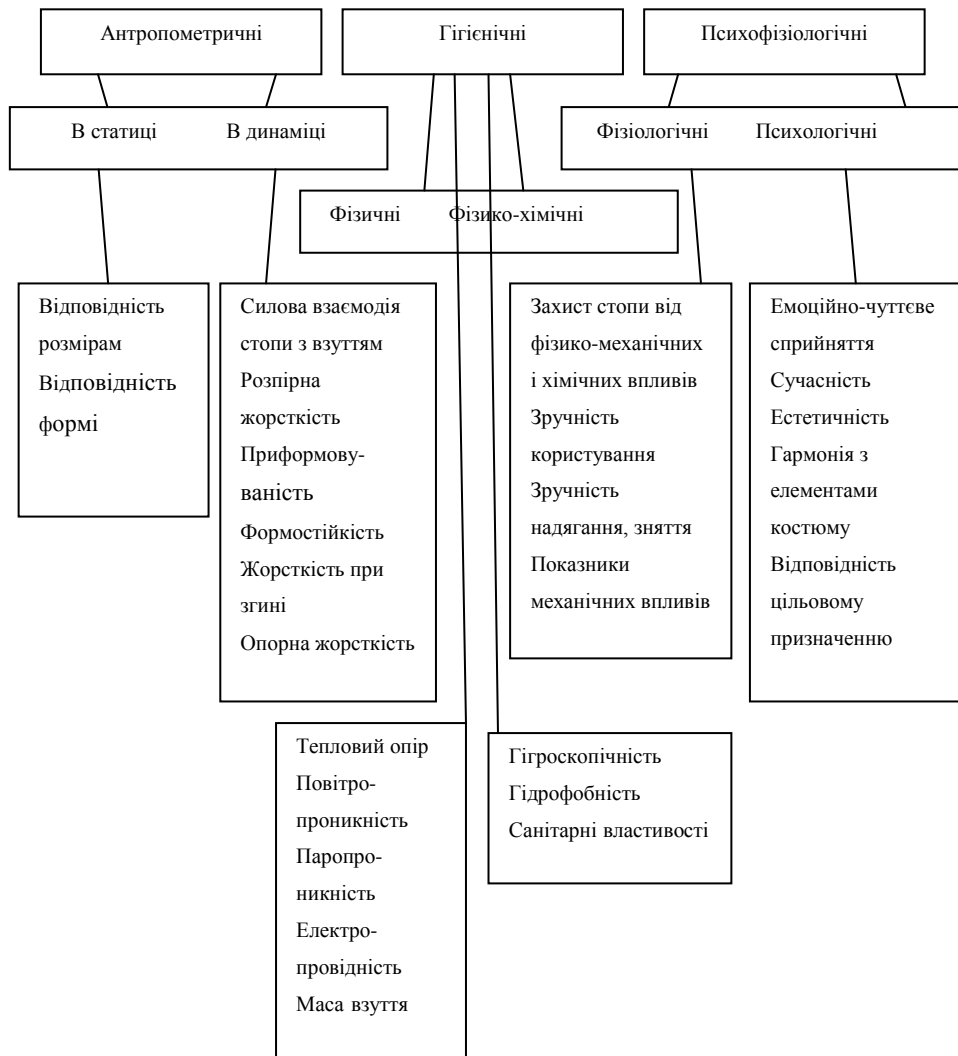


Рис. 1. Класифікація показників ергономічних властивостей, які визначають комфортність взуття

Запропонована класифікація дуже цікава і досить повно відбиває, які властивості повинне мати комфортне взуття. Разом з цим слід зазначити, що в статиці, коли людина стоїть, взуття також чинить механічний тиск на стопу, як і в динаміці. Проте, в представленій схемі це не знайшло свого відображення. Окрім цього, в представленій схемі класифікації показників ергономічних властивостей, такі показники як: "приформовуваність", "формостійкість" відносяться до комплексних показників, а "опорна жорсткість", "жорсткість при згині" до одиничних показників властивостей виробу. Тому було б доцільно доповнити показники – "приформовуваність" і "формостійкість" одиничними показниками властивостей. Аналогічні зауваження виникають при аналізі комплексних показників третього рівня "фізичні" і "фізико-хімічні". Якщо показники "фізичні" розкриваються через одиничні показники властивостей, то "фізико-хімічні" – через комплексні, такі як: "гідрофобність", "санітарні властивості". Показник "гігроскопічність" було б доцільніше перенести в показники "фізичні".

Незважаючи на виявлені неточності, приведена схема дозволяє наочно простежити взаємозв'язки показників властивостей для характеристики комфортності взуття і показує, наскільки різноманітне і складне це завдання.

Вплив фізико-механічних властивостей на комфортність мікроклімату стопи

Одними з основних показників при оцінці комфортного та якісного взуття являються фізико-механічні властивості матеріалів.

Необхідно, щоб матеріали, з яких виготовляється взуття, захищали стопу від зовнішніх впливів, забезпечували зручність і гігієнічність взуття, були б зносостійкими, зберігали початкову форму взуття і дозволяли надійно скріплювати деталі одне з одним. При цьому взуття повинно мати красивий вигляд і бути доступним, що також в значній мірі залежить від матеріалів, з яких воно виготовляється.

В залежності від призначення взуття, тобто від умов його носіння (роботи взуття), будуть різні вимоги, які пред'являються до матеріалів, з яких виготовляються деталі взуття і, естетичні вимоги. Але незважаючи на це, основні вимоги до взуттєвих матеріалів, без задоволення яких матеріал не може бути застосований для виготовлення взуття, будуть загальними. Вони будуть визначатися будовою стопи, її роботою і фізіологічними функціями, кліматичними особливостями середовища, умовами, в яких носить взуття, а також естетичними вимогами споживачів.

В залежності від призначення взуття до них висувають різні вимоги.

В той же час до матеріалів пред'являють вимоги, які визначаються процесом виробництва взуття, тобто технологічними вимогами. Вони також повинні бути добре відомі, для того щоб правильно побудувати процес виробництва і забезпечити необхідну якість взуття.

До взуттєвих матеріалів пред'являються виробничі і споживчі вимоги щодо їхньої придатності для перероблення у вироби наявними методами і можливості захисту ніг від небажаних чинників навколишнього середовища. З удосконаленням обладнання, технологічних процесів, поліпшення культури виробництва вимоги до матеріалів змінюють.

Виробничі (технологічні) вимоги до взуттєвих матеріалів – це вимоги до їхньої міцності на розрив, драпірованості, термостійкості, рівномірної товщини за площею та ізотропності фізико-механічних властивостей у різних напрямках. Споживчі вимоги до взуттєвих матеріалів – це вимоги до їхньої міцності, гігієнічності, еластичності, надійності, довговічності, ремонтпридатності, безпечності та ін. [8].

Взуття повинно забезпечувати споживачу максимум свободи руху і відчуття комфорту, під яким слід розуміти відповідну вологість і температуру, відвернення електростатичних зарядів, що накопичуються в результаті тертя, подачу повітря до шкіри і мінімальне навантаження ноги масою і жорсткістю взуття.

Незважаючи на те, що питаннями гігієни взуття вчені почали займатися давно, до цього часу немає системи чітких критеріїв оцінки гігієнічних властивостей як взуття в цілому, так і матеріалів, з яких воно виготовляється. Створення визначеного мікроклімату всередині взуття, тобто середовища з визначеною температурою і вологістю біля поверхні стопи, необхідно для нормального функціонування стопи і всього організму людини. Такий мікроклімат створюється шляхом підбору відповідних матеріалів і конструкції взуття.

Гігієнічні властивості для взуття являються доволі суттєвими. Іноді вони в загальному визначають придатність чи непридатність матеріалу для взуття.

При інтенсивному виділенні поту поверхня взуття покривається білими плямами – нальотами солі, його головної складової частини. Вихід солі на поверхню взуття можливий тільки внаслідок міграції рідкого поту (а не його парів) на поверхню взуття і випаровування з цієї поверхні.

Волога, що виділяється стопою під час носіння взуття, виводиться механічно – шляхом викиду водяної пари з повітрям завдяки всмоктуючо-нагнітальній дії взуття (при його згинанні і випрямленні); шляхом дифузії води через шкарпетки і деталі взуття. Частина вологи накопичується в деталях взуття і видаляється з них після зняття.

Таким чином, щоб зняти зі стопи надлишкову вологу і забезпечити їй комфортні умови, матеріали, з яких виготовлені деталі, повинні бути достатньо вологоємними.

При вивченні параметрів комфортного стану взуття дослідження проводилось у взутті з верхом із натуральної і різних синтетичних шкір. Комфортні умови носії взуття відчували при відносній вологості повітря всередині взуття до 90% і температурі 21-25 С. Такий рівень вологості досягався за 1,5-2 год ходіння у взутті з верхом із синтетичних шкір і за 5 год – у взутті з верхом з натуральної шкіри. При цьому паропроникність обох цих матеріалів однакова, а коефіцієнт сорбції натуральної шкіри перевищував коефіцієнт сорбції синтетичного шкіри у 5 разів. Тому, щоб досягти комфортних умов потрібно покращувати ці два показники – паро проникність та вологоємність матеріалу.

Конструкція сучасного взуття така, що 42% площі не бере участі в процесі виведення поту і вологи, а весь процес локалізується на невеликих ділянках союзки, що значно погіршує гігієнічні властивості і прискорює її знос в результаті постійного зволоження і накопичення в порах шкіри значної кількості відкладених солей.

Фізіологічні дослідження показують, що комфортне самопочуття людини при раціонально підібраних одязі та взутті, в умовах відносного спокою людини, спостерігається при температурі повітря 18-20°C, відносній вологості повітря 60±5 % та вмісту вуглекислого газу не більше 0,8 % [9].

В роботі було проведено дослідження на основі стандартних методик для натуральної шкіри. Отримані результати дозволять оцінити гігієнічні властивості відповідних волокон колагену.

Результати досліджень представлені в таблиці 1.

Таблиця 1.1

Гігієнічні властивості натуральних матеріалів

Матеріал, який досліджується	Гігроскопічність, %	Вологовіддача, %	Намокаємість (2 год.), %
Натуральна шкіра (колаген)	22	18	60

Натуральна шкіра володіє оптимальним комплексом гігієнічних показників.

Для оцінки теплозахисних властивостей нових матеріалів необхідно враховувати не тільки їхню теплопровідність (таблиця 1.2), але й здатність останніх поглинати воду, тобто намокаємість (таблиця 1.1).

Таблиця 1.2

Коефіцієнти теплопровідності матеріалів при 0-100 °С

Матеріал, який досліджується	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)
Натуральна шкіра	0,14-0,16

Зволожений матеріал буде мати значно нижчі теплозахисні властивості, адже коефіцієнт теплопровідності води при температурі 20°C становить 0,599 Вт/(м·°C). Очевидним є те, що для визначення фактичної теплопровідності композиційного матеріалу доцільно керуватись фактичною вологістю матеріалу.

Таким чином, проаналізувавши вимоги до матеріалів взуття, можна зробити висновок, що комфорт внутрішньовзуттєвого простору є величезною складовою загального психологічного комфорту. Необхідно прийняти до уваги показники, які в найбільшій мірі впливають на комфортність мікроклімату стопи, та дослідити матеріали, які знаходяться в найтіснішому контакті зі стопою.

Споживчі вимоги до взуття та забезпечення психологічного комфорту

Взуття – це товар, до якого пред'являються великий перелік вимог як зі сторони виробника, так і споживача. Відповідність їм носить важливий характер на сучасному етапі розвитку взуттєвої промисловості. Оскільки нехтування вимог на різних етапах виготовлення взуття має негативні наслідки. Вони породили постійно зростаючу низку проблем, пов'язаних зі здоров'ям молоді, переважно, через використання взуття неналежної якості (виготовленого із застосуванням шкідливих матеріалів, невідповідного антропометричним характеристикам стоп споживачів тощо). Масштаби поширення порушень здоров'я споживачів стали такими, що у медицині інтенсивно почав працювати лікувальний напрям стопотерапія [42].

Більшість досліджень потреб, що їх задовольняють товари взуттєвої промисловості, виконані у період до 1990 р. Надалі інтерес до цієї тематики помітно знизився, переважно у зв'язку із занепадом легкої промисловості як в Україні, так і в інших країнах колишнього СРСР. Проте саме у цей час науковому загалу цих країн стали доступними роботи іноземних авторів у сфері маркетингу та дослідження поведінки споживачів, де висвітлюються теоретичні основи споживчої мотивації в умовах ринку і, зокрема, пропонуються різноманітні підходи до класифікації споживчих потреб.



Рис. 2. Потреби, що їх задовольняє взуття

Одною з найбільш цікавих та послідовних є класифікація властивостей взуття, запропонована В.Х. Ліокумовичем [10]. Розгляд цієї класифікації через призму потреб, що їх має задовольняти взуття, дозволяє отримати ієрархію потреб, представлену на рис. 2. Оскільки вихідна класифікація систематизує не потреби, а властивості взуття, вона має дещо “інженерний” характер: необхідність задоволення потреб соціального спрямування (відповідність моді, демонстрація соціального статусу, респектабельності, індивідуальності особистості тощо) майже не враховується

Одною з найбільш відомих типологій споживчих потреб є модель А. Маслоу, згідно якої нижчі, біологічні потреби домінують у поведінці людини і повинні бути задоволені перш, ніж виникнуть та набудуть значущості соціальні потреби та бажання вищого порядку. У піраміді А. Маслоу виділені такі групи потреб: фізіологічні (їжа, вода); самозахисту (безпека, захищеність); соціальні (любов, дружба); в повазі (визнання, статус); у самоствердженні (саморозвиток, самореалізація). Потреба, що задоволена, більше не виступає мотивуючим фактором для здійснення купівлі. Стосовно до взуття це може означати, що за доступності на ринку багатьох моделей взуття, здатних захистити від холоду, людина вибере більш естетично привабливу для задоволення потреби у схвальному сприйнятті з боку оточуючих; за наявності багатьох привабливих взуттєвих виробів вибере більш престижну для демонстрації статусу; зрештою, якщо є можливість вибору і серед престижних брендових моделей взуття, на перший план виступає прагнення до розкриття індивідуальності особистості і навіть демонстрації певного настрою.

У реальному житті ієрархія потреб не завжди має таку жорстку структуру, як передбачає модель А. Маслоу. Конкретна поведінка споживачів може бути мотивована водночас кількома потребами; за різних зовнішніх обставин послідовність актуалізації потреб може змінюватися. Крім того, для деяких цілком реальних потреб (у комфорті, у отриманні сенсорного та естетичного задоволення) у ієрархії А. Маслоу важко знайти місце.

Якщо проаналізувати вище вказаний матеріал, можна стверджувати, що досягнення психологічного комфорту можливе при задоволенні одного найважливішого для споживача фактора. Це може бути як бренд, так і відповідність взуттєвого виробу модним тенденціям сезону.

Мода знаходиться в визначеній залежності від виникнення нових художніх стилів, економічних факторів, стану технічного рівня виробництва, естетичних уявлень.

Сучасна мода будується на найбільш зручних, раціональних та красивих формах моди. Мода – щорічна та сезонна зміна форм одягу та взуття в межах єдиного сучасного стилю.

Завжди існувало протиріччя між модою та комфортною конструкцією взуття. Споживачі взуття, особливо жінки, жертвують зручністю і навіть здоров'ям стопи на догоду моді і елегантності. Модні, але не функціональні моделі взуття – з вузькими і видовженими носками, на високих та тонких каблуках з різним положенням їх у взутті, з товстими жорсткими підошвами

(платформи, котурни тощо), які на перший погляд роблять ногу більш елегантною, насправді зменшують стійкість положення тіла в результаті переміщення вгору центру його тяжіння і площу поверхні опори. Одночасно такі конструкції призводять до того, що тіло носіїв взуття приймає неправильну позу, а ходьба здійснюється в незвичайному ритмі. Всі ці відхилення від норми організм людини повинен компенсувати додатковим напруженням м'язів і зв'язок витратами енергії.

Крім цього, носіння взуття на високому каблучці сприяє перевантаженню переднього відділу стопи, в результаті чого розвиваються патологічні відхилення в будові і функціях стопи.

Конструктори взуття, враховуючи вимоги моди, завжди повинні пам'ятати в першу чергу, про його функціональність, зручність при експлуатації.

Естетичність взуття обумовлює необхідність гармонійного поєднання матеріалів, легкості і міцності конструкції, елегантності і відповідного колористичного оформлення, вибору прикрас, ретельності виготовлення і відповідності моді. Ці критерії відносяться до взуття усіх статевих вікових груп різного призначення, оскільки естетичне взуття забезпечує, крім іншого, і гарне самопочуття людини.

Спеціальне взуття, виробниче, спортивне та інше носять в інших умовах, ніж побутове, тому при його конструюванні необхідно враховувати особливості експлуатації.

Таким чином, проаналізувавши споживчі потреби, можна стверджувати, що забезпечення комфортності при носінні не є основною функцією взуття, оскільки психологічний комфорт зумовлюється різними чинниками. Необхідно визначити, що є пріоритетним напрямком споживачів при виборі взуття для того, щоб виробники могли підвищити рівень конкурентоспроможності своїх виробів.

Висновки.

Аналіз літературних джерел показав, що проблема підвищення якості вітчизняного взуття є актуальним завданням, вирішення якого в значній мірі пов'язано з розробкою кількісних методів оцінки якості продукції. Особливо важливу роль при оцінці якості взуття відіграють ергономічні показники, які визначають комфортність взуття. Проаналізовано, яке значення мають фізико-механічні та гігієнічні показники матеріалів взуття та які показники найбільше впливають на комфортність мікроклімату стопи. Особливо важливу роль для створення комфортності внутрішньовзуттєвого простору відіграють властивості устілкових та підкладкових матеріалів. Проведено аналіз літературних джерел, з якого визначено основні споживчі потреби, які пред'являються споживачами при здійсненні покупки. Встановлено, що психологічний комфорт відрізняється від фізіологічного, а тому необхідно визначити, які саме показники являються суттєвими для його створення.

Література

1. Иванов М.Н. Влияние конструктивно-технологических характеристик обуви на ее потребительскую оценку / М.Н. Иванов, Н.А. Голубева, Ю.Н. Гнездилов // Кожевенно-обувная пром-сть. – 2000. – № 5. – С. 32-33.
2. Фордзюн Ю.І. Дослідження потовиділення стопи людини в системі стопа-взуття зовнішнє середовище для забезпечення гігієнічних вимог до взуттєвих матеріалів / Ю.І. Фордзюн, Т.Т. Рейс, К.М. Довжаніна // Вісник КНУТД. – 2008. – № 5. – С. 27-30.
3. Лыба В.П. Теория и практика проектирования комфортной обуви : дис. ... доктора техн. наук : 05.19.06 / Лыба Владимир Петрович. – М., 1996. – 314 с.
4. Любич М.Г. Свойства обуви / М.Г. Любич // Легкая индустрия, 1969. – 256 с.
5. Лев М.В. Классификация показателей качества обуви / М.В. Лев // Кожевенно-обувная промышленность. – 1970. – № 10. – С. 7-9.
6. Французова Н.В. Медико-биологическое обоснование конструкций медицинской обуви для больных сахарным диабетом : дис. ... кандидата техн. наук : 05.19.06 / Французова Наталья Викторовна. – М., 1998. – 297 с.
7. Фукин В.А. О комплексе свойств, определяющих комфортность обуви / В.А. Фукин, Д.С. Сакулина, В.В. Костылева // Кожевенно-обувная промышленность. – 1994. – № 1-2. – С. 37-38.
8. Савина З.Г. Товароведение обуви. – М.: Экономика, 1984. - 248 с.
9. Фордзюн Ю.І. Дослідження впливу вологи на гігієнічні та теплозахисні властивості натуральних матеріалів / Ю.І. Фордзюн, Б.Я. Хомяк // Науковий вісник. – 2008. – С. 202-206.
10. Лиокумович В.Х. Структурный анализ качества обуви / В.Х. Лиокумович. – М.: Лег. индустрия, 1980. – 160 с.

Рецензенти:

Стегней Мар'яна Іванівна, МДУ, декан факультету «Економіки, управління та інженерії», доктор економічних наук, професор

Жигуц Юрій Юрійович, УжНУ, завідувач кафедри «ТМ», доктор технічних наук, професор

Стаття надійшла до редакції 06.03.2019

УДК 667.64:678.026

О.О. Сапронов, О.В. Шарко, Д.Г. Круглий, К.М. Клевцов, Е.С. Аппазов

Херсонська державна морська академія

**ЕПОКСИДНІ КОМПОЗИТИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ РОБОТИ ДЕТАЛЕЙ
ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ**

При формуванні епоксидних композитів використано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20, який характеризується поліпшеною адгезійною міцністю та незначною усадкою. Для зшивання епоксидних композитів використано твердник поліетиленполіамін ПЕПА, що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. Показано, що для формування композитів з поліпшеними показниками когезійної міцності доцільно використовувати бор кристалічний за вмісту $q = 40$ мас.ч., що забезпечує перерозподіл енергії удару по об'єму матеріалу при навантаженнях ударного характеру. Це дозволяє знизити швидкість поширення тріщин, тим самим підвищити когезійну міцність епоксидних композитів і покриттів на їх основі. Методом оптичної мікроскопії проаналізовано структуру зламу епоксидних композитів і визначено оптимальний вміст наповнювача, при якому спостерігали впорядковану структуру, без дефектів, що забезпечує високі показники когезійної міцності матеріалів.

Ключові слова: епоксидний композит, наповнювач, ударна в'язкість, поверхня зламу.

А.А. Сапронов, А.В. Шарко, Д.Г. Круглий, К.М. Клевцов, Е.С. Аппазов

Херсонская государственная морская академия

**ЭПОКСИДНЫЕ КОМПОЗИТЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА РАБОТЫ ДЕТАЛЕЙ
СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА**

При формировании эпоксидных композитов использовано эпоксидный диановый олигомер марки ЭД-20, который характеризуется улучшенной адгезионной прочностью и незначительной усадкой. Для сшивания эпоксидных композитов использован отвердитель полиэтиленполиамин ПЭПА, что позволяет отверждать материалы при комнатных температурах. Показано, что для формирования композитов с улучшенными показателями когезионной прочности целесообразно использовать бор кристаллический при содержании $q = 40$ мас.ч., что обеспечивает перераспределение энергии удара по объему материала при нагрузках ударного характера. Это позволяет снизить скорость распространения трещин, тем самым повысить когезионную прочность эпоксидных композитов и покрытий на их основе. Методом оптической микроскопии проанализирована структура излома эпоксидных композитов и определено оптимальное содержание наполнителя, при котором наблюдали упорядоченную структуру, без дефектов, что обеспечивает высокие показатели когезионной прочности материалов.

Ключевые слова: эпоксидный композит, наполнитель, ударная вязкость, поверхность излома.

O.O. Saponov, O.V. Sharko, D.G. Krugliy, K.M. Klevtsov, E.S. Appazov

Kherson State Maritime Academy

**EPOXY COMPOSITES FOR IMPROVING RESOURCE WORK OF DETAILS
VEHICLES OF TRANSPORT**

Epoxydiane oligomer of the mark ED-20, which is characterized by improved adhesive strength and insignificant shrinkage was used in the formation of epoxy composites. Polyethylene polyamine (PEPA) was used for crosslinking of epoxy composites, which allows to cure materials at room temperature. It is shown that in order to form composites with improved cohesive strength, it is advisable to use a crystalline boron at a content of $q = 40$ pts.wt., which ensures the redistribution of impact energy over the volume of the material under impact stresses. This allows to reduce the rate of crack propagation, thereby increasing the cohesive strength of epoxy composites and coatings on their basis. The structure of the fracture of epoxy composites was analyzed by optical microscopy method and the optimum content of the filler, in which an ordered structure was observed without defects, which provides high coefficients of cohesive strength of materials was determined.

Key words: epoxy composite, filler, impact strength, fracture structure.

Постановка проблеми. На сьогодні важливою проблемою багатьох галузей промисловості є захист деталей транспорту, які експлуатують в умовах впливу агресивних середовищ, змінних температур, статичних і динамічних навантажень. Вирішуючи це питання, використовують захисні полімерні покриття. Водночас відомо [1-5], що експлуатаційні і технологічні характеристики захисних покриттів залежать від вибору зв'язувача. Використання покриттів на акриловій основі не є актуальним, позаяк поверхні устаткування, у тому числі і деталі транспорту зазнають корозійного руйнування вже у перші 3...6 місяців експлуатації. Окрім того, такі матеріали характеризуються невисокими показниками адгезійної міцності та фізико-механічних характеристик, що обмежує напрямки використання таких матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз властивостей відомих зв'язувачів [6-11], які використовують для формування захисних покриттів дозволив зупинитися на епоксидному. Він характеризується цілим комплексом властивостей, а саме: високою адгезійною міцністю,

можливістю затверджування при низьких температурах, малою усадкою, технологічністю при нанесенні на довговимірні деталі складного профілю, наявністю значної кількості аналогів, у тому числі на території України. При цьому до основних недоліків таких матеріалів можна віднести крихкість, що у свою чергу призводить до формування покриттів із незначними показниками ударної в'язкості. Вирішенням цього питання є можливість фізичної модифікації зв'язувача, що дозволить нівелювати крихкість і додатково забезпечити необхідний комплекс фізико-механічних властивостей, корозійну тривкість і зносостійкість та можливість відновлення робочих поверхонь технологічного устаткування багатьох галузей промисловості.

Мета роботи – розробка заходів щодо підвищення ресурсу роботи деталей засобів транспорту за рахунок використання епоксидних композитів.

Методика дослідження. Основним компонентом для зв'язувача при формуванні композитних матеріалів (КМ) вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84), який характеризується комплексом покращених властивостей порівняно з іншими відомими реактопластами, а саме: високою міцністю адгезійних з'єднань до металевої основи, можливістю затверджування при низьких температурах, малою усадкою та ін.

Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін (ПЕПА) (ТУ 6-05-241-202-78), що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. Відомо [1], що ПЕПА є низькомолекулярною речовиною, яка складається з таких взаємозв'язаних компонентів: $[-CH_2-CH_2-NH-]_n$. Зшивали КМ, вводячи твердник у композицію при стехіометричному співвідношенні компонентів за вмісту (мас.ч.) – ЕД-20 : ПЕПА – 100 : 10.

Як наповнювач використано дрібнодисперсні частки ($d = 8...10$ мкм) бору кристалічного (БК). Бор кристалічний має ромбоєдричну форму (густина $\rho = 2,45$ г/см³), яка складається з майже правильних ікосаєдрів B_{12} із частково деформованим кубічним щільним формоутворенням. Ця фаза формується за присутності вуглецю або азоту і залежно від способу отримання приймає наступний вигляд – $B_{50}C_2$ або $B_{50}N_2$.

