

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ



# **ВІСНИК**

**Східноукраїнського  
національного університету  
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

**№ 7 (248)  
2018**

**НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ**

Сєверодонецьк 2018

# ВІСНИК

СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО  
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

**№ 7 (248) 2018**

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ  
ЗАСНОВАНО У 1996 РОЦІ  
ВИХІД З ДРУКУ - ВІСІМНАДЦЯТЬ РАЗІВ НА РІК  
Засновник

Східноукраїнський національний університет  
імені Володимира Даля

Журнал зареєстровано  
в Міністерстві юстиції України  
Свідоцтво про державну реєстрацію  
серія КВ № 15607-4079ПР  
від 18.08.2009 р.

# VISNIK

OF THE VOLODYMYR DAHL EAST  
UKRAINIAN NATIONAL UNIVERSITY

**№ 7 (248) 2018**

THE SCIENTIFIC JOURNAL  
WAS FOUNDED IN 1996  
IT IS ISSUED EIGHTEEN TIMES A YEAR  
Founder

Volodymyr Dahl East Ukrainian National  
University

Registered by the Ministry  
of Justice of Ukraine  
Registration Certificate  
KB № 15607-4079ПР  
dated 18.08.2009

Журнал включено до Переліків наукових фахових видань України (Наказ МОН №1328 21.12.2015 р.), (Наказ МОН №515 16.05.2016 р.), в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук з технічних, економічних та історичних наук відповідно.

Журнал включено до Міжнародної наукометричної бази даних Index Copernicus International (ICV 2017: 48.35).

ISSN 1998-7927

## Головна редакційна колегія:

Поркуян О.В., докт. техн. наук (головний редактор),  
Голубенко О.Л., член-кор. Академії педагогічних наук,  
докт. техн. наук (заступник головного редактора),  
Марченко Д.М., докт. техн. наук (заступник головного  
редактора),  
Бузько І.Р., докт. екон. наук, (заступник головного  
редактора),

Архипов О.Г., докт. техн. наук,  
Глікін М.А., докт. техн. наук,  
Горбунов М.І., докт. техн. наук,  
Рач В.А., докт. техн. наук,  
Рязанцев О.І., докт. техн. наук,  
Смолій В.М., докт. техн. наук,  
Соколов В.І., докт. техн. наук,  
Стенцель Й.І., докт. техн. наук,  
Суворін О.В., докт. техн. наук,  
Татарченко Г.О., докт. техн. наук,  
Чернецька-Білецька Н.Б., докт. техн. наук,  
Харламов Ю.О., докт. техн. наук,  
Даніч В.М., докт. екон. наук,  
Заблудська І.В., докт. екон. наук,  
Костирко Л.А., докт. екон. наук,  
Рамазанов С.К., докт. техн. наук, докт. екон. наук,  
Чернявська Є.І., докт. екон. наук,  
Овчаренко Є. І., докт. екон. наук,

Д'яченко Ю.Ю., докт. екон. наук,  
Koško A., zw., dr. hab,  
Бровендер Ю.М., докт. іст. наук,  
Бут О.М., докт. іст. наук,  
Дацків І.Б., докт. іст. наук,  
Дефорж Г.В., докт. іст. наук,  
Довжук І.В., докт. іст. наук,  
Залізняка Л.Л., докт. іст. наук,  
Запорожченко Ю.В., докт. іст. наук,  
Коропченко А.А., докт. іст. наук,  
Кривоконь О.Г., докт. іст. наук,  
Литвиненко Р.О., докт. іст. наук,  
Михайлюк В.П., докт. іст. наук,  
Моця О.П., член-кор. НАН України, докт. іст. наук,  
Отрощенко В.В., докт. іст. наук,  
Пекарчук В.М., докт. іст. наук,  
Пилипчук О.Я., докт. біол. наук,  
Тригуб О.П., докт. іст. наук,  
Сапицька О.М., канд. іст. наук,  
Фомін А.В., канд. іст. наук,  
Новіков В.П., докт. хім. наук,  
Кондратов С.О., докт. хім. наук,  
Галстян Г.А., докт. хім. наук,  
Галстян А.Г., докт. хім. наук,  
Поталенко Е.В., докт. хім. наук,  
Голосман Є.З., докт. хім. наук

**Відповідальний за випуск: к.т.н., доцент Кудрявцев С.О.**

Рекомендовано до друку Вченою радою Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Протокол № 4 від 28 грудня 2018 р.)

Матеріали номера друкуються мовою оригіналу.

© Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, 2018  
© Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2018

## ЗМІСТ

<b>Галич В.А.</b> ЗМІШАНА ПРОСТОРОВА ЗАДАЧА ТЕОРІЇ ПРУЖНОСТІ ДЛЯ ТРИШАРОВИХ ПЛАСТИН.....	7
<b>Галстян Г. А., Кулешова Т. С., Галстян А. Г.</b> КІНЕТИКА І МЕХАНІЗМ РЕАКЦІЙ РІДИННОФАЗНОГО ОКИСНЕННЯ МЕТИЛБЕНЗЕНІВ ОКСИГЕНВІСНИМИ ГАЗАМИ.....	11
<b>Гусейнзаде С.О.</b> ЗАДАЧА ІДЕНТИФІКАЦІЇ КІНЕТИЧЕСКОГО КОЕФФІЦІЕНТА В УРАВНЕННІ ДИФУЗІЇ–РЕАКЦІЇ ПРИ НЕІЗВЕСТНОМ ГРАНИЧНОМ РЕЖИМЕ .....	16
<b>Квасова А. В., Зубцов Є. І., Тарасов В. Ю.</b> ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ОЧИСТКИ СКІДНИХ ГАЗІВ ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ .....	22
<b>Король Д.Р., Філіпс Т.Ч, Кудрявцев С.О.</b> РОЗРОБКА КАТАЛІТИЧНОГО ГЕНЕРАТОРА ТЕПЛА З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ АЕРОЗОЛЬНОГО НАНОКАТАЛІЗУ .....	26
<b>Корчуганова О.М., Потапенко Е.В.</b> ДО ПИТАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОРИСТОСТІ.....	30
<b>Кохан І.В., Кудрявцев С.О.</b> ПРОМИСЛОВІ ПРОЦЕСИ ГІДРОФОРМЛЮВАННЯ ЇХ ОСОБЛИВОСТІ ТА КАТАЛІЗАТОРИ ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ.....	33
<b>Кубіцька І. І., Комарецька А. А., Небесний Р. В.</b> ОДЕРЖАННЯ АКРИЛОВОЇ КИСЛОТИ КОНДЕНСАЦІЄЮ ОЦТОВОЇ КИСЛОТИ З ФОРМАЛЬДЕГІДОМ НА В–Р–W–V–O <sub>x</sub> КАТАЛІЗАТОРАХ НА ОСНОВІ АЕРОСИЛІВ РІЗНИХ МАРОК .....	38
<b>Мелконов Г.Л. Глазунов Я.І.</b> СТІЙКІСТЬ ІНСТРУМЕНТІВ З КРУГОВОЮ РЕЖУЧОЮ КРОМКОЮ .....	42
<b>Мелконов Г.Л., Ткачов Р.П.</b> ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ТЕМПЕРАТУРИ РІЗАННЯ ВІД РЕЖИМІВ РІЗАННЯ Й КУТА СХРЕЩУВАННЯ ПРИ ЧИСТОВОМУ ТОЧЕННІ ВАЛІВ ЧАШКОВИМИ РІЗЦЯМИ, ЩО ПРИМУСОВО ОБЕРТАЮТЬСЯ .....	47
<b>Мельник Ю.Р., Онуфрак К.О., Андрушко В.О., Мельник С.Р.</b> ЕСТЕРИФІКАЦІЯ ЖИРНИХ КИСЛОТ СОАПСТОКУ ЕСТЕРО-АЛЬДЕГІДНОЮ ФРАКЦІЄЮ.....	51
<b>Москалик В. М., Карпюк Л. В., Табунщиков В. Г.</b> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЕФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КОРОТКОГО ДИФFUЗОРА. ПОДГОТОВКА К ЭКСПЕРИМЕНТУ .....	56
<b>Польгуль Т. Д., Яровий А. А.</b> МЕТОД ПОДОЛАННЯ РІЗНОРІДНОСТІ ДАНИХ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ШАХРАЙСТВА ПРИ ІНСТАЛЮВАННІ МОБІЛЬНИХ ДОДАТКІВ .....	60
<b>Сафронов А. М., Крамаренко М.В, Лутонин С.В., Водяников Ю. Я.</b> ТОРМОЗНАЯ СИСТЕМА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЭЛЕКТРОПОЕЗДА ЭКР1.....	70
<b>Сотнікова Т. Г.</b> МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ РОБОТИ ОДНОКОНТУРНИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ.....	77
<b>Супонєв В.Н.</b> ВИЗНАЧЕННЯ СИЛИ ОПОРУ ГРУНТУ ПРИ ОЧИЩЕННІ СВЕРДЛОВИНИ ПІСЛЯ ЇЇ РОЗШИРЕННЯ КІЛЬЦЕВИМ НОЖЕМ .....	82

---

---

<b>Тарасов В. Ю., Захарова О.І., Зубцов Є.І., Заїка Р.Г.</b> АЗБЕСТ. СТАН ПРОБЛЕМИ В УКРАЇНІ.....	88
<b>Уваров П.Є., Татарченко Г.О., Шпарбер М.Є.</b> ЛІКВІДАЦІЙНИЙ ЦИКЛ ОБ'ЄКТУ ІНВЕСТИЦІЙНО-БУДІВЕЛЬНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ. ОСОБЛИВОСТІ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЕКТУВАННЯ.....	92
<b>Устименко Д.В., Муха А.Н.</b> АНАЛІЗ ВЛІЯННЯ ТЕМПЕРАТУРИ НАГРЕВА СКОЛЬЗЯЩЕГО КОНТАКТА «КОНТАКТНИЙ ПРОВІД – ВСТАВКА ТОКОПРИЕМНИКА» НА ЕГО РЕСУРС .....	97
<b>Федорова Ю.В.</b> НЕЕФЕКТИВНІСТЬ ЕКСПОРТУ ПРОДУКЦІЇ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНИХ КОМБІНАТІВ УКРАЇНИ .....	102
<b>Черних О.А., Соколенко К.В.</b> ОЦІНКА МАСШТАБУ СПІВУЧАСТІ МЕШКАНЦІВ МІСТ В РЕАЛІЗАЦІЇ ЗАВДАНЬ РОЗВИТКУ СИСТЕМ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....	107
<b>Кравченя І.Н.</b> ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЦИКЛА СВЕТОФОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПЕРЕКРЕСТКА.....	111

## CONTENTS

<b>Galich V.</b>	MIXED SPATIAL PROBLEM THEORY OF ELASTICITY FOR THREE-LAYER PLATES .....	7
<b>Galstyan G., Kuleshova T., Galstyan A.</b>	KINETICS AND MECHANISM OF REACTIONS OF LIQUID-PHASE OXIDATION OF METHYLBENZENES BY OXYGEN-CONTAINING GASES.....	11
<b>Huseynzade S. O.</b>	THE PROBLEM OF IDENTIFICATION OF KINETIC COEFFICIENT IN THE DIFFUSION- REACTION EQUATION AT THE UNKNOWN BOUNDARY MODE .....	16
<b>Kvasova A. V., Zubtsov Y. I., Tarasov V. Yu.</b>	COMPARATIVE ANALYSIS OF WASTE GAS TREATMENT TECHNOLOGIES OF THERMAL POWER PLANT.....	22
<b>Korol D.R., Philips T. C., Kudryavtsev S.O.</b>	DEVELOPMENT OF CATALYTIC HEAT GENERATOR VIA AEROSOL NANOCATALYSIS TECHNOLOGY .....	26
<b>Korchuganova O., Potapenko E.</b>	TO THE PROBLEM OF POROSITIES DETERMINING.....	30
<b>Kokhan I., Kudriavtsev S.</b>	INDUSTRIAL PROCESSES OF HYDROFORMYLATION FEATURES AND USED CATALYSTS.....	33
<b>Kubitska I.I., Komarets'ka A.A., Nebesnyi R.V.</b>	ACRYLIC ACID OBTAINING BY CONDENSATION OF ACETIC ACID WITH FORMALDEHYDE ON B-P-W-V-O <sub>x</sub> CATALYSTS BASED ON FUMED SILICA OF DIFFERENT BRANDS.....	38
<b>Melkonov G.L. Glazunov Ya.I.</b>	THE RESISTANCE OF TOOLS WITH CIRCULAR CUTTING EDGE.....	42
<b>Melkonov G.L., Tkachov R.P.</b>	DETERMINATION OF THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE CUTTING ANGLE OF THE CUTTING, AND WHEN CROSSING FINISH TURNING OF SHAFTS ROTATING CUTTERS TO FORCE CUP.....	47
<b>Melnyk Yu., Onufrak K., Andrushko V., Melnyk S.</b>	ESTERIFICATION OF SOAPSTOCK FATTY ACIDS BY THE ESTER- ALDEHYDE FRACTION .....	51
<b>Moskalyk V. M., Karpyuk L. V., Tabunshchikov V. G.</b>	EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE HYDRAULIC RESISTANCE COEFFICIENT OF A SHORT DIFFUSER. PREPARATION FOR THE EXPERIMENT .....	56
<b>Polhul T., Yarovyi A.</b>	THE INPUT DATA HETEROGENEITIES RESOLUTION METHOD DURING MOBILE APPLICATIONS INSTALLATION FRAUD DETECTION /.....	60
<b>Safronov O.M., Kramarenko M.V., Lutonin S.V., Vodyannikov Yu. Ya.</b>	BRAKE SYSTEM OF HIGH-SPEED ELECTRIC TRAIN EKR1 .....	70
<b>Sotnikova T.</b>	METHODS OF PERFORMANCE QUALITY IMPROVEMENT OF SINGLE-LOOP AUTOMATED CONTROL SYSTEMS .....	77
<b>Suponyev V.</b>	DETERMINATION OF THE RESISTANCE OF THE SOIL WHEN CLEANING THE BORE AFTER ITS EXPANSION RING KNIFE.....	82
<b>Tarasov V. Yu., Zakharova O.I., Zubtsov Y.I., Zaika R.G.</b>	ASBESTOS. STATE IN UKRAINE .....	88

---

---

<b>Uvarov P.E., Tatarchenko G.O., Shparber M.E.</b> LIQUIDATION CYCLE OF OBJECT OF INVESTMENT AND BUILDING ACTIVITIES. FEATURES OF ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL DESIGN.....	92
<b>Ustymenko D., Mukha A.</b> ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE TEMPERATURE OF THE HEATING OF THE SLIDING CONTACT «CONTACT WIRE - INSERT OF CURRENT» ON ITS RESOURCE .....	97
<b>Fedorova Y.</b> INEFFICIENCY OF EXPORT OF MINERAL-CONTAINING COMBINATES OF UKRAINE .....	102
<b>Chernih O.A., Sokolenko K.V.</b> EVALUATION OF THE CITY RESIDENTS PARTICIPATION IN IMPLEMENTATION OF DEVELOPMENT OBJECTIVES OF HEAT SUPPLY SYSTEMS .....	107
<b>Kravchenya I.N.</b> SIMULATION MODELING USAGE FOR OPTIMIZING THE PARAMETERS OF TRAFFIC SIGNALIZATION CYCLE AT THE CROSSROADS.....	111

УДК 539.3

**ЗМІШАНА ПРОСТОРОВА ЗАДАЧА ТЕОРІЇ ПРУЖНОСТІ  
ДЛЯ ТРИШАРОВИХ ПЛАСТИН****Галич В.А.****MIXED SPATIAL PROBLEM THEORY OF ELASTICITY  
FOR THREE-LAYER PLATES****Galich V.**

*У статті розглянуто питання пошуку потенціального рішення змішаної тривимірної задачі теорії пружності для тришарової пластини, симетричної відносно серединної площини будови. Пластина може бути послаблена отворами. Шари пластини вважаються ізотропними. Переміщення на торцевих поверхнях пластини дорівнюють нулю, а між шарами пластини існує ідеальний механічний контакт. На бічній поверхні задаються напруження, які симетричні відносно поперечної координати (задача типу розтягу-стискання). У кінцевому підсумку проблема зводиться до задачі по знаходженню власних значень і власних функцій.*

**Ключові слова:** змішана задача, тришарова пластина, ідеальний механічний контакт, потенціальне рішення, переміщення.

**Вступ.** Багатозв'язкові пластини знаходять широке застосування в якості елементів конструкцій в багатьох галузях сучасної промисловості. Особливу роль серед них відіграють шаруваті композиційні матеріали, зокрема тришарові пластини.

**Постановка проблеми.** Для розрахунку таких пластин на міцність використовуються, як правило, прикладні двовимірні теорії, в яких напруження і переміщення усереднюються по товщині пластини. Такий підхід приводить до значних похибок при оцінці напружено-деформованого стану пластин. Тому більшу увагу слід приділяти розвитку методів розв'язку задач теорії пружності для багатошарових пластин в просторовій постановці.

**Аналіз останніх досліджень і результатів.** Перші результати по знаходженню напружено-деформованого стану тришарових пластин в тривимірній постановці були отримані в працях І.І. Воронича, Кадомцева І.Г., Устинова Ю.А. Для цього ними був застосований метод однорідних рішень за допомогою якого напружено-деформований стан був представлений у вигляді суми трьох складових: бігармонічної, потенціальної та вихрової. Подальший розвиток цей напрямок досліджень знайшов в

працях вчених донецької школи механіків: О.С.Космодам'янского, В.А. Шалдирвана, Є.В. Алтухова, В.А. Галича. Зокрема, були отримані розв'язки задач про напружено-деформований стан тришарових пластин с трансверсально-ізотропними шарами, а також з урахуванням впливу температури на розподіл напружень в пластині.

**Мета статті.** Отримати потенціальну складову напружено-деформованого стану для тришарової пластини з однорідними умовами на торцевій поверхні в переміщеннях.

**Постановка задачі.** Розглянемо симетричну відносно серединної площини тришарову пластину, що складається з ізотропних шарів. Пластина може бути як безкінечною, так і обмеженою зовнішньою циліндричною бічною поверхнею  $\Omega_0$ , а також внутрішніми циліндричними поверхнями  $\Omega_i$ . Віднесемо пластину до прямокутної системи координат  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ), при цьому координати  $x_1, x_2$  сумістимо з серединною площиною пластини, а вісь  $x_3$  направимо в поперечному напрямку по товщині пластини. Таким чином,  $-(h_1 + h_2) \leq x_3 \leq h_1 + h_2$ , де  $h_1$  – товщина однакових зовнішніх шарів,  $2h_2$  – товщина внутрішнього шару пластини. В подальшому величини, що відносяться до зовнішніх шарів будемо позначати індексом 1, а до внутрішнього шару – 2. Пружні характеристики шарів характеризуються модулями зсуву  $G_j^*$  і коефіцієнтами Пуассона  $\nu_j$ , де  $j$  – номер шару. Припускаємо, що пластина деформується лише за рахунок зовнішніх зусиль, що прикладені до бічної поверхні, а на торцевій плоскій поверхні переміщення дорівнюють нулю (змішана задача теорії пружності). Будемо також вважати, що між шарами пластини існує ідеальний механічний контакт.

**Виклад основного матеріалу досліджень.**

Введемо наступні безрозмірні величини:

$$\xi = \frac{x_1}{R}, \eta = \frac{x_2}{R}, \zeta = \frac{x_3}{h} = \frac{1}{\lambda} \frac{x_3}{R},$$

$$\lambda = h/R, h = h_1 + h_2, \lambda_1 = h_1/h \quad (1)$$

$$\lambda_2 = h_2/h, u_{kj} = u_{mj}^*/R, \sigma_{klj} = \sigma_{mij}^*/2G_1^*,$$

де

$k, l = \xi, \eta, \zeta; m, n = 1, 2, 3; G_j = G_j^*/G_1^*; u_{kj}, \sigma_{klj}$  – безрозмірні переміщення і напруги  $j$ -ого шару,  $R$  – характерний лінійний розмір пластини в площині  $\xi, \eta$ .

Задача зводиться до інтегрування рівнянь рівноваги в переміщеннях

$$M_{1j} \partial^2 U_j + \lambda M_{2j} \partial U_j + \lambda^2 M_{3j} U_j = 0, \quad (2)$$

де

$$M_{1j} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{2j} \end{vmatrix}, \quad M_{2j} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & \mu_{1j} \partial_1 \\ 0 & 0 & \mu_{1j} \partial_2 \\ \mu_{1j} \partial_1 & \mu_{1j} \partial_2 & 0 \end{vmatrix},$$

$$M_{3j} = \begin{vmatrix} D^2 + \mu_{1j} \partial_1^2 & \mu_{1j} \partial_1 \partial_2 & 0 \\ \mu_{1j} \partial_1 \partial_2 & D^2 + \mu_{1j} \partial_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & D^2 \end{vmatrix}, \quad U_j = \begin{vmatrix} u_{\xi j} \\ u_{\eta j} \\ u_{\zeta j} \end{vmatrix},$$

$$\partial_1 = \frac{\partial}{\partial \xi}, \quad \partial_2 = \frac{\partial}{\partial \eta}, \quad D^2 = \partial_1^2 + \partial_2^2, \quad \partial = \frac{\partial}{\partial \zeta},$$

$$\mu_{1j} = \frac{1}{1-2\nu_j}, \quad \mu_{2j} = \frac{2(1-\nu_j)}{1-2\nu_j}.$$

Граничні умови жорсткого защемлення торців пластини мають вигляд

$$U_1|_{\zeta=1} = 0. \quad (3)$$

Умови ідеального механічного контакту шарів пластини можна представити так:

$$U_1 = U_2|_{\zeta=\lambda_2}, \quad \sigma_1 = \sigma_2|_{\zeta=\lambda_2}, \quad (4)$$

$$\text{де } \sigma_j = \begin{vmatrix} \sigma_{\xi j} \\ \sigma_{\eta j} \\ \sigma_{\zeta j} \end{vmatrix}.$$

Формула (2) представляє собою систему диференціальних рівнянь в приватних похідних відносно переміщень. Відомо, що в змішаних задачах теорії пружності для пластин з однорідними граничними умовами на торцевій поверхні загальне рішення можна представити у вигляді суми двох складових: по-

тенціальної та вихрової. В даній роботі зосередимось на пошуку потенціального рішення системи (2) з урахуванням граничних умов (3) і (4).

Для знаходження потенціального рішення системи рівнянь рівноваги застосуємо на пів обернений метод. Відповідно до нього переміщення будемо шукати у вигляді

$$u_{\xi j}^{\Pi} = n_j(\zeta) \partial_1 C(\xi, \eta), \quad u_{\eta j}^{\Pi} = n_j(\zeta) \partial_2 C(\xi, \eta),$$

$$u_{\zeta j}^{\Pi} = q_j(\zeta) C(\xi, \eta), \quad (5)$$

де функція  $C(\xi, \eta)$  задовольняє метагармонійному рівнянню

$$D^2 C - \left(\frac{\gamma}{\lambda}\right)^2 C = 0. \quad (6)$$

Вимагаючи, щоб переміщення (5) задовольняли системі (2), отримаємо систему звичайних диференціальних рівнянь відносно невідомих функцій  $n_j(\zeta), q_j(\zeta)$ :

$$\partial^2 n_j + \gamma^2 \frac{2(1-\nu_j)}{1-2\nu_j} n_j + \lambda \frac{1}{1-2\nu_j} \partial q_j = 0,$$

$$\partial^2 q_j + \gamma^2 \frac{1-2\nu_j}{2(1-\nu_j)} q_j + \frac{\gamma^2}{\lambda} \frac{1}{2(1-\nu_j)} \partial n_j = 0. \quad (7)$$

Із рівнянь (3),(4) випливають граничні умови для функцій  $n_j(\zeta), q_j(\zeta)$ :

$$n_1(1) = 0, q_1(1) = 0, n_1(\lambda_2) = n_2(\lambda_2), q_1(\lambda_2) = q_2(\lambda_2),$$

$$\lambda q_1(\lambda_2) - G_2 \lambda q_2(\lambda_2) + \partial n_1(\lambda_2) - G_2 \partial n_2(\lambda_2) = 0,$$

$$\partial q_1(\lambda_2) - G_2 \frac{1-\nu_2}{1-2\nu_2} \frac{1-2\nu_1}{1-\nu_1} \partial q_2(\lambda_2) + \frac{\gamma^2}{\lambda} \frac{\nu_1}{1-\nu_1} * \quad (8)$$

$$* n_1(\lambda_2) - G_2 \frac{\gamma^2}{\lambda} \frac{\nu_2}{1-2\nu_2} \frac{1-2\nu_1}{1-\nu_1} n_2(\lambda_2) = 0.$$

При отриманні співвідношень (8) були використані рівняння закону Гука у вигляді

$$\sigma_{\xi j} = G_j \left[ \frac{\nu_j}{1-2\nu_j} (\partial_1 u_{\xi j} + \partial_2 u_{\eta j}) + \lambda^{-1} \frac{1-\nu_j}{1-2\nu_j} \partial u_{\zeta j} \right],$$

$$\sigma_{\xi j} = \frac{G_j}{2} (\partial_1 u_{\xi j} + \lambda^{-1} \partial u_{\xi j}), \quad \sigma_{\eta j} = \frac{G_j}{2} (\partial_2 u_{\xi j} + \lambda^{-1} \partial u_{\eta j}).$$

Система диференціальних рівнянь (7) при граничних умовах (8) представляють собою задачу штурма-ліувівського типу на власні функції  $n_j(\zeta), q_j(\zeta)$  і власні значення  $\gamma$ . Функції  $n_j(\zeta), q_j(\zeta)$  будемо шукати у вигляді



$$\begin{aligned} n_1(\zeta) &= a_1 \cos \zeta + a_2 \sin \zeta + a_3 \zeta \cos \zeta + a_4 \zeta \sin \zeta, \\ q_1(\zeta) &= b_1 \cos \zeta + b_2 \sin \zeta + b_3 \zeta \cos \zeta + b_4 \zeta \sin \zeta, \\ n_2(\zeta) &= a_5 \cos \zeta + a_6 \zeta \sin \zeta, \\ q_2(\zeta) &= b_5 \sin \zeta + b_6 \zeta \cos \zeta. \end{aligned}$$

Вимагаючи, щоб дані функції задовольняли систему рівнянь (7), отримаємо

$$\begin{aligned} q_1(\zeta) &= -a_1 \frac{\gamma}{\lambda} \sin \zeta + a_2 \frac{\gamma}{\lambda} \cos \zeta + a_3 \left[ \frac{-3 + 4\nu_1}{\lambda} * \right. \\ & * \cos \zeta - \frac{\gamma}{\lambda} \zeta \sin \zeta \left. \right] + a_4 \left[ \frac{-3 + 4\nu_1}{\lambda} \sin \zeta + \frac{\gamma}{\lambda} \zeta \cos \zeta \right], \\ q_2(\zeta) &= -a_5 \frac{\gamma}{\lambda} \sin \zeta + a_6 \left[ \frac{-3 + 4\nu_2}{\lambda} \sin \zeta + \frac{\lambda}{\lambda} \zeta \cos \zeta \right]. \end{aligned}$$

Підставляючи знайдені функції  $n_j(\zeta)$ ,  $q_j(\zeta)$  в граничні умови (8), отримаємо лінійну однорідну систему шести рівнянь відносно шести невідомих

$$\begin{aligned} a_1 \cos \gamma + a_2 \sin \gamma + a_3 \cos \gamma + a_4 \sin \gamma &= 0, \\ -a_1 \gamma \sin \gamma + a_2 \gamma \cos \gamma + a_3 ((-3 + 4\nu_1) \cos \gamma - & \\ - \gamma \sin \gamma) + a_4 [(-3 + 4\nu_1) \sin \gamma + \gamma \cos \gamma] &= 0, \\ a_1 \cos \gamma \lambda_2 + a_2 \sin \gamma \lambda_2 + a_3 \lambda_2 \cos \gamma \lambda_2 + & \\ + a_4 \lambda_2 \sin \gamma \lambda_2 - a_5 \cos \gamma \lambda_2 - a_6 \lambda_2 \sin \gamma \lambda_2 &= 0, \\ -a_1 \gamma \sin \gamma \lambda_2 + a_2 \gamma \cos \gamma \lambda_2 + a_3 ((-3 + 4\nu_1) * & \\ * \cos \gamma \lambda_2 - \gamma \lambda_2 \sin \gamma \lambda_2) + a_4 ((-3 + 4\nu_1) \sin \gamma \lambda_2 + & \\ \gamma \lambda_2 \cos \gamma \lambda_2) + a_5 \gamma \sin \gamma \lambda_2 - a_6 ((-3 + 4\nu_2) * & \\ * \sin \gamma \lambda_2 + \gamma \lambda_2 \cos \gamma \lambda_2) &= 0, \\ -a_1 2\gamma \sin \gamma \lambda_2 + a_2 2\gamma \cos \gamma \lambda_2 + a_3 ((-2 + 4\nu_1) * & \\ * \cos \gamma \lambda_2 - 2\gamma \lambda_2 \sin \gamma \lambda_2) + a_4 ((-2 + 4\nu_1) \sin \gamma \lambda_2 + & \\ + 2\gamma \lambda_2 \cos \gamma \lambda_2) + a_5 2G_2 \gamma \sin \gamma \lambda_2 - a_6 G_2 * & \\ * ((-2 + 4\nu_2) \sin \gamma \lambda_2 + 2\gamma \lambda_2 \cos \gamma \lambda_2) &= 0, \\ a_1 \frac{2\nu_1 - 1}{1 - \nu_1} \gamma^2 \cos \gamma \lambda_2 + a_2 \frac{2\nu_1 - 1}{1 - \nu_1} \gamma^2 \sin \gamma \lambda_2 + & \\ + a_3 (2(1 - 2\nu_1) \gamma \sin \gamma \lambda_2 + \frac{2\nu_1 - 1}{1 - \nu_1} \gamma^2 \lambda_2 \cos \gamma \lambda_2) + & \\ + a_4 (-2(1 - 2\nu_1) \gamma \cos \gamma \lambda_2 + \frac{2\nu_1 - 1}{1 - \nu_1} \gamma^2 \lambda_2 * & \\ * \sin \gamma \lambda_2) + a_5 G_2 \frac{1 - 2\nu_1}{1 - \nu_1} \gamma^2 \cos \gamma \lambda_2 + a_6 G_2 * & \\ * \frac{1 - 2\nu_1}{1 - \nu_1} (2(1 - \nu_2) \cos \gamma \lambda_2 + \gamma^2 \lambda_2 \sin \gamma \lambda_2) &= 0. \end{aligned}$$

$a_1, a_2, \dots, a_6$  :

Для того, щоб ця система мала нетривіальне рішення необхідно прирівняти її визначник нулю. В результаті отримаємо трансцендентне рівняння для знаходження власних значень задачі  $\gamma$  :

$$\begin{aligned} \Delta(\gamma) &\equiv \gamma(G_2^2 \frac{1 - 2\nu_1}{1 - \nu_1} \lambda_2 \cos \gamma \lambda_2 ((-3 + 4\nu_1) \sin \gamma \lambda_2 + \\ & + \gamma \lambda_2 \cos \gamma \lambda_2) (4(1 - \nu_2) \gamma \sin \gamma \lambda_2 \cos \gamma \lambda_2 + 2\gamma^2 \lambda_2 * \\ & * \sin^2 \gamma \lambda_2 + (-2 + 4\nu_2) \gamma^2 \sin \gamma \lambda_2 \cos \gamma \lambda_2 + 2\gamma^3 \lambda_2 * \\ & * \cos^2 \gamma \lambda_2) - \dots) + \dots - (-3 + 4\nu_1) \sin^2 \gamma (2G_2^2 * \\ & * \frac{1 - 2\nu_1}{1 - \nu_1} \gamma \sin \gamma \lambda_2 \cos \gamma \lambda_2 ((-3 + 4\nu_1) \cos \gamma \lambda_2 - \gamma \lambda_2 * \\ & * \sin \gamma \lambda_2) (2(1 - \nu_2) \cos \gamma \lambda_2 + \gamma^2 \lambda_2 \sin \gamma \lambda_2) + \dots \\ & + G_2 \gamma \lambda_2 \sin^2 \gamma \lambda_2 (\frac{1 - 2\nu_1}{1 - \nu_1} \gamma^2 \cos \gamma \lambda_2 ((-2 + 4\nu_1) * \\ & * \cos \gamma \lambda_2 - 2\gamma \lambda_2 \sin \gamma \lambda_2) - 2\gamma \sin \gamma \lambda_2 (2(1 - 2\nu_1) \gamma * \\ & * \sin \gamma \lambda_2 + \frac{2\nu_1 - 1}{1 - \nu_1} \gamma^2 \lambda_2 \cos \gamma \lambda_2))) = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Корні  $\gamma_p$  трансцендентного рівняння (9) розташовані на комплексній площині симетрично відносно координатних осей. При цьому кожному кореню  $\gamma_p$  відповідає і комплексно пов'язаний корінь  $\bar{\gamma}_p$ .