Наповнений частками БК епоксидний композит формували за такою технологією: попереднє дозування епоксидної діанової смоли ЕД-20, підігрівання смоли до температури $T = (353 \pm 2)$ К і її витримка при цій температурі впродовж часу $\tau = (20 \pm 0,1)$ хв; дозування наповнювача і подальше його введення в епоксидний зв'язувач; гідродинамічне поєднання олігомеру ЕД-20 і нанонаповнювача впродовж часу $\tau = (1 \pm 0,1)$ хв; ультразвукова обробка композиції впродовж часу $\tau = (1,5 \pm 0,1)$ хв; охолодження композиції до кімнатної температури впродовж часу $\tau = (60 \pm 5)$ хв; введення твердника ПЕПА і перемішування композиції впродовж часу $\tau = (5 \pm 0,1)$ хв. Потім проводили полімеризацію КМ за експериментально встановленим режимом: формування зразків і їх витримка впродовж часу $\tau = (12,0 \pm 0,1)$ год за температури $T = (293 \pm 2)$ К, нагрівання зі швидкістю $v = 3$ К/хв до температури $T = (393 \pm 2)$ К, витримка КМ впродовж часу $\tau = (2,0 \pm 0,05)$ год, повільне охолодження до температури $T = (293 \pm 2)$ К. З метою стабілізації структурних процесів перед проведенням випробувань зразки з КМ витримували впродовж $\tau = 24$ год на повітрі за температури $T = (293 \pm 2)$ К.

У роботі досліджували ударну в'язкість, а також топологію зламу КМ за допомогою оптичної мікроскопії. Ударну в'язкість (W) визначали за методом Шарпі відповідно до ГОСТ 4647-80 на маятниковому копрі МК-30 при температурі $T = 298 \pm 2$ К і відносній вологості $d = 50 \pm 5$ %. Використовували зразки з такими параметрами без надрізу: $(63,5 \times 12,7 \times 12,7) \pm 0,5$ мм. Відстань між опорами $40 \pm 0,5$ мм.

Дослідження структури (топології) КМ проводили на металографічному мікроскопі моделі XJL-17AT, який обладнаний камерою Levenhuk C310 NG (3,2 Mega Pixels). Діапазон збільшення зображення від $\times 100$ до $\times 1600$ разів. Для обробки цифрових зображень використовували програмне забезпечення «Levenhuk Tour View».

Експериментальні результати. Відомо [1], що у процесі експлуатації епоксидних композитів чи захисних покриттів вагомим є не лише показники адгезійної міцності, а й фізико-механічні характеристики. У попередніх роботах [1, 5] встановлено, що оптимальний вміст бору кристалічного для формування епоксидних адгезивів становить $q = 30$ мас.ч. (тут і далі по тексту вміст БК вказано на 100 мас.ч. олігомеру ЕД-20 і 10 мас.ч. твердника ПЕПА). Оптимальний вміст добавки забезпечує формування епоксидних адгезивів із наступними характеристиками: адгезійна міцність при відриві – $\sigma_a = 41,0$ МПа, залишкові напруження – $\sigma_s = 0,89$ МПа. Водночас, оптимальний вміст бору кристалічного при формуванні епоксидних композитів із підвищеними когезійними характеристиками становить – $q = 30...40$ мас.ч. Оптимальний вміст добавки забезпечує формування епоксидних адгезивів із наступними характеристиками: руйнівні

напруження при згинанні – $\sigma_{z2} = 73,7$ МПа; модуль пружності при згинанні – $E = 4,7$ ГПа; теплостійкість (за Мартенсом) – $T = 350$ К.

До недоліків епоксидних композитів відносять крихкість матриці і відповідно низькі значення ударної в'язкості [11]. Водночас, в умовах експлуатації деталей транспорту при знакозмінних навантаженнях вагомим є показники ударної в'язкості епоксидних композитів. Тому, нами було досліджено вплив вмісту бору кристалічного на ударну в'язкість КМ. Вміст добавки при експериментальних дослідженнях вибирали враховуючи попередні результати дослідження, а саме – $q = 30 \dots 60$ мас.ч.

Відповідно до отриманих результатів дослідження (рис. 1), при додаванні БК за вмісту $q = 30$ мас.ч. показники ударної в'язкості КМ не змінюються відносно матриці ($W = 7,0$ кДж/м²). Це можна пояснити недостатньою кількістю добавки для формування зшитої полімерної структури здатної чинити опір навантаженню ударного характеру. Тоді, як введення часток БК за вмісту $q = 40$ мас.ч. забезпечує зростання ударної в'язкості до $W = 8,9$ кДж/м². Таким чином можна стверджувати, що збільшення вмісту добавки забезпечує формування жорстко зшитої структури композиту стійкої до деформації. Це пов'язано із обмеженням рухливості як сегментів, так і макроланцюгів зв'язувача, а також адгезією між частками і полімером. Така адгезія в поєднанні з обмеженням рухливості структурних елементів забезпечує ефективний перерозподіл енергії удару при навантаженнях ударного характеру по об'єму матеріалу. Таким чином утворюється дисипація енергії удару, де значну кількість енергії сприймає частка добавки, тим самим забезпечуючи стійкість до поширення тріщини, що є основною причиною руйнування матеріалу.

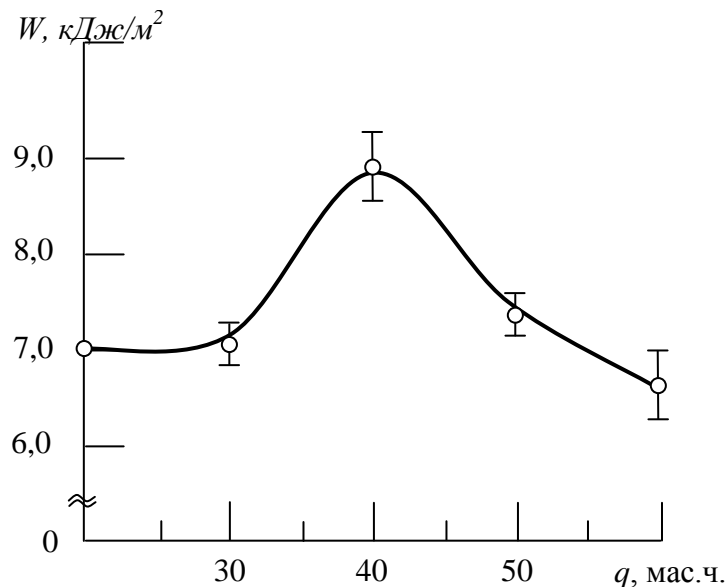


Рис. 1. Залежність ударної в'язкості (W) КМ від вмісту наповнювача БК

Подальше введення часток БК у епоксидну матрицю (понад 40 мас.ч.) не забезпечує зростання ударної в'язкості ($W = 6,8 \dots 7,2$ кДж/м²). Це може свідчити про утворення дефектної структури епоксидного композиту внаслідок зростання густини просторової сітки полімеру та нерівномірного розподілу часток в об'ємі матриці. Перенасичення епоксидного зв'язувача дисперсною добавкою також зменшує ефективну площу контакту компонентів, а отже, і, зменшує хімічну взаємодію в об'ємі полімерної матриці.

З метою підтвердження наведених вище результатів досліджували структуру зламу епоксидної матриці і композитів методом оптичної мікроскопії. Дослідженню підлягала поверхня руйнування матеріалів після випробовування ударної в'язкості. При дослідженні структури зламу матриці встановлено формування напруженого стану у структурі матеріалу, що характеризується наявністю пологих ліній сколювання, які формують рельєф поверхні (рис. 2, а). Складна топологія поверхні таких зразків опосередковано свідчить про суттєву крихкість матриці, внаслідок високих залишкових напружень, що узгоджується з результатами дослідження наведених у попередній роботі [5]. Значення залишкових напружень матриці становить $\sigma_3 = 1,4$ МПа, що вказує на достовірність висуненого припущення.

Введення часток БК за вмісту $q = 30$ мас.ч. забезпечує формування однорідного рельєфу без помітних дефектів структури (рис. 2, б), що вказує на кінетичну та термодинамічну рівновагу у полімерній системі. Помітних змін у структурі не виявлено при збільшенні вмісту БК у епоксидному зв'язувачі до $q = 40$ мас.ч. (рис. 2, в). Тоді, як аналіз структури зламу КМ (рис. 2, г) при збільшенні у 2 рази ($\times 800$) вказує на достовірність наведених припущень, а саме перерозподіл енергії удару у об'ємі полімеру, що показано у вигляді рівномірного поширення тріщин. При цьому тріщини не мають чітко вираженого продовження, що вказує на збільшення в'язкості полімеру. Тобто, із збільшенням в'язкості матеріалу швидкість поширення тріщини зменшується, а, отже, й збільшуються показники його ударної в'язкості, що характерно для КМ з високим ступенем зшивання.

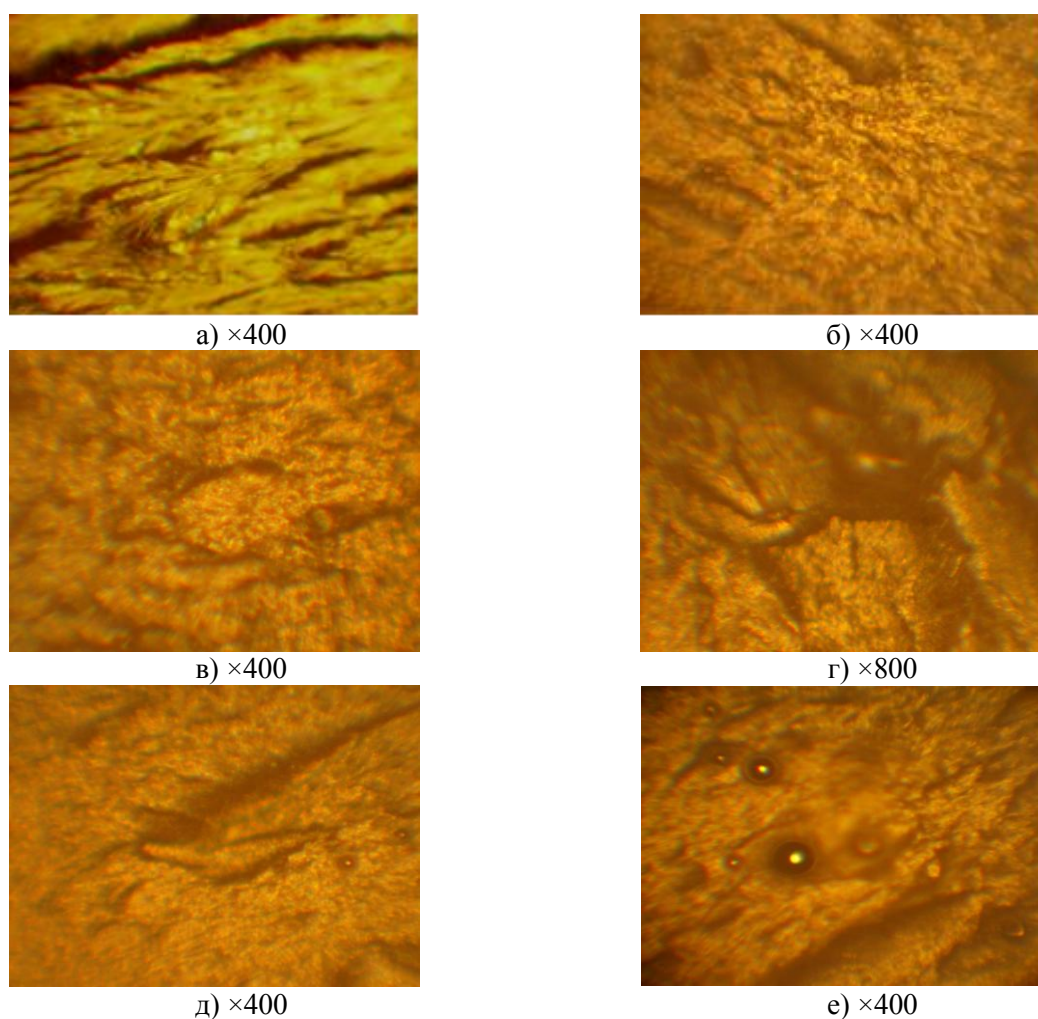


Рис. 2. Фрактограми зламу КМ, наповнених частками БК: а) матриця; б) 30 мас.ч.; в), г) 40 мас.ч.; д) 50 мас.ч.; е) 60 мас.ч.

Хаотичний напрямок поширення тріщини (рис. 2, д) для КМ із вмістом $q = 50$ мас.ч. БК свідчить про формування матеріалу із значним напруженим станом, що зумовлює зменшення стійкості чинити опір навантаженням ударного характеру. Відповідно, подальше введення часток БК за вмісту $q = 60$ мас.ч. призводить до формування ще більш дефектної структури (рис. 2, е). На світлинах зламу спостерігали більш крихкий характер руйнування із утворенням дефектів у вигляді повітряних включень. Таким чином дисперсні частки не можуть ефективно сприймати і перерозподіляти навантаження ударного характеру у об'ємі матриці. При цьому ударна в'язкість таких матеріалів суттєво знижується навіть при мінімальних навантаженнях.

Висновок. За результатами проведених досліджень когезійної міцності епоксикомпозитних матеріалів встановлено оптимальний вміст бору кристалічного дисперсністю 8...12 мкм у епоксидному зв'язувачі, що забезпечує збільшення стійкості до навантаження ударного характеру та водночас зменшення крихкості. Отже, для формування

епоксикомпозитних матеріалів із підвищеною ударною в'язкістю, необхідно додавати дисперсні частки бору кристалічного у кількості $q = 40$ мас.ч. на 100 мас.ч. олігомеру ЕД- 20 і 10 мас.ч. твердника ПЕПА. У цьому випадку формуються матеріали із значенням ударної в'язкості – $W = 8,9$ кДж/м². Враховуючи комплексні дослідження можна стверджувати, що для полімерних систем, де спостерігали перенасичення дисперсної добавки ($q = 50..60$ мас.ч.), перерозподіл енергії удару на межі поділу фаз «наповнювач-матриця» малоефективний. Тоді, як для КМ із оптимальним вмістом дисперсних часток, що становить $q = 40$ мас.ч., забезпечується перерозподіл енергії удару на межі поділу фаз «наповнювач-матриця» за рахунок обмеженням рухливості структурних елементів композиту і його міжфазовою взаємодією.

Результати, отримані методом оптичної мікроскопії, добре узгоджуються з дослідженнями ударної в'язкості матеріалів. Тобто, структура зламу композитних матеріалів, наповнених частками бору кристалічного за вмісту $q = 40$ мас.ч. характеризуються в'язким руйнуванням, що забезпечує зменшення швидкості поширення тріщини внаслідок рівномірного розподілу залишкових напружень за об'ємом матеріалу.

Література

1. Букетов А.В. Епоксидні нанокомпозити: монографія / А.В. Букетов, О.О. Сапронов, В.Л. Алексенко. – Херсон : ХДМА, 2015. – 184 с.
2. Liubov M. Structural Peculiarities of Ion-Conductive Organic-Inorganic Polymer Composites Based on Aliphatic Epoxy Resin and Salt of Lithium Perchlorate / M. Liubov, M. Iurzhenko, Y. Mamunya, I. Tkachenko, V. Demchenko, V. Synyuk, A. Shadrin and G. Boiteux. // Nanoscale Research Letters, 12(1), pages, 2011.
3. Leonova N.G. Thermophysical properties of epoxy-polysiloxane composites of cationic polymerization / N.G. Leonova, V.M. Mikhal'chuk, Y.P. Mamunya, V.V. Davydenko, M.V. Iurzhenko // Polymer Science Series D. – 2013. – Volume 6, [Issue 3](#), pp 210–217.
4. Lysenkov E.A. Electric field effect on the percolative behavior of systems based on polyethylene glycol and carbon nanotubes / E.A. Lysenkov, V.V. Klepko, V.M. Golovanets, V.L. Demchenko // Ukrainian Journal of Physics – 2014, Vol. 59, №9. – P. 906-914.
5. Сапронов О.О. Вплив вмісту і природи дрібнодисперсного наповнювача на механічні властивості і структуру полімерних захисних покриттів / О.О. Сапронов, В.Д. Нігалатій, К.М. Клевцов, І.В. Смирнов, М.А. Долгов // Вісник ХДМА, 2013. – №2(9). – С. 228-237.
6. Букетов А. В. Вплив дрібнодисперсних мінеральних добавок на властивості полімерних композитів / А. В. Букетов, М. В. Браїло // Вопросы химии и химической технологии. – 2014. – № 1. – С. 39-43.
7. Браїло М.В. Дослідження ударної в'язкості епоксикомпозитних матеріалів / М.В. Браїло // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2014. – № 1. – С. 148-157.
8. Букетов А.В. Дослідження процесу структуроутворення композитних матеріалів із різним вмістом вуглецевих нанотрубок методом ІЧ-спектрального аналізу / А.В. Букетов, А.В. Сапронова, О.В. Лещенко, О.С. Голотенко, А.О. Василенко // Наукові нотатки. – Луцьк: ЛНТУ. – 2018. - Випуск 61. – С. 13-19.
9. Долгов М.А. Дослідження механічних властивостей функціонально градієнтних епоксидних покриттів під впливом водного середовища / Долгов М.А., Чихіра І.В., Букетов А.В., Стухляк Д.П. // Нафтова та газова промисловість. – 2011. – № 1 С. 42 – 46.
10. Brooker R.D. Themorphology and fracture properties of ther moplastic-toughened epoxypolymers / R.D. Brooker, A.J. Kinloch, A.C. Taylor // Journal of Adhesion. 2010. V.86. P. 726-741.
11. Buketov A.V. Use of dispersive additives to ensure high indicators of physico-mechanical properties of functional polymer coatings/ A.V. Buketov, O.O. Sapronov, O.V. Leshchenko, S.V. Voronenko // Journal of Hydrocarbon Power Engineering. – 2017. – Vol. – 4(2) . – P. 54-63.

Стаття надійшла до редакції 18.03.2019

УДК 378.016:62

В.В. Скідан¹, Г.В. Єфімчук²*Київський національний університет технологій та дизайну¹**Луцький національний технічний університет²***ИННОВАЦИЙНИ ОСВІТНІ ПІДХОДИ ПРИ ВИКЛАДАННІ ТЕХНІЧНИХ ДИСЦИПЛІН
У ЗАКЛАДАХ ВИЩОЇ ОСВІТИ**

В статті розглянуто використання інноваційних освітніх підходів при викладанні дисциплін для технічних спеціальностей у закладах вищої освіти. Зокрема, при викладанні дисциплін «Безпека життєдіяльності та цивільний захист», «Охорона праці», «Основи академічного письма» використовуються наступні новітні підходи навчання: змішане навчання, "перевернутий клас", метод кейсів, участь у публічних дискусіях, дебати: Оксфордський формат та формат Карла Поппера, пітчінги ідей, візуальне мислення: інфографіка та інтелект-карти, відео та аудіо.

Ключові слова: інноваційні освітні підходи, викладання, технічні дисципліни, заклади вищої освіти.

В.В. Скидан¹, Г.В. Ефимчук²*Киевский национальный университет технологий и дизайна¹**Луцкий национальный технический университет²***ИННОВАЦИОННЫЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ ПРИ ПРЕПОДАВАНИИ
ТЕХНИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН В ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЯХ**

В статье рассмотрено использование инновационных образовательных подходов при преподавании дисциплин для технических специальностей в высших учебных заведениях. В частности, при преподавании дисциплин «Безопасность жизнедеятельности и гражданской защиты», «Охрана труда», «Основы академического письма» используются следующие современные подходы обучения: смешанное обучение, "перевернутый класс", метод кейсов, участие в публичных дискуссиях, дебаты: Оксфордский формат и формат Карла Поппера, питчинг идей, визуальное мышления: инфографика и интеллект-карты, видео и аудио.

Ключевые слова: инновационные образовательные подходы, преподавание, технические дисциплины, высшие учебные заведения.

V. Skidan¹, H. Yefimchuk²*Kyiv National University of Technology and Design¹**Lutsk National Technical University²***INNOVATIVE EDUCATIONAL APPROACHES FOR TEACHING TECHNICAL DISCIPLINES
IN HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS**

The article considers the use of innovative educational approaches in the teaching of disciplines for technical specialties in higher education institutions. In particular, the following new approaches to teaching are used in the teaching of "Safety of Life and Civil Protection", "Occupational Safety", "Basics of Academic Writing" disciplines: mixed learning, "inverted class", case study method, participation in public discussions, debate: Oxford format and format of Carl Popper, ideas pitch, visual thinking: infographic and intelligence maps, video and audio.

Key words: innovative educational approaches, teaching, technical disciplines, institutions of higher education.

Постановка проблеми. Хоча традиційні лекції, як і раніше, залишаються найбільш поширеною формою навчання, дослідження демонструє, що студенти сприймають меншу кількість інформації під час лекцій (близько 10%) у порівнянні з більш інтерактивними методами навчання (близько 90%). Тому не дивно, що інноваційні освітні підходи навчання отримують все більш широке розповсюдження. Без реального практичного застосування студенти часто не можуть осмислити отримані знання з дисципліни. І навпаки, використання активних методів навчання може перетворити процес навчання в цікаву і захоплюючу діяльність для студентів.

Активне навчання означає, що мозок студента активно задіяний: замість того, щоб бути пасивним спостерігачем, студент бере на себе роль динамічного учасника в навчанні, моніторингу освітнього процесу та його результатів. Часто нові інтерактивні методики навчання залучають аудиторію, заохочують до групової роботи і взаємодопомоги, одночасно сприяючи здоровій конкуренції та дозволяючи студентам робити свій індивідуальний внесок в освітній процес. Активні методи навчання, як правило, призводять до більш високого рівня розуміння нових концепцій [1]. Важливо відзначити, що студенти навчаються застосовувати здобуті знання в своєму повсякденному житті, отримуючи в аудиторії позитивний і «захоплюючий» досвід.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Стратегія інноваційної технології навчання передбачає системну організацію управління навчально-виховним процесом, характерні риси якої наступні [2]:

- 1) зміна позиції викладача як ведучого елемента освіти як стосовно студента, так і до самого себе;
- 2) зміна функції знань (вони стають системними, міждисциплінарними, узагальненими) і способів організації процесу їх засвоєння;
- 3) на перший план виступає соціальна природа навчання та розвитку особистості, яка пов'язана з різноманіттям форм взаємодії, міжособистісних відносин і спілкування.

Таким чином, процес передачі інформації побудований на принципі взаємодії викладача і студента, його активності, творчого переосмислення одержаної інформації.

Розвиток інноваційних технологій відбувається за напрямками [3]:

- 1) репродуктивне навчання (індивідуальне навчання, персоналізоване навчання);
- 2) дослідницьке навчання (процес навчання вибудовується як пошук пізнавально-прикладних, практичних завдань);
- 3) розробка моделей навчальної дискусії;
- 4) організація навчання на основі ігрових моделей (включення в навчальний процес імітаційного і рольового моделювання).

Постановка завдання. Використання викладачем інноваційних підходів при викладанні технічних дисциплін є особливо актуальним, оскільки потребує розробки нових підходів до різних ситуацій, зокрема професійних, та направлене на розвиток творчих здібностей студентів – майбутніх фахівців. При цьому, вибираючи технологію навчання, варто пам'ятати, що інтелектуальна активність, гнучкість і самостійність особистості підвищують рівень її вимог до змісту і умов праці, а рутинна праця і нетворче навчання формують людей, які орієнтуються на репродуктивний, нетворчий стиль життя.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо використання новітніх підходів у викладанні на прикладі дисциплін «Безпека життєдіяльності та цивільний захист (БЖД та ЦЗ) і Охорона праці» та «Основи академічного письма».

Вищезгадані дисципліни включені в список обов'язкових для вивчення на всіх факультетах університету, які здійснюють підготовку бакалаврів. Кінцеве завдання при вивченні курсу дисципліни БЖД та ЦЗ полягає у формуванні певного типу свідомості, що створює потребу в оволодінні відповідними навичками та засобами захисту. Також формує мотивацію діяльності, спрямовану на отримання додаткової інформації, визначення відповідного вибору в ситуації, що склалася і участі в управлінні ризиком на рівні суспільства. Формування такого типу свідомості базується на системі знань про ризик, і, в свою чергу, являє собою якийсь плацдарм для активних, обдуманих і цілеспрямованих дій. Таким чином, найважливіше завдання в області захисту людини полягає в тому, щоб направити розум майбутніх фахівців на досягнення мети гармонійного розвитку людини, природи, техносфери і, таким чином, приборкати стихійні процеси [4].

Завданням дисципліни «Основи академічного письма» є закріплення розуміння студентами цінностей та цілей вищої освіти, а також основних понять курсу: «вища освіта», «університет», «академічна культура та доброчесність», «академічна свобода», «інтелектуальна чесність», «інтелектуальна свобода», «інтелектуальна власність», «авторське право», «порушення академічної чесності», «кодекс честі», «етичні і правові норми», «академічне письмо» [5]. Разом з тим, студенти набувають навиків у культурі оформлення наукового тексту (зокрема ознайомлюються з правилами цитування й оформлення посилань на бібліографічні джерела, засвоюють методологію бібліографічного пошуку та роботи з каталогами, навчаються оформляти бібліографічні списки джерел та літератури), а також вправляються у вивченні та використанні в усному та писемному мовленні наукового стилю української мови (засвоюють поняття про вербальні й невербальні складові в усному науковому мовленні, здобувають навички публічного наукового виступу та академічної дискусії, навчаються складати анотацію, рецензію та відгук на наукову працю).

Охорона праці в установах освіти включає в себе заходи по створенню безпечних умов навчання [6]. Вектор інноваційного розвитку вузів передбачає залучення студентів до процесу виробництва, що сприяє набуттю професійних навичок і формування уявлення про безпеку праці, тому умови праці в майстернях, лабораторіях, наукових та інноваційних центрах повинні відповідати вимогам охорони праці та санітарних норм, а це викликає необхідність залучення значних фінансових коштів. Дуже важливо в стінах навчального закладу сформувати у майбутніх керівників вдумливе ставлення до питань охорони праці, функціонуванню окремих ланок її системи управління, розуміння цінності людського життя і відповідальності за неї, уважного ставлення до питань особистої безпеки.

Часом у студентів ще в стінах вузу формується думка, що їх майбутня професія не пов'язана з даним напрямком і вивчення питань охорони праці лише марна трата часу. Обсяг знань, повинен не тільки розширити кругозір, а й забезпечити розуміння майбутніх керівників, бізнесменів відповідальності за життя і здоров'я своїх працівників, сприяти швидкій адаптації випускників до трудової і колективної діяльності та успішному кар'єрному росту. Досвід найбільших світових компаній показує, що охорону праці вищі керівники вважають одним з головних пріоритетів. Так, з десяти показників діяльності підприємства охорону праці та здоров'я своїх працівників вони ставлять на друге місце, відразу після кваліфікації та компетентності персоналу. Охорона праці – ключовий інститут соціальної політики сучасного суспільства, оскільки збереження життя і здоров'я працюючої людини є пріоритетним для будь-якого виду економічної діяльності. Соціальний ефект від підвищення якості підготовки студентів з охорони праці може бути виражений у зниженні рівня травматизму і професійних захворювань, поліпшення демографічної ситуації в країні за рахунок зниження смертності серед постраждалих від нещасних випадків на виробництві.

При викладанні дисциплін «БЖД та ЦЗ», «Охорона праці» та «Основи академічного письма» використовуються наступні новітні підходи навчання: змішане навчання, "перевернутий клас", метод кейсів, участь у публічних дискусіях, дебати: Оксфордський формат та формат Карла Поппера, пітчінги ідей, візуальне мислення: інфографіка та інтелект-карти, відео та аудіо.

Більш детально зупинимось на деяких з них. *Змішане навчання* – це новий підхід до освітнього процесу, який поєднує роботу в аудиторії з дистанційним навчанням [7]. Як правило, студенти працюють з викладачем в університеті і використовують онлайн-ресурси вдома. Таким чином, змішане навчання дозволяє студентам засвоювати знання у більш зручній та індивідуальній формі, адже вони можуть працювати в своєму власному темпі і отримувати зворотний зв'язок в режимі онлайн. Змішане навчання може використовуватись для різних академічних курсів і дисциплін. До аудиторних занять можуть бути додані онлайн-опитування, інтерактивні вправи, відео- та аудіоматеріали. Віртуальні симуляції також можуть використовуватися в якості завдань в ході аудиторних занять. Також аудиторні заняття можуть бути зняті на відео, а потім обговорюватись з однокурсниками та викладачем.

Використання змішаного навчання в контексті викладання курсу «Охорона праці». Крім звичайних лекцій, курс включає практичні заняття. Приклад проведення практичного заняття «Дослідження штучного освітлення виробничого приміщення та на робочому місці»: ознайомлення та засвоєння сучасних енергетичних проблем виробничого та побутового освітлення; засвоєння основних світлотехнічних одиниць вимірювання; ознайомлення з принципами нормування штучного освітлення виробничих приміщень та на робочому місці; практичне навчання користуватися приладами для вимірювання освітленості; засвоєння методики розрахунку освітленості виробничого приміщення та на робочому місці з умінням підбирати відповідні джерела світла та світлотехнічну апаратуру. Частина занять було замінено на онлайн модулі. Більш того, для тестування використовувалось онлайн-опитування, заохочуючи студентів переглядати навчальні матеріали. Завдяки онлайн-навчанням і тестуванню, більше часу залишається для активної роботи в аудиторії.

«Перевернутий клас» – один з прикладів змішаного навчання. На відміну від традиційного навчання, коли новий матеріал пояснюється в аудиторії, методика «перевернутого класу» передбачає вивчення студентами лекційного матеріалу перед заняттями, тим самим вивільняючи навчальний час для вирішення задач та інших форм навчання, які традиційно були визначені як домашня робота [8].

Передбачається, що студенти ознайомляться з лекційним матеріалом та переглянуть відео-лекції вдома перед заняттями. У звичній домашній обстановці студенти можуть вивчати матеріали в індивідуальному ритмі, маючи можливість перечитувати завдання, перемотувати відеоролики і отримувати додаткову допомогу та інформацію для повного розуміння матеріалу. В якості додаткових джерел інформації викладач може порекомендувати конференцію TED, відео на Youtube, записані лекції або подкасти. Таким чином, студенти будуть готові до активного навчання в аудиторії, дискусій та дебатів, застосовуючи засвоєні знання для вирішення кейсів, створення презентацій, підготовки плакатів або участі в симуляційних іграх. Цей підхід також частково перекладає відповідальність за результативність навчання з викладача на студента. «Перевернутий клас» дозволяє студентам брати більш активну участь в навчанні, в той час як викладач виступає в якості помічника, допомагаючи при виникненні труднощів.

Методика «перевернутого класу» була використана при викладанні курсу БЖД та ЦЗ, а саме «Соціально-політичні небезпеки, їхні види та особливості. Соціальні та психологічні чинники ризику. Поведінкові реакції населення у НС» [9]. Методика «перевернутого класу» була реалізована шляхом підготовки записаних відеороликів і слайдів PowerPoint з вбудованим аудіо-супроводом замість традиційних лекцій в аудиторії. Ці відеоролики супроводжуються тестуванням для забезпечення більш якісного вивчення лекційного матеріалу. На заняттях студенти виконують вправи з використанням активних методів навчання. Опитування щодо результатів впровадження методики «перевернутого класу», проведене наприкінці вивчення дисципліни, показало позитивний зворотний зв'язок зі студентами. Більше половини студентів заявили, що вони могли використовувати свої знання в аудиторії під час занять і отримали навички, які будуть корисні їм в майбутньому.

Відео. Багато студентів, як і чимало інших людей, є «візуалами». Це означає, що вони краще сприймають інформацію, якщо вона представлена у вигляді зображення [1]. Відео об'єднує візуальне та слухове сприйняття і може бути потужним інструментом навчання як в аудиторії, так і за її межами. Нижче наведемо можливості застосування відео для навчальних цілей:

- обговорення питань Травматизму та професійних захворювань в галузі. Розслідування нещасних випадків;
- написання промови, яка буде представлена на імітованій конференції TEDx в аудиторії;
- допомога студентам організувати конференцію TEDx в університеті;
- завдання студентам створити коротке відео на Youtube, яке торкається актуальних питань в галузі охорони праці;
- проведення вечорів кіно та огляд документальних фільмів, обговорення їх на заняттях;
- запропонуйте студентам у якості домашнього завдання переглянути онлайн-лекції, що знаходяться у вільному доступі (так звані масові відкриті онлайн-курси). Кількість масових відкритих онлайн-курсів постійно зростає, кожний день додаються нові курси.

Аудіо. Викладачі можуть використовувати подкасти в навчальних цілях. Подкасти – це записані аудіопрограми, які знаходяться у вільному доступі в мережі Інтернет. Вони можуть бути призначені замість або додатково до обов'язкового матеріалу. Подкасти – зручний спосіб ознайомити студентів з проблемою, особливо під час інших видів діяльності студента (поїздка додому, спортивні заняття чи домашні справи).

При вивченні курсу «Основи академічного письма» передбачалось проведення *публічних дискусій та дебатів*. Так, для закріплення теми «Науковий стиль української мови: усне мовлення» [5], було запропоновано навчитись здобувати навички *публічного наукового виступу* на одну із рекомендованих тем (тривалість виступу макс. 5 хв.): «Академічна доброчесність – вибір успішних професіоналів»; «Плагіат у мистецтві»; «Історія студентського самоврядування»; «Структура і функції студентського самоврядування: досвід США»; «Структура і функції студентського самоврядування: досвід України». Кожен виступ повинен супроводжуватися його подальшим обговоренням. Викладач і студенти, незалежно один від одного, оцінюють виступи за п'ятибальною шкалою. До уваги береться змістовність виступу, послідовність викладу думок, аргументованість, мовна компетенція доповідача, наявність чи відсутність power-point презентації. Наприкінці заняття викладач і студенти порівнюють виставлені бали. Студенти паралельно здобувають навички peer-review (рецензування). Окрім того, в рамках обумовленої теми заняття пропонувалося проведення *академічної дискусії* при попередній домашній підготовці. Для обговорення рекомендовано такі теми (на вибір): «Чи є плагіат невід'ємною частиною (наукової) творчості або чому Котляревський та Ейнштейн не плагіатори?»; «Роль студентського самоврядування в дотриманні норм академічної доброчесності в університеті».

Також, для написання групового проекту «Кодекс честі групи» [10] було проведено *пітчінг ідей*, з допомогою якого обговорювались основні засади створення академічного середовища в університеті загалом і в академічній групі зокрема. У ході дослідження безпосередньо студентами проаналізовано прояви академічної нечесності серед них. До них можна віднести: списування один в одного; привласнювання чужих здобутків (у тому числі і під час написання самостійних робіт, аналізу літературних та інтернет-джерел); заздрощі суб'єктам навчання, які отримали кращі результати поточного контролю; недобррозичливе ставлення студентів один до одного.

На основі пітчінгу ідей, визначення та обговорення реальних потреб академічної групи, студентами розроблено основні правила академічної доброчесності, які увійшли в Кодекс Честі груп ЛП-11 та ЛГ-11. Це:

- ✓ принцип самостійності – студенти повинні самостійно виконувати завдання поточного та підсумкового контролю;
- ✓ принцип чесності – студенти не повинні давати про себе завідомо неправдиву інформацію, фальсифікувати результати досліджень, привласнювати чужі досягнення, копіювати із джерела без зазначення посилання на нього та списувати один в одного;
- ✓ принцип законності – студенти зобов'язані діяти у рамках встановленого законодавства, не порушувати гідності однолітків, викладачів, не давати хабарів, не надавати послуг однокласникам за гроші чи винагороду;
- ✓ принцип критичності та справедливості – студенти повинні справедливо оцінювати свої досягнення та досягнення однокласників, критично сприймати свої невдачі, аналізувати їх та виправляти помилки, сміливо кидати виклик академічній нечесності для встановлення справедливості;
- ✓ принцип доброзичливості – доброзичливо сприймати усіх суб'єктів навчального процесу, допомагати, підтримувати однолітків у разі необхідності;
- ✓ принцип відповідальності – студенти повинні відповідати за свої вчинки та методи навчання перед викладачами, товаришами та власною совістю.

Висновки. Володіння сучасними інноваційними освітніми технологіями дозволяє викладачу максимально наблизити навчальний процес до майбутньої професійної діяльності; розвинути у студентів креативність (уміння бачити незвичайне в звичайному, приймати нестандартні рішення), необхідну для успішної інноваційної діяльності; навчити відступати від стереотипів і шукати не єдино вірне, а різні варіанти вирішення проблеми.

Література.

1. Бругель А. Е. Інноваційне "зелене" навчання / А. Е. Бругель, Л. Джоллер, Н.Костюченко, Д. Смоленніков // Посібник з інноваційних методик викладання екологічної та енергетичної проблематики. – Університет Санкт-Галлена, Тартуський університет, Сумський державний університет. – 2017 – 20с.
2. Січкарук О. І. Інтерактивні методи навчання у вищій школі : навч.-метод. Посібник / О. І. Січкарук ; Університет економіки та права «КРОК». – К. : Таксон, 2006. – 88 с.
3. Добрынина Д. В. Инновационные методы обучения студентов вузов как средство реализации интерактивной модели обучения // Вестник Бурятского госуниверситета. – 2010. – № 5. – С. 171-176.
4. Костецкая Г. А. Проблемы практической подготовки учителей безопасности жизнедеятельности в условиях многоуровневого образования и модернизации образовательных стандартов / Г. А. Костецкая, Э. М. Киселева. // Научно-технические ведомости СПбГПУ Серия «Гуманитарные и общественные науки». – 2012. – № 48. – С. 54-60.
5. Основи академічного письма: методичні вказівки до практичних робіт для студентів спеціальностей 182 «Технології легкої промисловості», 205 «Лісове господарство» денної і заочної форм навчання / Г.В. Єфімчук. – Луцьк: Луцький НТУ, 2018. – 102 с.
6. Косинова Н.В. Аспекты развития охраны труда в учреждениях образования / Н.В. Косинова, О.К. Комаров // Омский научный вестник. – 2015. – №2 (136). – с. 232-234.
7. Picciano, A.G. (2009). Blending with purpose: The multimodal model. Journal of the Research Center for Educational Technology, 5(1). Kent, OH: Kent State University.
8. Szparagowski, R.(2014). The Effectiveness of the Flipped Classroom. Honors Projects. Paper 127. Bowling Green State University. Available online at: <http://scholarworks.bgsu.edu/honorsprojects/127/>.
9. Скідан В.В. Безпека життєдіяльності та цивільний захист. Конспект лекцій для студентів денної та заочної форм навчання освітньо-кваліфікаційного рівня «Бакалавр» спеціальності: 022 Дизайн; – К.: КНУТД – 2016 – 158 с.
10. Єфімчук Г. В. Кодекс честі групи – запорука академічної доброчесності студентів / Л. М. Метельська, Г. В. Єфімчук // Студентський науковий вісник: наук. збірник, серія «Технічні науки». – Луцьк: РВВ Луцького НТУ. – 2018. – Випуск 30 (част. 2). – с. 130-133.

Рецензенти:

Панасюк І.В., д.т.н., професор кафедри теплоенергетики, ресурсоощадності та техногенної безпеки Київського національного університету технологій та дизайну;

Шовкомуд О.В., к.т.н., доцент кафедри галузевого машинобудування та лісового господарства Луцького національного технічного університету.

Стаття надійшла до редакції 25.02.2019

УДК: 628.38

К.Б. Сорокіна*Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова***АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ БАГАТОСТУПЕНЕВОГО АНАЕРОБНОГО ЗБРОДЖУВАННЯ ОСАДІВ СТІЧНИХ ВОД**

Запропоновано технологічну схему обробки осадів стічних вод, що включає двоступеневе анаеробне зброджування сирового осаду і активного мулу зі створенням різних температурних режимів на окремих стадіях. Враховано можливість рекуперації теплоти з метою зниження витрат на реалізацію процесу. Всі етапи обробки осадів, включаючи кондиціонування та зневоднення, взаємопов'язані і передбачають технічні рішення для їх інтенсифікації.

Ключові слова: сирий осад, активний мул, анаеробна стабілізація, термофільне зброджування.

Е.Б. Сорокіна**АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОСТУПЕНЧАТОГО АНАЭРОБНОГО СБРАЖИВАНИЯ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД**

Предложена технологическая схема обработки осадков сточных вод, включающая двухступенчатое анаэробное сбраживание сырого осадка и активного ила с созданием разных температурных режимов на отдельных стадиях. Учтена возможность рекуперации теплоты с целью снижения затрат на реализацию процесса. Все этапы обработки осадков, включая кондиционирование и обезвоживание, взаимосвязаны и предусматривают технические решения для их интенсификации.

Ключевые слова: сырой осадок, активный ил, анаэробная стабилизация, термофильное сбраживание.

K. Sorokina**ANALYSIS OF USE POSSIBILITY OF SEWAGE SLUDGE MULTISTAGE ANAEROBIC DIGESTION**

A technological scheme for treatment of sewage sludge is proposed, including two-step anaerobic digestion of primary and secondary sludge with the creation of different temperature regimes at separate stages. At first stage, the treatment under thermophilic conditions is proposed for 3 days; in second stage, processing in mesophilic conditions is provided. The final decomposition of organic substances, sterilization, decontamination, change in structure of sediment, improvement of its water withdrawal properties, reduction of filtration resistivity is achieved with highest heat treatment. Taken into account possibility of heat recovery in order to reduce the cost of process. All stages of sludge treatment, including conditioning and dehydration, are interrelated and include technical solutions for their intensification.

Keywords: primary sludge, secondary sludge, anaerobic stabilization, thermophilic digestion.

Постановка проблеми. У процесах механічного біологічного та фізико-хімічного очищення стічних вод на очисних спорудах утворюються різного виду осади, що містять органічні та мінеральні компоненти.

Стабілізація осадів забезпечує їх стійкість проти загнивання і задовільні санітарні умови при їх утилізації та складуванні. Ефект стабілізації осаду може бути отриманий різними методами – біологічними, хімічними, фізичними, а також їх комбінацією. Доцільність застосування того чи іншого методу стабілізації визначається рядом умов, головними з яких є вид осадів, їх кількість, можливість і умови подальшого використання, наявність території для їх розміщення.

Як відомо, стабілізація може здійснюватися як в анаеробних умовах шляхом зброджування осадів у метантенках, так і в аеробних умовах шляхом аерування осадів в стабілізаторах.

Анаеробне зброджування осадів міських стічних вод – дуже складний біохімічний процес, який залежить від багатьох фізичних (температура, концентрація сухої речовини, ступінь перемішування, навантаження за беззолною речовиною, тривалість зброджування) і хімічних (рН, лужність, концентрація летючих кислот, елементів живлення і токсичних речовин) чинників [1].

Інтенсифікацію процесу метанового бродіння проводять для досягнення наступних цілей[2]:

- збільшення вмісту метану в біогазі з метою підвищення його теплоти згорання і ефективності утилізації;
- досягнення значного ущільнення і властивості збродженого осаду добре віддавати вологу з метою скорочення витрат на споруди та апарати для його зневоднення;
- скорочення тривалості зброджування при досягненні заданого ступеня розпаду з метою зменшення обсягів споруд, а отже і капітальних витрат;

– підвищення кількості біогазу, що виділяється в процесі бродіння, з метою його використання для скорочення витрат на обігрів самих метантенків і додаткового отримання інших видів енергії.

Вибираючи спосіб інтенсифікації роботи метантенка, необхідно чітко визначити, з якою метою вона повинна проводитися, так як не завжди можна одночасно домогтися кількох цілей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні прийоми інтенсифікації процесу зброджування в метантенках слід розділити на дві групи [2–4]:

- 1) удосконалення традиційної технології зброджування в одноступеневому метантенку;
- 2) використання ступеневих схем зброджування зі створенням в кожному ступені різних умов проведення процесу

До перспективних технологій інтенсивного зброджування відносять різні варіанти фазового розділення. У цих технологіях на різних ступенях зброджування створюють умови для переважного розвитку мікроорганізмів, які утворюють кислоти і метан.

Ряд досліджень присвячено вивченню впливу попередньої термічної обробки на ефективність подальшого термофільного або мезофільного зброджування сирого осаду і активного мулу.

В [5] досліджені відмінності між мезофільним і термофільним анаеробним зброджуванням мулу та вплив попередньої обробки при 70 °С на подальше мезофільне і термофільне анаеробне зброджування сирого осаду і активного мулу. Показано позитивний вплив стадії попередньої обробки на вироблення метану при подальшому термофільному зброджуванні сирого осаду. Вибір тривалості попередньої обробки, а також температури подальшої анаеробної стадії стабілізації мулу залежить від співвідношення сирого осаду і активного мулу.

В [6] показано збільшення сприйнятливості термічно обробленого надлишкового мулу до біохімічного розкладу в анаеробних умовах з використанням температури 50 °С та часу нагріву 6 годин і 70 °С та часу нагріву 4,5 години – були отримані ступені ферментації осаду відповідно 30,67 % і 33,63 % порівняно з 16,88 % після 8 днів ферментації необробленого активного мулу.

Аналогічні результати отримані в [7] при вивченні впливу гіпертермофільної (70 °С) стадії попередньої обробки суміші осадів перед термофільним (55 °С) анаеробним зброджуванням. Також при такій обробці відзначається повне знищення фекальних стрептококів, які були обрані в якості індикаторного патогену.

Автори [8] оцінили ефективність короткої (2 доби) стадії попередньої обробки при 50–70 °С перед обробкою при 35 °С на основній стадії (10-20 діб). Термофільно-мезофільне багатоступінчасте анаеробне зброджування дозволяє досягти 54 % розпаду органічної речовини порівняно з 44 % в мезофільно-мезофільному процесі з паралельним збільшенням вироблення метану на 25 %.

Таким чином, численні дослідження підтверджують ефективність і доцільність розділення процесу анаеробного зброджування осадів стічних вод на кілька ступенів зі створенням при цьому в них різних умов проведення процесу.

Однак, незважаючи на доведену ефективність підтримки на першому етапі температури 70° С отриманий ефект не може компенсувати тепловитрати. Крім цього, процес зброджування необхідно розглядати як елемент комплексної технологічної схеми і враховувати вплив збільшення ступеня розпаду органічної речовини та зміни фазово-дисперсного стану частинок осаду на процес зневоднення і подальшої утилізації осадів.

Постановка завдань. В роботі поставлено завдання дати рекомендації щодо практичного впровадження багатоступеневого анаеробного зброджування сирого осаду та активного мулу. Для цього необхідно встановити критерії вибору параметрів та складу технологічної схеми, запропонувати варіанти обладнання технологічної схеми багатоступеневого анаеробного зброджування осадів стічних вод. При цьому основними факторами, які слід враховувати для практичного впровадження, є необхідність забезпечення:

- ефективної організації процесу зброджування осаду;
- рекуперації теплоти з метою зменшення витрат;
- покращення вологовіддавальних властивостей зброженого осаду.

Викладення основного матеріалу. При виборі складу споруд та обладнання технологічної схеми обробки сирого осаду і надлишкового активного мулу традиційно необхідно вирішувати питання зменшення обсягуосадів, їх знешкодження та забезпечення можливості подальшої утилізації. Логічна послідовність технологічних операцій, яка забезпечує виконання поставлених завдань, представлена на рисунку 1.



Рис.1. Технологічні процеси обробки осадів стічних вод

З метою підвищення ефективності та економічності реалізованих процесів до вирішуваних завдань слід додати збільшення кількості вироблюваного біогазу з подальшою його утилізацією, використання тепла утворюваних потоків, поліпшення вологовіддавальних властивостей осадів, забезпечення високого ступеня їх знезараження.

Під час вибору споруди і способу ущільнення необхідно враховувати, що даний процес спрямований не тільки на зниження вологості осадів і зменшення їх обсягів, а й на забезпечення необхідної концентрації осадів для забезпечення ефективного протікання процесу подальшої стабілізації. Відоме гравітаційне ущільнення в радіальних ущільнювачах відрізняється достатньою простотою і економічністю.

Для прийнятої до розгляду технологічної схеми обробки осадів пропонується прийняти двоступеневе анаеробне зброджування. В його основі передбачається поділ процесу на стадію інтенсивного бродіння з бурхливим виділенням біогазу, що запобігає розшаруванню осаду (I ступінь) і стадію загасання процесу бродіння – виділення біогазу, розшарування осаду і відділення мулової води (II ступінь). Це призведе до зменшення обсягу збродженого осаду, що надходить на зневоднення, і відповідно витрат на цю стадію його обробки. Крім того за рахунок спуску мулової води у II ступені метантенка в ній буде збільшуватися час доброджування осаду, що має покращувати його вологовіддавальні властивості. Слід зазначити, що доброджування і розшарування осаду іноді можна проводити в декількох послідовно розташованих резервуарах.

У дво- і триступневих метантенках при загальному часі перебування в них осаду 25–30 діб обсяг збродженого осаду може бути зменшений вдвічі. При цьому досягається скорочення витрат на будівництво метантенків і мулових площадок порівняно з одноступеневим мезофільним зброджуванням. Ступеневе зброджування не дасть істотних переваг щодо виходу газу порівняно з одноступеневим процесом при рівних обсягах метантенків[9].

У зв'язку з посиленням санітарно-гігієнічних вимог до зброджених осадів є необхідність в їх знезараженні, яке буде досягнуто при термофільному анаеробному зброджуванні та подальшій термічній обробці.

Особливу увагу при складанні технологічної схеми слід приділити питанням зниження витрат на нагрівання осадів. Теплова енергія потрібна для нагрівання осаду, що надходить на обробку, і на компенсацію втрати тепла. Основна теплова енергія витрачається на нагрів осаду.

Витрата тепла на підігрівання вмісту метантенків залежить від режиму зброджування, конструкцій і об'ємів метантенків, тепловтрат, типу зброджуваного осаду і його температури. Під час влаштування метантенків зазвичай використовують бетон та сталь. Для їх утеплення доцільно застосовувати матеріали зневеликим коефіцієнтом теплопровідності (мінеральну вату, вулканітове волокно та ін.). У випадку заглиблених метантенків теплоізоляційним матеріалом слугує ґрунт.

Зазвичай зброджувані осади підігрівають за допомогою теплообмінників або шляхом введення пари через парострумінні інжектори. Однак при установці інжектора безпосередньо в метантенку відбувається перегрів осаду, що сприяє загибелі бактерій, які утворюють метан, зниженню вироблення біогазу та створенню «неробочої» зони. При подачі гострої пари у всмоктувальну трубу насоса при подачі та перемішуванні осаду відбувається теплова і кавітаційна інактивізація функціональної біомаси.

Для скорочення витрат тепла доцільно передбачити підігрів осадів в теплообмінниках осадом, виведеним з метантенків. При організації теплообміну між потоком, що залишає метантенк першої фази, і потоком, що надходить на обробку, частина теплової енергії економиться. Для здійснення такого теплообміну може бути використаний спіральний теплообмінник – рекуперативний теплообмінний апарат, призначений для передачі тепла від гарячого робочого середовища до холодного через поверхню, яка передає тепло. У цих апаратах здійснюється теплообмін між робочими середовищами рідина – рідина. В них здійснюється протитечійний рух робочих середовищ по одному щілиноподібному каналу для кожного середовища. Завдяки тому, що площа поперечного перерізу каналів по всій довжині залишається незмінною, забруднення на стінках в працюючому апараті краще змиваються потоком робочого

середовища, і теплообмінник може триваліше працювати без очищення. Конструкцією теплообмінників зі знімними кришками передбачена можливість механічного очищення каналів.

В разі відкладення забруднень на теплопередавальній поверхні з боку одного з робочих середовищ і при розчинності цих забруднень в другому середовищі можна періодично перемикаєти канали. Геометричні розміри каналів в апараті для першого і другого робочих середовищ однакові, і тому їх взаємне перемикаєння не порушує гідродинамічний процес.

Також генерований біогаз може частково забезпечити власні потреби станції обробки осаду, принаймні, за тепловою енергією. Якщо передбачити газовий двигун з електрогенератором, то можна отримати і електроенергію для приводу машин системи транспортування і зневоднення осадів.

Таким чином, з метою удосконалення технологічної схеми типової станції аерації для очищення міських, господарсько-побутових і близьких до них за складом стічних вод може бути запропонований комплекс обладнання та споруд технологічної схеми інтенсивної обробки осаду з використанням операцій багатоступеневої біологічної стабілізації, кондиціонування, ущільнення і зневоднення.

В технологічний процес обробки осаду рекомендується включити наступні етапи (рисунк 2):

1. Спільне ущільнення сирого осаду первинних відстійників і надлишкового активного мулу з вторинних відстійників. Рекомендовано застосування поширеного методу – гравітаційне ущільнення в радіальному мулоущільнювачі I з мулоскребом. Це дозволяє ефективно видаляти надлишкову вологу і зменшувати обсяг осаду. Мулову воду пропонується відводити в первинні відстійники.

У мулоущільнювачі для інтенсифікації ущільнення можна подавати деяку кількість фільтрату після механічного зневоднення та мулової води з мулоущільнювача після термічного кондиціонування зброженого осаду.

2. Накопичення ущільненого осаду в резервуарі 2 в обсязі добової дози.

3. Нагрівання ущільненого осаду. Пропонується проводити шляхом подачі його плунжерним насосом в метантенки через теплообмінники 3. У теплообмінниках відбувається нагрів ущільненого осаду від розрахункової температури (15 °С) до робочої температури в метантенку першої фази (55 °С). Причому, спочатку завантажуваний осад нагрівається до 34 °С в першому спіральному теплообміннику потоком осаду, що витісняється з метантенка першої фази в метантенк другої фази. Потік, який витісняється, при цьому охолоджується з 55 °С до робочої температури в реакторі другої фази (36 °С). Далі завантажуваний осад підігрівається від 34 °С до 55 °С у другому спіральному теплообміннику, що обігрівається гарячою водою.

4. Анаеробна стабілізація в метантенках за двофазною схемою. У метантенку першої фази⁴ збродження відбувається у термофільних умовах (55 °С). Час перебування – 3 доби. При цьому відбувається гідроліз, кіслотогенез і ацетотогенез органічної речовини з генерацією вуглекислоти і водню. Водневий показник середовища рН знижується, тому створюються умови для протікання стадії кіслоного бродиння.

У метантенку другої фази⁵, куди надходить частково зброжений осад, що витіснений з метантенка першої фази при завантаженні, триває бродиння в мезофільному режимі (36 °С) протягом 14 діб з більш глибоким розкладанням органічної речовини, що супроводжується утворенням метану.