Знаючи числа  $\gamma_p$ , можна знайти функцію  $C$ , що задовольняє мета гармонійному рівнянню (6). Так, у випадку осесиметричної задачі для пологого циліндру ця функція має вигляд

$$C_p(r) = A_p K_0(\gamma_p r / \lambda) + B_p I_0(\gamma_p r / \lambda), \quad (10)$$

де  $K_0, I_0$  – модифіковані функції Бесселя,  $r$  – полярний радіус. Невідомі коефіцієнти  $A_p, B_p$  дозволяють задовольнити граничним умовам на бічній поверхні пластини.

**Висновок.** Потенціальний напружено-деформований стан тришарової пластини із нульовими переміщеннями на торцях зводиться до знаходження власних функцій і власних значень для задачі штурма-ліувілівського типу, а також до розв'язку мета гармонійного рівняння. Розв'язок мета гармонійного рівняння для ряду областей може бути представленим через модифіковані функції Бесселя.

### Л і т е р а т у р а

1. Космодамианский А.С. Толстые многосвязные пластины// А.С. Комодомианский, В.А. Шалдырван. - Киев: Наукова думка, 1978. - 240 с.
2. Галич В.А. Изгиб транслопных трехслойных плит// В.А. Галич, А.С. Космодамианский, В.А. Шалдырван// Доклады АН УССР. - 1981. - №1. - С. 35-39.
3. Галич В.А. Метод однородных решений в смешанных задачах теории упругости и термоупругости для толстых многосвязных пластин// В.А. Галич, А.С. Космодамианский, Е.В. Алтухов// Доклады АН УССР. - 1981. - №3. - С. 62-65.
4. Галич В.А. Однородные решения задач теории упругости для трехслойных плит с транслопными слоями

- ми/В.А. Галич// Теоретическая и прикладная механика. – Киев-Донецк: Выща школа, 1982. - №1. – С. 11-15.
5. Галич В.А. Однородные решения задач термоупругости для трехслойных пластин при неидеальном тепловом контакте слоїв/ В.А.Галич, А.С. Космодамианский// Доклады АН УССР. – 1982. - №3. – С. 26-28.
  6. Галич В.А. К определению трехмерного напряженного состояния трехслойных пластин с трансверсально-изотропными слоями/ В.А. Галич, В.А. Шалдырван// Известия АН СССР. Механика твердого тела. – 1982. - №6. – С. 131-134.
  7. Галич В.А. Смешанная задача теории упругости для изотропного цилиндра/ В.А. Галич, К.И. Горохов, А.С. Космодамианский // Доклады АН УССР. – 1986. -№7. – С. 36-39.
  8. Ворович И.И. Качественное исследование напряженно-деформированного состояния трехслойной плиты/ И.И. Ворович, И.Г. Кадомцев// Прикладная математика и механика. – 1970. – Вып.5. – С. 870-876.
  8. Vorovich I.I. Qualitative study of the stress-strain state of a three-layer plate / I.I. Vorovich, I.G. Kadomtsev // Applied Mathematics and Mechanics. - 1970. - Issue 5. - P. 870-876.

### References

1. Kosmodamiansky AS Thick multiply plates / A.S. Kosmodamiansky, V.A. Shaldirvan. - Kiev: Naukova Dumka, 1978. - 240 p.
2. Galich V.A. Bend of transtropic three-layer plates / V.A. Galich, A.S. Kosmodamiansky, V.A. Shaldirvan // Reports of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. - 1981. - №1. - P. 35-39.
3. Galich V.A. The method of homogeneous solutions in mixed problems of the theory of elasticity and thermoelasticity for thick multiply connected plates / V.A. Galich, A.S. Kosmodamiansky, E.V. Altukhov // Reports of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. - 1981. - №3. - P. 62-65.
4. Galich V.A. Homogeneous solutions of problems of the theory of elasticity for three-layer plates with transtropic layers / V.A. Galich // Theoretical and applied mechanics. - Kiev-Donetsk: Higher School, 1982. - №1. - P. 11-15.
5. Galich V.A. Homogeneous solutions of thermoelasticity problems for three-layer plates with non-ideal thermal contact of layers / V.A. Galich, A.S. Cosmodamian // Reports of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. - 1982. - №3. - P. 26-28.
6. Galich V.A. On the determination of the three-dimensional stress state of three-layer plates with transversely isotropic layers / V.A. Galich, V.A. Shaldirvan // News of the Academy of Sciences of the USSR. Solid mechanics. - 1982. - №6. - P. 131-134.
7. Galich V.A. Mixed problem of the theory of elasticity for an isotropic cylinder / V.A. Galich, K.I. Gorokhov, A.S. Cosmodamian // Reports of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. - 1986. -№7. - P. 36-39.

### Галич В.А. Смешанная пространственная задача теории упругости для трехслойных пластин.

*В статье рассмотрены вопросы поиска потенциального решения смешанной трехмерной задачи теории упругости для трехслойной пластины, симметричного относительно срединной плоскости строения. Пластина может быть ослаблена отверстиями. Слои пластины считаются изотропными. Перемещение на торцевых поверхностях пластины равны нулю, а между слоями пластины существует идеальный механический контакт. На боковой поверхности задаются напряжения, которые симметричны относительно поперечной координаты (задача типа растяжения-сжатия). В конечном итоге проблема сводится к задаче по нахождению собственных значений и собственных функций.*

**Ключевые слова:** смешанная задача, трехслойная пластина, идеальный механический контакт, потенциальное решение, перемещения.

### Galich V.A. Mixed spatial problem theory of elasticity for three-layer plates.

*The article deals with the search for a potential solution of the mixed three-dimensional problem of the theory of elasticity for a three-layer plate that is symmetrical with respect to the median plane of the structure. The plate may be weakened by the holes. Layers of the plate are considered isotropic. The displacement on the end surfaces of the plate is zero, and between the layers of the plate there is an ideal mechanical contact. On the side surface, stresses are specified that are symmetrical with respect to the transverse coordinate (a problem of the type of tension-compression). In the end, the problem is reduced to the problem of finding eigenvalues and eigenfunctions.*

**Keywords:** mixed problem, three-layer plate, ideal mechanical contact, potential solution, displacements.

**Галич В.А.** – к. фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри «Програмування та математики» СХУ ім. Володимира Даля, tetatet\_teta@ukr.net

*Рецензент:* д.т.н., проф., **Глікін М.А.**

Стаття подана 10.12.2018.

УДК 541.127: 542.943

## КІНЕТИКА І МЕХАНІЗМ РЕАКЦІЙ РІДИННОФАЗНОГО ОКИСНЕННЯ МЕТИЛБЕНЗЕНІВ ОКСИГЕНВМІСНИМИ ГАЗАМИ

Галстян Г. А., Кулешова Т. С., Галстян А. Г.

## KINETICS AND MECHANISM OF REACTIONS OF LIQUID-PHASE OXIDATION OF METHYLBENZENES BY OXYGEN-CONTAINING GASES

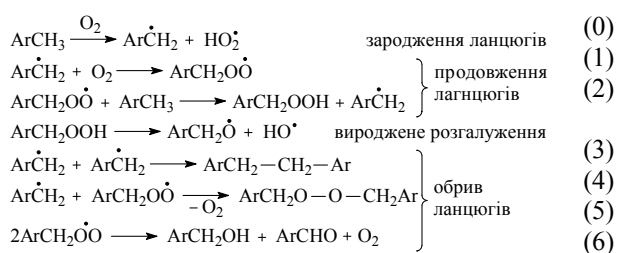
Galstyan G., Kuleshova T., Galstyan A.

Вивчено кінетику і механізм рідиннофазних реакцій метилбензенів з молекулярним киснем і його алотропною модифікацією – озоном. Показано, що реакції протікають переважно за схожими механізмами, за виключенням стадії утворення радикалів: при окисненні киснем навіть при високій температурі процес відбувається досить повільно, в той час, як при озонуванні метилбензенів швидкість утворення радикалів висока навіть в м'яких умовах.

**Ключові слова:** окиснення, озон, метилбензен, ацетатна кислота, озоноліз, каталізатор, перехідні метали

**Постанова проблеми.** Серед широкого спектру рідиннофазних процесів окиснення метилбензенів важливе місце займають реакції окиснення молекулярним киснем [1-3], а в останні роки і його алотропною модифікацією – озоном [4,5]. Саме цими методами, найбільш прямими і дешевими, в нас час одержують такі цінні окисненні сполуки ряду бензену, як ароматичні спирти, альдегіди та карбонові кислоти [2,3].

Процеси окиснення молекулярним киснем у рідкій фазі вивчені досить докладно [1,2,6]. Сьогодні механізм окиснення метилбензенів представляється як радикальна (або як іон-радикальна за умов каталізу) ланцюгова вироджено-розгалужена реакція:

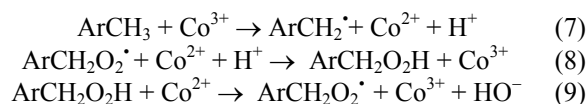


Характерною рисою кінетики цих процесів є аутоприскорення на початку реакції як по вихідній

речовині, так і по продуктах реакції [1]. Наявність індукційного періоду є наслідком низької швидкості зародження ланцюгів за реакцією (0), що призводить до повільного накопичення продуктів, відповідальних за вироджене розгалуження ланцюгів, тобто пероксидних радикалів (1) і гідропероксидів (2), та і реакція (3) протікає досить повільно (для п-ксилену при 110° С  $r_0 = 0,74 \cdot 10^{-9}$  моль/(л·с) [7]; для кумену  $k_0 = 2,7 \cdot 10^{12} \cdot \exp(30400/RT)$ , с<sup>-1</sup> [1]).

Для прискорення процесу окиснення на початку реакції створюють умови, в яких значною мірою підвищується швидкість утворення вільних радикалів за реакцією (0), а звідси і швидкість реакцій (1-3). Як правило, цієї мети досягають введенням в зону реакції малих добавок речовин (ініціаторів), здатних утворювати вільні радикали, підвищенням температури реакції або введенням каталізаторів – солей перехідних металів (в першу чергу кобальту, мангану чи їх суміші) [1]. Але і за умов каталізу бажані швидкості окиснення досягаються лише при високих температурах, коли сумарна швидкість утворення радикалів зростає настільки, що в системі миттєво досягається їх стаціонарна концентрація і зникає характерний період індукції [1].

Прискорююча дія каталізаторів пояснюється протіканням реакцій (7-9) [1]:



Наприклад, при окисненні толуену киснем у розчині ацетатної кислоти при температурі 70° С швидкість утворення вільних радикалів за реакціями (7,8) значно перевищує швидкість ініціювання ланцюгів за умов некаталітичного окиснення (0, 2) (табл. 1).

Таблиця 1

## Кінетичні параметри окиснення толуену в ацетатній кислоті при температурі 70° С

Номер реакції	k, л/(моль·с)	г, моль/(л·с)*
0		$< 10^{-9}$ [7] **
2	1,6 [8]	$1,7 \cdot 10^{-9}$
7	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$5,6 \cdot 10^{-4}$
8	$6,1 \cdot 10^{-2}$ [8]	$4,9 \cdot 10^{-3}$

\* - швидкість реакцій розраховували як для бімолекулярних реакцій, при розрахунку концентрації пероксидних радикалів застосовували метод стаціонарних концентрацій Боденштейна-Семенова [9].

\*\* - прийнята по даним для п-кселену.

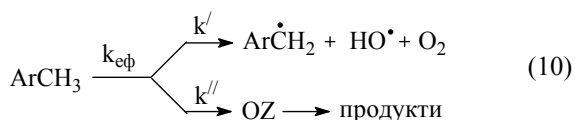
На практиці каталітичне ініціювання процесів окиснення метилбензенів молекулярним киснем ведуть при температурах 100-200° С і надлишковому тиску 0,5-5,0 МПа [2,3]. Жорсткі умови окиснення хоча і забезпечують економічні показники процесів, але створюють певні проблеми щодо забезпечення технологічних показників та апаратурного оформлення процесів. З цього приводу привертає до себе увагу рідиннофазна реакція озону з метилбензенами [4,5,8].

**Мета.** Метою роботи є дослідження кінетики та механізму реакцій окиснення метилбензенів озном у рідкій фазі, та проведення системного аналізу переваг озонування перед окисненням молекулярним киснем.

**Матеріали та результати дослідження.** Кінетичні закономірності реакцій окиснення метилбензенів озном досліджували за методикою, описаною у [4,5]. Концентрацію метилбензену і продуктів його подальшого перетворення у розчині визначали методом газорідинної хроматографії на хроматографі з полум'яно-іонізаційним детектором на колонці довжиною 3м і діаметром 4мм, заповненою носієм „Інертон-супер”, з нанесеною нерухомою фазою “FFAP” у кількості 5% від маси носія за наступних умов: температура термостату – за програмою 115-220 °С за 10 хв; швидкість газу носія (азот) – 1,8; водню – 1,8; повітря – 18 л/год. В якості внутрішнього стандарту використовували нітробензен.

Озон, як алотропна модифікація кисню, володіє найбільшим серед окисників окиснювально-відновним потенціалом (2.04В) і тому здатний окиснювати метилбензени з високою швидкістю навіть за нормальних умов (20° С, атмосферний тиск). Втім, проведені дослідження показали, що константи швидкості реакції озону з метилбензенами є ефективними, оскільки враховують атаку озном як за бічним ланцюгом (k'), так і за бензеновим кільцем (k'') (табл. 2, сх.10).

Тобто озон на відміну від молекулярного кисню здатний до руйнування ароматичної системи з утворенням озонідів [10], які далі перетворюються у відповідні аліфатичні оксигенпохідні речовини [11].



Таблиця 2

## Константи швидкості реакції озону з метилбензенами у розчині ацетатної кислоти при 25° С

Сполука	Початкова концентрація, моль/л		k	k'	k''
	[ArH] <sub>0</sub> · 10 <sup>2</sup>	[O <sub>3</sub> ] <sub>0</sub> · 10 <sup>4</sup>			
Бензен	4,11-17,28	0,11-0,94	0,13	0,00	0,13
Толуен	1,33-12,10	0,16-1,16	0,80	0,13	0,67
4-Ксилен	0,23-1,28	0,23-1,18	5,10	0,26	4,84
3-Ксилен	0,25-1,26	0,24-1,18	4,10	0,19	3,91
2-Ксилен	0,21-1,11	0,24-1,21	2,80	0,00	2,80
Мезитилен	0,54-1,21	0,33-2,15	45,00	0,00	45,00
Псевдокумен	0,08-0,34	0,33-2,15	27,80	0,00	27,80
4-Нітртолуен	2,43-11,52	0,13-1,41	0,038	0,008	0,030
3-Нітртолуен	2,43-11,52	0,13-1,41	0,035	0,007	0,028
3-Бромтолуен	0,92-6,12	0,15-1,04	0,41	0,11	0,30

Характерно, що у більшості випадків деструктивна дія озону є головним напрямом озонування метилбензенів (табл. 3). Наприклад, основними продуктами озонування толуену у розчині ацетатної кислоти при 30° С є озоніди – продукти руйнування ароматичної системи (83,7%), в значно менших кількостях утворюються на ранніх стадіях як проміжні продукти бензиловий спирт і бензальдегід, і на заключному етапі – бензойна кислота (16%).

Таблиця 3

## Окиснення метилбензенів озном в ацетатній кислоті при температурі 30° С

Сполука	Ступінь перетворення, %	Селективність за, %	
		бічним ланцюгом	бензеновим кільцем
Толуен	17,0	16,0	83,7
4-Ксилен	37,0	5,1	92,3
3-Ксилен	34,2	4,6	92,5
2-Ксилен	100,0	0,0	100,0
Мезителен	100,0	0,0	100,0
Псевдокумен	28,0	0,0	97,3
4-Нітртолуен	59,4	24,2	71,5
2-Нітртолуен	12,0	6,2	89,0
2,4-Динітртолуен	100,0	34,4	65,1
3-Бромтолуен	12,0	26,5	71,0
4-Хлртолуен	12,5	23,1	74,2

Таким чином, в системі озон-метилбензен-ацетатна кислота відбуваються паралельні, конкуруючі між собою реакції озону з ароматичним кільцем і метильною групою. Співвідношення цих напрямів залежить від будови метилбензену, умов проведення реакції і глибини окиснення (табл. 3).

Селективність окиснення за метильною групою знижується за наявності у структурі другої метильної групи – при окисненні 4-ксилену до 5,1%, а 3-ксилену до 4,6%. 2-Ксилен окиснюється озном виключно за ароматичним кільцем. Аналогічно озонуються і поліметилбензени (табл. 3).

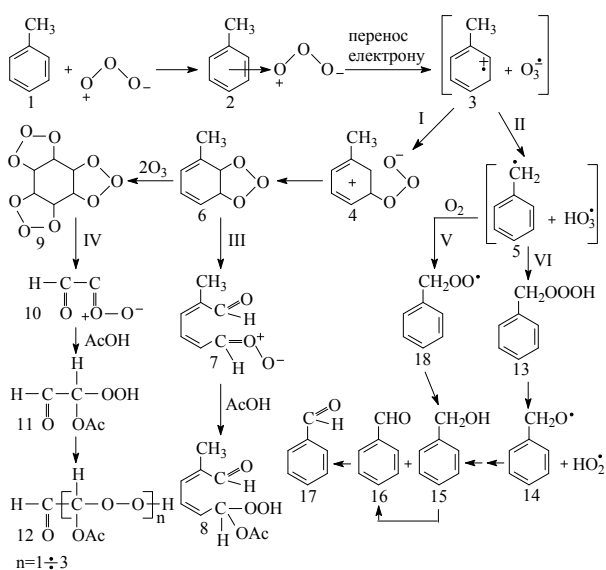
Метилбензени з акцепторними замісниками, або атомами галогенів є більш стійкими до дії озону, в результаті чого їх ефективна константа швидкості реакції з озном знижується, а селективність окис-

нення за метильною групою підвищується (табл. 2, 3).

Наведені вище експериментальні дані свідчать про те, що озон в реакціях окиснення проявляє себе як типова електрофільна частка, яка переважно атакує бензенове кільце при наявності в ньому замісників, що спричиняють гіперкон'югаційний ефект, і в меншій мірі атакує його в присутності акцепторних замісників або атомів галогенів, які проявляють значний -I-ефект.

Наведені вище та літературні дані [12-14] добре описуються наступною схемою 11:

Схема 11



За схемою спочатку утворюється π-комплекс (2) [14], далі з переносом електрону іон-радикальна пара (3), яка трансформується за двома напрямками: за першим – руйнується ароматичне кільце з утворенням пероксидів – мономерних (III) або олігомерних (IV) (механізм Кріге [14]); другий напрям веде до утворення продуктів окиснення за метильною групою.

При низьких температурах (≈ -30° С) радикальна пара (VI) перетворюється у гідротриоксид (7) [15-18], який далі розкладається з утворенням оксо-радикала (8) з подальшим його окисненням до бензойних кислот (11). При високих температурах окиснення відбувається за напрямом (V).

Механізм озонлізу бензенового кільця залежить від хімічної будови метилбензену. Наприклад, толуен озонується за напрямом (IV), а мезителен – за змішаною схемою – напрям III + IV (на моль субстрату витрачається 1,69 моль озону [17]).

Дослідження впливу різних чинників показало, що співвідношення швидкостей реакції за напрямком I і II залежить від температури реакції і більш суттєво – солі кобальту або мангану.

Наприклад, при озонуванні 3,4-динітротолуену у розчині ацетатної кислоти з підвищенням температури з 30 до 100° С вихід відповідної бензойної кис-

лоти зростає з 34,4 до 42,8 %. В присутності кобальт(II) ацетату значною мірою запобігається руйнування бензенового кільця, в результаті чого підвищується селективність окиснення за метильною групою до 96% (табл. 4).

Зміна механізму реакції відбувається за рахунок протікання двохстадійного окиснення, в межах якого має місце високошвидкісна реакція озону з відновною формою металу з утворенням активної форми  $Co^{3+}$  (12),



яка приймає участь у реакції (7)

Таблиця 4  
Окиснення метилбензенів озonom в ацетатній кислоті в присутності кобальт(II) ацетату при температурі 100° С.  $[ArCH_3]_0 = 0,4$ ;  $[Co(OAc)_2]_0 = 0,14$ ;  $[O_3]_0 = 5 \cdot 10^{-4}$  моль/л.

Метилбензен	Кінцевий продукт	Вихід цільового продукту, %
Толуен	Бензойна кислота	71,0
3-Ксилен	3-Толуїлова кислота	74,2
4-Ксилен	Терефталева кислота	73,3
Мезителен	Тримезинова кислота	71,0
3-Нітротолуен	3-Нітробензойна кислота	90,2
4-Нітротолуен	4-Нітробензойна кислота	95,3
3,4-Динітротолуен	3,4-Динітробензойна кислота	96,0

Константа швидкості реакції (12) при 20° С дорівнює  $9,3 \cdot 10^{-2}$  л/(моль·с), тобто на три порядки перевищує константу швидкості реакції озону з толуеном (табл. 2). В результаті чого озон витрачається майже цілком в реакції (12), і таким чином запобігається руйнування ароматичної системи.

Друга реакція каталізатора (7) нічим не відрізняється від той, яка протікає при окисненні молекулярним киснем. Вже на початковій стадії реакції в системі утворюється висока концентрація активних частинок  $Co^{3+}$ , за участі яких метилбензен залучається в окиснення за метильною групою (7-9). При досить високих концентраціях каталізатора (табл. 4) швидкість утворення бензильних радикалів (7) суттєво зростає, і як наслідок знижується швидкість деструкції бензенового кільця.

Характерною особливістю реакції озонування метилбензенів за умов некаталітичного і каталітичного окиснення є неланцюговий механізм реакції.

При окисненні толуену за відсутності каталізатора, коли  $k_2 = 1$ ;  $k' = k_{ef} \cdot 0,16 = 0,8 \cdot 0,16 = 0,13$  л/(моль·с) (0,16 – селективність окиснення за метильною групою в масових долях);  $\tau_2 = k_2 [ArCH_2O_2^{\cdot}][ArCH_3] = 1 \cdot 0,17 \cdot 10^{-6} \cdot 0,4 = 0,7 \cdot 10^{-7}$  моль/(л·с) (Концентрація пероксидного радикалу оцінювалася, виходячи з умови стаціонарності концентрацій реагуючих речовин:

$$k'' [\text{ArCH}_3]_0 [\text{O}_3]_0 = k_6 [\text{ArCH}_2\text{O}_2^*]^2,$$

$$\text{відкля } [\text{ArCH}_2\text{O}_2^*] = ((k'' [\text{ArCH}_3]_0 [\text{O}_3]_0) / k_6)^{1/2} =$$

$$= ((0,26 \cdot 10^{-4}) / 1,5 \cdot 10^8)^{1/2} = 0,17 \cdot 10^{-6} \text{ л/(моль}\cdot\text{с)}.$$

Звідси довжина ланцюгу  $v = r_2 / r'' = 0,7 \cdot 10^{-7} / 0,26 \cdot 10^{-4} = 2,7 \cdot 10^{-3}$ . В присутності каталізатора  $v = r_8 / r_7$ . Якщо  $r_8 = k_8 [\text{ArCH}_2\text{O}_2^*] [\text{Co}^{2+}]$ , а  $r_7 = k_7 [\text{ArCH}_3] [\text{Co}^{3+}]$  концентрація пероксидного радикалу дорівнює  $[\text{ArCH}_2\text{O}_2^*] = ((0,4 \cdot 0,14 \cdot 10^{-2}) / 1,5 \cdot 10^8)^{1/2} = 2,9 \cdot 10^{-6} \text{ моль/л}^1$ ;  $r_8 = 610 \cdot 2,9 \cdot 10^{-6} \cdot 0,14 = 2,48 \cdot 10^{-4} \text{ моль/(л}\cdot\text{с)}$ ;  $r_7 = 0,01 \cdot 0,4 \cdot 0,14 = 5,60 \cdot 10^{-4} \text{ моль/(л}\cdot\text{с)}$ , тоді  $v = 2,48 \cdot 10^{-4} / 5,60 \cdot 10^{-4} = 0,4$ .

**Висновок.** Незважаючи на схожість механізмів окиснення метилбензенів киснем і озоном, вони мають деякі відмінності: кисень атакує лише метильну групу за радикально-ланцюговим механізмом, а озон реагує за метильною групою і бензеновим кільцем, при цьому перший напрям озонування відбувається за радикально-неланцюговим механізмом, а другий – як іон-радикальна неланцюгова реакція.

Окиснення киснем супроводжується значним індукційним ефектом, для прискорення реакцію каталізують солями перехідних металів при підвищених температурах. Озонування відбувається навіть при низьких температурах, але переважно за бензеновим кільцем, і лише в присутності солей перехідних металів переважає окиснення за метильною групою.

### Література

1. Эмануэль Н. М. Цепные реакции окисления углеводородов в жидкой фазе / Н. М. Эмануэль, Е. Т. Денисов, З. К. Майзус. – М. : Наука, 1965. – 375 с.
2. Назимок В. Ф. Жидкофазное окисление алкилароматических углеводородов / В. Ф. Назимок, В. И. Овчинников, В. М. Потехин. – М. : Химия, 1987. – 240 с.
3. Новые нефтехимические процессы и перспективы развития нефтехимии / Под. ред. Калечицы И. В. – М. : Химия, 1970. – 328 с.
4. Галстян Г. А. Озон и его реакции с ароматическими соединениями в жидкой фазе / Г. А. Галстян, Н. Ф. Тюпало, С. Д. Разумовский. – Луганськ : ВУНУ, 2004. – 272 с.
5. Галстян Г. А. Жидкофазное каталитическое окисление ароматических соединений озоном / Г. А. Галстян, Н. Ф. Тюпало, А. Г. Галстян. – Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2009. – 415 с.
6. Harries C. D. Uber das Ozobenzol / C. D. Harries, V. Waiss // Ber. Dtsch. Chem. Ges. - 1904. -Bd.37. - S. 3431-3439.
7. Кутуев Л. А. Зарождение радикалов при жидкофазном окислении ксилолов / Л. А. Кутуев, Н. Н. Терпиловский // Кинетика и катализ. -1975. – Т.26, № 2. – С. 372.
8. Захаров И.В. Кобальтбромидный катализ окисления органических соединений / И.В.Захаров, Ю.В.Галетий, В.А. Адамян // Кинетика и катализ.– 1988.– Т.29, № 5.– С.1072–1077.
9. Семенов И.Н. Цепные реакции / И.Н. Семенов. – М. : Наука, 1986. – 535 с.

10. Разумовский С. Д. Озон и его реакции с органическими соединениями / С.Д. Разумовский, Г. Е. Заиков. – М. : Наука, 1974. – 322 с.
11. Bailey P.S. Ozonation in organic chemistry. Nonolefinic Compounds / P.S. Bailey // N-Y, L. Academic Press. - 1982.- V. 2. - 497 p.
12. Pryor W.A. Reaction of polycyclic aromatic hydrocarbons with ozone. Linear free-energy relationships and tests of likely rate-determining steps using simple molecularorbital correlations / W.A.Pryor, G.J. Gleicher, D.F. Church // J.Org.Chem.-1983.-V.48, №23.-P.4198-4202.
13. Авзянова Е. В. Кинетические закономерности превращения комплексов озона с аренами / Е. В. Авзянова, Н. Н. Кабальнова, В. В. Шерешовец // Изв. РАН сер. хим. - 1996.-№2.-С.371-373.
14. Criegee R. Ozone / R. Criegee // Chem. Zeitung. – 1975. – Bd. 99, № 3. – S. 138–141.
15. Pryor W.A. Formation of a charge-transfer complex, its thermal and the mechanism of decomposition of the hydrotrioxide / W.A. Pryor, O.Norio, D.F. Church // J.Am.Chem.Soc. - 1982. - V. 104, №21. - P.5813-5814.
16. Pryor W.A. Relative reactivities of alkylbenzenes and related compounds toward ozone. The mechanism of ozonation of benzylic positions W.A.Pryor, G.J. Gleicher, D.F. Church // J.Org.Chem.-1984.-V.49, №14.-P.2574-2578.
17. Nangia P.S. Thermochemistry and kinetics of Ozonation Reaction / P.S. Nangia, S.W. Benson // J.Am.Chem.Soc.- 1980.-V.102, №9.-P.3105-3115.
18. Nakagawa T. W. The Kinetics of Ozonation of Polyalkylbenzenes / T.W.Nakagawa, L. J. Andrews, R. M. Keefer // J. Amer. Chem. Soc. - 1960. - V.82. - P. 269-276.

### References

1. Emanuel N. M. Tsepnyie reaktsii okisleniya uglevodorodov v zhidkoy faze / N. M. Emanuel, E. T. Denisov, Z. K. Mayzus. – М. : Nauka, 1965. – 375 s.
2. Nazimok V. F. Zhidkofaznoe okislenie alkilaromaticheskikh uglevodorodov / V. F. Nazimok, V. I. Ovchinnikov, V. M. Potehin. – М. : Himiya, 1987. – 240s.
3. Novyie neftehimicheskie protsessyi i perspektivy razvitiya neftehimii / Pod. red. Kalechitsyi I. V. – М. : Himiya, 1970. – 328s.
4. Galstyan G. A. Ozon i ego reaktsii s aromaticeskimi soedineniyami v zhidkoy faze / G. A. Galstyan, N. F. Tyupalo, S. D. Razumovskiy. – Lugansk : VUNU, 2004. – 272 s.
5. Galstyan G. A. Zhidkofaznoe kataliticheskoe okislenie aromaticeskikh soedineniy ozonom / G.A. Galstyan, N.F. Tyupalo, A.G. Galstyan. – Lugansk: VNU im. V. Dalja, 2009. - 415 s.
6. Harries C. D. Uber das Ozobenzol / C. D. Harries, V. Waiss // Ber. Dtsch. Chem. Ges. - 1904. -Bd.37. - S. 3431-3439.
7. Kutuev L. A. Zarozhdenie radikalov pri zhidkofaznom okislenii ksilolov / L. A. Kutuev, N. N. Terpilovskiy // Kinetika i kataliz. -1975. – Т.26, # 2. – С. 372.
8. Zaharov I.V. Kobaltbromidnyiy kataliz okisleniya organicheskikh soedineniy / I.V.Zaharov, Yu.V.Galetiy, V.A. Adamyan // Kinetika i kataliz.– 1988.– Т.29, # 5.– С.1072–1077.
9. Semenov I.N. Tsepnyie reaktsii / I.N. Semenov. – М.: Nauka, 1986. – 535s.
10. Razumovskiy S. D. Ozon i ego reaktsii s organiceskimi soedineniyami / S.D. Razumovskiy, G. E. Zaikov. – М. : Nauka, 1974. – 322 s.

11. Bailey P.S. Ozonation in organic chemistry. Nonolefinic Compounds / P.S. Bailey // N-Y, L. Academic Press. - 1982. - V. 2. - 497 s.
12. Pryor W.A. Reaction of polycyclic aromatic hydrocarbons with ozone. Linear free-energy relationships and tests of likely rate-determining steps using simple molecularorbital correlations / W.A.Pryor, G.J. Gleicher, D.F. Church // J.Org.Chem.-1983.-V.48, #23.-P.4198-4202.
13. Avzyanova E. V. Kineticheskie zakonomernosti prevrascheniya kompleksov ozona s arenami / E. V. Avzyanova, N. N. Kabalnova, V. V. Shereshovets // Izv. RAN ser. him. - 1996. - #2.- S.371-373.
14. Criegee R. Ozone / R. Criegee // Chem. Zeitung. – 1975. – Bd. 99, # 3. – S. 138–141.
15. Pryor W.A. Formation of a charge-transfer complex, its thermal and the mechanism of decomposition of the hydrotrioxide / W.A. Pryor, O.Norio, D.F. Church // J.Am.Chem.Soc. - 1982. - V. 104, #21. - P.5813-5814.
16. Pryor W.A. Relative reactivities of alkylbenzenes and related compounds to ward ozone. The mechanism of ozonation of benzylic positions W.A.Pryor, G.J. Gleicher, D.F. Church // J.Org.Chem.-1984.-V.49, #14.-P.2574-2578.
17. Nangia P.S. Thermochemistry and kinetics of Ozonation Reaction / P.S. Nangia, S.W. Benson // J.Am.Chem.Soc.-1980.-V.102, #9.-P.3105-3115.
18. Nakagawa T. W. The Kinetics of Ozonation of Polyalkylbenzenes / T.W.Nakagawa, L. J. Andrews, R. M. Keefer // J. Amer. Chem. Soc. - 1960. - V.82. - P. 269-276.