Перемішування в метантенках пропонується здійснювати за допомогою пропелерної мішалки, встановленої у вертикальній відкритій з обох торців трубі, коаксіально резервуару метантенка. При роботі мішалки труба діє як осьовий насос, що піднімає осад з нижньої частини метантенка в верхню. З метою компенсації тепловтрат трубу слід виконувати з «рубашкою», в якій циркулює гаряча вода, що нагріває осад, який циркулює в трубі. Витрата гарячої води в «рубашці» регулюється за сигналом датчика температури в метантенку. Регулювання подачі відбувається пропорційно відхиленню температури від робочої з метою термостабілізації.

5. Дроблення зброженого осаду. Осад, вивантажуваний з метантенка при температурі 36 °С, необхідно пропускати через дробаркуб для подрібнення. Подрібнений осад пропонується накопичувати в резервуарі⁷, звідки насосом подавати в установку термічної обробки⁸.

6. Термічна стабілізація осаду в установці теплової обробки⁸. Подрібнений зброжений осад слід подавати спочатку в теплообмінник, де нагрівати вивантажуваним осадом, що пройшов реактор, потім – в реактор, що являє собою вертикальну циліндричну колону.

У реакторі осад витримують протягом 60–75 хвилин при температурі 140–200 °С при тиску 1,2–2 МПа. Для нагріву в реактор подають гостру пару. Пари і гази, що утворюються, скидають з верхньої частини колони в сепаратор для розділення, дезодорації і знешкодження.

При такій обробці відбувається розпад органічних речовин, стерилізація, знешкодження, зміна структури осаду, поліпшення його водовіддавальних властивостей, зниження питомого опору фільтруванню. Це дозволяє проводити подальше ефективне зневоднення центрифугуванням або фільтр-пресуванням. Очікується, що вологість кеку, одержуваного при зневодненні, може досягати 55–70 %.

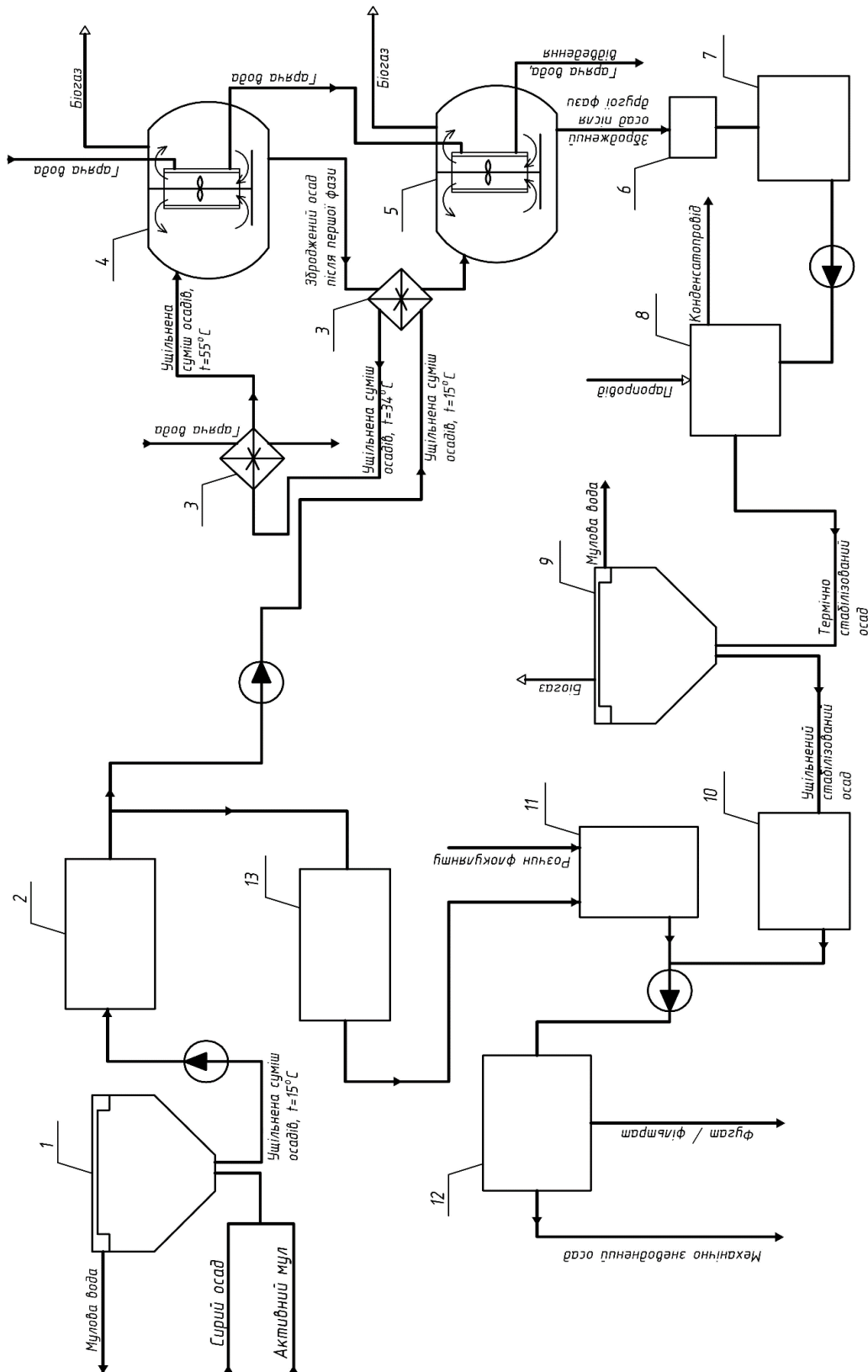


Рис. 2. Технологічна схема інтенсивної обробки осаду з використанням операцій багатоступеневої біологічної стабілізації, кондиціонування, ущільнення і зневоднення

7. Ущільнення. Термічно оброблений осад проходить ущільнення в гравітаційному радіальному мулоущільнювачі 9 з мулоскребом. Ущільнений осад відводять в резервуар-накопичувач 10, мулову воду подають в первинний відстійник для очищення від наявних в ній у помітних кількостях розчинених і завислих речовин. Частково вона може надходити в перший мулоущільнювач.

Можливе використання мулової води в схемах денітрифікації стічних вод як джерела біогенного харчування (велика кількість амонійного азоту і фосфатів).

8. Механічне зневоднення центрифугуванням або фільтр-пресуванням. З резервуара гвинтовим насосом осад подають на зневоднення у цех 12.

Фугат або фільтрат слід відводити в очисні споруди і, частково, в перший мулоущільнювач.

Для обробки понадрозрахункових кількостей надлишкового активного мулу в системі передбачений аеробний стабілізатор 13 та реагентне кондиціонування стабілізованого осаду 11.

У процесі розпаду органічної речовини осаду в метантенках утворюється біогаз, який по системі трубопроводів надходить на утилізацію. Котли або генератори, що працюють на біогазі, виробляють відповідно пару або електроенергію. Пара або утворювана в процесах охолодження гаряча вода йде на підігрів реактора теплової обробки осаду і на підігрів води, що спрямовується в теплообмінники.

Зневоднений осад може бути вивезений на полігони захоронення або направлений на утилізацію в якості добрива або гранульованого палива.

Окремо необхідно зазначити, що в свою чергу і проблема утилізації осаду стічних вод вимагає свого вирішення, що передбачає необхідність проведення спеціальних досліджень.

Висновки. З метою удосконалення технологічної схеми типової станції аерації для очищення міських, господарсько-побутових і близьких до них за складом стічних вод в роботі запропоновано технологію інтенсивної обробки осаду з використанням операцій біологічної стабілізації, кондиціонування, ущільнення і зневоднення.

Запропонована схема обробки сирого осаду та активного мулу двоступеневим анаеробним зброджуванням дає більш глибокий ефект стабілізації та знезараження осаду, забезпечує поліпшення його властивостей віддавати вологу, можливість отримання та подальшої утилізації біогазу, зменшення обсягів споруд.

Привикористанні двоступеневих метантенків слід очікувати зростання витрат, пов'язаних з будівництвом і експлуатацією метантенків, які компенсуються зниженням витрат на подальшу обробку збродженого осаду.

Список використаних джерел:

1. Ciešlik, B., Namiešnik, J., Konieczka, P. Review of sewage sludge management: Standards, regulation and analytical methods / Journal of Cleaner Production. – Volume 90, March 2015. – P. 1-15.
2. Сорокіна К. Б. Можливості застосування схем метанового зброджування осадів стічних вод та утилізації біогазу / К.Б.Сорокіна // Водопостачання та водовідведення. Виробничо-промисловий журнал – Київ, ТОВ «Прайм-прінт», 2015. – № 1. – С. 17-20.
3. Kasprzaka, M., Neczaja, E., Fijałkowska, K., Grobelaka, A., Grossera, A. Sewage sludge disposal strategies for sustainable development / Environmental Research. – Volume 156, July 2017. – P. 39-46.
4. Zhang, Q., Hua, J., Lee, D., Chang, Y., Lee, Y. Sludge treatment: Current research trends / Bioresource Technology. – Volume 243, November 2017. – P. 1159-1172.
5. Gavala, H. N., Yenal, U., Skiadas, I. V., Westermann, P., Ahring, B. K. Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of primary and secondary sludge. Effect of pre-treatment at elevated temperature / Water Research. – Volume 37, Issue 19, November 2003. – P. 4561-4572.
6. Zawieja, I., Wolski, P. Effect of thermal disintegration of excess sludge on the effectiveness of hydrolysis process in anaerobic stabilization / Archives of environmental protection. – Volume 38, № 1, 2012. – P. 103-114.
7. Skiadas, I.V., Gavala, H.N., Lu, J., Ahring, B.K. Thermal pre-treatment of primary and secondary sludge at 70 °C prior to anaerobic digestion / Water Science & Technology. – Volume 52, № 1-2, 2005. – P. 161-166.
8. Ge, H., Jensen, P. D., Batstone, D. J. Pre-treatment mechanisms during thermophilic-mesophilic temperature phased anaerobic digestion of primary sludge / Water Research. – Volume 44, Issue 1, January 2010. – P. 123-130.
9. Природоохоронні технології. Методи переробки осадів стічних вод / Петрук В. Г., Васильківський І. В., Безвозюк І. І., Петрук Р. В., Турчик П. М. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – 324 с.

Стаття надійшла до редакції 19.03.2019

621.317.333.621.316.13

Л.Б. Терешкевич¹, І.О. Бандура², О.О. Хоменко¹
Вінницький національний технічний університет¹
Луцький національний технічний університет²

МЕТОД РОЗРАХУНКУ ВНУТРІШНЬОГО СИМЕТРУВАННЯ ОДНОФАЗНИХ ЕЛЕКТРОПРИЙМАЧІВ У ВУЗЛАХ ЧОТИРИПРОВІДНОЇ МЕРЕЖІ

Розроблено метод розрахунку оптимального під'єднання однофазних навантажень до вузла чотирипровідної мережі, який враховує зміни їх параметрів в часі та забезпечує глобальний екстремум сумарних додаткових втрат енергії, зумовлених несиметрією режиму.

Ключові слова: несиметрія електричного режиму, чотирипровідна мережа.

Л.Б. Терешкевич, И.А. Бандура, О.О. Хоменко МЕТОД РАСЧЕТА ВНУТРЕННЕЙ СИММЕТРИРОВАНИЯ ОДНОФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ В УЗЛАХ ЧЕТЫРЕХПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ

Разработан метод расчета оптимального подключения однофазных нагрузок к узлу четырехпроводной сети, учитывающий изменения их параметров во времени и обеспечивает глобальный экстремум суммарных дополнительных потерь энергии, обусловленных несимметрией режима

Ключевые слова: несимметрия электрического режима, четырехпроводная сеть.

L. Tereshkevich, I. Bandura, O. Khomenko METHOD OF CALCULATION OF INTERNAL SYMBOLIZATION OF ONE-PHASE ELECTRIC PIPES IN HIGH-POINTING NETWORK NETWORKS

The method of calculating the optimal connection of single-phase loads to the node of a four-wire network, which takes into account changes in their parameters in time and provides the global extremum of total additional energy losses due to regime asymmetry, is developed.

Keywords: asymmetry of electric mode, four-wire network.

Постановка проблеми. Несиметрія електричного режиму, яка має місце в мережах 0,4 кВ енергопостачальних компаній, зумовлена однофазними електроприймачами (ОЕ), що живляться від неї. Нормовані ГОСТ 13109-97 показники несиметрії напруг в багатьох випадках залишаються не забезпеченими, а потужності ОЕ мають тенденцію до зростання.

Зменшити несиметрію електричного режиму без додаткових пристроїв можна шляхом внутрішнього симетрування ОЕ.

За своєю природою задача внутрішнього симетрування оптимізаційна, а її вирішення класичними методами супроводжується рядом труднощів, серед яких [1]:

- необхідність знаходження розв'язків в цілочислових змінних;
- критерії ефективності описуються не скалярною квадратичною функцією дійсного змінного;
- розв'язки, знайдені існуючими методами вирішення таких задач, можуть відповідати локальним екстремумам цільових функцій, якими описані критерії ефективності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі роботи, де розроблено методи розрахунку внутрішнього симетрування ОЕ в трипровідній мережі при незмінних параметрах ОЕ, що забезпечують локальний екстремум цільової функції [1, 2]. Прийняти технічне рішення з внутрішнього симетрування із врахуванням зміни параметрів ОЕ можна за методом [3]. Взаємозв'язки задачі внутрішнього симетрування ОЕ із задачею вирівнювання групового графіка навантажень дослідженні в [4].

Локальний мінімум цільової функції для задач внутрішнього симетрування ОЕ із сталими параметрами в чотирипровідній мережі можна знайти за методом [5]. Але для більшості ОЕ характерним є зміна їх параметрів в часі, оптимальне рішення прийняте для одного моменту часу, може бути неоптимальним для іншого. Тому виникає потреба у врахуванні цього фактору при внутрішньому симетруванні ОЕ, які під'єднуються до фазних напруг. Зменшити струм в нульовому провіднику можна за допомогою інформаційних технологій [6]. У роботі [7, 8] розроблено пристрій автоматичного перемикачів магістралей з групою ОЕ на протязі доби. Недопустимим для роботи ОЕ – часті перемикачів, оскільки це зменшує термін служби побутового обладнання.

Мета роботи: розробити метод розрахунку внутрішнього симетрування ОЕ в чотирипровідній мережі за умови зміни їх параметрів, який забезпечує знаходження рішення, якому відповідає глобальний екстремум цільової функції, а всі етапи такого розрахунку можуть виконуватись за інформаційними технологіями.

Викладення основного матеріалу. Багатокритеріальна оптимізаційна задача внутрішнього симетрування ОЕ, параметри яких змінюються в часі, може вирішуватись за середньозваженим критерієм – сумарними додатковими втратами активної енергії в лінії живлення вузла навантаження [4]. Складові цільової функції – додаткові втрати активної енергії, зумовлені струмами зворотної та нульової послідовності, можуть бути суперечливими.

Глобальний екстремум цільової функції можна знайти якщо прорахувати всі можливі варіанти розв'язку задачі та виконати кількісну оцінку кожного, порівняти результати і відібрати найкращий. Такий шлях реальний, оскільки задача цілочислова і кількість варіантів обмежена.

Якщо на інтервалі часу $t_0 - t_K$ виділити дискретні моменти часу t_k з однаковою тривалістю інтервалів $t_k - t_{k+1}$, $k=1;2;\dots;K$, на яких параметри графіків навантажень ОЕ залишаються незмінними (позначення інтервалів є спільним для всіх графіків і відповідає реалізованому взаємному їх зсуву в часі), то додаткові втрати активної енергії в лінії живлення для деякого варіанту внутрішнього симетрування будуть пропорційними:

$$P^* \sum_k \left| \sum_n (I_{lmm})_k \right|^2 + \sum_k \left| \sum_n (I_{0mm})_k \right|^2, \quad (1)$$

де $(I_{lmm})_k$ – вектор струму зворотної послідовності, що створюється електроприймачем n , $n=1;2;\dots;N$ на інтервалі часу k . (m – код напруги, до якої під'єднано ОЕ, $m=1$ відповідає під'єднанню до U_A ; $m=2$ до U_B ; $m=3$ до U_C).

$(I_{0mm})_k$ – те саме, нульової послідовності.

$$P^* = \frac{\Delta P_{II}}{\Delta P_0},$$

де ΔP_{II} – додаткові втрати активної потужності в лінії живлення, зумовлені струмом зворотної послідовності величиною 1А.

ΔP_0 – те саме, струмом нульової послідовності.

Залежність (1) є аналітичним описом показника ефективності i -го варіанта внутрішнього симетрування.

Струми в лінії живлення – $\sum_n (I_{lmm})_k$ та $\sum_n (I_{0mm})_k$, які є компонентами матриць **F** та **E** відповідно, за умови усіх можливих варіантів під'єднання ОЕ до мережі, можуть бути розрахованими так:

$$\mathbf{F} = P^* \cdot \mathbf{I}_{II} \cdot \mathbf{X};$$

$$\mathbf{E} = \mathbf{I}_0 \cdot \mathbf{X},$$

де \mathbf{I}_{II} – матриця векторів струмів зворотної послідовності, що генеруються окремими ОЕ за умови їх під'єднання до різних напруг вимірністю $K \times 3N$, її k -тий рядок – це струми в k -тий момент часу;

\mathbf{I}_0 – те саме – векторів струмів нульової послідовності;

\mathbf{X} – матриця векторів під'єднання ОЕ до мережі, кожний стовпчик якої – опис одного із варіантів під'єднання групи ОЕ до мережі.

Матриця **X** охоплює описи всіх можливих варіантів під'єднання ОЕ до мережі. Якщо зафіксувати під'єднання одного із них до будь-якої напруги, то кількість можливих комбінацій зменшиться втричі і її вимірність буде $3N \times \frac{1}{3} 3^N$. Інформація про i -тий варіант під'єднання ОЕ до

мережі міститься в i -тому стовпчику матриці **X**, $\mathbf{X} = \begin{pmatrix} \mathbf{X}_1 & \mathbf{X}_2 & \dots & \mathbf{X}_i & \dots & \mathbf{X}_{\frac{1}{3} 3^N} \end{pmatrix}$.

Для опису під'єднання n -го ОЕ за i -тим варіантом використовуються булеві змінні $x_{(3n)i}$; $x_{(3n-1)i}$; $x_{(3n-2)i}$. Якщо електроприймач під'єднується до напруги U_A , то $x_{(3n)i} = 1$, а $x_{(3n-1)i} = 0$, $x_{(3n-2)i} = 0$; якщо до U_B , то $x_{(3n-1)i} = 1$, а $x_{(3n-2)i} = 0$, $x_{(3n)i} = 0$; якщо до U_C , то $x_{(3n-2)i} = 1$, а $x_{(3n-1)i} = 0$, $x_{(3n)i} = 0$.

Надалі обробка інформації, що міститься в матрицях **F** та **E**, пов'язана із вибором за критерієм (1) оптимального варіанту внутрішнього симетрування ОЕ і виконується за алгоритмом, рис. 1.



Рис. 1. Алгоритм розрахунку оптимального варіанту внутрішнього симетрування ОЕ у вузлі чотирипровідної мережі

Приклад вирішення задачі за розробленим методом

До вузла електричної мережі необхідно під'єднати чотири ОЕ, параметри яких змінюються в часі, як показано в табл. 1.

Таблиця 1

		Характеристика ОЕ				
№ ОЕ	Параметри	Інтервали часу				
		Δt_1	Δt_2	Δt_3	Δt_4	Δt_5
1	Р, кВт	4,2	2,6	2,9	3,8	5,9
	cosφ	0,75	0,86	0,82	0,9	0,92
2	Р, кВт	5,8	1,6	5,4	1,3	1,4
	cosφ	0,9	0,89	0,88	0,85	0,87
3	Р, кВт	1,2	1,1	2,6	2,3	3
	cosφ	0,71	0,79	0,7	0,67	0,71
4	Р, кВт	3,6	7,2	5,1	4	3,2
	cosφ	0,91	0,89	0,9	0,91	0,92

Визначити оптимальний варіант їх під'єднання до вузла мережі, що забезпечує мінімум додаткових втрат енергії (1). При розрахунках прийняти значення $P^* = \frac{1}{4}$.

Розв'язування.

Складаються: матриці векторів під'єднання ОЕ **X**, а також векторів струмів зворотної та нульової послідовностей I_n та I_0 відповідно. Компоненти матриць I_n та I_0 розраховуються за аналітичними залежностями:

Відповідно до алгоритму, рис. 1, розраховуються множини M_1 та M_2 і знаходяться суми відповідних їх елементів, які компонентами множини M_3 :

$$M_3 = \{44331,99 \quad 19052,37 \quad 16324,41 \quad 24156,22 \quad 12234,77 \quad \dots \quad 2617,29\}.$$

На останньому кроці знайдемо мінімум із множини M_3 :

$$\min\{M_3\} = 2617,29 (A^2).$$

Отриманому $\min\{M_3\}$ знаходиться у відповідності такий вектор під'єднання ОЕ:

$$\mathbf{X}_i^T = (1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 1 \quad 0).$$

У відповідності до оптимального вектора \mathbf{X}_i перший ОЕ слід під'єднати – до \underline{U}_A , другий та третій – до \underline{U}_C , четвертий – до \underline{U}_B .

Оптимальним рішенням для умов прикладу, табл.1, яке знайдене за параметрами для дискретного моменту часу t_1 (без врахування зміни параметрів ОЕ в часі) у відповідності [5] буде таким:

- перший ОЕ під'єднати – до напруги \underline{U}_B ;
- другий – до \underline{U}_C ;
- третій та четвертий – до \underline{U}_A .

Показник ефективності (1), що відповідає такому під'єднанню ОЕ становить 5045,24 A^2 , що в 1,9 разів перевищує результат, отриманий за розробленим методом. Це свідчить про необхідність врахування зміни параметрів ОЕ в часі при розрахунках оптимального варіанту їх під'єднання до вузла мережі.

Висновки.

1. Розрахунок оптимального під'єднання однофазних навантажень до трифазної чотирипровідної мережі необхідно виконувати із врахуванням зміни їх параметрів.

2. За показник ефективності, який оцінює прийняте рішення з під'єднання однофазних навантажень до чотирипровідної мережі на інтервалі часу $t_1 - t_K$, може бути прийнято функціонал (1), числове значення якого пропорційне сумарним додатковим втратам активної енергії, що зумовлені несиметрією режиму.

3. Розроблений метод дозволяє знайти оптимальне під'єднання однофазних навантажень до трифазної чотирипровідної мережі із врахуванням зміни їх параметрів.

4. Всі етапи розрахунку алгоритмізовано, що дає можливість використання інформаційних технологій.

Список використаних джерел:

1. Аввакумов В. Г. Методы нескалярной оптимизации и их приложения / В. Г. Аввакумов. – К. : Вища шк., 1990. – 188 с. – ISBN 5-11-001321-7/
2. Терешкевич Л.Б. АСУ в електроспоживанні – Вінниця: ВНТУ, 2016. – 136 с.
3. Терешкевич Л. Б. Оптимальне під'єднання однофазних навантажень, параметри яких змінюються в часі, до вузла трипровідної електричної мережі / Л. Б. Терешкевич, О. О. Хоменко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2017 – №1 – с. 57-61.
4. Терешкевич Л. Б. Внутрішнє симетрування однофазних електроприймачів та вирівнювання їх групового графіка навантажень / Л. Б. Терешкевич, О. О. Хоменко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2018 – №1 – С. 12-17.
5. Мокін Б. І. Нескалярна квадратична цільова функція та алгоритм її мінімізації в задачі керування несиметрією режиму чотирипровідної електричної мережі / Б. І. Мокін, В. А. Барчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012 – №1 – С. 43-47.
6. M. Noruzi, A. Basiri "Current balancing for distributed single phase loads based on automated phase tracing" IEEE 23rd International Conference on Electricity Distribution, 2015.
7. T. T. Son, T. A. Tung "Current unbalance reduction in low voltage Distribution networks using automatic phase Balancing device" Journal of Science and Technology Vol. 55, No. 1, pp. 108-119, 2017.
8. Y. Zheng, L. Zou, J. He, Y. Su, Z. Feng "Fast Unbalanced Three-phase Adjustment base on Single-phase Load Switching" TELKOMNIKA, Vol. 11, No. 8, pp. 4327-4334, 2013.

Стаття надійшла до редакції 19.03.2019

УДК 614.8

Т.В. Терлецький, В.В. Любитовець, А.А. Ткачук, О.Л. Кайдик, С.А. Мороз*Луцький національний технічний університет***ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ШЛЕЙФІВ ПОЖЕЖНОЇ СИГНАЛІЗАЦІЇ**

В статті подано результати аналізу конструкцій баз пожежних сповіщувачів, які застосують під час побудови шлейфів пожежної сигналізації та виділено проблему недосконалості національних нормативних документів стосовно сумісності пристроїв пожежної сигналізації. Розглянуто питання розгалуження радіального шлейфу та встановлено найбільш оптимальний спосіб кріплення його електричних провідників.

Ключові слова: шлейф пожежної сигналізації, сповіщувач, прилад приймально-контрольний пожежний, узгодження, сумісність.

Т.В. Терлецкий, В.В. Любитовец, А.А. Ткачук, О.Л. Кайдик, С.А. Мороз
ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ШЛЕЙФОВ ПОЖАРНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ

В статье представлены результаты анализа конструкций баз пожарных извещателей, которые применяют при построении шлейфов пожарной сигнализации и выделено проблему несовершенства национальных нормативных документов относительно совместимости устройств пожарной сигнализации. Рассмотрены вопросы разветвления радиального шлейфа и установлено наиболее оптимальный способ крепления его электрических проводников.

Ключевые слова: шлейф пожарной сигнализации, извещатель, прибор приемно-контрольный пожарный, согласование, совместимость.

T. Terletsnyi, V. Lyubitovets, A. Tkachuk, O. Kaidyk, S. Moroz
FEATURES OF CONSTRUCTION OF THE PLUME FIRE ALARM

The article presents the results of the analysis design fire detector bases that are used during the construction of the fire alarm loops and highlighted the problem of imperfection of the national normative documents regarding the compatibility of the fire alarm devices. The issues of branching of radial loop are considered and the most optimal way of fixing of its electric conductors is established.

Key words: plume fire alarm, detector, control and fire control device, coordination, compatibility.

Шлейфи пожежної сигналізації (ШПС) являють собою електричні ланцюги, які з'єднують вихідні ланцюги пожежних сповіщувачів (СП), що включають в себе допоміжні виносні радіоелементи і дрони сполучення та призначені для видачі на прилад приймально-контрольний пожежний (ППКП) повідомлень про пожежу і несправність, а також подачі електроживлення на ці сповіщувачі.

У нормативних документах [1, 2] зазначено, що контроль цілісності ланцюга шлейфу на всьому його протязі і формування сигналу несправності обов'язково повинно відобразитись на ППКП при витяганні головки з бази в будь-якому місці шлейфу. Крім цього, не допускається виконання з'єднань «повітряними» скрутками, наявність яких в шлейфі негативно впливає на надійність функціонування пожежної сигналізації у цілому.

Кількість контактів з'єднання на головці та базі залежить від багатьох причин і в першу чергу ця залежність визначається питаннями організації шлейфу пожежної сигналізації. Також існує проблема сумісності пристроїв пожежної сигналізації різних виробників.