**Галстян Г.А., Мамец Е.В., Галстян А.Г. Кинетика и механизм реакций жидкофазного окисления метилбензолов кислородсодержащими газами.**

*Изучена кинетика и механизм жидкофазных реакций метилбензолов с молекулярным кислородом и его аллотропной модификацией - озоном. Показано, что реакции протекают преимущественно по схожим механизмам, за исключением стадии образования радикалов: при окислении кислородом даже при высокой*

*температуре процесс происходит достаточно медленно, в то время, как при озонировании метилбензолов скорость образования радикалов высокая даже в мягких условиях.*

**Ключевые слова:** окисление, озон, метилбензол, ацетатная кислота, озонлиз, катализатор, переходные металлы

**Galstyan G., Kuleshova T., Galstyan A. Kinetics and mechanism of liquid-phase oxidation of methylbenzenes by oxygen-containing gases.**

*The kinetics and mechanism of liquid-phase reactions of methylbenzenes with molecular oxygen and its allotropic modification, ozone was studied. It has been shown that the reactions proceed predominantly through similar mechanisms, with the exception of the radical formation stage: during oxidation with oxygen, even at high temperatures, the process is rather slow, while with ozonation of methyl benzenes, the rate of radical formation is high even under mild conditions.*

**Keywords:** oxidation, ozone, methylbenzene, acetate acid, ozonolysis, catalyst, transition metals

**Галстян Генрі Аршавирович** – д.х.н., професор кафедри ХФТ Інституту хімічних технологій (м. Рубіжне) Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля, tov@iht.lg.ua

**Кулшова Тетяна Сергіївна** – аспірант кафедри ХФТ Інституту хімічних технологій (м. Рубіжне) Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля, tov@iht.lg.ua

**Галстян Андрій Генрійович** – д.х.н., професор, декан факультету хімічних наук Інституту хімічних технологій (м. Рубіжне) Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля, aggaalst@gmail.com.

*Рецензент:* д.х.н., проф. **Кондратов С.О.**

Стаття подана 10.12.2018

УДК: 532.546: 519.6

## ЗАДАЧА ИДЕНТИФИКАЦИИ КИНЕТИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА В УРАВНЕНИИ ДИФФУЗИИ–РЕАКЦИИ ПРИ НЕИЗВЕСТНОМ ГРАНИЧНОМ РЕЖИМЕ

Гусейнзаде С.О.

## THE PROBLEM OF IDENTIFICATION OF KINETIC COEFFICIENT IN THE DIFFUSION- REACTION EQUATION AT THE UNKNOWN BOUNDARY MODE

Huseynzade S. O.

*При неизвестном режиме на правой границе исследуемой области рассматривается обратная задача восстановления зависимости кинетического коэффициента реакции от времени нестационарного одномерного уравнения диффузии–реакции. Вместе с этим задаются дополнительное краевое условие на левой границе области, а также нелокальное краевое условие, которое содержит интеграл от искомого решения. Определенная задача преобразуется с использованием нелокального краевого условия путем интегрирования уравнения к коэффициентной обратной задаче с локальными условиями. Построен дискретный аналог краевой задачи с использованием явно-неявных схем для аппроксимации ее операторов. В качестве численного решения полученной разностной задачи предложен вычислительный алгоритм, основанный на сведении разностной задачи к двум линейным разностным задачам первого порядка. В результате получена явная формула для определения приближенного значения искомого коэффициента при каждом дискретном значении временной переменной. Проведены численные эксперименты для модельных задач с использованием предложенного вычислительного алгоритма.*

**Ключевые слова:** уравнение диффузии–реакции, коэффициентная обратная задача, нелокальное интегральное условие, разностная задача, явно-неявные схемы.

**Введение.** Для исследования многих нестационарных процессов в гидродинамике, химической промышленности, биологии, экологии, теплопередаче, акустике и т.д. применяется следующее одномерное нестационарное уравнение диффузии–реакции [1–4]

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} + r(x,t)u(x,t) = \frac{\partial}{\partial x} \left( k(x,t) \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \right) + f(x,t),$$

$$0 < x < l, \quad 0 < t \leq T \quad (1)$$

где  $u(x,t)$ – физическая величина (масса, концентрация, импульс, энергия и т.д.),  $r(x,t)$ – кинетический

коэффициент реакции,  $k(x,t)$ – коэффициент диффузии. Слагаемое  $r(x,t)u(x,t)$  характеризует процесс поглощения или выделения физической величины, а слагаемое  $f(x,t)$  характеризует действие внешнего источника.

Аналитические и численные исследования прямых начально-краевых задач для линейного уравнения диффузии–реакции рассмотрены в работах [1–4]. Необходимо отметить несомненный практический интерес поставленной задачи, ввиду важной физической значимости уравнения диффузии–реакции в различных областях при решении задач идентификации, связанных с восстановлением коэффициентов, внешнего источника, граничного режима и т.д.

В данной работе исследована коэффициентная обратная задача для уравнения (1), направленная на определение кинетического коэффициента реакции, представляя его функцией лишь от временной переменной, при отсутствии краевого условия на одной из границ рассматриваемой области. Общие методы решения обратных задач для уравнений математической физики исследованы авторами [5–7]. В работах [8, 9] исследованы некоторые коэффициентные обратные задачи для параболических уравнений в контексте их существования, единственности, разрешимости. Численные методы решения задач идентификации коэффициентов, входящих в уравнение диффузии–конвекции–реакции рассмотрены авторами [10–13].

Постановка задачи и метод решения. Рассмотрим одномерное нестационарное уравнение диффузии–реакции

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} + r(t)u(x,t) = \frac{\partial}{\partial x} \left( k(x,t) \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \right) + f(x,t),$$

$$0 < x < l, \quad 0 < t \leq T. \quad (2)$$



Для уравнения (2) известны следующие начальное и граничное условия

$$u(x, 0) = \varphi(x), \quad 0 \leq x \leq l, \quad (3)$$

$$k(x, t) \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = q(t), \quad 0 \leq t \leq T. \quad (4)$$

Предположим, что граница рассматриваемой области  $x = l$  не доступна для непосредственного измерения искомой физической величины и следовательно, точное представление условия на границе  $x = l$  не представляется возможным. Кроме того, также не известен кинетический коэффициент реакции  $r(t)$ . Очевидно, что, для корректной постановки задачи, необходимо задавать дополнительные условия. Представим дополнительные условия в следующем виде

$$u(0, t) = c(t), \quad 0 \leq t \leq T, \quad (5)$$

$$\int_0^l u(x, t) dx = e(t), \quad 0 \leq t \leq T. \quad (6)$$

Предполагается, что при этом выполняются условия согласования

$$c(0) = \varphi(0), \quad \int_0^l \varphi(x) dx = e(0).$$

Таким образом, задача заключается в определении функций  $u(x, t)$ ,  $r(t)$ , удовлетворяющих уравнению (2) и условиям (3)–(6).

Необходимо отметить, что в данной задаче дополнительное условие (6) не является локальным условием для уравнения (2).

Сначала задачу (2)–(6) сведем к задаче с локальными условиями. Проведем дифференцирование соотношения (6) по переменной  $t$

$$\int_0^l \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} dx = \frac{de(t)}{dt}.$$

Подставим в это соотношение выражения для  $\frac{\partial u(x, t)}{\partial t}$  из уравнения (2)

$$\int_0^l \left[ -r(t)u(x, t) + \frac{\partial}{\partial x} \left( k(x, t) \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \right) + f(x, t) \right] dx = \frac{de(t)}{dt}$$

Выполнив интегрирования по частям и учитывая условия (4), (6) получим

$$-r(t)e(t) + k(x, t) \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=l} - q(t) + g(t) = \frac{de(t)}{dt},$$

где  $g(t) = \int_0^l f(x, t) dx$ .

Разрешив последнее уравнение относительно  $k(x, t) \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=l}$ , получим недостающее краевое условие для уравнения (2) на границе  $x = l$

$$k(x, t) \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=l} = \frac{\partial e(t)}{\partial t} + r(t)e(t) + q(t) - g(t). \quad (7)$$

Теперь задача заключается в определении функций  $u(x, t)$ ,  $r(t)$ , которые удовлетворяют уравнению (2), начальному условию (3) и локальным граничным условиям (4), (5), (7). Данная задача относится к классу граничных обратных задач [5–7]. Построим дискретный аналог дифференциальной задачи (2)–(5), (7). С этой целью введем равномерную разностную сетку

$$\bar{\omega} = \{ (t_j, x_i) : x_i = i\Delta x, t_j = j\Delta t, i = 0, 1, 2, \dots, n, j = 0, 1, 2, \dots, m \}$$

в прямоугольной области  $\{0 \leq x \leq l, 0 \leq t \leq T\}$  с шагами  $\Delta x = l/n$  по переменной  $x$  и  $\Delta t = T/m$  по времени  $t$ . Используя явную аппроксимацию по времени для оператора реакции, а неявную аппроксимацию для оператора диффузии, дискретный аналог задачи (2)–(5), (7) на сетке  $\bar{\omega}$  представим следующим образом

$$\begin{aligned} \frac{u_i^j - u_i^{j-1}}{\Delta t} + r^j u_i^{j-1} &= \frac{1}{\Delta x} \left[ k_{i+1/2}^j \frac{u_{i+1}^j - u_i^j}{\Delta x} - k_{i-1/2}^j \frac{u_i^j - u_{i-1}^j}{\Delta x} \right] + f_i^j, \\ i &= 1, 2, \dots, n-1, \\ k_0^j \frac{u_1^j - u_0^j}{\Delta x} &= q^j, \\ k_n^j \frac{u_n^j - u_{n-1}^j}{\Delta x} &= \frac{e^j - e^{j-1}}{\Delta t} + r^j e^j + q^j - g^j, \\ u_0^j &= c^j, \\ j &= 1, 2, \dots, m, \\ u_i^0 &= \varphi(x_i), \quad i = 0, 2, \dots, n, \end{aligned}$$

где

$$u_i^j \approx u^j(x_i, t_j), \quad r^j \approx r(t_j), \quad f_i^j = f(x_i, t_j), \quad k_{i\pm 1/2}^j = k(x_i \pm \Delta x / 2),$$

$$q^j = q(t_j), \quad e^j = e(t_j), \quad g^j = g(t_j), \quad c^j = c(t_j).$$

Преобразуем полученную систему разностных уравнений к виду

$$\begin{aligned} a_i u_{i-1}^j - d_i u_i^j + b_i u_{i+1}^j &= -u_i^{j-1} \Delta x^2 - f_i^j \Delta x^2 \Delta t + r^j u_i^{j-1} \Delta x^2 \Delta t \\ i &= 1, 2, \dots, n-1, \end{aligned} \quad (8)$$

$$u_1^j = u_0^j + q^j \Delta x / k_0^j, \quad (9)$$

$$u_0^j = c^j, \quad (10)$$

$$u_n^j = u_{n-1}^j + \Delta x (q^j - g^j + (e^j - e^{j-1}) / \Delta t) / k_n^j + r^j e^j \Delta x / k_n^j, \quad (11)$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, m, u_i^0 = \varphi_i, \quad (12)$$

где  $a_i = \Delta t k_{i-1/2}^j, b_i = \Delta t k_{i+1/2}^j, d_i = a_i + b_i + \Delta x^2$ .

Разностная задача (8)–(12) представляет собой систему линейных алгебраических уравнений, в которой в качестве неизвестных выступают приближенные значения искомых функций  $u(x, t)$  и  $r(t)$  в узлах разностной сетки  $\bar{\omega}$ , т.е.  $u_i^j, r^j, i = 0, 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, 3, \dots, m$ .

Предположим, что решение системы уравнений (8)–(12) при каждом фиксированном значении  $j, j = 1, 2, \dots, m$  можно представить в виде

$$u_i^j = \alpha_i u_{i-1}^j + \beta_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (13)$$

где  $\alpha_i, \beta_i$  – неизвестные пока коэффициенты. Запишем аналогичное выражение для  $u_{i+1}^j$

$$u_{i+1}^j = \alpha_{i+1} u_i^j + \beta_{i+1}.$$

Подставляя выражение для  $u_{i+1}^j$  в уравнение (8), получим следующие нелинейные уравнения для определения коэффициентов  $\alpha_i, \beta_i$

$$\alpha_i = \frac{a_i}{d_i - b_i \alpha_{i+1}}, \quad (14)$$

$$\beta_i = \frac{b_i}{d_i - b_i \alpha_{i+1}} \beta_{i+1} + \frac{u_i^{j-1} \Delta x^2 + f_i^j \Delta x^2 \Delta t}{d_i - b_i \alpha_{i+1}} - \frac{u_i^{j-1} \Delta x^2 \Delta t}{d_i - b_i \alpha_{i+1}} r^j, \quad (15)$$

$$i = n-1, n-2, \dots, 1.$$

Уравнения (14), (15) представляют собой нелинейные разностные уравнения первого порядка. Необходимо задавать начальные значения коэффициентов  $\alpha_i, \beta_i$  для решения этих уравнений. Эти значения определим из требования эквивалентности представления (13) при  $i = n$ , т.е.  $u_n^j = \alpha_n u_{n-1}^j + \beta_n$ , условию (11)

$$\alpha_n = 1,$$

$$\beta_n = \Delta x (q^j - g^j + (e^j - e^{j-1}) / \Delta t) / k_n^j + r^j e^j \Delta x / k_n^j. \quad (16)$$

Таким образом, определив  $\alpha_n$ , остальные значения коэффициентов  $\alpha_i, i = n-1, n-2, \dots, 1$  последовательно можно найти по формуле (14).

С целью разделения переменных в нелинейном уравнении для  $\beta_i$ , представим его в виде [14]

$$\beta_i = \xi_i + \eta_i r^j, \quad i = n-1, n-2, \dots, 1, \quad (17)$$

где  $\xi_i, \eta_i$  – неизвестные переменные.