У зв'язку з цим постала потреба в проведенні аналізу схем підключення сповіщувачів і відповідності конструкцій їх баз стосовно існуючих нормативних вимог до організації ШПС.

Реалізовані у СП принципи побудови вимагають певних технічних рішень при підключенні цих виробів до ППКП за допомогою ШПС.

Типовим представником СП є неадресний двох провідний сповіщувач пожежний димовий (СПД) з можливістю підключення зовнішнього пристрою індикації (ЗП), у якого головка має чотири контакти для з'єднання з базою:

- контакт плюсової шини шлейфу (+ Uz);
- контакт ЗП (LED);
- контакт мінусової шини шлейфу (GND);
- контакт мінусової шини шлейфу (GND).

Дублювання контактів мінусової шини шлейфу (GND рис. 1) здійснено з метою виконання нормативного вимоги – контролю цілісності ланцюга шлейфу на всьому його протязі і формування сигналу несправності на ППКП при витяганні головки з бази в будь-якому місці шлейфу.

Якщо для кожного контакту головки на базі буде надано тільки по одному гвинтовому контакту для підключення провідників та елементів ШПС, то частину з'єднань доведеться виконувати «повітряними» скрутками, так як спеціальних місць для з'єднання цих елементів не передбачено.

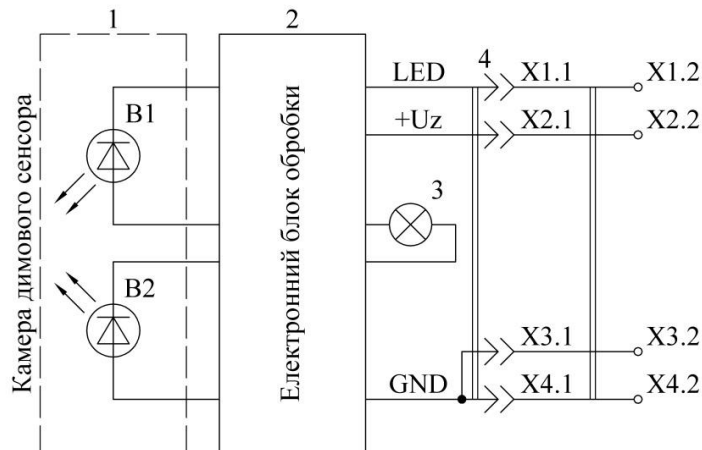


Рис. 1. Схема СПД: 1 – камера димового сенсора з фотодіодом B1 і світлодіодом B2; 2 – електронний блок обробки; 3 – індикатор стану; 4 – контакти головки; 5 – база з контактними групами X1, ... X4

Якщо ж такі бази використати для побудови ШПС із знакозмінним формуванням напруги – то в цьому шлейфі та немає необхідності підключати до сповіщувача додатковий ЗПП, а кінцеві елементи будуть розташовані на окремому спеціальному блоці, а не на базі останнього у шлейфі сповіщувача, то тоді можна уникнути «повітряних» з'єднань.

Приклад побудови двох провідного знакозмінного шлейфу пожежної сигналізації наведено на рис. 2. Підключення у такому ШПС двох провідників до одного гвинтового з'єднувача +Uz не є коректним. Приєднання кінцевих елементів – діода та резистора зроблено на окремій монтажній колодці, яка розташована поза базу кінцевого у шлейфі сповіщувача, оскільки на самій базі для таких з'єднань контакти відсутні.

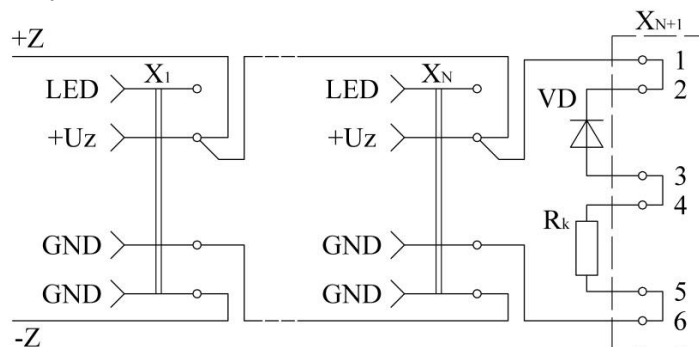


Рис. 2. Схема двох провідного знакозмінного ШПС

Для правильного монтажу ланцюгів необхідно дотримуватися рекомендації нормативних документів. Пояснення у цьому питанні надає американський стандарт NFPA 72 [2]. Рекомендації за правилами з'єднання провідників ШПС з цього документа наочно представлені на рис. 3 (Figure A.5.4.6 (a) [3]).

З даної схеми стає зрозуміло, що для правильного і надійного з'єднання провідників шини +Z необхідно збільшити кількість гвинтових з'єднувачів на контакт +Uz бази. Очевидно, що потрібно змінити попередню схему підключення СП до ШПС (рис.4).

У разі використання ЗПП необхідно передбачити ще одне гвинтове з'єднання на контакт GND бази, щоб було куди приєднати катод світлодіода (рис.5).

Проблеми з підключенням провідників до такої бази виникнуть у тому випадку, коли сповіщувач виконаний так, що ЗПП повинен підключатися катодом до контакту LED бази, а анодом – до контакту +Uz.

Навіть коли кожному контакту головки на базі буде надано по два гвинтових контакти, то все одно для декількох обов'язкових з'єднань не буде потрібних гвинтових з'єднувачів для підключення сповіщувачів до сучасних ППКП.

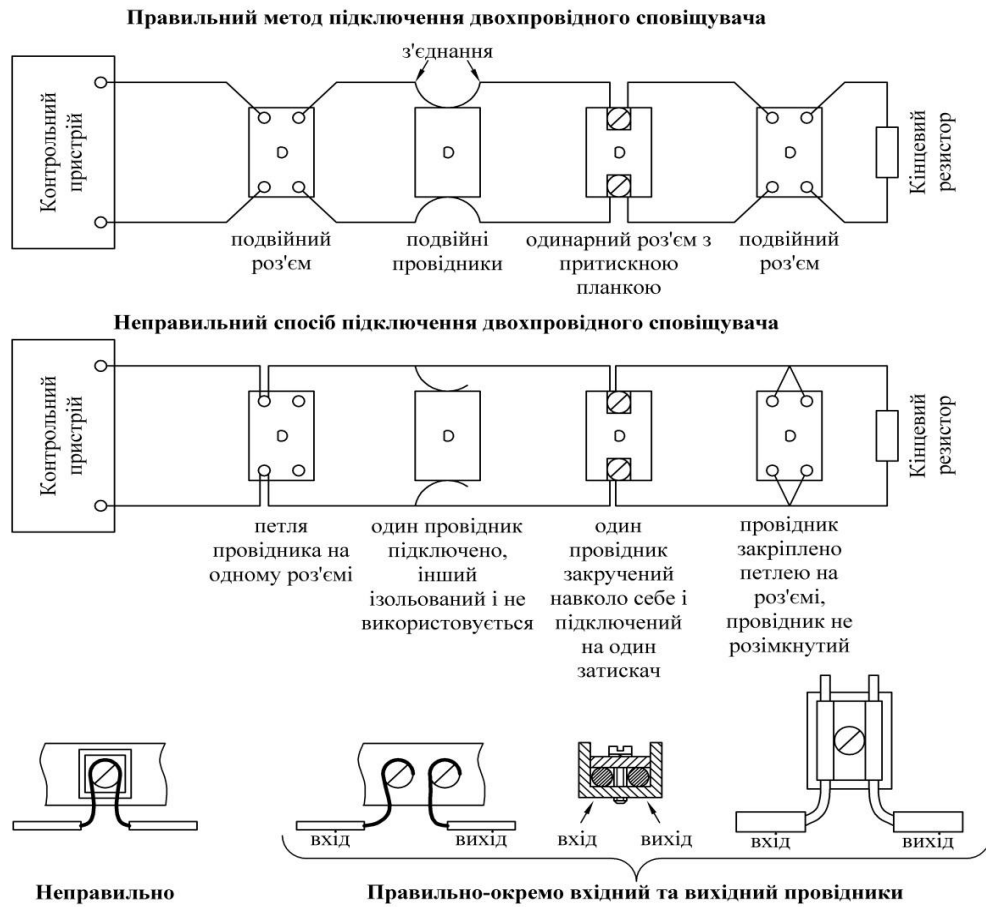


Рис. 3. Схема правильного і неправильного з'єднання провідників шлейфу за NFPA-72

Драйвер постійно-струмового ППКП [4] (рис. 6), дозволяє виявити спрацювання одного або двох сповіщувачів з декількох десятків СПД, підключених в один шлейф такого ППКП.

Для цієї мети необхідно підключити кожен сповіщувач послідовно з резистором, який би обмежував струм у режимі пожежної тривоги. Таким чином, виникає необхідність з'єднання одного виводу резистора з двома провідниками шлейфу, але дане гвинтове з'єднання не повинно мати зв'язків з головкою.

Подібна проблема, з'єднання провідників різного діаметру, виникає і на другому контакті при необхідності підключення ЗП. Аналогічна проблема може виникнути і з четвертим контактом для такого виконання активної частини, в якому ЗП буде підключатися до цієї шини живлення сповіщувача.

Всі гвинтові з'єднувачі цієї бази виконані з квадратними гайками. А їх по парне об'єднання дозволяє забезпечити надійне електричне з'єднання провідників різного діаметру в межах встановлених значень для слабкострумових ланцюгів. Особливо актуально дане рішення проблеми проявляється при використанні негорючих провідників і екранованих кабелів.

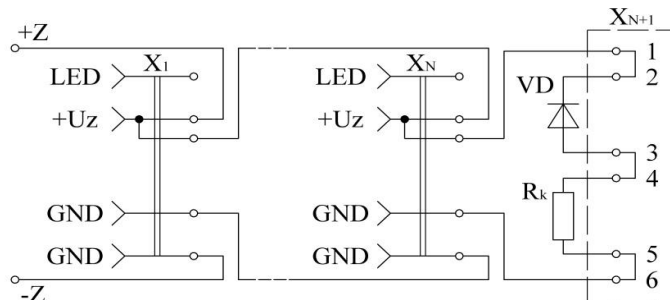


Рис. 4. Модифікована схема двох проводного знакозмінного ШПС

Особливістю СПД є те, що в процесі їх експлуатації необхідно проводити технічне обслуговування. А це означає, що димові сповіщувачі повинні бути знімними і складатися з головки та бази.

Оскільки, наявність ЗПІ – функція необов'язкова, то для виконання основних функцій знімний СП може містити на активній частині тільки два контакти для підключення його через базу до двопровідного ШПС. Однак у нормативних документах є вимога, що при вилученні головки з бази в функціонуючій ШПС повинні відбутися зміни, які прилад ППКП повинен сприйняти як «НЕСПРАВНІСТЬ». Зазвичай це забезпечується розривом одного з провідників ШПС за допомогою двох контактів на базі та двох замкнутих між собою контактів на головці сповіщувача.

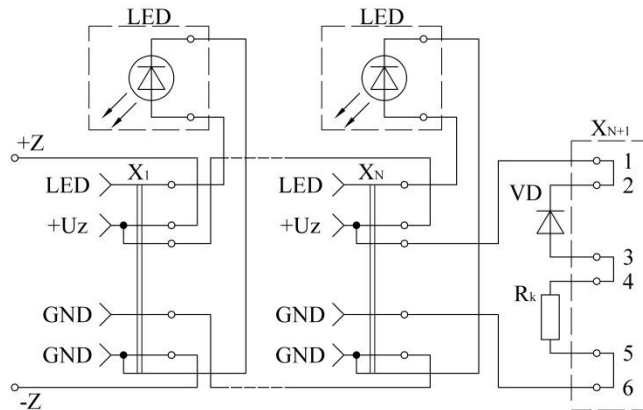


Рис. 5. Модифікована схема двопровідного знакозмінного ШПС з можливістю підключення ЗПІ

В останні роки на ринках СПД все більше проявляється тенденція використання базових основ з безгвинтовим підключенням провідників і елементів шлейфу сигналізації [5-8].

Аналіз існуючих конструкцій безгвинтових затискачів електричних провідників важільного типу показав, що найкращим з них є варіант реалізації затискача з плоскою пластиною та фігурним важелем [8] (рис. 7), який розроблено для баз СПД. Такий затискач дозволяє здійснити електричне підключення декількох провідників однакового діаметру.

Завдяки пружним властивостям фігурного важеля, а також взаємному розташуванню в ізоляційній основі плоского контакту та фігурного важеля забезпечується надійне електричне з'єднання провідників з плоским контактом. Подібне з'єднання застосовується для фіксації SIM-карти у мобільних телефонах.

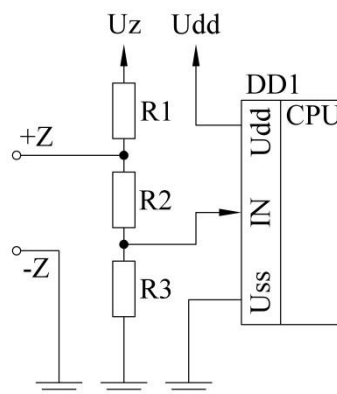


Рис. 6. Схема драйвера ППКП з постійно-сумовим методом контролю стану ШПС

Величина перехідного опору в електричному з'єднанні плоского контакту з циліндричним провідником, що притискається до площини контакту в одній точці, залежить від зусилля стиснення [9]. Згідно теорії електричних з'єднань, опір звуження обернено пропорційний кубічному кореню від зусилля стиснення. Це означає, що для того, щоб опір перехідного точкового контакту збільшився в два рази, наприклад, з 0,01 Ом до 0,02 Ом, необхідно, щоб зусилля стиснення зменшилося в 8 разів, тобто з 40 Н до 5 Н. Так як хід із зусиллям рукоятки важеля пропорційний цьому зусиллю, то стає очевидним, що при статичному зусиллі стиснення

перехідний опір контакту практично не буде помітно зростати навіть у процесі тривалої експлуатації затискача.

Переваги, які надає безгвинтова база у порівнянні із звичайною гвинтовий базою, полягають у зручності в монтажі та практично у 2 рази зменшення часу на цю процедуру.

Під час побудови безадресних ШПС доводиться неухильно дотримуватися умови: забезпечувати радіальний характер шлейфів. Практично будь-яка спроба організувати відведення від радіального безадресного ШПС призводить до порушення нормативних вимог.

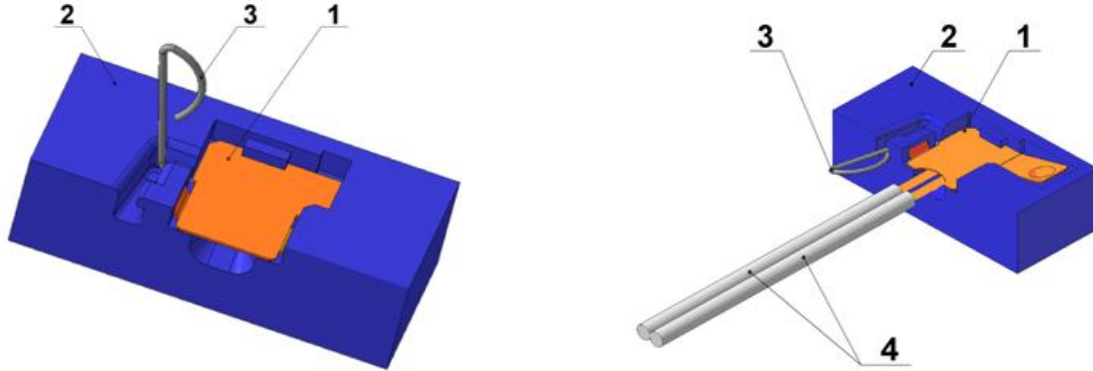


Рис. 7. Безгвинтовий затискач електричних провідників важільного типу: 1 – плоский контакт : 2 – ізоляційна основа: 3 – фігурний важіль: 4 - провідники

У нормативних документах, таких як EN 54–2, NFPA 72 та інших, зазначено, що ППКП повинен фіксувати в ШПС крім сигналу «ПОЖЕЖА» сигнал «НЕСПРАВНІСТЬ». Не є обов'язковим вимога виявлення та відображення причин появи сигналу «НЕСПРАВНІСТЬ» у ШПС – обрив чи коротке замкнення.

У безадресному радіальному постійно-струмовому ШПС, для виконання вимоги «...при знятті будь-якого сповіщувача з бази, підключеної до ШПС, ППКП повинен зафіксувати сигнал НЕСПРАВНІСТЬ у відповідному шлейфі...», існує співвідношення струмів обриву, сумарного струму споживання сповіщувачами, струму через кінцевий резистор, струму при спрацьовуванні одного або двох та більше сповіщувачів, а також струму короткого замикання. Тому пряме відгалуження ШПС з встановленням кінцевого резистора тільки в одному кінці шлейфу або кінцевих резисторів в кожному кінці шлейфа подвоєного опору не можливо, оскільки, будуть порушені вимоги зазначених нормативних документів.

Вирішення проблеми узгодження сигналів у ШПС можливе вразі застосування відповідних пристроїв узгодження, за допомогою яких можливе «дорощування» ШПС в кінцевій частині шлейфа. Недоліком згаданих пристроїв узгодження ШПС є обов'язкове живлення їх від додаткового джерела живлення.

Технічне рішення [10], згідно якого перетворювач сигналів у ШПС являє собою Т-подібний розгалужувач (рис. 8), який має один вхід та два виходи. Цей пристрій не вимагає для роботи додаткового джерела живлення, і в той же час має індикацію активізації свого стану із зазначенням напрямку, в якому виник обрив шлейфа.

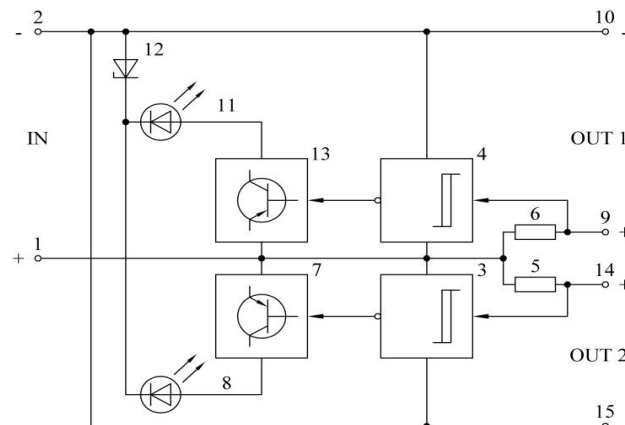


Рис. 8. Схема Т-подібного розгалужувача ШПС

Функціонує Т-подібний розгалужувач наступним чином. До вхідних клем IN1 та IN2 підключається та частина ШПС, яка йде від ППКП і на якій можуть бути розташовані СП. До вихідних клем OUT1 9 та 10 першого виходу і до вихідних клем OUT2 14 та 15 другого виходу підключаються ще дві частини ШПС із своїми СП. У віддалених від пристрою кінцях цих двох частин шлейфу встановлюються кінцеві резистори, опір кожного з них вибирають таким, щоб при паралельному з'єднанні їх обох він становив рекомендований опір кінцевого резистора для звичайних радіальних ШПС.

Опори резисторів 5 та 6 вибирають такими, щоб падіння напруги на цих резисторах у стані ПОЖЕЖА становило кілька відсотків від напруги, прикладеної до вхідних клем 1 та 2. У черговому режимі роботи падіння напруги на кожному з цих резисторів буде перевищувати напругу перемикачів граничних елементів 3 та 4. Обидва транзисторних ключа 7 та 13 будуть вимкнені, світлодіодні індикатори 8 та 11 не будуть світитися. Сумарний струм споживання граничними елементами 3 та 4 не перевищує струм споживання одним активним сповіщувачем. Якщо в одній з частин ШПС, що підключена до одного з виходів, наприклад, OUT1 станеться обрив лінії зв'язку, то зменшиться величина струму, яка протікає через резистор 5. Переключиться відповідний граничний елемент 3. Зміниться стан і на виході відповідного транзисторного ключа 7 і засвітиться світлодіодний індикатор 8. У цьому випадку транзисторний ключ 7 сформує в ШПС коротке замикання. При струмі (20–25) мА, що характерно для короткого замикання, сумарне падіння напруги на стабілітроні 12, світлодіодному індикаторі 8 і на відповідному транзисторному ключі 7 буде цілком достатнім для нормальної роботи граничних елементів 3 та 4. Аналогічно буде функціонувати пристрій у випадку обриву в іншому плечі Т-подібного розгалужувача.

Отже, при виявленні обривів у частинах ШПС Т-подібний розгалужувач передає на ППКП сигнал, що відповідає стану «коротке замикання». Одночасно відповідний індикатор 8 або 11 буде сигналізувати про те, в якій частині шлейфу була виявлена несправність типу ОБРИВ.

Якщо несправності типу ОБРИВ будуть з'являтися у тій частині ШПС, що підключена до входу Т-подібного розгалужувача, то він не буде перешкоджати роботі ППКП, який прийме і обробить цей сигнал. Підвищення струму у вихідних ланцюгах частин шлейфу, що підключені до виходів OUT1 і OUT2, не змінюватиме стан граничних елементів 3 або 4, але такий приріст струму буде надходити на ППКП і оброблятися ним. А це означає, що застосування Т-подібних розгалужувачів у ШПС дозволяє, не порушуючи вимог нормативних документів, скорочувати загальну їх довжину.

Але, для нормальної роботи Т-подібного розгалужувача існує обмеження за кількістю сповіщувачів у в кожній частині ШПС, до і після нього. Рекомендується між ППКП та розгалужувачем встановлювати не більше 16 сповіщувачів, а до кожного з виходів OUT1 і OUT2 підключати не більш ніж по 8 сповіщувачів.

У національному стандарті ДСТУ EN 54–1:2014 є вимога стосовно сумісності СП та ППКП: «п.1.6. Те, що компонент системи задовольняє вимогам відповідної частини EN 54, не означає того, що такий компонент буде обов'язково правильно функціонувати спільно з іншим компонентом, який також задовольняє вимогам відповідної частини EN 54 (наприклад, пожежний приймально-контрольний прилад у сполученні з пожежним сповіщувачем), якщо тільки обидва компонента не були оцінені разом як ті, що задовольняють вимогам щодо системи».

На практиці ж не завжди досягається узгодження технічних вимог. Сучасні СП являють собою активні виробы, що мають різні вольт-амперні характеристики.

У таких умовах, під час проектування СПС, виникає багато типових питань від різних проектних організацій, що висвітлені на сайтах виробників відповідних пристроїв. Крім того, передбачаючи подібні питання, розробники технічних засобів завчасно викладають на своїх сайтах відповіді на них:

- типові проекти з використанням виробленого ними устаткування;
- схеми підключення конкретних пристроїв, вказуючи необхідні номінали узгоджувальних елементів, кількісні та якісні параметри ліній зв'язку між блоками;
- у спеціальному розділі дають відповіді на типові питання;
- коригують експлуатаційну документацію;
- повідомляють про випуск нових виробів.

Проектним організаціям доводиться створювати проекти на основі нових компонентів, вивчаючи їх експлуатаційну документацію, намагаючись врахувати вимоги замовника. При цьому критерії вибору обладнання можуть бути різноманітними (особливості об'єкту, дизайн виробів,

цінова політика тощо), але вибравши ППКП від одного виробника, СП від іншого, комунікатор від третього, а оповіщувачі від n-го – виходить вже не система, а набір протиріч.

Не дивлячись на те, що про проблеми узгодження сигналів в шлейфах існують постійно і про них говорилося у різних публікаціях [10..14], але окремого стандарту, який би визначав основні технічні вимоги до параметрів, не створено досі. Також не конкретизовані технічні характеристики СП та ППКП у конкретному національному галузевому документі, які б забезпечували їх взаємне узгодження. Усі обмеження зведені тільки до п. 1.6 вище згаданого стандарту EN 54 не дозволяють вирішити підняте питання узгодження в ШПС. Цим і пояснюється, що для підключення СП до ППКП різних виробників доводиться використовувати або пристрої узгодження, які безпосередньо підключаються у ШПС, або застосовувати відповідні розрахунки елементів узгодження.

Список використаних джерел:

1. ДБН В.2.5-13-2014 Системи пожежного захисту. Державні будівельні норми України. – К.: Мінрегіон України, 2015.
2. ДСТУ EN 54: 2003 Системи пожежної сигналізації. Національний стандарт України. – К.: Держспоживстандарт України, 2004.
3. NFPA-72 1996. National Fire Alarm Code. Technical Committees on Fundamentals of Fire Alarm Systems. – Minneapolis, 2004.
4. Баканов В. В. Ключ к системам пожарной сигнализации высокой надежности // Алгоритм безопасности, №6, 2010, с. 6.
5. Горелик А. С., Язынин М. П. Устройство подключения провода в охранных приборах и извещателях пожарных. Патент России на изобретение №2314612, бюл. № 1, 2008.
6. Извещатель пожарный дымовой оптико-электронный ИП212-85, ТУ-4371-006-59069151-2004, Паспорт.
7. Безвинтовой зажим для электрических проводов, Патент России на изобретение №2314613, бюл. № 1, 2008.
8. Баканов В. В., Капре М. К., Мисевич І. З., Чумак А. М. Безвинтовий затискач електричних провідників. Патент України на винахід № 94835, бюл. №11, 2010.
9. Фролик Я. Непамяные соединения в электронике (пер. с венгер.) –М.: Энергия, 1978, с.11.
10. Баканов В. В., Мисевич І. З. Перетворювач сигналів у шлейфі пожежної сигналізації. Патент України на корисну модель № 48194, бюл. № 5, 2010.
11. И. Неплохов Классификация неадресуемых шлейфовых, или почему за рубежом нет двухпороговых приборов // Алгоритм безопасности, № 3, 2008, с 7.
12. И. Неплохов Анализ параметров шлейфа двухпорогового ППКП // Алгоритм безопасности, № 5 2010.
13. Баканов В. Пути решения проблем в шлейфах пожарной сигнализации // F+S: технологии безопасности и противопожарной защиты, № 4, 2009, с 54.
14. Терлецький Т.В., Мороз С.А., Приступа С.О. Особливості застосування давачів dht22 і y1-69 в інформаційно-вимірювальних системах // Матеріали V-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених та студентів «Фізика і хімія твердого тіла: стан, досягнення і перспективи». 25-26 жовтня 2018 р., м. Луцьк : ІВВ Луцького НТУ, 2018. – С. 171-173.

Рецензенти:

Андрій Борисович Семенюк – зам. директора ПАТ «Електротермометрія».

Віктор Юрійович Денисюк – к.т.н., доцент кафедри приладобудування Луцького НТУ

Стаття надійшла до редакції 24.01.2019

УДК 517.45

В.М. Тимошук, Б.К. Гануліч, С.М. Лісковець, О.В. Гуда

Луцький національний технічний університет

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ТЕОРІЇ НАБЛИЖЕННЯ БІГАРМОНІЧНИХ ФУНКЦІЙ ДО ДОСЛІДЖЕННЯ ГРАНИЧНОЇ ПОВЕДІНКИ РОЗВ'ЯЗКІВ ДЕЯКИХ КРАЙОВИХ ЗАДАЧ

В запропонованій роботі сформульовано і доведено теореми, які дають можливість визначити властивості наближень, що забезпечують існування похідних відповідного порядку граничної функції в півплощині. Наведений метод доведення дозволяє коректно розв'язати обернену задачу і визначити ряд умов, при яких досліджувані початкові умови мають похідні до n -го порядку включно. Одержані оцінки можуть бути поширені на інші функції (зокрема на функції бігармонічні в крузі).

Ключові слова: бігармонічна функція, обернена теорема, задача Ліурічеллі, модуль неперервності.

В.Н. Тимошук, Б.К. Гануліч, С.М. Лісковець, О.В. Гуда

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ТЕОРИИ ПРИБЛИЖЕНИЯ БИГАРМОНИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ К ИССЛЕДОВАНИЮ ПРЕДЕЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ РЕШЕНИЙ НЕКОТОРЫХ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ

В предлагаемой статье сформулированы и доказаны теоремы, которые дают возможность определить свойства приближений, которые обеспечивают существование производных соответствующего порядка предельной функции в полуплоскости. Приведенный метод доказательства дает возможность корректно решить обратную задачу, определить ряд условий, при которых исследуемые начальные условия имеет производные до n -го порядка включительно. Полученные результаты можно использовать при исследовании функций бигармонических в круге.

Ключевые слова: бигармоническая функция, обратная теорема, задача Лиуричелли, модуль непрерывности.

V. Tymoshchuk, B. Ganulich, S. Liskovets, O. Guda

APPLICATION OF THE METHODS OF THE APPROXIMATION THEORY OF BIHARMONIC FUNCTIONS TO INVESTIGATION THE LIMITING BEHAVIOR OF THE SOLUTIONS OF SOME BOUNDARY-VALUE PROBLEMS

In the inverse theorems of the approximation theory, the dependence of the properties of functions on the propagation speed to zero of its approximations is established. The classical theory of the approximation of functions has mastered a number of effective methods for the study of such theorems. These methods proved to be very successful for qualitative research of solutions of boundary value problems in flat canonical regions.

In the proposed paper, theorems are formulated and proved, which make it possible to determine the properties of approximations that ensure the existence of derivatives of the corresponding order of the boundary function in the half-plane. The given method of proof allows us to correctly solve the inverse problem and to determine a set of conditions under which the studied initial conditions have derivatives of the order of magnitude inclusive. The obtained estimates can be extended to other functions (in particular, the functions of biharmonic in the circle).

In addition, the solution of these problems enables us to formulate and solve the problems of the theory of elasticity, plasticity theory, structural mechanics, mathematical physics, etc.

Key words: biharmonic function, inverse theorem, problem Liurichelli, continuity module.

Постановка проблеми. Робота присвячена оберненим оцінкам відхилення бігармонічних функцій в півплощині. В статті [1] одержані обернені теореми наближення бігармонічними функціями в півплощині. В цих теоремах за заданою швидкістю відхилення бігармонічних функцій від своїх граничних значень встановлено неперервність граничних значень (за відповідною метрикою) і оцінюється модуль неперервності другого порядку цього граничного значення.

У запропонованій роботі згадані обернені теореми доповнюються такими властивостями наближень, які забезпечують існування похідних певного порядку граничної функції, що дає можливість оцінити модуль неперервності похідної найвищого можливого порядку.

Аналіз досліджень і публікацій. В теорії апроксимації поняття оберненої теореми було введено С.М. Бернштейном [2]. В обернених теоремах встановлюється залежність властивостей функції від швидкості наближення до нуля її наближень. Метод Бернштейна доведення обернених теорем одержав потужний розв'язок в теорії наближення тригонометричними і алгебраїчними многочленами або раціональними функціями і його розвиток зв'язаний з результатами про ускладнення множин, на яких можна формулювати і доводити теореми наближення.

Класична теорія наближення функцій оволоділа рядом ефективних методів для дослідження прямих і обернених теорем своєї теорії. Ці методи виявились плідними до якісного дослідження

розв'язків крайових задач в плоских канонічних областях. Першими в цьому плані були результати 50-х років І.П. Натансона, О.П. Тіммана [3], які стосувались оцінок відхилення гармонійних функцій від їх значень на межі в термінах модулів неперервності крайових даних. Їх дослідження підтвердило думку про природну залежність поведінки розв'язків задачі Діріхле від властивостей функцій, заданих на межі. В наш час проводяться дослідження розв'язків більш загальних рівнянь з крайовими даними із різних функціональних класів.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо функції бігармонічні в півплощині. Нехай задано бігармонічне рівняння

$$\Delta^2 u = 0. \quad (1)$$

Позначимо $u_g(x, y) = u(x, y)$ розв'язок рівняння (1) в півплощині $y > 0$, що задовільняє граничним умовам

$$u(x, y)|_{y=0} = g(x); \quad \frac{\partial u}{\partial y}(x, y)|_{y=0} = 0. \quad (2)$$

Розв'язок крайової задачі (1)-(2) можна записати у вигляді [1]

$$u_g(x, y) = \frac{2y^3}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{g(x+y)}{(t^2 + y^2)^2} dt. \quad (3)$$

Клас таких функцій позначимо через B_y . Позначимо через $L_p[-\infty; +\infty]$, $p \geq 1$ клас функцій $g(x)$, $-\infty \leq x \leq +\infty$ з кінцевою нормою, що визначається співвідношеннями

$$\|g\| = \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} |g(x)|^p dx \right\}^{\frac{1}{p}}, \text{ якщо } 1 \leq p < \infty$$

$$\|g\| = \text{ess sup}_{-\infty \leq x \leq +\infty} |g(x)|, \text{ якщо } p = +\infty.$$

Сформулюємо і доведемо наступні теореми.

Теорема 1. Якщо $g \in L_p[-\infty; +\infty]$, $p \geq 1$ і $u_g(x, y) \in B_y$, то для довільного фіксованого натурального k має місце нерівність

$$\left\| \frac{\partial^k u_g(x, y)}{\partial x^k} \right\| \leq M \frac{\|g\|}{y^k}, \quad y > 0, \quad (4)$$

де $M > 0$ – стала, що не залежить від y .

Доведення. Використовуючи (3) розв'язок $u_g(x, y)$ граничної задачі (1)-(2) і узагальнену нерівність Мінковського [2], одержимо нерівність

$$\left\| \frac{\partial^k u_g(x, y)}{\partial x^k} \right\| \leq \frac{2y^3 \|g\|}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left| \frac{\partial^k}{\partial t^k} \left(\frac{1}{(t^2 + y^2)^2} \right) \right| dt. \quad (5)$$

Оцінимо інтеграл в правій частині (5). Для цього знайдемо похідні відповідного порядку:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{(t^2 + y^2)^2} \right) = \frac{-4t}{(t^2 + y^2)^3};$$

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{1}{(t^2 + y^2)^2} \right) = \frac{5t^2 - y^2}{(t^2 + y^2)^4};$$

$$\frac{\partial^3}{\partial t^3} \left(\frac{1}{(t^2 + y^2)^2} \right) = \frac{30t^3 - 18y^2t}{(t^2 + y^2)^5};$$

$$\frac{\partial^4}{\partial t^4} \left(\frac{1}{(t^2 + y^2)^2} \right) = \frac{210t^4 - 252t^2y^2 - 18y^4}{(t^2 + y^2)^6};$$

$$\frac{\partial^5}{\partial t^5} \left(\frac{1}{(t^2 + y^2)^2} \right) = \frac{168t^5 - 337y^2t^3 + 720y^4t}{(t^2 + y^2)^7}.$$

Підставляючи знайдені значення в нерівність (5), послідовними перетвореннями знайдемо

$$\begin{aligned} 1) \left\| \frac{\partial^3 u_g(x, y)}{\partial x^3} \right\| &\leq \frac{2y^3 \|g\|}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left| \frac{t(30t^2 - 18y^2)}{(t^2 + y^2)^5} \right| dt = \frac{4y^3}{\pi} \|g\| \int_0^{+\infty} \frac{t|30t^2 - 18y^2|}{(t^2 + y^2)^5} dt \leq \\ &\leq \frac{4y^3}{\pi} \|g\| \int_0^{+\infty} \frac{t \cdot 30(t^2 + y^2)}{(t^2 + y^2)^5} dt = \frac{60y^3}{\pi} \|g\| \int_0^{+\infty} \frac{d(t^2 + y^2)}{(t^2 + y^2)^4} = \\ &= \frac{20y^3}{\pi} \|g\| \cdot \frac{1}{y^6} = \frac{20}{\pi} \cdot \frac{\|g\|}{y^3}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2) \left\| \frac{\partial^4 u_g(x, y)}{\partial x^4} \right\| &\leq \frac{20y^3}{\pi} \|g\| \int_{-\infty}^{+\infty} \left| \frac{\partial^4}{\partial t^4} \left(\frac{1}{(t^2 + y^2)^2} \right) \right| dt = \\ &= \frac{2y^3}{\pi} \|g\| \int_{-\infty}^{+\infty} \left| \frac{210t^4 + 420t^2y^2 + 18y^4}{(t^2 + y^2)^6} \right| dt \leq \frac{420y^3}{\pi} \|g\| \int_{-\infty}^{+\infty} \left| \frac{t^4 + 2t^2y^2 + y^4}{(t^2 + y^2)^6} \right| dt = \\ &= \frac{840y^3}{\pi} \|g\| \int_0^{+\infty} \left| \frac{t^4 + 2t^2y^2 + y^4}{(t^2 + y^2)^6} \right| dt = \frac{840y^3}{\pi} \|g\| \int_0^{+\infty} \frac{dt}{(t^2 + y^2)^4}. \end{aligned}$$

Для обчислення цього інтеграла використаємо відомі формули [2]:

$$\int_0^{+\infty} \frac{x^{2m} dx}{(x^2 + y^2)^n} = \frac{(2m-1)!!(2n-2m-3)! \pi}{2(2n-2)!!(y^2)^{n-m-1} \cdot y} \quad (y > 0, n > m+1)$$

$$\int_0^{+\infty} \frac{x^{2m+1} dx}{(x^2 + y^2)^n} = \frac{m!(n-m-2)!}{2(n-1)!(y^2)^{n-m-1}} \quad (y > 0, n > m+1 \geq 1)$$
(6)

Таким чином,

$$\left\| \frac{\partial^4 u_g(x, y)}{\partial x^4} \right\| \leq \frac{B \|g\|}{y^4}, \quad B = const > 0.$$

3) Аналогічно, одержимо

$$\left\| \frac{\partial^5 u_g(x, y)}{\partial x^5} \right\| \leq \frac{C \|g\|}{y^5}, \quad C = \text{const} > 0.$$

Використовуючи формули (6), подібні оцінки можна отримувати при подальших обчисленнях. Таким чином, узагальнюючи 1) 2) 3) і враховуючи той факт, що похідні парної функції є непарними і навпаки, маємо

$$\left\| \frac{\partial^k u_g(x, y)}{\partial x^k} \right\| \leq M \frac{\|g\|}{y^k}, \quad y > 0.$$

Теорема 2. Якщо $g \in L_p(-\infty; +\infty)$, $p \geq 1$, $u_g(x, y) \in B_y$, то для похідних фіксованих $y_1 > 0$, $y_2 > 0$ і всіх $x \in (-\infty; +\infty)$ справедлива рівність

$$u_{u_g(x, y_1)}(x, y_2) = u_{u_g(x, y_2)}(x, y_1). \quad (7)$$

Доведення. З умови теореми маємо

$$u_{u_g(t, y_2)}(x, y_1) = \frac{2y_2^3}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{g(\tau)}{\left[(t-\tau)^2 + y_2^2 \right]} d\tau \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dt}{\left[(x-t)^2 + y_1^2 \right]} dt = \quad (8)$$

$$= \frac{4y_1^3 y_2^3}{\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} g(\tau) \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dt}{\left[(t-\tau)^2 + y_2^2 \right]^2 \cdot \left[(x-t)^2 + y_1^2 \right]^2} d\tau$$

$$u_{u_g(t, y_1)}(x, y_2) = \frac{2y_2^3}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{g(\tau)}{\left[(t-\tau)^2 + y_1^2 \right]} d\tau \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dt}{\left[(x-t)^2 + y_2^2 \right]} dt = \quad (9)$$

$$= \frac{4y_2^3 y_1^3}{\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} g(\tau) \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dt}{\left[(t-\tau)^2 + y_1^2 \right]^2 \cdot \left[(x-t)^2 + y_2^2 \right]^2} d\tau$$

Знайдемо різницю внутрішніх інтегралів по t в правих частинах рівностей (8) і (9).

$$\begin{aligned} & \frac{4y_1^3 y_2^3}{\pi^2} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} g(\tau) \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dt}{\left[(t-\tau)^2 + y_2^2 \right]^2 \cdot \left[(x-t)^2 + y_1^2 \right]^2} d\tau - \right. \\ & \left. - \int_{-\infty}^{+\infty} g(\tau) \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dt}{\left[(t-\tau)^2 + y_1^2 \right]^2 \cdot \left[(x-t)^2 + y_2^2 \right]^2} d\tau \right) = \\ & = \frac{4y_1^3 y_2^3}{\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} g(\tau) \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{1}{\left[(t-\tau)^2 + y_2^2 \right]^2 \cdot \left[(x-t)^2 + y_1^2 \right]^2} - \frac{1}{\left[(t-\tau)^2 + y_1^2 \right]^2 \cdot \left[(x-t)^2 + y_2^2 \right]^2} \right) dt \end{aligned}$$

Використовуючи заміни $t = u + \frac{\tau + x}{2}$, $v = \frac{\tau - x}{2}$, одержимо

$$\begin{aligned}
& \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{du}{\left[(u-v)^2 + y_2^2\right]^2 \left[(u+v)^2 + y_1^2\right]^2} - \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{du}{\left[(u-v)^2 + y_1^2\right]^2 \left[(u+v)^2 + y_2^2\right]^2} = \\
& = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\left[(u-v)^2 + y_1^2\right]^2 \left[(u+v)^2 + y_2^2\right]^2 - \left[(u-v)^2 + y_2^2\right]^2 \left[(u+v)^2 + y_1^2\right]^2}{\left[(u-v)^2 + y_2^2\right]^2 \left[(u+v)^2 + y_1^2\right]^2 \left[(u+v)^2 + y_2^2\right]^2 \left[(u-v)^2 + y_1^2\right]^2} = \\
& = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\left[(u-v)^2 + y_1^2\right]^2 \left[u^2 + 2uv + v^2 + y_2^2\right]^2 - \left[(u-v)^2 + y_2^2\right]^2 \left[u^2 + 2uv + v^2 + y_1^2\right]^2}{\left[(u-v)^2 + y_2^2\right]^2 \left[(u+v)^2 + y_1^2\right]^2 \left[(u+v)^2 + y_2^2\right]^2 \left[(u-v)^2 + y_1^2\right]^2} = \\
& = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\left[u^2 - 2uv + v^2 + y_1^2\right]^2 \left[(u+v)^2 + y_2^2\right]^2 - \left[u^2 - 2uv + v^2 + y_2^2\right]^2 \left[(u+v)^2 + y_1^2\right]^2}{\left[(u-v)^2 + y_2^2\right]^2 \left[(u+v)^2 + y_1^2\right]^2 \left[(u+v)^2 + y_2^2\right]^2 \left[(u-v)^2 + y_1^2\right]^2} =
\end{aligned}$$

Оскільки, підінтегральна функція є непарною по u , то даний інтеграл дорівнює нулю. Отже,

$$u_{u_g(t,y_2)}(x, y_1) = u_{u_g(t,y_1)}(x, y_2)$$

і теорема доведена.

Зауважимо також, що в умовах теореми 2, справедливе твердження:

$$u_{g-u_g(x,y_1)}(x, y_2) - u_{g-u_g(x,y_2)}(x, y_1) = u_g(x, y_2) - u_g(x, y_1) \quad (10)$$

яке одержується з адитивності оператора u_g і рівності (7).

Висновки до роботи. В даній роботі наведено теореми і наслідок з однієї з них, які визначають властивості наближень, що забезпечують існування похідних певного порядку граничної функції. Це дозволяє відновити граничну функцію в задачі Діріхле для рівняння $\Delta^2 u = 0$ в півплощині; задачі Ліурічеллі для його ітерації; задач відновлення початкових умов для одномірних задач теплопровідності. Крім цього, розв'язок даних задач дає можливість сформулювати і вирішити багато різних проблем теорії пружності, теорії пластичності, будівельної механіки та математичної фізики. Також одержані результати можуть бути поширені і на інші функції, зокрема, бігармонічні в крузі.

Список використаних джерел:

1. Горбайчук В.И. О некоторых граничных свойствах бигармонических функций // Изд. вузов математики – 1974 – №12. – С.54-57.
2. Бернштейн С.Н. – Собрание сочинений – М., 1954 – т.3. – С.310–348.
3. Тимман А.Ф. Теория приближения функций действительного переменного. – М., Физматиз, 1960. – 624с.

Рецензент

Пастернак Ярослав Михайлович, завідувач кафедри прикладної математики та механіки, доктор фіз.-мат. наук, професор

Стаття надійшла до редакції 20.03.2019

УДК 621.791:678.029.43

М.В. Юрженко*Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України***АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ БАГАТОШАРОВИХ АРМОВАНИХ КОМПОЗИТНИХ ТРУБ НА ОСНОВІ ПОЛІПРОПІЛЕНУ ТА ПРОБЛЕМИ ЇХ ЗВАРЮВАННЯ (ОГЛЯД)**

В роботі проведено аналіз різновидів поліпропілену та їх основних характеристик, а також полімерних композитних матеріалів на їх основі, які використовуються для виготовлення полімерних багатошарових труб, призначених для будівництва мереж гарячого водопостачання та опалення з використанням зварювання. Показано, що усталений метод зварювання поліпропіленових труб, армованих алюмінієвою фольгою або базальтовим/скляним волокном, а саме зварювання нагрітим інструментом врозтруб, має багато недоліків, тому існує потреба у новітніх технологіях стыкового зварювання таких багатошарових труб із збереженням їх шаруватості структури. У такому випадку структура зварного з'єднання буде ідентичною до структури композитної труби, таким чином міцність зварного з'єднання буде рівною міцності труби. Визначено найбільш перспективні для цього методи зварювання, а саме індукційне зварювання, ультразвукове зварювання, зварювання нагрітим інструментом з непрямим нагрівом і т.д.

Ключові слова: поліпропілен, багатошарові композитні труби, зварювання

М.В. Юрженко*Інститут електросварки ім.Є.О. Патона НАН України***АНАЛІЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИТНЫХ ТРУБ НА ОСНОВЕ ПОЛИПРОПИЛЕНА И ПРОБЛЕМЫ ИХ СВАРКИ (ОБЗОР)**

В работе проведено анализ разновидностей полипропилена и их основных характеристик, а также полимерных композитных материалов на их основе, которые используются для изготовления полимерных многослойных труб, предназначенных для строительства сетей горячего водоснабжения и отопления с использованием сварки. Показано, что устоявшийся метод сварки полипропиленовых труб, армированных алюминиевой фольгой или базальтовым/стеклянным волокном, а именно сварка нагретым инструментом врозтруб, имеет множество недостатков, поэтому существует необходимость в новейших технологиях стыковой сварки таких многослойных труб с сохранением и слоистой структуры. В таком случае структура сварного соединения будет идентичной структуре композитной трубы, таким образом, прочность сварного соединения будет равна прочности трубы. Определены наиболее перспективные для этого методы сварки, а именно индукционная сварка, ультразвуковая сварка, сварка нагретым инструментом непрямим нагревом и т.д.

Ключевые слова: полипропилен, многослойные композитные трубы, сварка

M.V. Iurzhenko*E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine***ANALYSIS OF THE PECULIARITIES OF FORMATION AND USE OF MULTILAYER REINFORCED COMPOSITE PIPES BASED ON POLYPROPYLENE AND PROBLEMS OF THEIR WELDING (REVIEW)**

The paper analyzes the varieties of polypropylene and their main characteristics, as well as polymeric composite materials based on them, which are used for manufacturing multilayer polymeric pipes for the construction of hot water supply and heating networks using welding. It is shown that the established method of welding of polypropylene pipes reinforced with aluminum foil or basalt/glass fibers, mainly socket welding with the heated tool, has many limitations, so novel technologies for butt welding of such multilayer pipes with saving the their layered structure are required. In this case structure of the welded joints will be similar to structure of the composite pipe, thus the strength of the welded joint will be equal to the strength of the pipe. The most promising methods for that have been identified and they are: induction welding, ultrasonic welding, welding with the heated tool by indirect heating etc.

Keywords: polypropylene, multilayer composite pipes, welding

Постановка проблеми та завдань. В Україні при будівництві трубопроводів гарячого водопостачання та опалення часто використовують багатошарові композитні труби на основі поліпропілену, армованого різними способами: алюмінієвою фольгою, базальтовим та скловолокном і т.д. При цьому важливим етапом монтажу таких трубопроводів є з'єднання цих труб, яке зазвичай виконують зварюванням. Тож метою роботи було проведення аналізу існуючих різновидів поліпропілену та особливостей формування полімерних композитів на їх основі, які використовуються для виробництва багатошарових композитних труб, а також способів їх зварювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Поліпропілен є продуктом полімеризації пропілену, хімічна формула якого C_3H_6 . На відміну від етилену, в цьому мономері один атом

водню заміщений метильною групою CH_3 . Полімеризація поліпропілену відбувається при низькому або середньому тиску з використанням металоорганічних та металоценових каталізаторів, причому використання останніх дає можливість регулювати довжину полімерного ланцюга [1].

За структурою макромолекул поліпропілен поділяється на три типи:

- ізотактичний поліпропілен (рис. 1, а). Така молекулярна будова забезпечує матеріалу збільшену густину та міцність;
- синдіотактичний поліпропілен (рис. 1, б), в якому метильні групи розташовані симетрично з обох боків полімерного ланцюга. Такий поліпропілен менш міцний та піддається впливу ультрафіолетового випромінювання, але прозорий для видимого світла;
- атактичний поліпропілен (рис. 1, в) в якому метильні групи хаотично розташовані з обох боків полімерного ланцюга у випадковому порядку. Цей матеріал менш міцний та не дуже стійкий до зовнішніх впливів, але пластичний та гнучкий.

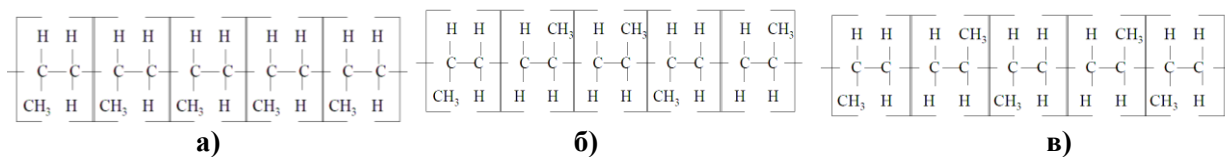


Рис. 1. Типи поліпропілену за будовою макромолекули

Саме ізотактичний поліпропілен, як найбільш щільний та міцний, та кополімери на його основі використовуються для виробництва труб для холодного та гарячого водопостачання. У свою чергу, ізотактичний поліпропілен також поділяється на 3 типи за хімічною структурою: гомополімер (PP-H, тип 1), блок-кополімер (PP-B, тип 2), рандом-кополімер (PP-R, тип 3) [2].

Гомополімер поліпропілену PP-H (PolyPropylene Homopolymer) являє собою власне ізотактичний поліпропілен, в макромолекули якого не входять будь які інші мономерні одиниці. Це досить жорсткий та міцний полімер з температурою плавлення біля 140°C , придатний для виробництва напірних труб та позначається як ПП 80 тип 1. Недоліки цього типу поліпропілену – погана стійкість до кліматичних факторів, зокрема ультрафіолетового випромінювання та низьких температур. Тому цей матеріал використовують тільки у мережах внутрішнього водопостачання.

Блок-кополімер поліпропілену PP-B (PolyPropylene Block copolymer) являє собою полімер, в макромолекулах якого послідовно чергуються блоки «чистого» поліпропілену та блоки кополімеру пропілену з етиленом: $\text{C}_3\text{-(C}_3\text{)}_n\text{-C}_3\text{+C}_3\text{-(C}_3\text{-C}_2\text{-C}_2\text{-C}_3\text{-C}_3\text{-C}_2\text{-C}_2\text{-C}_2\text{-C}_3\text{-C}_2\text{-C}_3\text{)}_n\text{-C}_3$. Чергування полімерних блоків є статистичним та досить важко піддається чисельній ідентифікації. Цей матеріал дещо міцніший за PP-H, більш еластичний та стійкий до низьких температур. При виготовленні труб має позначення ПП 80 тип 2.

Рандом-кополімер поліпропілену PP-R (PolyPropylene Random copolymer), або статистичний поліпропілен (від англ. random – випадковий) – полімер, у макромолекулах якого нерегулярним чином чергуються мономерні одиниці пропілену та етилену: $\text{C}_3\text{-(C}_3\text{-C}_3\text{-C}_2\text{-C}_3\text{-C}_3\text{-C}_3\text{-C}_2\text{-C}_3\text{)}_n\text{-C}_3$. Вміст етилену при цьому складає усього 2-4%, максимум до 8%. Така макромолекулярна будова забезпечує цьому полімеру підвищений рівень кристалічності та найбільшу міцність та термостійкість серед усіх 3-х типів ізотактичного поліпропілену. При виготовленні труб позначається ПП 80 тип 3.

Зі збільшенням частки етилену в кополімері PP-R покращуються ущільнюючі властивості, розширюється температурний інтервал плавлення, зменшується температура склування, підвищується ударна в'язкість, зменшуються кристалічність та жорсткість [3]. Цей полімер може випускатись у двох різновидах – прозорий та непрозорий. Перший з них використовується для виготовлення пакувальних матеріалів, плівок та листів. Непрозорий поліпропілен 3-го типу використовують для виготовлення труб та фітінгів систем гарячого або холодного водопостачання. Як і усі ізотактичні поліпропілени, PP-R формує надмолекулярні утворення у вигляді спіралі, де 3 мономерні одиниці утворюють один оберт. Цей матеріал зазвичай формує класичну кристалічну форми – моноклінну (α), але може утворювати гексагональну (β) та триклинну (γ), відому, також, як загартована, форма [4]. В даний час для виробництва труб почали все більше застосовувати новий різновид PP-R, що відрізняється своєю кристалічною будовою

PPR-CT. Це – термостабілізований рандом-кополімер поліпропілену, який іноді називають поліпропіленом 4 типу.