Подставив соотношение (17) в уравнение (15), будем иметь

$$\xi_i + \eta_i r^j = \frac{b_i}{d_i - b_i \alpha_{i+1}} \xi_{i+1} + \frac{b_i}{d_i - b_i \alpha_{i+1}} \eta_{i+1} r^j + \frac{u_i^{j-1} \Delta x^2 + f_i^j \Delta x^2 \Delta t}{d_i - b_i \alpha_{i+1}} - \frac{u_i^{j-1} \Delta x^2 \Delta t}{d_i - b_i \alpha_{i+1}} r^j$$

или

$$\left[ \xi_i - \frac{b_i}{d_i - b_i \alpha_{i+1}} \xi_{i+1} - \frac{u_i^{j-1} \Delta x^2 + f_i^j \Delta x^2 \Delta t}{d_i - b_i \alpha_{i+1}} \right] + r^j \left[ \eta_i - \frac{b_i}{d_i - b_i \alpha_{i+1}} \eta_{i+1} + \frac{u_i^{j-1} \Delta x^2 \Delta t}{d_i - b_i \alpha_{i+1}} \right] = 0$$

Соотношение (17) также подставим в (16)

$$\xi_n + \eta_n r^j = \Delta x (q^j - g^j + (e^j - e^{j-1}) / \Delta t) / k_n^j + r^j e^j \Delta x / k_n^j$$

Из последних соотношений получим следующие разностные задачи для определения вспомогательных переменных  $\xi_i, \eta_i$

$$\xi_i - \frac{b_i}{d_i - b_i \alpha_{i+1}} \xi_{i+1} - \frac{u_i^{j-1} \Delta x^2 + f_i^j \Delta x^2 \Delta t}{d_i - b_i \alpha_{i+1}} = 0, \quad i = n-1, n-2, \dots, 1, \quad (18)$$

$$\xi_n = \Delta x (q^j - g^j + (e^j - e^{j-1}) / \Delta t) / k_n^j. \quad (19)$$

$$\eta_i - \frac{b_i}{d_i - b_i \alpha_{i+1}} \eta_{i+1} + \frac{u_i^{j-1} \Delta x^2 \Delta t}{d_i - b_i \alpha_{i+1}} = 0, \quad i = n-1, n-2, \dots, 1, \quad (20)$$

$$\eta_n = e^j \Delta x / k_n^j \quad (21)$$

Разностные задачи (18), (19) и (20), (21) представляют собой линейные разностные задачи первого порядка. Решения этих задач можно записать в явном виде. С этой целью уравнение (18) запишем в виде

$$\xi_i = s_i \xi_{i+1} + y_i$$

$$\text{где } s_i = \frac{b_i}{d_i - b_i \alpha_{i+1}}, \quad y_i = \frac{u_i^{j-1} \Delta x^2 + f_i^j \Delta x^2 \Delta t}{d_i - b_i \alpha_{i+1}}.$$

Подставив сюда выражение для  $\xi_{i+1}$

$$\xi_{i+1} = s_{i+1} \xi_{i+2} + y_{i+1},$$

будем иметь

$$\xi_i = s_i s_{i+1} \xi_{i+2} + s_i y_{i+1} + y_i.$$

Далее, подставляя в последнее уравнение выражения для  $\xi_{i+2}, \xi_{i+3}, \dots, \xi_{n-1}$ , получим

$$\xi_i = \xi_n \prod_{k=i}^{n-1} s_k + \sum_{\substack{k=i+1 \\ k \leq n-1}}^{n-1} y_k \prod_{v=i}^{k-1} s_v + y_i,$$

$$i = n-1, n-2, \dots, 1.$$

Аналогично определяется решение разностной задачи (20), (21)

$$\eta_i = \eta_n \prod_{k=i}^{n-1} s_k + \sum_{\substack{k=i+1 \\ k \leq n-1}}^{n-1} \theta_k \prod_{v=i}^{k-1} s_v + \theta_i,$$

$$i = n-1, n-2, \dots, 1.$$

где 
$$\theta_i = -\frac{u_i^{j-1} \Delta x^2 \Delta t}{d_i - b_i \alpha_{i+1}}.$$

Учитывая представление (17) для коэффициентов  $\beta_i$ , решение системы уравнений (8)–(12) при каждом фиксированном значении  $j$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$  можно представить в виде рекуррентного соотношения

$$u_i^j = \alpha_i u_{i-1}^j + \xi_i + \eta_i r^j, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (22)$$

В последнем соотношении принимая  $i = 1$

$$u_1^j = \alpha_1 u_0^j + \xi_1 + \eta_1 r^j$$

и учитывая условия (9), (10), будем иметь

$$c^j + q^j \Delta x / k_0^j = \alpha_1 c^j + \xi_1 + \eta_1 r^j.$$

Отсюда можно определить приближенное значение искомой функции  $r(t)$  при  $t = t_j$ , т.е.  $r^j$

$$r^j = \frac{c^j(1 - \alpha_1) + q^j \Delta x / k_0^j - \xi_1}{\eta_1}. \quad (23)$$

Таким образом, вычислительный алгоритм решения разностной задачи (8)–(12) по определению  $u_i^j, i = \overline{1, n}$  и  $r^j$  при каждом фиксированном значении  $j = 1, 2, \dots, m$ , основан на решении двух линейных разностных задач первого порядка (18), (19) и (20), (21) относительно вспомогательных переменных  $\xi_i, \eta_i, i = \overline{1, n}$ , определения  $r^j$

из (23) и использовании представления (22) для вычисления  $u_i^j, i = \overline{1, n}$ .

**Результаты численных расчетов.** Проведены численные эксперименты для модельных задач на основе предложенных вычислительных алгоритмов. Далее приведены результаты численного эксперимента для следующей модельной задачи.

Задача. Необходимо найти функции  $u(x, t)$  и  $r(t)$ , которые удовлетворяют следующие условия

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial t} + r(t)u(x, t) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{(x+1)^2}{12(t+1)} \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \right) + 10(x+1)^2 t,$$

$$0 < x < 1, \quad t > 0,$$

$$u(x, 0) = 2(x+1)^2,$$

$$u(0, t) = 2\sqrt{t+1},$$

$$\left. \frac{(x+1)^2}{12(t+1)} \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{1}{3\sqrt{t+1}},$$

$$\int_0^1 u(x, t) dx = \frac{14\sqrt{t+1}}{3}.$$

Точным решением данной задачи являются функции

$$u(x, t) = 2(x+1)^2 \sqrt{t+1}, \quad r(t) = \frac{5t}{\sqrt{t+1}}.$$

Численные расчеты проводились в двух вариантах. Первая серия расчетов выполнялась с использованием невозмущенных входных данных. В таблице 1 представлены результаты численного решения задачи при использовании невозмущенных данных: в ней  $t_*$  – время,  $r^t$  – точные значения функции  $r(t)$ ,  $\bar{r}$  – вычисленные значения  $r(t)$  при невозмущенных данных. Результаты численного эксперимента показали, что искомая функция  $r(t)$  восстанавливается с достаточно высокой точностью при всех расчетных сетках по времени. При этом максимальная относительная погрешность восстановления искомого коэффициента не превышает 0.2 %.

Вторая серия расчетов проводились при наложении на  $c(t) = u(0, t)$  некоторой функции, моделирующей погрешность входных данных

$$\tilde{c}(t) = c(t) + \delta c(t) \sigma(t),$$

где  $\sigma(t)$  – случайный процесс, моделируемый с помощью датчика случайных чисел,  $\delta$  – уровень погрешности. Уровень погрешности определен как  $\delta = 0.01$  и  $\delta = 0.05$ . Результаты численных расчетов при использовании возмущенных входных данных представлены в таблице 2: в ней  $\tilde{r}$  вычисленные значения  $r(t)$  при возмущенных данных.

Таблица 1  
Численные результаты при невозмущенных  
входных данных

t,сек.	$r^t$	$\bar{r}$		
		$\Delta t = 0.001$	$\Delta t = 0.005$	$\Delta t = 0.01$
0.5	2.041	2.042	2.045	2.048
1.0	3.536	3.537	3.541	3.545
1.5	4.743	4.744	4.749	4.754
2.0	5.774	5.775	5.779	5.784
2.5	6.682	6.683	6.687	6.692
3.0	7.500	7.502	7.505	7.510
3.5	8.250	8.251	8.255	8.259
4.0	8.944	8.946	8.949	8.954
4.5	9.594	9.595	9.599	9.603
5.0	10.206	10.208	10.210	10.214

Таблица 2  
Численные результаты при возмущенных  
входных данных

t	$r^t$	$\bar{r}, \delta = 0.01$		$\bar{r}, \delta = 0.05$	
		$\Delta t = 0.005$	$\Delta t = 0.05$	$\Delta t = 0.01$	$\Delta t = 0.05$
1	3.536	4.253	3.645	2.882	3.866
2	5.774	6.007	5.934	7.333	6.337
3	7.500	6.655	7.580	8.122	7.675
4	8.944	8.372	8.899	9.262	8.516
5	10.206	10.180	10.177	7.413	9.864
6	11.339	11.846	11.357	9.137	11.233
7	12.374	13.951	12.351	12.784	12.071
8	13.333	13.475	13.287	11.672	12.926
9	14.230	13.768	14.210	12.384	13.954
10	15.076	15.831	15.062	14.780	14.840

Результаты численных расчетов показали, что при использовании возмущенных входных данных, погрешность имеет флуктуационный характер и искомая функция  $r(t)$  восстанавливается с определенной погрешностью. На уровне погрешности  $\delta = 0.01$  при  $\Delta t = 0.005$  максимальная относительная погрешность восстановления искомого коэффициента превышает 19%, а при  $\Delta t = 0.05$  максимальная относительная погрешность не превышает 3%. А на уровне погрешности  $\delta = 0.05$  при  $\Delta t = 0.01$  максимальная относительная погрешность восстановления искомого коэффициента превышает 37%, а при  $\Delta t = 0.05$  – не превышает 5%. Анализ результатов численного экспериментирования свидетельствует, что для случая возмущенных входных данных использование малых шагов по времени дает противоположный эффект по сравнению с численным решением прямых краевых задач. Следовательно, увеличивая величины шага разностной сетки по времени можно обеспечить устойчивость решения обратной задачи.

#### Л и т е р а т у р а

- Андерсон Д., Таннеhill Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. М.: Мир, 1990. Том 1. 384 с.
- Уизем Дж. Б. Линейные и нелинейные волны. М.: Мир, 1977. 638 с.

- Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло-и массообмена. М.: Наука, 1984. 288 с.
- Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980. 528 с.
- Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В. Экстремальные методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1988. 288 с.
- Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Численные методы решения обратных задач математической физики. М.: Издательство ЛКИ, 2009. 480 с.
- Кабанихин С. И. Обратные и некорректные задачи. Новосибирск: Сибирское научное издательство, 2009. 457 с.
- Камынин В. Л. Обратная задача определения младшего коэффициента в параболическом уравнении при условии интегрального наблюдения. Матем. заметки, 2013, том 94, выпуск 2, с. 207–2175.
- Кожанов А. И. Параболические уравнения с неизвестными коэффициентами, зависящими от времени. Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 2017, том 57, номер 6, с. 961–972.
- Vabishchevich P.N., Vasil'ev V.I. Computational algorithms for solving the coefficient inverse problem for parabolic equations // Inverse Problems in Science and Engineering. 2016. V. 24. P. 42–59.
- Вабищевич П. Н., Клибанов М. В. Вычислительная идентификация старшего коэффициента параболического уравнения// Дифференциальные уравнения, 2016, том 52, № 7, с. 896–903.
- Nazim B. Kerimov, Mansur I. Ismailov. An inverse coefficient problem for the heat equation in the case of nonlocal boundary conditions. Journal of Mathematical Analysis and Applications, Volume 396, Issue 2, 2012, P. 546-554.
- Гамзаев Х.М. Численный метод решения коэффициентной обратной задачи для уравнения диффузии – конвекции – реакции. Вестник Томского государственного университета, Математика и Механика, 2017, №50, с.67–78.
- Gamzaev Kh.M. Numerical Solution of Combined Inverse Problem for Generalized Burgers Equation. Journal of Mathematical Sciences, Volume 221, Number 6, March 28, 2017. p. 833-839.

#### References

- Anderson D., Tannehill K., Pletcher R. Computational fluid mechanics and heat transfer. Vol 1. New York, 1984. 392 p.
- Whitham G.B. Linear and Nonlinear Waves. John Wiley & Sons Inc., 1974. 629 p.
- Paskonov V.M., Polejaev V.I., Chudov L.A. Chislennoe modelirovanie prosessov teplo-i-massoobmena [Numerical modeling of heat and mass transfer processes]. Moscow, Nauka, 1984. 288 p.
- Roache P.J. Computational fluid dynamics. Albuquerque, Hermosa Publishers, 1976. 446 p.
- Alifanov O.M., Artyukhin E.A., Rumyantsev S.V. Ekstremalniye metodi resheniya nekorrektnich zadach [Extreme methods for solving ill-posed problems]. Moscow.: Nauka, 1988. 288 p.
- Samarsky A.A., Vabishchevich P.N. Chislennye metodi resheniya obratnich zadach matematicheskoy fiziki [Numerical methods for solving inverse problems of mathematical physics]. Moscow, Publishing house LCI, 2009. 480 p.

7. Kabanikhin S. I. Obratniye I nekorrektye zadachi [Inverse and Ill-Posed Problems] Siberian Scientific publishers, Novosibirsk, 2009 , 457 p.
8. Kamynin V. L. The Inverse Problem of Determining the Lower-Order Coefficient in Parabolic Equations with Integral Observation // Mathematical Notes, 2013, 94:2, p. 205–213.
9. Kozhanov A. I. Parabolic equations with unknown time-dependent coefficients .Computational Mathematics and Mathematical Physics, 2017, 57:6, p. 956–966 .
10. Vabishchevich P.N., Vasil'ev V.I. Computational algorithms for solving the coefficient inverse problem for parabolic equations // Inverse Problems in Science and Engineering. 2016. V. 24. P. 42–59.
11. Vabishchevich P.N., Klibanov M. V. Numerical identification of the leading coefficient of a parabolic equation//Differential Equations. 2016, Vol. 52, Issue 7, pp 855–862.
12. Nazim B. Kerimov , Mansur I. Ismailov . An inverse coefficient problem for the heat equation in the case of nonlocal boundary conditions. Journal of Mathematical Analysis and Applications, Volume 396, Issue 2, 2012, Pages 546-554.
13. Gamzaev Kh.M. (2017) A numerical method for solving the coefficient inverse problem for diffusion-convection-reaction equation. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. matematika i mekhanika [Tomsk state university Journal of Mathematics and Mechanics]. 50. pp. 67–78.
14. Gamzaev Kh.M. Numerical Solution of Combined Inverse Problem for Generalized Burgers Equation. Journal of Mathematical Sciences, Volume 221, Number 6 ,March 28, 2017. p. 833-839.

**Гусейнзаде С.О. Задача ідентифікації кінетичного коефіцієнту в рівнянні дифузії-реакції при невідомому граничному режимі**

*Розглядається зворотна задача по відновленню залежності кінетичного коефіцієнту реакції від часу нестационарного одновимірного рівняння дифузії-реакції при невідомому режимі на правій межі даної області. При цьому задаються нелокальна крайова умова, що містить інтеграл від шуканого рішення, а також додаткова крайова умова на лівій межі області. Поставлена задача шляхом інтегрування рівняння з використанням нелокальної крайової умови перетворюється до коефіцієнтної зворотньої задачі з локальними умовами. Використовуючи явно-неявні схеми для апроксимації операторів крайової задачі, побудований її дискретний аналог. Для чисельного рішення отриманої різнисної задачі пропонується об-*

*числювальний алгоритм, заснований на зведенні різнисної задачі до двох лінійним різницеvim завданням першого порядку. В результаті отримана явна формула для визначення наближеного значення шуканого коефіцієнта при кожному дискретному значенні тимчасової змінної. На основі запропонованого обчислювального алгоритму були проведені чисельні експерименти для модельних задач.*

**Ключові слова:** *рівняння дифузії-реакції, коефіцієнтна зворотна задача, нелокальна інтегральна умова, різницева задача, явно-неявні схеми.*

**Huseynzade S.O. The problem of identification of kinetic coefficient in the diffusion-reaction equation at the unknown boundary mode**

*We consider the inverse problem of restoring the dependence of the kinetic response coefficient on the time of the nonstationary one-dimensional diffusion-reaction equation under the unknown regime on the right boundary of the region under consideration. In this case, a non-local boundary condition is established that contains the integral of the desired solution, and also an additional boundary condition on the left boundary of the domain. The problem is solved by integrating the equation with the use of a nonlocal boundary condition, which is transformed to a coefficient inverse problem with local conditions. Using explicitly implicit schemes for approximating the operators of the boundary value problem, a discrete analogue is constructed. For numerical solution of the obtained difference problem, a computational algorithm based on reduction of the difference problem to two linear difference problems of the first order is proposed. As a result, an explicit formula is obtained to determine the approximate value of the sought-for coefficient for each discrete value of the time variable. Based on the proposed computational algorithm, numerical experiments were performed for model problems.*

**Keywords:** *diffusion reaction equation, coefficient inverse problem, nonlocal integral condition, difference problem, explicit-implicit schemes.*

**Гусейнзаде С. О.** – доцент кафедри общей и прикладной математики Азербайджанского государственного университета нефти и промышленности, e-mail: [sevilhuseynzade@gmail.com](mailto:sevilhuseynzade@gmail.com)

*Рецензент:* д.е.н., проф. **Д'яченко Ю.Ю.**

Стаття подана 16.11.2018

УДК 544.478.12

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ОЧИСТКИ СКИДНИХ ГАЗІВ ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Квасова А. В., Зубцов Є. І., Тарасов В. Ю.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF WASTE GAS TREATMENT TECHNOLOGIES OF THERMAL POWER PLANT

Kvasova A. V., Zubtsov Y. I., Tarasov V. Yu.

*Представлено порівняльний аналіз технологій очистки скидних газів теплових електростанцій. Показано переваги і недоліки кожної з існуючих технологій очистки. Вибрано центр плану для повнофакторного експерименту другого порядку для подальшої побудови математичної моделі.*

**Ключові слова:** Теплові електростанції, адсорбція, монооксид вуглецю, повнофакторний експеримент

**Вступ.** В наш час в світі все більше уваги приділяється зменшенню забруднення навколишнього середовища. Одне з основних завдань – поліпшення стану атмосферного повітря. Одним з рамових законів в сфері охорони атмосферного повітря є Паризька угода, яка прийшла на зміну Кіотському протоколу. Вона передбачає регулювання заходів зі зменшення викидів діоксиду вуглецю з 2020 року та Набула чинності з 4 листопада 2016 року [1].