Звичайний рандом-кополімер PP-R має переважно моноклінну кристалічну решітку, де монокліни з'єднуються між собою у випадковому порядку. Завдяки особливому методу охолодження матеріалу при отриманні PPR-CT полімер утворює більш упорядковану гексагональну структуру, формуються більш дрібні та чисельні кристали, ніж у PP-R. Тому PPR-CT має більшу в'язкість та стійкість до температури, що дозволяє виготовляти з цього матеріалу більш легкі та стійкі труби. Порівняння фізичних параметри двох основних кополімерів на основі пропілену приведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Деякі характеристики окремих кополімерів на основі пропілену

Параметр	Одиниця виміру	Гомополімер PP-H	Рандом-кополімер PP-R
Густина	г/см ³	0,9-0,91	0,9-0,91
Міцність на розтяг (23 °С)	н/мм ²	31	25
Модуль пружності (23 °С)	н/мм ²	1300	900
Ударна в'язкість (23 °С)	кДж/м ²	85	30,9
Ударна в'язкість (0 °С)	кДж/м ²	4,8	3,4
Температура плавлення	°С	145-150	150-167
Теплопровідність (23 °С)	Вт/м К	0,23	0,23
Абсорбція води (23 °С)	%	0,1	0,1

Поліпропілен є одним із термопластичних полімерів, який широко застосовують для виробництва напірних труб та будівництва полімерних трубопроводів як у світі, так і в Україні [5]. Цей матеріал знаходиться на третьому місці у світовому об'ємі виробництва труб після ПВХ та поліетилену. Більш широкому розповсюдженню поліпропілену у трубній галузі заважає його висока вартість у порівнянні із матеріалами – лідерами ринку. За фізичними властивостями поліпропілен подібний до поліетилену, однак термостійкість його вище, що зумовлює використання цього матеріалу у трубопроводах для подачі гарячої води [6]. Основними недоліками труб з однорідного поліпропілену були висока дифузія кисню крізь цей матеріал та великий коефіцієнт лінійного розширення труб, що призводило до значних змін їх розмірів при коливаннях температури. Тому на певному етапі розвитку технології виготовлення поліпропіленових труб почали застосовувати їх армування алюмінієвою фольгою та рубленим скловолокном. В даний час близько 10% загального об'єму світового ринку виробництва полімерних композитних матеріалів використовується для виготовлення напірних труб. Це полімерні труби, армовані металами та синтетичними нитками, склопластикові труби та труби, армовані короткими волокнами, як правило, скловолокном [7]. Слід зазначити, що у світі постійно розширюється сфера застосування багат шарових труб з полімерних композитних матеріалів, які виготовляються за допомогою спеціальних співекструїційних технологій, через зростаючу потребу у них різних галузей промисловості. Це пояснюється можливістю варіювання їхніх властивостей за рахунок вибору складу композитного матеріалу, встановлення порядку чергування шарів, вибору оптимальної технології та обладнання для отримання конкретного матеріалу [8, 9].

Армування труб алюмінієм утворило на її зовнішній поверхні антидифузійний бар'єр та значно зменшило термічне лінійне розширення труби. Це дозволило суттєво підвищити температуру теплоносія, що транспортується, та застосовувати такі труби у мережах опалення. Труба, армована алюмінієвою фольгою, зазвичай має п'ятишарову структуру. Внутрішній основний шар поліпропілену формує основне тіло труби, зовнішній тонкий поліпропіленовий шар має захисні та декоративні функції. Між цими поліпропіленовими шарами знаходиться тонкий шар алюмінію товщиною 0,1 – 0,5 мм, який з'єднується з ними двома шарами адгезиву (полімерного клею). При розтрубному зварюванні таких труб необхідно видаляти усі зовнішні шари труби, оголюючи внутрішній основний шар поліпропілену.

Інший, більш простий спосіб армування поліпропіленових труб - використання шару полімеру, наповненого базальтовим або скловолокном. Вміст волокон у полімері становить від 15

до 50% маси полімеру. Такі труби мають тришарову структуру, причому середній шар складається з суміші поліпропілену та рубленого базальтового або скловолокна (рис. 2, а). Оскільки усі три шари труби мають в основі однаковий матеріал, немає потреби використовувати будь-які міжшарові адгезиви, виготовляються такі труби методом одночасної коекструзії. Коефіцієнт лінійного розширення армованих базальтовим або скловолокном труб дещо збільшений у порівнянні з алюмо-полімерними, але все одно значно менший у порівнянні з монолітними поліпропіленовими трубами [10]. Коефіцієнт лінійного розширення армованої труби залежить від товщини армованого шару та процентного вмісту волокна у ньому [11]. Оптимальний відсотковий склад армуючого волокна у середньому шарі труби обирається виробником. Суміш полімеру та наповнювача повинна забезпечувати необхідне значення коефіцієнту лінійного температурного розширення, добре проходити крізь екструдер та з'єднуватись із неармованими шарами труби. Надалі в роботі розглядаються композитні труби з поліпропілену, армовані скловолокном, оскільки вклад природи волокон у загальну картину є незначним.



Рис. 2. Переріз тришарової поліпропіленової труби, армованої скловолокном та її розтрубного зварного з'єднання [12]: 1 – внутрішня поверхня; 2 – внутрішній шар монолітного поліпропілену; 3 – шар поліпропілену, наповненого скловолокном; 4 – зовнішній шар монолітного поліпропілену; 5 – зовнішня поверхня

Промислове використання скловолокна має в основі досить неочікуваний феномен зміни фізичних властивостей скла, яке у великих об'ємах являє собою дуже крихкий матеріал, а у вигляді надтонких волокон стає досить гнучким. Скляні нитки та волокна формують із розплаву скляної маси – діоксиду кремнію з домішками оксидів різних металів. Для виробництва більшої частини скловолокон використовують надміцне алюмоборосилікатне скло марок Е та S. Рублені скляні волокна зазвичай мають круглу форму поперечного перерізу, хоча застосовують, також волокна трикутної, прямокутної та шестикутної форм. Такі волокна корисні при необхідності забезпечення високого ступеню наповнення полімерного композитного матеріалу. З іншого боку, для отримання полімерних композитів малої густини, можливо виготовлення пустотілих скляних волокон. Окрім волокон, для наповнення композитних матеріалів використовують, також, скляні порошки з монолітними та пустотілими гранулами [13, 14].

Переваги, які мають армовані скловолокном поліпропіленові труби дають можливість без обмежень використовувати їх для постачання гарячої води та у системах низькотемпературного опалення. Армований шар забезпечує підвищену жорсткість такої труби, а теплопровідність її аналогічна звичайній трубі з монолітного поліпропілену. Відсутність у таких труб антидифузійного шару не дозволяє використовувати їх у системах транспортування води з надвисокою температурою, за усіма іншими параметрами вони знаходяться на рівні армованих алюмінієм, так званих «стабільних» труб [15].

Тришарова структура поліпропіленових труб, армованих скловолокном була обрана не випадково. Оскільки скло, навіть у вигляді тонких волокон, залишається досить крихким матеріалом, труби, виготовлені із суцільного композитного матеріалу були б досить міцними, але з суттєво підвищеною крихкістю. Внутрішній шар з чистого поліпропілену контактує з водою, що транспортується та захищає її від проникнення дрібних уламків скляних волокон з армованого

шару. Зовнішній поліпропіленовий шар формує поверхню труби та використовується для її монтажу.

Виробники поліпропіленових труб рекомендують застосовувати експлуатаційні параметри та розраховувати строк служби водопроводів та трубопроводів опалення, виконаних із тришарових труб, армованих скловолокном так само, як це робиться для труб з одношаровими суцільними стінками. Насправді такий підхід є некоректним, оскільки окремі шари армованої труби мають різні фізичні характеристики та по-різному сприймають навантаження, особливо довготривале. В процесі коекструзії таких труб внутрішній композитний шар поліпропіленової труби зварюється з шарами суцільного поліпропілену, формуючи два циліндричні зварні з'єднання, які, фактично, можна вважати проміжними шарами всередині труби. Саме в цих нових шарах виникають найбільші термічні напруження через обмеження поздовжньої деформації різномодульних матеріалів у суміжних шарах стінок армованої труби [11]. Дослідження напруження на розтяг різних шарів навантаженої армованої труби показали, що в композитному шарі такі напруження у 2-3 рази більші у порівнянні з напруженнями монолітних шарів. Таким чином, під дією довготривалих навантажень старіння шарів з монолітного поліпропілену та композитного шару буде відбуватись відмінно. З великою вірогідністю можна припустити, що в процесі старіння матеріалу, модуль пружності композитного шару труби буде зменшуватись швидше, ніж у полімеру зовнішнього та внутрішнього шарів. Відповідно будуть перерозподілятися долі навантаження, які припадають на кожен шар до зрівняння напружень в усіх шарах. Точно визначити, яким чином прогнозований довготривалий строк експлуатації технологічних трубопроводів з армованих скловолокном поліпропіленових труб буде відрізнятись від рекомендованих до використання кривих регресії для труб з суцільного поліпропілену неможливо без проведення спеціальних гідравлічних випробувань [16].

Для з'єднання звичайних та армованих поліпропіленових труб традиційно рекомендують використовувати зварювання нагрітим інструментом врозтруб [17] (рис. 2,б). Ця технологія сама по собі має цілий ряд суттєвих недоліків. Використання при зварюванні спеціальних фітінгів – литих муфт або інших деталей із суцільного поліпропілену ускладнює та здорожує процес виконання з'єднання. Для кожного стику фактично необхідно виконати два зварювання, під'єднавши трубу з обох боків фітінгу.

При зварюванні врозтруб прогривається внутрішня циліндрична поверхня муфти та відповідна зовнішня ділянка труби. Для цього на пластині нагрівального інструменту закріплюють дорн та гільзу потрібного типорозміру (рис. 3, а). Технологія зварювання вимагає, щоб в процесі осадження прогріта труба з деяким натягом входила у відповідний отвір фітінгу. Для формування якісного з'єднання необхідно, щоб величина натягу була однаковою по всій орбіті стику. Враховуючи високу вірогідність значної овальності труб, на деяких ділянках може утворюватися послаблення взаємного тиску труби і муфти, що призводить до утворення непроварів. Слід відзначити, що для забезпечення необхідного натягу деталей при зварюванні врозтруб труба та муфта повинні зберегти кільцеву жорсткість після прогрівання, не переходити у пластичний стан.

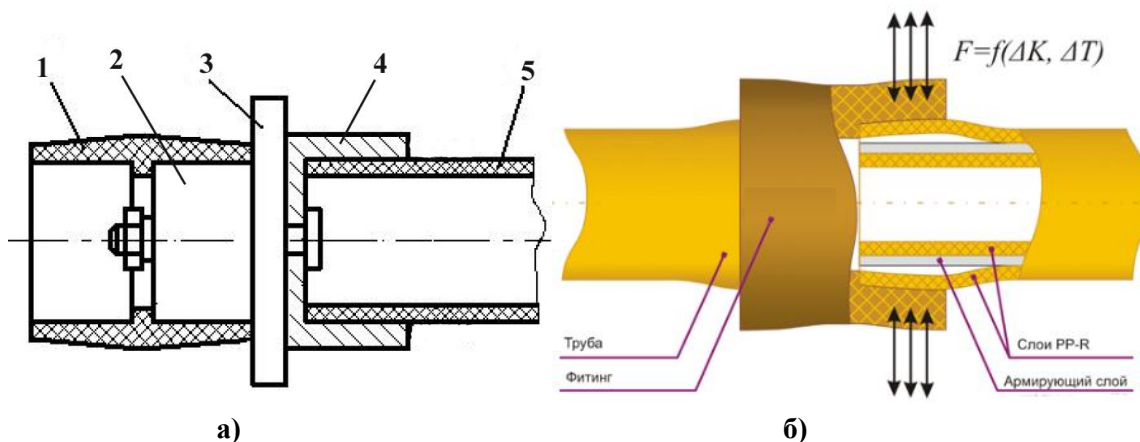


Рис. 3. Схеми зварювання композитних труб нагрітим інструментом врозтруб (а) [18] та руйнування розтрубного зварного з'єднання (б) [19]: 1 – муфта; 2 – дорн; 3 – пластина нагрівального інструменту; 4 – гільза; 5 – труба

Цього буває нелегко досягти, особливо при з'єднанні тонкостінних труб. Для запобігання перегріву деталей при зварюванні намагаються розплавити тільки тонкий шар полімеру на поверхнях, що зварюються. Тому зазвичай встановлюють підвищену температуру нагрівального інструменту у 260 – 270°C.

Висока температура нагрівача при зварюванні врозтруб зумовлює погіршення макромолекулярної структури полімеру, особливо на межі переходу між муфтою та трубою. Ця ділянка є зоною високої концентрації напружень при переході від великої товщини стінки (муфта та труба) до малої (труба). За рахунок перегріву матеріалу на рівні початку термодеструкції на межі переходу виникає зниження міцності труби приблизно на 20%. При несприятливому поєднанні згинаючого та розтягуючого навантажень в ослабленій зоні відбувається руйнування стику.

Оскільки при зварюванні врозтруб прогриваються досить значні площі деталей, виникає небезпека значних усадок розплавленого матеріалу муфти та труби. По поверхні сплавлення можуть утворюватися пори та більш великі порожнини, які при об'єднанні формують наскрізні несплавлення, що порушують герметичність стику [20].

Специфічні дефекти можуть виникати, також, при розтрубному зварюванні армованих поліпропіленових труб. Такі труби мають коефіцієнт теплового розширення на порядок менший у порівнянні з монолітним поліпропіленом, що вважається великою перевагою, оскільки відпадає потреба встановлення на трубопроводах спеціальних теплових компенсаторів. Однак, аналогічне зменшення теплового розширення відбувається і у радіальному напрямку, що може призвести до виникнення небезпечних дефектів у розтрубних зварних стиках армованих труб.

У розтрубних зварних з'єднаннях монолітних поліпропіленових труб труба та фітинг мають однакові коефіцієнти теплового розширення, тому деформуються однаково при коливаннях температури. Якщо врозтруб зварюється тришарова армована поліпропіленова труба, то фітинг з'єднується з тонким зовнішнім шаром ненаповненого поліпропілену. В результаті утворюється масивна монолітна система з високим коефіцієнтом теплового розширення, а під нею шар армованого поліпропілену, теплове розширення якого значно менше. При циклічних змінах температури в трубопроводі на фітинг діє сила, направлена на відрив його від шарів труби (рис. 3,б) [19]. Ця сила пропорційна різниці температурних коефіцієнтів та перепаду температур, її довготривала дія може призвести до руйнування середнього армованого шару з наступним руйнуванням усієї труби. Радіальні сили теплового розширення можуть призвести, також, до руйнування самого фітингу. Відомо, що поліпропілен PP-R є матеріалом з високим ступенем кристалічності, отже може мати підвищену крихкість. Навіть короткотривале велике радіальне зусилля при різкому скачку температури теплоносія всередині трубопроводу може призвести до утворення тріщин та розколюванню муфти зварного розтрубного з'єднання.

Альтернативою ненадійному розтрубному способу зварювання тришарових поліпропіленових труб може бути застосування зварювання встик. Оскільки йдеться про з'єднання багатшарової полімерної структури, для збереження у зварному з'єднанні усіх властивостей основного матеріалу технологія зварювання повинна забезпечити незмінне чергування у шві полімерних шарів. Найбільшу складність в цьому випадку являє собою зварювання центрального шару труби з полімерного композитного матеріалу.

Зварювання термопластичних композитних матеріалів зазвичай здійснюється тими самими способами, що застосовуються для зварювання звичайних термопластів. Однак для них усталені технології зварювання потребують суттєвої адаптації з метою виконання спеціальних вимог. В першу чергу, в процесі зварювання повинні бути збережені фізичні властивості композитного матеріалу. У випадку зварювання композитів, армованих скловолокном, не повинно відбуватись руйнування волокон, їх просторова орієнтація у зварному з'єднанні не повинна суттєво відрізнятись від основного матеріалу. Найбільш придатними для зварювання полімерних композитних матеріалів вважаються термоконтатне зварювання, та способи зварювання індукційним нагрівом, ультразвуком, інфрачервоним випромінюванням та вібротертям [21, 22].

Найбільш розповсюджений спосіб зварювання нагрітим інструментом встик, пов'язаний з оплавленням поверхонь, що зварюються, в даному випадку застосовувати не можна через змішування матеріалів різних шарів композитної труби при оплавленні та наступному осадженні. Були проведені спроби зварювати полімерні композитні труби встик із застосуванням зовнішнього інфрачервоного трансмісійного нагріву [23].

Більш успішним може бути застосування способу, який у літературі називають контактним тепловим зварюванням проплавленням [24], або пресовим зварюванням нагрітим інструментом з

непрямим нагрівом [25]. При даному способі зварювання нагрітий інструмент не контактує безпосередньо з поверхнями, що зварюються, а нагрів зварного з'єднання відбувається за рахунок контакту нагрітого інструменту із зовнішньою поверхнею деталей, що зварюються (так званий непрямий нагрів) з наступним розплавленням зони зварювання на усю її глибину (так зване зварювання проплавленням [18]). Зварювання проплавленням традиційно використовується для виконання напускних з'єднань листових полімерних матеріалів. Поступове прогрівання товщі з'єднання зовні та відсутність значної течії розплаву при осадженні сприятимуть збереженню неушкодженої структури багатшарового матеріалу в зварному шві.

Висновки. В роботі проведено аналіз різновидів поліпропілену та їх основних характеристик, а також полімерних композитних матеріалів на їх основі, які використовуються для виготовлення полімерних багатшарових труб, призначених для будівництва мереж гарячого водопостачання та опалення. Показано, що при будівництві трубопроводів з полімерних монолітних та багатшарових труб застосовують зварювання нагрітим інструментом врозтруб. Однак, як було показано в багатьох роботах, таке зварне з'єднання є недостатньо ефективним і надійним, тож актуальним є розробка альтернативних технологічних підходів до зварювання полімерних багатшарових труб встик, наприклад, на основі способів зварювання індукційним нагрівом, ультразвуком, нагрітим інструментом з непрямим нагрівом і т.д. зі збереженням неушкодженою пошарову структуру основного матеріалу композитної труби.

Список використаних джерел:

1. Уайт Дж. Л. Полиэтилен, полипропилен и другие полиолефины [Текст]/ Дж. Л. Уайт, Д. Д. Чой М.С. - С.Пб.: Изд-во «Профессия», 2006. - 256 с.
2. Капранчик В. П. Свойства полипропилена и особенности его использования [Текст]/ В. П. Капранчик //Московская международная конференция «Полипропилен 2004», июнь 2004.
3. Papageorgiou D. G. Effect of crystalline structure of polypropylene random copolymers on mechanical properties and thermal degradation kinetics [Text]/ D. G. Papageorgiou, D. N. Bikiaris, K. Chrissafis // Thermochimica Acta. – 2012. – Vol. 543. – iss. 10. - p. 288 – 294.
4. Razavi-Nouri M. Thermal and Dynamic Mechanical Properties of a Polypropylene Random Copolymer [Text]/ M. Razavi-Nouri// Iranian Polymer Journal. – 2005. – vol.14/ - iss. 5. – p.p. 485 – 493.
5. Бухин В.Е. Полимерные материалы, используемые при строительстве трубопроводов [Текст]/ В.Е. Бухин, М.М. Фаттахов// Инженерные сети из полимерных материалов. – 2008. - № 25. - с.20-26.
6. ДСТУ Б В.2.7-144:2007 Труби для мереж холодного та гарячого водопостачання із поліпропілену. Технічні умови [Текст].
7. Перепелкин К. Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты [Текст]/ К. Е. Перепелкин. – М.: Издательство «НОТ», 2009. - 400 с.
8. Комаров Г.В. Композиционные материалы: производство, применение, тенденции рынка [Текст]/ Г.В. Комаров // Полимерные материалы. – 2013. - №2. - с. 6 – 14.
9. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы [Текст]/ Ю.А.Михайлин. - СПб.: Изд. «Научные основы и технологии», 2-е издание. - 2013. - 822 с.
10. Армированные трубы в «доспехах»: в чем их успех? Полипропиленовые армированные трубы – область применения и особенности монтажа [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.arhiterm.by/information/thermplus/-lr>
11. Козлов О. В. Особенности конструкции полипропиленовых (PPR) труб, армированных стекловолокном для систем водоснабжения [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.vashdom.ru/articles/alterplast_1.htm
12. Полипропиленовые трубы для отопления [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://otoplenie-guide.ru/oborudovanie/trubi/polipropilenovie-trubi-dlya-otopleniya>
13. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб.пособие [Текст]/ под ред. А.А Берлина.- СПб.: ЦОП «Профессия», 3-е испр. изд., 2011.- 560с.
14. Европейский рынок пластиков, армированных стекловолокном в 2014 году. Продолжение тенденции роста [Текст] / Статья AVK (Немецкая профессиональная ассоциация волоконных композиционных пластиков и композитов)// Приложение к журналу МАКАПЛАС (Macplas Intrnational), декабрь 2014 – январь 2015, с. 12 – 14.
15. Диффузия кислорода в полимерных трубах [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.meto.ru/analiz/publ_17/dif_o2.pdf
16. Шалапин С.В., Гвоздев И.В., Симонов-Емельянов И.Д. Расчет и прогнозирование прочности многослойных полимерных армированных труб [Текст]/ С.В Шалапин., И.В. Гвоздев, И.Д. Симонов-Емельянов //Вестник МИТХТ. – 2012 .- т. 7. - №4. - с. 112 – 116.
17. Водоснабжение и отопление. Инструкция по монтажу [Электронный ресурс] Режим доступа: https://ekoplastik.ua/downloads/instrukcia_ppr_2016.pdf

18. Словник-довідник зі зварювання та склеювання пластмас / За ред. Б.Є.Патона. – Київ : Наукова думка, 2018. – 368 с. ISBN 978-966-00-1669-9.
19. Попов М., Крокотин В. Внимание! Сварка многослойных полипропиленовых труб. Статья. [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.meto.ru/analiz/publ_20.htm
20. Кораб Н.Г., Минеев Э.А Критические замечания по способам сварки труб из термопластичных полимерных материалов [Текст]/ Н.Г. Кораб, Э.А. Минеев// Полимерные трубы Украина. – 2007. - №1. – с. 53 – 55.
21. Гончаренко В.А. Свариваемость термопластичных композиционных материалов и математическое моделирование процессов сварки [Текст]/ В.А. Гончаренко// Автореферат диссертации на соиск. уч. ст. д.т.н. «МАТИ» - РГТУ им.К.Э.Циолковского. Москва. 2000 г.
22. Мацюк Л. Н., Меркулов Н.А., Смирнова И. И., Бейдер Э.Я., Бугров К. В. Сварка армированных термопластичных материалов. ВИАМ, 1990 [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://viam.ru/public/files/1990/1990-200641.pdf>.
23. Dong Hun No. A study of the combined socket and butt welding of plastic pipes using through transmission infrared welding. Dissertation. The Ohio State University. 2005 [Text].
24. Волков С.С. Сварка и склеивание полимерных материалов [Текст]/ С.С. Волков. - М.: Химия, 2001.- 376 с.
25. Шестопад А.Н. Справочник по сварке и склеиванию пластмасс [Текст]/ А.Н. Шестопад, Ю.С. Васильев, О.В.Тарасенко, В.П. Тарногородский /Под общ.ред. А.Н.Шестопада, Г.Н.Кораба. – К.: Техника, 1990. – 199 с.

Стаття надійшла до редакції 15.03.2019

УДК 678.675

О.П. Чигвинцева, И.В. Рула, Ю.В. Бойко*Днепровский государственный аграрно-экономический университет***ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АРОМАТИЧЕСКИХ ПОЛИАМИДОВ**

Проведены сравнительные термические и трибологические исследования ароматических полиамидов фенилон С-1 и фенилон П. Изучены процессы термоокислительной деструкции полиамидных связующих. Исследовано влияние режимов эксплуатации на процессы трения и изнашивания полимеров. Показано, что ароматические полиамиды при работе в режиме трения без смазки имеют низкий коэффициент трения и высокую износостойкость.

Ключевые слова: ароматический полиамид фенилон, термостойкость, коэффициент трения, интенсивность линейного изнашивания

O.P. Chigvintseva, I.V. Rula, Yu.V. Boyko*Dnipro State University of Agriculture and Economics***STUDY OF THE THERMAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF AROMATIC POLYAMIDES PHENYLONE**

Comparative thermal and tribological studies of aromatic polyamides phenylone C-1 and phenylone P have been carried out. Thermo-oxidative destruction processes of polyamide binders have been studied. It is established that phenylone C-1, has a higher heat resistance and begins to decompose at a temperature of 55°C higher than phenylone P.

The influence of operating modes on the processes of friction and wear of polymers is investigated. It was found that phenylone P is a more promising material according to tribotechnical characteristics. This polymer has a low coefficient of friction and minimal wear. It has been shown that aromatic polyamides have high tribotechnical characteristics when operating under friction conditions without lubrication and can work stably in friction units with the performance criterion $PV \leq 0.7 \text{ MPa} \cdot \text{m/s}$.

Key words: aromatic polyamide phenylone, heat resistance, friction coefficient, intensity of linear wear

О.П. Чигвинцева, И.В. Рула, Ю.В. Бойко*Дніпровський державний аграрно-економічний університет***ВИВЧЕННЯ ТЕРМІЧНИХ І ТРИБОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АРОМАТИЧНИХ ПОЛІАМІДІВ**

Проведені порівняльні термічні і трибологічні дослідження ароматичних поліамідів фенілон С-1 і фенілон П. Вивчені процеси термоокиснювальної деструкції поліамідних в'язучих. Досліджений вплив режимів експлуатації на процеси тертя та зносу полімерів. Показано, що ароматичні поліаміди при роботі у режимі тертя без змащування мають низький коефіцієнт тертя і високу зносостійкість.

Ключові слова: ароматичний поліамід фенілон, термостійкість, коефіцієнт тертя, інтенсивність лінійного зношування

Ароматические полиамиды фенилоны относятся к числу полярных соединений с сильным межмолекулярным взаимодействием, которое реализуется за счет возникновения водородных связей. Эти особенности макромолекул и обуславливают особенности эксплуатационных свойств полимеров. Фенилоны – негорючие и химически устойчивые полимеры, сохраняющие свою работоспособность в интервале температур от 153 до 553 К и обладающие высокой жесткостью, твердостью и способностью к пластическим деформациям. К основным преимуществам ароматических полиамидов следует отнести то, что эти термопласты сочетают в себе высокие тепло- и термостойкость с жесткостью, прочностью и высокими антифрикционными свойствами, что существенно расширяет их области применения в различных отраслях промышленности. Использование фенилонов позволяет решить проблему получения высокопрочных, тепло- и термостойких материалов конструкционного назначения [1-3].

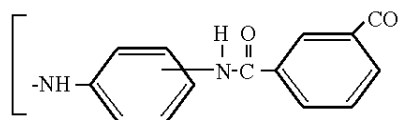
Ароматический полиамид фенилон П (ТУ 6-05-221-101-7), являющийся продуктом поликонденсации м-фенилендиаминa и дихлорангидрида изофталево́й кислоты, и смешанный сополиамид фенилон С-1 (ТУ 6-05-221-10) имеют следующую структурную формулу:

Фенилон С-1

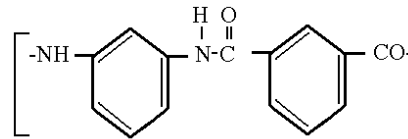
м,п-фениленизофталамид:

мета – 75%

пара – 25%



Фенилон-П
м-фениленизофталамид



Основные физико-механические свойства указанных полиамидных связующих приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Физико-механические свойства ароматических полиамидов

Параметры	Фенилон П	Фенилон С-1
Плотность, кг/м ³	1330	1330
Предел прочности при сжатии, МПа	210-230	220-230
Ударная вязкость, кДж/м ²	20-30	30-40
Твердость по Бринеллю, МПа	300	280
Теплостойкость по Вика, К	543	548

Известно [1, 2], что ароматические полиамиды при трении в условиях невысоких нагрузок изнашиваются примерно в четыре раза меньше по сравнению с алифатическими. Характер процессов трения и изнашивания фенилона существенно зависит от режимов эксплуатации и температур, развивающихся в узле трения [1], поэтому изучение термических и трибологических свойств указанного связующего имеет научный и практический интерес.