Найбільше забруднення повітря відбувається внаслідок викидів в атмосферу шкідливих речовин при роботі енергетичних установок, що працюють на вуглеводному паливі (вугілля, гас, мазут, дизельне паливо) [2]. Одним з основних і найбільш великомасштабних джерел забруднення атмосфери є теплові електростанції (ТЕС). На частку ТЕС припадає більше 30% викидів шкідливих речовин в атмосферу. [3] Основні компоненти, що викидаються в атмосферу при спалюванні різних видів палива нетоксичні вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ ) і водяна пара ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Крім цього в повітряне середовище викидаються такі шкідливі речовини, як оксиди сірки, нітрогену, вуглецю, зокрема чадний газ ( $\text{CO}$ ), сполуки важких металів, таких як свинець (Pb), сажа, вуглеводні, незгорілі частки твердого палива, канцерогенний бенз(а)пірен ( $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$ ). [4] При спалюванні твердого палива в котлоагрегатах

ТЕС утворюється велика кількість золи, діоксиду сірки ( $\text{SO}_2$ ), оксидів нітрогену. [5]

Дані про щорічні викиди ТЕС в Україні представлені в таблиці 1. [6]

Таблиця 1

Дані про щорічні викиди ТЕС в Україні

Назва викиду	Кількість, т/рік
Сірчистий ангідрид	5765,7
Двоокис нітрогену	4576
Окис нітрогену	743,5
Зважені частки (пил, аерозолі)	148,3
Зола	2205,7
Окис вуглецю	50,3
Вуглеводні	1,8
Формальдегід	6
Важкі метали	5

**Актуальність роботи.** В Луганській області викиди в атмосферне повітря постачальників електроенергії, газу та пари у 2016 році склали 75,9 тис. т, що складає 48,8% від обсягів викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря за всіма видами економічної діяльності в регіоні. Викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря від стаціонарних джерел складають більше 80% від загального обсягу викидів. За період 2014 – 2016 рр. спостерігається наступна динаміка викидів забруднюючих речовин від стаціонарних джерел наведена в таблиці 2.

Викиди в атмосферне повітря від найбільшої в регіоні ВП «Луганська ТЕС» ТОВ «ДТЕК СХІДЕНЕРГО», що працює на вугіллі, за 2016 р. склали 73217,289 т/рік, а саме в т/рік (частка від загального обсягу викидів об'єкту у %): речовин у вигляді суспендованих твердих частинок - 9433,84 (12,8%); сполуки азоту - 9240,541 (12,6%); діоксид та інші сполуки сірки - 53429,39 (73,0%); вуглецю оксид – 440,698 (0,6%); неметанові леткі органічні сполуки – 621,337 (0,85%); метан – 38,362 (0,05%). Таким чином, аналіз динаміки викидів забруднюю-

чих речовин від стаціонарних джерел, зокрема від електро- та теплогенеруючих підприємств, показує тенденцію до збільшення негативного антропогенного навантаження на атмосферне середовище цього виду економічної діяльності в регіоні та в цілому в Україні. Необхідно також відмітити, що джерела викидів ТЕС (ВП «Луганська ТЕС» ТОВ «ДТЕК СХІДЕНЕРГО») оснащені газоочисними установками лише від речовин у вигляді суспендованих твердих частинок з ефективністю роботи 93,51% [7]. Тому особливу увагу треба приділити розробці методів зниження викидів сполук сірки, нітрогену та вуглецю.

Таблиця 2

**Динаміка викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від стаціонарних джерел в Луганській області**

Назва забруднюючої речовини	Обсяг викидів за роками, тис.т		
	2014	2015	2016
1. Загальний обсяг викидів забруднюючих речовин	244,5	133,0	155,5*
2. Від стаціонарних джерел:	197,8	115,2	155,5
метали та їх сполуки	0,6	0,2	0,3
стійкі органічні забруднювачі	0,0	0,0	0,0
оксид вуглецю	67,1	35,8	53,8
діоксид та інші сполуки сірки	63,9	44,8	62,9
оксиди азоту	22,0	10,4	13,0
речовини у вигляді суспендованих твердих частинок	26,3	15,0	17,0
3. Парникові гази, усього, млн. т CO <sub>2</sub> – екв.	16,4	6,8	9,8

\* дані за 2016 р. без врахування пересувних джерел.

Мета роботи – зробити порівняльний аналіз технологій очистки газів, що відходять з котлоагрегатів ТЕС від СО, та запропонувати найменш енерговитратну.

**Викладення основних матеріалів.** Існує декілька основних видів очистки скидних газів від СО: адсорбція, абсорбція, каталітичні, термокаталітичні та термічні методи очистки. Розглянемо більш детально кожний з цих методів, їх переваги та недоліки. Адсорбція – вибіркоче поглинання речовини з газового чи рідкого середовища поверхневим шаром твердого тіла (адсорбенту) чи рідини. Перевагами є простота роботи та апаратного оформлення, висока селективність, з недоліків можна виділити: неможливість очищення запиленних газів і циклічність. [8] Абсорбція – вибіркоче поглинання речовини з газового чи рідкого середовища усім об'ємом твердого тіла чи рідини. Переваги: вловлює також і тверді частки, простота обладнання. Недоліки: утворення рідких стоків, громіздкість обладнання і енергоємність. Каталітичні методи очистки – базуються на процесі знешкодження шкідливих домішок, зокрема метану, оксиду вуглецю, бензолу та ін. Переваги: не потребують високих температур. Недоліки: викиди містять такі гази як NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, котрі є отрутами для багатьох

каталізаторів та очистка лише від СО. Термічні методи очистки полягають в окисленні СО в менш токсичний СО<sub>2</sub>. Переваги: ступінь очистки газів близько 99%. Недоліки: високі температури (750 - 1200°C), великі енерговитрати. [9] На даний час на кафедрі ХІЕ СХУ ім. В. Даля проводяться дослідження з очистки димових газів від оксидів сірки, нітрогену і вуглецю комбінованим адсорбційним методом. Пропонується реалізувати процес адсорбції в віброзрідженому шарі з механохімактивацією сорбенту. Після десорбції відпрацьованого сорбенту пропонується направляти сконцентрований потік токсикантів на стадію абсорбції або деструкції. Даний метод здатний забезпечити достатньо високу ступінь очистки димових газів від оксидів сірки, нітрогену і вуглецю. Завданням подальших досліджень є підбір ефективних сорбентів в умовах механохімактивації як індивідуальних компонентів викидів, так і їх сумішей. В даній роботі розглядається адсорбція монооксиду вуглецю

**Результати досліджень.** Схема експериментальної установки для процесу очищення димових газів від токсикантів адсорбцією представлена на рис.

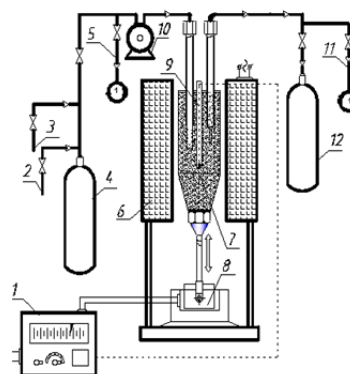


Рис. Схема експериментальної установки:

1 – блок керування; 2 – блок дозування оксидів сульфуру, нітрогену й монооксиду вуглецю; 3 – блок введення повітря; 4 – ємність із газовою сумішшю; 5, 11 – точки відбору газової суміші на аналіз; 6 – електрообігрівач; 7 – адсорбер; 8 – віброприлад; 9 – термокишеня; 10 – компресор; 12 – приймач адсорбованих газів

Ємність 4 перед початком експерименту заповнюють сумішшю повітря, монооксиду карбону, оксидів сульфуру та оксидами нітрогену – аналог димових газів ТЕС або кремими компонентами в сумішші з повітрям. Отримана газова суміш надходить в адсорбер 7 зверху. Адсорбер заповнений сорбентом, наприклад, золою й інертним матеріалом – скляними кульками середнім діаметром 1-1,2 мм. Температура в адсорбері підтримується електрообігрівачем 6, вимірюється термопарою, розташованою в термокишені 9 і контролюється мілівольтметром. Активация сировини в адсорбері здійснюється примусовими механічними коливаннями за допомогою

Таблиця 3

## Експериментальні дослідження сорбції монооксиду вуглецю

№	Концентрація СО		Частота	Температура	Маса сорбенту	Поглинено СО	Ступінь поглинання СО	Час	Сорбційна ємність	Винос сорбенту
	вхід	вихід								
	ppm									
1	95	18	1,2	300	0,2	77	81,1	69	385,0	0,01
2	200	154	1,2	150	0,2	46	23,0	65,0	230,0	0,012
3	369	339	1,2	300	0,2	30	8,1	68	150,0	0,004
4	396	361	3	220	0,2	35	8,8	66	175,0	0,013
5	416	376	3,8	220	0,2	40	9,6	82	200,0	0,012
6	418	398	1,6	220	0,2	20	4,8	60	100,0	0,012
7	427	374	1,2	220	0,2	53	12,4	55	265,0	0,007
8	443	420	1,4	220	0,2	23	5,2	54	115,0	0,02
9	554	534	1,9	220	0,2	20	3,6	78	100,0	0,003

вібропристрою 8. Температура в реакційній зоні й інтенсивність активації задається й підтримується блоком керування 1. При русі адсорбера з певною частотою й амплітудою створюється вибросліджений шар диспергуючих часток і механохімічна активація поверхні сорбенту. На виході з адсорбера розташований металоволокнивий фільтр, що запобігає віднесенню часток сорбенту з адсорбційного об'єму. Вихідні з адсорбера газу надходять у приймач 12. Перекачування газової суміші з ємності 4 в 12 здійснюється компресором 10. На установці є дві точки відбору газової суміші на аналіз: перед адсорбером (5) і в приймачі (11).

На кафедрі ХІЕ [10] був проведений ряд експериментів з адсорбції монооксиду вуглецю. Варіювалися наступні параметри: частота коливань вібропристрою (0-3,8 Гц), температура (20-300°C), початкова концентрація токсиканту (80-1500 ppm), час контакту змінювався від 1,15 до 1,92 секунд, витрата суміші 10 л/год, концентрація сорбенту 20 г/м<sup>3</sup> димових газів. Отримані експериментальні дані (сорбент зола) представлені в таблиці 3.

Проведені дослідження показали можливість керування процесом за допомогою таких параметрів, як час контакту, температура, а також специфічного параметра – частоти коливань вібропристрою.

Отримані експериментальні дані дозволяють визначити значення технологічних параметрів близьких до оптимальних. Залежність ефективності сорбції від часу коливання при наявності механохімічної активації (МХА) показує, що ефективність сорбції досягне свого максимуму при частоті близько 2,2 Гц потім йде на спад. Залежність ефективності сорбції від температури показала, що в умовах механохімічної активації утворюються зрушення в золі на атомарному рівні, у результаті відбуваються зміни фізико-хімічних властивостей поверхні сорбенту (електричних, магнітних, механічних, оптичних), оптимальною визначена температура близько 220°C. Виявлена аномальна залежність, що не відповідає теорії, згідно якої ефективність сорбції та сорбційна ємність зменшуються із підвищенням температури, але так як вона була підтверджена багаторазовими

вимірами була висунута гіпотеза, про те що можливо, подібний характер кривої, пов'язаний із одночасним перебігом адсорбційних та хімічних перетворень при підвищених температурах, але ця гіпотеза потребує підтвердження та подальших досліджень.

Обробка експериментальних даних показала, що для максимальної сорбції оксиду вуглецю золою необхідні такі оптимальні параметри процесу: збільшення сорбенту до 50 г/м<sup>2</sup>, температура 220°C або 300°C та частота коливань 2,2 Гц та 3,8 Гц відповідно.

Для порівняння термічне допалювання монооксиду вуглецю здійснюється при 800-1200°C. Застосування каталітичного методу ускладнюється наявністю пилу у димових газах. Тому витрати на використання сорбенту у вигляді золи має більший економічний сенс.

Завдяки попереднім дослідженням було обрано центр плану для побудови математичної моделі і складання адекватного рівняння регресії. Пропонується проведення повнофакторного експерименту другого порядку з проведенням 4 досліджень. В якості параметрів варіювання обрані: температура (за базовий рівень обрано 220°C) та концентрація сорбенту (на базовому рівні вона становитиме 20 г/м<sup>3</sup>). Дослідження будуть проводитися на сорбенті золі, як і в попередніх дослідженнях, та цеоліті (NaX). Для побудови математичної моделі і складання адекватного рівняння регресії обрані вихідні дані для проведення експерименту представлені в таблиці 4, а сама матриця планування повнофакторного експерименту другого порядку в таблиці 5 [11].

Таблиця 4

## Вихідні дані

	x <sub>1</sub> , °C	x <sub>2</sub> , г/м <sup>3</sup>
Базовий рівень	220	20
інтервал	20	5
верхній рівень	240	25
нижній рівень	200	15



Таблиця 5  
Матриця планування ПФЕ-2

Дослід	x <sub>0</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> , °C	x <sub>2</sub> , г/м <sup>3</sup>
1	+1	-1	-1	200	15
2	+1	+1	-1	240	15
3	+1	-1	+1	200	25
4	+1	+1	+1	240	25

**Висновки**

Проведений аналіз викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря, показав, що найбільш негативний вплив здійснюють електро- та теплогенеруючі підприємства. Показано, що особливу увагу треба приділити розробці методів очистки газових викидів від сполук сірки, нітрогену та вуглецю, які відсутні на ТЕС. Запропоновано процес адсорбції токсикантів із застосуванням механоактивації сорбенту, що дозволяє значно інтенсифікувати сорбцію. На підставі попередніх досліджень обрано центр плану для подальших досліджень з метою побудови математичної моделі та складання адекватного рівняння регресії.

**Література**

1. Паризька угода (2015) – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Паризька\\_угода\\_\(2015\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/Паризька_угода_(2015))
2. Серебряков В. В. Основи екології: Підручник. – К.: Знання-Прес, 2002. – 300 с.
3. Сухарев С. М., Чудак С. О., Сухарева О. Ю. Технологія та охорона навколишнього середовища: Навч. посіб. – Львів: Новий світ – 2000, 2004. – 256 с.
4. Кучерявий В. Л. Екологія. – Львів: Світ, 2000. – 500 с.
5. Національна екологічна політика України: заг. оцінки і ключ. рек./ Міністерство охорони навколишнього природного середовища, Програма розвитку ООН, Глобальний Екологічний Фонд. – К. 2007. – 32 с.: фотоілюстр.
6. Борисов М. А. Реабілітація ТЕС. Забезпечення сталої роботи об'єднаної енергосистеми України/Енергетика та електрифікації. – 2004. №3. С.2-3
7. Екологічний паспорт Луганської області. – 2017 р. – 111 с.
8. Шкідливі викиди ТЕС і АЕС – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.krivda.net/books/l\\_s\\_sterman\\_s\\_a\\_tevlin\\_a\\_t\\_sharkov-](http://www.krivda.net/books/l_s_sterman_s_a_tevlin_a_t_sharkov-)
9. Мала гірнича енциклопедія: у 3 т./за ред. В. С. Білецького. – Д.: Східний видавничий дім, 2004-2013
10. Технология аэрозольного нанокатализа. Селективное восстановление окислов азота аммиаком в дымовых газах сжигания угля / Гликин М. А., Кудрявцев С. А., Гликina И. М. Аleshko А. А. // Хімічна промисловість України. – 2010. – №6. – С. 3–11.
11. Станжицький О.М. Основи математичного моделювання : Навчальний посібник. / Станжицький О.М., Таран Є.Ю., Гординський Л.Д. – К.: Видавничо-поліграфічний центр “Київський університет”. – 2006. – 96 с.

**References**

1. Paryz'ka uhoda (2015) – [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Паризька\\_угода\\_\(2015\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/Паризька_угода_(2015))
2. Serebryakov V. V. Osnovy ekolohiyi: Pidruchnyk. – K.: Znannya-pres, 2002. – 300 s.