Исследование процессов термоокислительной деструкции ароматических полиамидов производили с использованием дериватографа Q-1500Д системы Ф. Паулик, Й. Паулик и Л. Ердей фирмы МОМ (Венгрия) в воздушной среде в интервале температур 298 – 1273 К. Скорость подъема температуры – 10 град/мин, в качестве эталонного вещества использовали Al₂O₃, навеска вещества составляла 200 мг.

Изучение процессов трения и износа фенилона С-1 и фенилона П осуществлялось на дисковой машине трения в режиме трения, путь трения составлял 1000 м. В качестве контртела использовали диск, изготовленный из стали 45 (ГОСТ 1050-74), термообработанный до твердости 45-48 HRC с шероховатостью поверхности R_a = 0,16-0,32 мкм.

Коэффициент трения *f* определялся по формуле:

$$f = \frac{(F_1 + F_2)}{N} \tag{1}$$

где *N* - нормальная нагрузка на образец; *F*₁ - сила трения исследуемого образца; *F*₂ - потери, возникающие при повороте рычага в горизонтальной плоскости.

Интенсивность линейного износа *I*_h рассчитывалась согласно соотношению:

$$I_h = \frac{\lambda}{\rho_T} \cdot \frac{dG}{(A_a \cdot dL_T)} \tag{2}$$

где *G* – величина весового износа; *L*_T – путь трения, м; *A*_a – номинальная площадь контакта; *ρ*_T – плотность исследованного образца.

Дифференциальный термический анализ относится к числу наиболее чувствительных методов, позволяющих определять различные изменения, протекающие при нагревании исследуемых материалов и сопровождающиеся выделением или поглощением тепла [4].

Термостойкость ароматических полиамидов в значительной степени определяется их химическим строением. Вследствие различной доступности полимерного материала к воздействию кислорода и из-за различия условий удаления из него реакционной и сорбированной влаги может меняться характер протекания процессов термической и термоокислительной деструкции фенилонов [1].

В нашем случае результаты термического анализа (рис. 1, табл. 2) свидетельствует о том, что фенилон С-1 является более термостойким полимером по сравнению с фенилоном П.

Таблица 2.

Термостойкость ароматических полиамидов

Материалы	T ₁₀	T ₂₀
Фенилон С-1	423	483
Фенилон П	418	468

* T_{10} и T_{20} – температуры 10 и 20 % потери массы образцов, °С

Анализ кривых зависимости потеря массы – температура для исследуемых материалов показал, что на первоначальном этапе исследований в температурном диапазоне 373-383К, наблюдалось постепенное уменьшение массы образцов фенолонов на 2-5%, связанное с потерей влаги. Затем, вплоть до $T = 653\text{K}$ масса образцов оставалась практически неизменной; при этом наблюдался плавный ход кривых ДТА (рис. 2, кривая 2) без ярко выраженных изменений. Интенсивная деструкция фенолонов, сопровождающаяся значительной потерей массы, начала проявляться после 648К. На кривых ДТА в области температур 653-793К наблюдались пики, характеризующие процесс разложения ароматических полиамидов (рис. 2, кривая 3), причем для фенолона С-1 процесс разложения начал проявляться при 793К, а для фенолона II – при 738К.

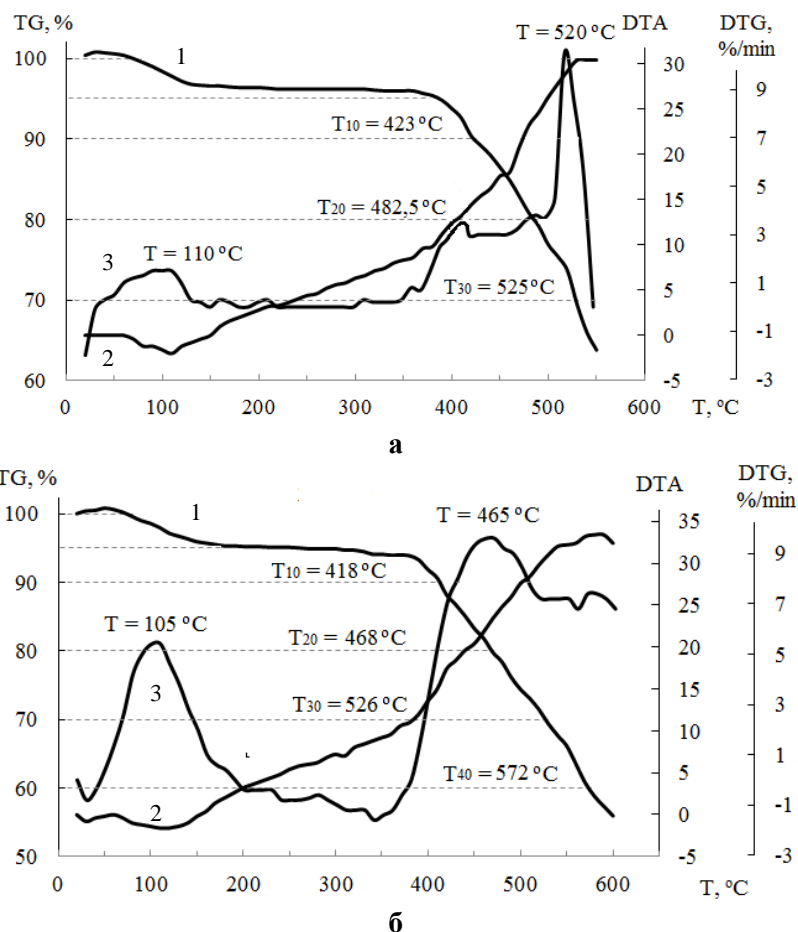


Рис. 1. Кривые термогравиметрического (1), дифференциального термического (2) и дифференциального термогравиметрического (3) анализов фенолона С-1 (а) и фенолона II (б)

Известно [5], что на термостойкость фенолонов существенно влияет изомерия положения заместителей в ароматическом ядре (табл. 3).

Таблица 3.

Влияние изомерии замещения на термостойкость ароматических полиамидов

Материал	Формула	Термостойкость, К
поли-(<i>m</i> -фениленизофталамид)	$\left[\text{-HN-} \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \text{---} \text{NHOC-} \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \text{---} \text{CO-} \right]_n$	603
поли-(<i>p</i> -фенилен-изофталамид)	$\left[\text{-HN-} \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \text{---} \text{NHOC-} \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \text{---} \text{CO-} \right]_n$	663

Как видно из данных табл. 3, полимер, содержащий циклы, замещенные в *n*-положении более термостоек по сравнению с м-изомерами, поэтому вполне закономерным является тот факт, что фенилон С-1 – сополимер м- и п-фениленизофталамидов отличается более высокой термостойкостью по сравнению фенилоном П, что подтверждается данными термического анализа.

Определение возможного механизма и расчет кинетических параметров процесса термодеструкции ароматических полиамидов проводили с использованием интегральных кинетических уравнений различных механизмов гетерогенных процессов.

Расчет проводился согласно программе с использованием метода Коатса-Редферна и с применением уравнения Аррениуса [6-8]. Исходными параметрами для каждого механизма служили среднеквадратичные отклонения минимума функции *S*, коэффициента корреляции *r*, энергии активации *E* и предэкспоненциального множителя *Z*. Основой алгоритма расчета являлась проверка линейности функции $\lg k(\alpha) - 1/T$, а также определение минимума функции *S* для математических моделей основных механизмов гетерогенных процессов:

$$S = f \{ \alpha(\tau), T(\tau), \Delta T(\tau), E_{акт.}, Z \}, \quad (3)$$

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{(\alpha_{эксп.} - \alpha_{розн.})^2}{m}} \quad (4)$$

где $\alpha_э, \alpha_p$ – экспериментальные и расчетные значения степени превращения; *m* – количество экспериментальных данных; *T* – температура; *E_{акт.}* – энергия активации; *Z* – предэкспоненциальный множитель.

Критериями выбора математической модели термодеструкции фенилонов являлись коэффициент корреляции прямой *r* в координатах уравнения Аррениуса и минимум функции *S*.

Результаты расчета выходных параметров термодеструкции исследуемых веществ, рассчитанные по программе [6], приведены в таблице 4.

Таблица 4.

Расчетные кинетические параметры процесса термодеструкции ароматических полиамидов

Математична модель процесса	<i>r</i>	<i>S</i>	<i>E_{акт.}</i> , кДж/моль	lg <i>Z</i>
Фенилон С-1				
$k\tau = 2[1 - (1 - \alpha)^{1/2}]$	0,993	0,0169	133,16	3,61
$k\tau = 3[1 - (1 - \alpha)^{1/3}]$	0,995	0,0152	147,45	4,41
Фенилон П				
$k\tau = 2[1 - (1 - \alpha)^{1/2}]$	0,998	0,0113	141,32	4,15
$k\tau = 3[1 - (1 - \alpha)^{1/3}]$	0,997	0,0117	158,17	5,11

* *r* – коэффициент корреляции; *E_{акт.}* – энергия активации; *Z* – предэкспоненциальный множитель

В результате расчетов было установлено, что наиболее адекватно процесс термодеструкции фенилонов отражают математические модели реакции на границе раздела фаз: уравнения сферической симметрии (6) – для фенилона С-1 и цилиндрической симметрии (5) – для фенилона П:

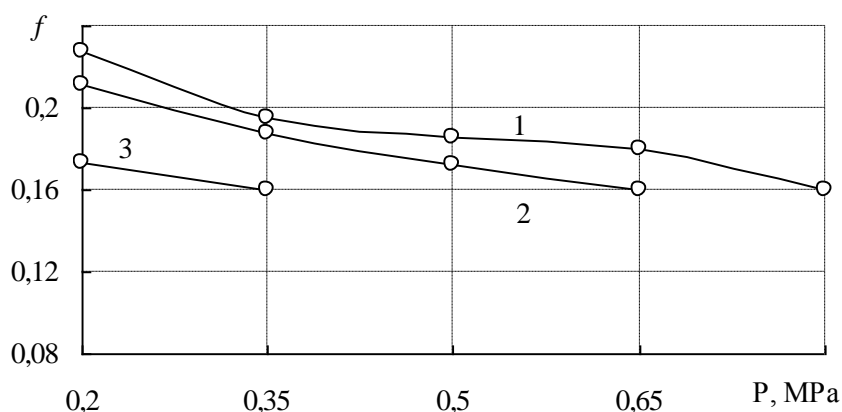
$$k\tau = 2[1 - (1 - \alpha)^{1/2}] \quad (5)$$

$$k\tau = 3[1 - (1 - \alpha)^{1/3}] \quad (6)$$

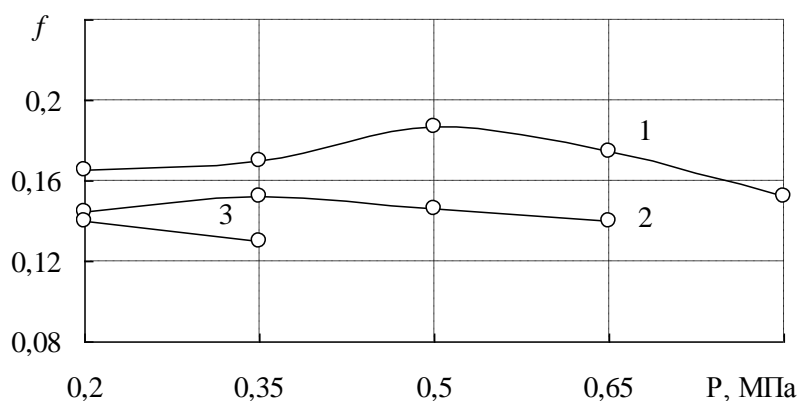
Триботехнические исследования ароматических полиамидов показало на общую закономерность: наиболее работоспособными образцы из фенилонов были при испытаниях в условиях минимальной скорости скольжения 0,5 м/с (рис. 2). Сравнение значений трибологических свойств фенилона С-1 и фенилона П, испытанных при данной скорости скольжения, показало, что более низкие значения коэффициента трения были характерны для фенилона П. При скорости скольжения *v* = 0,5 м/с с ростом удельного давления для полиамидных связующих коэффициент трения снижался, причем более существенно (более 30 %) для фенилона С-1, в то время как для фенилона П он изменялся незначительно находясь в пределах 0,15-0,17.

Обращает на себя внимание тот факт, что с ужесточением нагрузочного режима разница между коэффициентами трения полиамидных связующих при минимальной скорости скольжения снижалась. Так, если при удельном давлении *P* = 0,2 МПа коэффициент трения фенилона П был на

31 % ниже, чем у фенилона С-1, то при $P = 0,8$ МПа эта разница составила всего 5 % (рис. 2 а, б, кривая 1).



а



б

Рис. 2. Влияние удельного давления на коэффициент трения фенилона С-1 (а) и фенилона II (б), испытанных в условиях сухого трения при скоростях скольжения 0,5 (1), 1 (2) и 1,5 м/с (3)

Данные проведенных триботехнических испытаний показали, что с увеличением скорости скольжения коэффициент трения фенилонов во всем исследованном диапазоне удельных давлений снижался (рис. 2а, б). Это обусловлено, с одной стороны, сокращением времени фрикционной связи полимерный образец – стальное контртело, а с другой – увеличением тангенциально составляющей скорости скольжения, что способствовало эффективному удалению частиц износа из зоны трения [9].

Что касается износостойкости исследованных полимеров, то здесь проявляется общая тенденция: с ростом скорости скольжения интенсивность линейного износа образцов возрастала, а при более жестких режимах испытаний ($v = 1,5$ м/с и $P = 0,8$ МПа, а также при $v = 2$ м/с и $P = 0,5-0,8$ МПа) полиамидные связующие катастрофически изнашивались и теряли свою работоспособность (табл. 5). Последнее, очевидно, можно объяснить тем, что в этих условиях в зоне трения развивается температура, близкая к температуре размягчения полимеров, что приводит к схватыванию полимерных материалов с контртелом и, как следствие, к увеличению коэффициента трения и интенсификации процессов износа пластиков [9].

В целом, интенсивность линейного износа (I_h) образцов ароматических полиамидов существенно зависела от удельного давления (табл. 5). В условиях минимальной скорости скольжения при $P = 0,2-0,5$ МПа интенсивность линейного износа образцов фенилона С-1 и фенилона II возросла соответственно в 3,2 и 2,5 раз. При более высоких значениях удельных давлений износ материалов значительно возрастал, причем для фенилона II эта тенденция начала проявляться раньше (при $P = 0,65$ МПа), чем у фенилона С-1 (при $P = 0,8$ МПа).

Микроструктурные исследования образцов показали, что при трении ароматических полиамидов по поверхности стального контртела происходило непосредственное разрушение поверхностного слоя полимеров путем среза, причем, для фенилона II этот процесс начал проявляться в условиях более низких температур и более интенсивно (рис. 3б).

Анализ поверхности контртела свидетельствовал о наличии на ней плотной пленки, образовавшейся из продуктов трибодеструкции полиамидов. Образование поверхностной пленки было вызвано тем, что в результате повышения температуры в зоне контакта полимерный образец – контртело возросли адгезионные силы между полимером и стальным диском. При трении образцов полиамидных связующих в результате износа наблюдалось образование мелкодисперсных продуктов, которые накапливались на поверхности стального диска, в результате чего трение полимеров в процессе исследований производилось не по поверхности контртела, а по продуктам износа.

Таблица 5.

Влияние режимов эксплуатации на интенсивность линейного износа ароматического полиамида фенилон С-1, $I_h \times 10^{-8}$

Скорость скольжения, м/с	Удельное давление, МПа				
	0,2	0,35	0,5	0,65	0,8
Фенилон С-1					
1,0	1,3	1,9	4,2	5,9	13
1,5	1,5	2,7	5,6	23	–
2,0	1,8	3,0	–	–	–
Фенилон II					
1,0	3,5	5,4	8,8	12	25
1,5	5,7	6,2	9,1	13	–
2,0	6,0	7,4	–	–	–

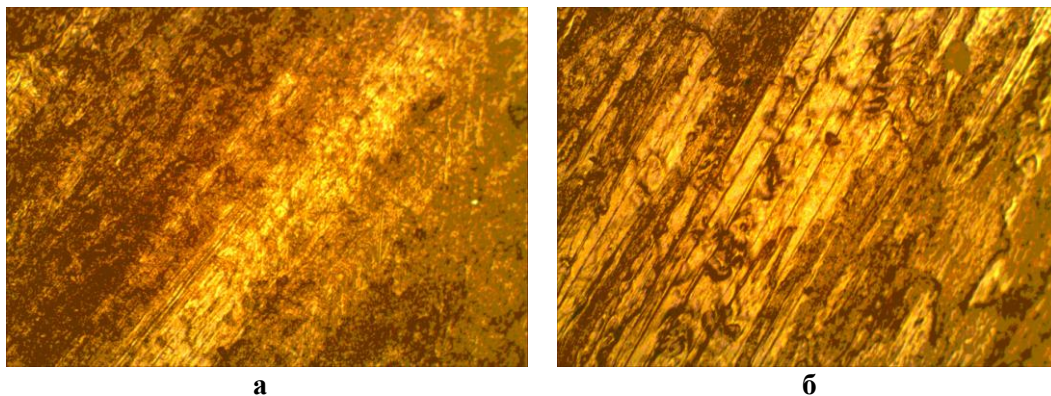


Рис. 3. Микроструктура поверхности трения образцов фенилона С-1 (а) и фенилона II (б). Увеличение $\times 180$.

Таким образом, результаты проведенных термических и трибологических исследований позволяют сделать вывод о том, что термостойкость и триботехнические характеристики ароматических полиамидов в значительной степени определяется их химическим строением. Смешанный сополиамид фенилон С-1, состоящий из мета- и пара-фениленизофталамидов, отличается более высокой термостойкостью и начинает разлагаться при температуре 55°C выше, чем фенилон II. Это обусловлено влиянием изомерии положения заместителей в ароматическом ядре полимера: фенилон С-1 содержит в своем составе звенья более термостойкого п-фениленизофталамида, поэтому он более устойчив к воздействию высоких температур и процессы термоокислительной деструкции протекают для него в области более высоких температур, чем для фенилона II. По триботехническим характеристикам более перспективным материалом является фенилон II. Указанный ароматический полиамид во всем исследованном интервале скоростей скольжения и удельных давлений имеет низкий коэффициент трения (0,13-0,19), что в среднем на 25-35 % ниже, чем у фенилона С-1. В целом, исследованные ароматические полиамиды имеют высокие триботехнические

характеристики при експлуатації в умовах трення без смазки і можуть стабільно працювати в узлах трення, маючи критерій работоспособности $PV \leq 0,7 \text{ МПа} \cdot \text{м/с}$.

Список использованных источников:

1. Соколов Л.Б. Термостойкие и высокопрочные полимерные материалы. – М.: Знание, 1984. – 64 с.
2. Соколов Л.Б., Герасимов В.Д., Савинов В.Д., Беляков В.К. Термостойкие ароматические полиамиды. – М.: Химия, 1975. – 256 с.
3. Бюллер К.-У. Тепло- и термостойкие полимеры: Пер. с нем. – М.: Химия, 1984. – 1056 с.
4. Коршак В.В. Термостойкие полимеры – М.: Наука, 1969. – 381 с.
5. Коршак В.В. Химическое строение и температурные характеристики полимеров. – М.: Наука, 1970. – 367 с.
6. Coats A.W., Redfern G.P. // Nature. – 1964. – 201. – P. 68.
7. Zsaco J. Kinetic analysis of thermogravimetric data. XIV. Three integral method and their computer programs // J. Therm. Anal. – 1980. – Vol. 19. – P. 333-345.
8. Zuru A.A., Whitehead R., Criffiths D.L. A new technique for determination of the possible reaction mechanism from non-isothermal thermogravimetric data // Thermochim. Acta, 164, 1990. – P.285-305.
9. Бартнев Г.М., Лаврентьев В.В. Трение и износ полимеров. Л.: Химия, 1972. – 240 с.

Рецензенты:

А.Д. Деркач, заведующий кафедрой “Эксплуатация машино-тракторного парка” Днепропетровского государственного аграрно-экономического университета, к.т.н., доцент

В.И. Сытар, заведующий кафедрой машиностроения и инженерной механики ГВУЗ “Украинский государственный химико-технологический университет”, профессор, к.т.н.

Стаття надійшла до редакції 20.03.2019

**ДО УВАГИ КОРЕСПОНДЕНТІВ!
ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАННЯ СТАТЕЙ**

1. **Наукова стаття обов'язково повинна мати наступні необхідні елементи:** постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття; формулювання цілей статті; виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки з даного дослідження і перспективи подальших досліджень у даному напрямку.
2. **Статтю можна подавати українською, російською, або англійською мовою.** Стаття повинна бути набрана у текстовому редакторі не нижче MS WORD 97/03. Нумерацію сторінок не виконувати. Обсяг статті від 5-9 сторінок.
3. Параметри сторінки: верхнє, нижнє та ліве поле – 2 см, праве поле 2,5 см. Від краю до колонтитула верхнього – 1,25 см, нижнього – 1,25 см.
4. Шапка статті: індекс УДК, ініціали та прізвища авторів розміщується на один абзац нижче шрифтом 11 пт, назва організації – набираються з нового рядка шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по центру. Назва статті розміщується на один абзац нижче назви організації, набирається шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з напівжирним виділенням і вирівнюється по центру.
5. **Анотації** українською, російською мовами набираються з абзацного відступу шрифтом Time New Roman Cyr розміром 9, курсив, напівжирний 300-500 друкованих знаків з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по ширині; англійською мовами розширена анотація 700-1000 друкованих знаків.
6. Нижче анотацій обов'язково вказуються ключові слова шрифтом Time New Roman Cyr, курсив, напівжирний 9 пт.
7. Основний текст розміщується на 1 см нижче анотацій, набирається з абзацного відступу 1 см шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюється по ширині.
8. Для набирання формул застосовувати редактор формул MS WORD (використовувати шрифти: Symbol, Time New Roman Cyr; розміри шрифтів: звичайний 12 пт, крупний індекс 7 пт, дрібний індекс 5 пт, крупний символ 18 пт, дрібний символ 12 пт). Формула вирівнюється по центру і не повинна займати більше 5/6 ширини рядка.
9. Якщо в статті присутні ілюстрації, необхідно розташовувати їх по тексту, вирівнюючи підписи (*Рис. 1. Схема ...*) по ширині з абзацного відступу 1 см. Другий екземпляр ілюстрації необхідно подати на окремому листі. Ілюстрації повинні бути чіткими та контрастними.
10. Таблиці розташовувати по тексту, причому їх ширина повинна бути на 1 см менша ширини рядка. Над таблицею поставити її порядковий номер (*Таблиця 1*) вирівнюючи по правому краю, під яким розмістити назву таблиці вирівнюючи по центру.
11. Література подається загальним списком в кінці рукопису згідно з вимогами ДСТУ 8302:2015 через 1 см від останнього рядка.
12. Статті надіслати електронною поштою за такою адресою: notatki@ukr.net
13. До статті додається дві рецензії: зовнішня і внутрішня. Редакція залишає за собою право направляти статті на додаткову рецензію.
14. В кінці статті обов'язково вказуються ПІБ, посаду, науковий ступінь, вчене звання рецензентів статті.
15. Рукописи, що не відповідають вище вказаним вимогам, не розглядаються і до друку не приймаються.

До статті обов'язково додаються у письмовому вигляді відомості про авторів:

Прізвище, Ім'я, По-батькові

Місце роботи, посада, науковий ступінь, вчене звання

Наукові інтереси

Назва статті та особисті підписи усіх авторів

Адреса для листування, телефон

Довідки з питань публікації та прийому матеріалів у збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ» можна отримати у відповідального секретаря – Савюка Ігоря Віталійовича за тел. (0332) 262519.

Адреса: 43018, м. Луцьк, вул. Потебні, 56, к. 34.

Автор статті отримує 1 примірник збірника. **Вартість друку** однієї сторінки становить 45 грн. Рахунок виставляється після підтвердження редакційною колегією про прийняття статті до друку.

До уваги авторів. Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ» (за галузями знань «Технічні науки») згідно наказу МОН України № 528 від 12.05.2015 р. затверджено як наукове фахове видання України, в якому можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук.

Збірник входить у науково метричну базу РИНЦ.

Редколегія повідомляє, що планова періодичність друку збірника чотири випусків на рік.

P.S. Без авторської довідки, матеріали редакційною колегією не розглядаються.

ЗРАЗОК ОФОРМЛЕННЯ СТАТТІ

УДК: 620.179.16

І.І. Іванов¹, П.П. Петров²

Луцький національний технічний університет¹

Тернопільський національний технічний університет²

**НАБЛИЖЕНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ОСІ КОНОЇДА, ПРЕДСТАВЛЕНОГО ДИСКРЕТНИМ
КАРКАСОМ ТВІРНИХ**

Розроблено алгоритм наближеного визначення осі коноїда, представленого дискретним каркасом спільних твірних.

Ключові слова: вісь коноїда, дискретний каркас, твірна.

И.И. Иванов, П.П. Петров

**ПРИБЛИЖЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСИ КОНОИДА, ПРЕДСТАВЛЕННОГО
ДИСКРЕТНЫМ КАРКАСОМ ОБРАЗУЮЩИХ**

Разработан алгоритм приближенного определения оси коноида, представленного дискретным каркасом обшивки образующих.

Ключевые слова: ось коноида, дискретный каркас, образующая.

I. Ivanov, P. Petrov

**AXIS APPROXIMATE DEFINITION OF CONOID DESCRIBED BY THE SET OF STRAIGHT
LINES**

The algorithm of axis approximate definition of conoid described by the set of straight lines is made. The approximate conoid axis is a line. Conoid is created by straight lines.

Keywords: conoid axis, discretely carcass of straight lines.

Постановка проблеми. На коноїді, представленому дискретним каркасом твірних, можна побудувати безліч плоских і просторових.....

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наскільки відомо автору з.....

Постановка завдань. В роботі поставлено мету – розробити алгоритм.....

Викладення основного матеріалу. Для наближеного визначення осі використовувалася така властивість коноїдів: усі твірні поверхні перетинають її вісь [1].

$$Y_j = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^n Y_{ji}, \quad (1)$$

де K -

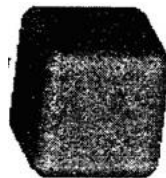


Рис. 1. Назва рисунка

Таблиця 1.

Назва таблиці

№п/п	Фактори		Функції відгуку	
	X ₁	X ₂	Y ₁	Y ₂

Висновки. В статті розроблено алгоритм наближеного.....

Список використаних джерел:

1.

ПІБ, посада, науковий ступінь, вчене звання рецензентів статті.

Ціна договірна

Колектив авторів

Наукові нотатки

**Міжвузівський збірник
(за галузями знань «Технічні науки»)
Випуск 65**

Комп'ютерний набір та верстка: І.В. Савюк
Збірник друкується в авторській редакції

Наклад **300 прим.**

Адреса редакції: 43018, м. Луцьк, вул. Потебні, 56.

Редакційно-видавничий відділ
Луцького національного технічного університету
43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75.
Свідоцтво Держкомтелерадіо України ДК № 4123 від 28.07.2011