3. Sukharev S. M., Chudak S. O., Sukhareva O. Yu. Technolohiya ta ohorona navkolyshn'oho seredovyscha: Navch. posib. – L'viv: Novyy svit – 2000, 2004. 256 s.
4. Kucheryavyy V.L. Ekolohiya. - L'viv: Svit, 2000. – 500 s.
5. Natsional'na ekolohichna polityka Ukrainy: zah. otsinky i klyuch. rek./ Ministerstvo okhorony navkolyshn'oho pryrodnoho seredovyscha, Prohrama rozvytku OON, Hlobal'nyy Ekolohichnyy Fond. – K. 2007. – 32 s.: fotoilyustr.
6. Borysov M. A. Reabilitatsiya TES. Zabezpechennya staloyi roboty ob'yednanoyi enerhosystemy Ukrainy/Enerhetyka ta elektrifikatsiya. – 2004. №3. S.2-3
7. Ekolohichnyy pasport Luhans'koyi oblasti. – 2017 r. - 111 s.
8. Shkidlyvi vykydy TES i AES – [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: [http://www.krivda.net/books/l\\_s\\_sterman\\_s\\_a\\_tevlin\\_a\\_t\\_sharkov-](http://www.krivda.net/books/l_s_sterman_s_a_tevlin_a_t_sharkov-)
9. Mala hirnycha entsyklopediya: u 3 t./za red. V. S. Bilets'koho. – D.: Skhidnyy vydavnychyy dim, 2004-2013.
10. Tekhnologiya aerezol'nogo nanokataliza. Selektivnoye vosstanovleniye okislov azota ammiakom v dymovyykh gazakh szhiganiya uglya / Glikin M. A., Kudryavtsev S. A., Glikina I. M. Aleshko A. A. // KHimichna promislovist' Ukraini. – 2010. – №6. – С. 3–11.
11. Stanzhyts'kyi O.M. Osnovy matematychnoho modelyuvannya : Navchal'nyy posibnyk. / Stanzhyts'kyi O.M., Taran YE.YU., Hordyns'kyi L.D. – K.: Vydavnycho-polihrafichnyy tsentr “Kyyivs'kyi universytet”. – 2006. – 96 s.

**Квасова А. В., Зубцов Е. И. сравнительный анализ технологий очистки сбросных газов тепловых электростанций**

*Представлен сравнительный анализ технологий очистки сбросных газов тепловых электростанций. Показаны преимущества и недостатки каждой из существующих технологий очистки. Выбран центр плана для полнофакторного эксперимента второго порядка для дальнейшего построения математической модели.*

**Ключевые слова:** тепловые электростанции, адсорбция, монооксид углерода, полнофакторного эксперимент

**Kvasova A. V., Zubtsov Y. I. Comparative analysis of waste gas treatment technologies of thermal power plant**

*The comparative analysis of technologies of treatment of waste gases of thermal power plans is presented. The center of plan for the full-factorial experiment of the second order for the further construction of mathematical model is chosen.*

**Key words:** thermal power plants, adsorption, carbon monoxide, full-factor experiment.

**Квасова Альбіна Валеріївна** – студент групи ПЕО-18Дм, Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, [albinakvasova99@gmail.com](mailto:albinakvasova99@gmail.com)

**Зубцов Євген Іванович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри хімічної інженерії та екології Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, [mining\\_07@i.ua](mailto:mining_07@i.ua)

**Тарасов Вадим Юрійович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімії та охорони праці Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. [vatarasov81@gmail.com](mailto:vatarasov81@gmail.com)

Рецензент: д.т.н., проф. **Глікін М.А.**

Стаття подана 10.12.2018.

УДК 544.478.12

## РОЗРОБКА КАТАЛІТИЧНОГО ГЕНЕРАТОРА ТЕПЛА З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ АЕРОЗОЛЬНОГО НАНОКАТАЛІЗУ

Король Д.Р., Філіпс Т.Ч, Кудрявцев С.О.

## DEVELOPMENT OF CATALYTIC HEAT GENERATOR VIA AEROSOL NANOCATALYSIS TECHNOLOGY

Korol D.R., Philips T. C., Kudryavtsev S.O.

*У статті розглянуті існуючі каталітичні генератори тепла (КГТ), їх переваги та недоліки. Було створено лабораторну установку – КГТ – з використанням технології аерозольного нанокаталізу. Розглянуто вплив технології аерозольного каталізу на вміст діоксиду вуглецю в газах окиснення, що виходять з КГТ. Показані результати, що відображають ефективність установки КГТ і впливу технології аерозольного нанокаталізу на процес згоряння палива. Визначені основні відмінності термічного окиснення та каталітичного процесу. Зроблені пропозиції щодо подальших досліджень КГТ і їх вдосконалення з використанням аерозольних наночастинок каталізатору.*

**Ключові слова:** аерозольний нанокаталіз, КГТ, ізопропіловий спирт, каталітична система, віброзріджений шар

**Введення.** Спалювання твердих, рідких і газоподібних палив в каталітичних генераторах тепла (КГТ) є ефективним і екологічно чистим способом отримання теплової енергії. Актуальність цього обумовлена сучасними тенденціями розвитку паливно-енергетичного комплексу, які складаються в переході від централізованого тепло- і електропостачання до комбінованого, яке включає в себе автономні енергетичні установки різної теплової потужності. Каталітичне безполуменеве спалювання є ефективним енерго- та ресурсозберігаючим способом використання твердого, рідкого і газоподібного палива. У цьому способі окиснення палива відбувається на поверхні каталізатору при відносно низькій температурі. При цьому забезпечується максимальна конверсія палива в продукти повного окиснення і знижуються викиди шкідливих речовин.

Мета роботи - дослідження впливу технології аерозольного нанокаталізу на процеси окиснення палива в установці КГТ.

**Вибір напрямку досліджень.** В статті були розглянуті і проаналізовані сучасні наукові розробки КГТ [1-4], які мають ряд недоліків, а саме:

- складність в конструкції КГТ;
- висока вартість каталізатора;

- за наявності в деяких варіантах КГТ водяної сорочки можливі проблеми з регулюванням потужності цього КГТ;

- вивантаження частини суміші каталізатора і інертного матеріалу або повна заміна гранул каталізатора і інертного матеріалу;

- деякі КГТ розраховані на окиснення тільки газоподібного палива;

- висока вартість конструкції апарату;

- зношення каталізатора, а в деяких випадках наявність специфічних добавок до каталізатора, таких як платина або оксид церію. Технологія аерозольного нанокаталізу дозволяє вирішити частину з цих недоліків, домогтися позитивного економічного ефекту, при цьому зберігаючи прийнятну екологічну складову.

**Аналітичний огляд.** Протягом 24 років постійно проводять системні дослідження технології. Перші роботи були виконані колективом Сєвєродонецького технологічного інституту (СТІ), а потім системні дослідження проводили в інституті ДНДПІ «Хімотехнологія» (м. Сєвєродонецьк). В даний час роботи продовжують проводити в Східноукраїнському національному університеті ім. В. Даля на кафедрі хімічної інженерії та екології

Спочатку технологія аерозольного нанокаталіза була реалізована в апараті з рухом каталітичної системи в режимі псевдозрідженого шару (ПЗШ). Цей процес називається аерозольним нанокаталізом в псевдозрідженому шарі (AnCFB - Aerosol nanoCatalysis with Fluidized Bed). В даному процесі механохімічна активація каталізатора здійснювалася за рахунок псевдозрідження диспергуючого матеріалу. У цьому варіанті технологія вимагала значних витрат реагентів і дотримання вузьких газодинамічних режимів.

На наступному етапі розвитку технології AnC було запропоновано проводити дослідження на установках з віброударним або віброзрідженим ша-

ром (ВЗШ), де механохімічна активація каталізатору здійснюється за рахунок вертикальних зворотно-поступальних рухів реактора і каталітичної системи, що знаходиться всередині нього [5]. Процес був названий аерозольним нанокаталізом в віброзріженому шарі (AnCVB - Aerosol nanoCatalysis with Vibrating Bed). Потужність такого реактора виявилась вищою, ніж у реактора з ПЗШ., Технологія ВЗШ дала нові можливості управління кінетикою процесів [6].

В цілому, запропонована технологія AnC забезпечила:

- наявність в реакторі аерозолу каталізатора;
- каталітичну систему, що включає каталізатор і постійно диспергируючий його матеріал (переважно діаметром 1-2 мм і кулястої форми);
- постійну механохімічну активацію поверхні наночастинок з підвищенням і підтримкою високої активності каталізатора;
- збільшення швидкості хімічної реакції в до  $10^6$  разів в розрахунку на масу каталізатора та адекватне зниження концентрації каталізатора до  $0,3\text{-}5 \text{ г/м}^3$  реакційного обсягу;
- зменшення обсягу реактора в 2-10 разів;
- рівна доступність для реагентів поверхні каталізатора;
- можливість каталітичної взаємодії газів з твердими і смолоподібними реагентами.

#### Результати експерименту та їх обговорення.

Експериментальна установка (рис. 1) складається з реактора 1, який містить в собі сітку для запобігання випаданню каталізатора. З реактора по лінії відводу 8 відводяться гази окислення. Температура реактора 1 контролюється за допомогою термопари, для якої в реакторі зроблена кишенька 3, і регулюється за допомогою електропідігрівача 2, який представляє з себе ніхромову спіраль з керамічними вставками, яка має кільцеву форму і рівномірно підігріває реактор. Магнітний вібропристрій 6 - електромагнітна котушка, яка забезпечує зворотно-поступальний рух реакторної частини. За допомогою блоку управління 4 є можливість варіювати такі параметрами як температура процесу і частота коливання реакторної частини. Через лінії 5 і 7 в реактор подається повітря і ізопропіловий спирт за допомогою компресора і дозатора відповідно

Порядок роботи установки наступний. Спочатку живлення. Потім калібрують ротаметр і дозатор для отримання коректних значень витрати повітря і спирту відповідно. Після калібрування включається компресор і за допомогою ротаметра регулюється кількість необхідного повітря. За компресором включається дозатор, який подає з певною витратою основне паливо - ізопропіловий спирт. Потрапляючи в реактор, між молекулами спирту і повітря відбувається хімічна взаємодія на поверхні каталізатору. Гази окислення відводяться по лінії з реактора.

Температура процесу  $400^\circ\text{C}$ . Частота коливання реакторної частини - 3 Гц. Каталітична система складається з скляних кульок (диспергуючого матеріалу) і вільного каталізатора -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Приготування відбувається за стандартною методикою [7].

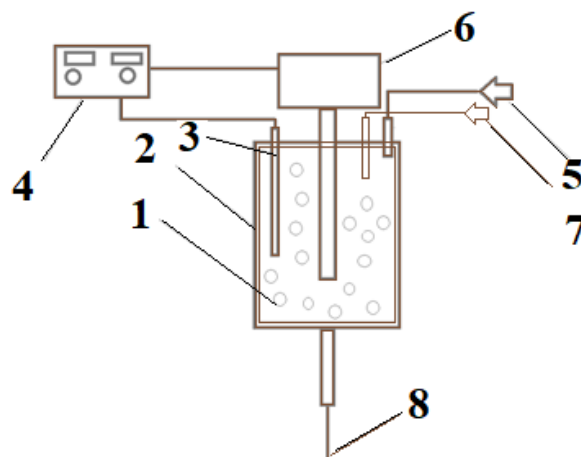


Рис. 1. Схема лабораторної установки.

1 – реактор з інертним матеріалом і каталізатором всередині, 2 – електричний обігрівач, 3 – кишенька для термопари, 4 – блок управління, 5 – лінія подачі повітря за допомогою компресора, 6 – магнітний вібропристрій, 7 – лінія подачі ізопропілового спирту за допомогою дозатора, 8 – лінія відведення газів окислення

Першочерговим завданням стояв доказ перебігу саме каталітичних процесів в реакторі подібного типу, а також стійкості показників у часі. Вимірюваним параметром - функцією відгуку для процесу окислення ізопропілового спирту є об'ємна частка вуглекислого газу в газовій пробі. Відбиралися проби при подачі сировини в: пустий реактор; реактор, заповнений тільки диспергуючим матеріалом; реактор з каталітичною системою;

Дані експериментів представлені на малюнках 2-4:

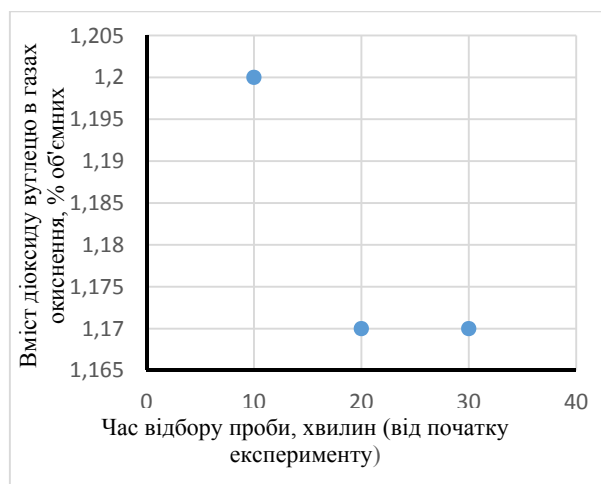


Рис. 2. Залежність об'ємної частки  $\text{CO}_2$  від часу відбору проби в порожньому реакторі

Протягом цієї серії експериментів частота коливань реакторної частини склала 3 Гц. З те-ням часу (після 20-ї хвилини) результати стали стабільними. Вміст діоксиду вуглецю в газах окислення при цьому становив 1,17% об'ємних.

На малюнку 3 представлені дані відбору проб  $\text{CO}_2$  з реактора, заповненого тільки диспергуючим матеріалом:

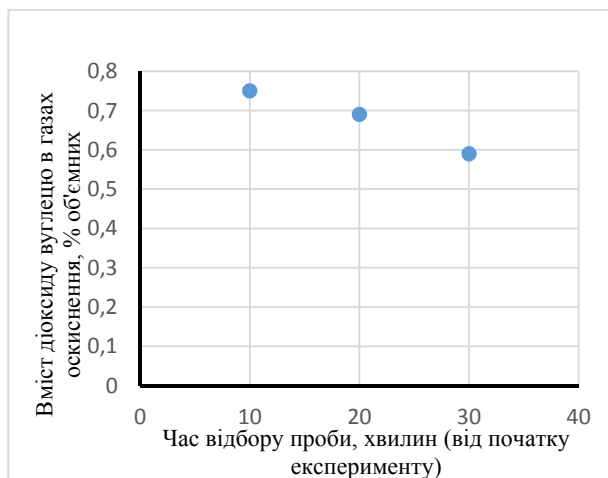


Рис. 3. Залежність об'ємної частки  $\text{CO}_2$  від часу відбору проби в порожньому реакторі з диспергуючим матеріалом

В даному випадку вміст діоксиду вуглецю в газах окиснення зафіксований на рівні 0,6-0,7% об'ємних, що менше, ніж в пустотілому реакторі. Це можна пояснити інтенсивним перемішуванням сировини та продуктів реакції, в той час, як в пустому реакторі гази рухаються в режимі, близькому до ідеального витискання.

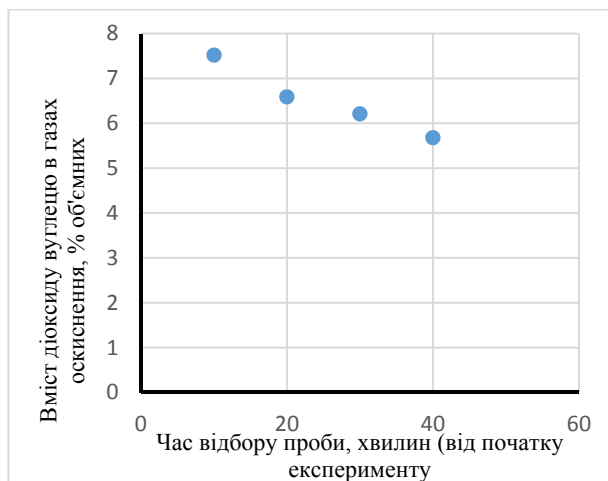


Рис. 4. Залежність об'ємної частки  $\text{CO}_2$  від часу відбору проби в порожньому реакторі з диспергуючим матеріалом

На рисунку 4 наведено вміст діоксиду вуглецю в газах окиснення при проведенні процесу в реакторі, заповненому каталітичною системою. Після 20-ї хвилини від початку експерименту вміст становить біля 6%, що в 5,1 разів вище, чим в термічному процесі (рис. 2) і в 10 разів вище, чим в реакторі заповненому виключно диспергуючим матеріалом. Таким чином було доведений перебіг саме каталітичних реакцій в умовах технології аерозольного наноката-

лізу. На наступних етапах досліджень планується вивчення впливу температур, інтенсивності механохімічної активації та надлишку повітря на швидкість та селективність окиснення. Кінцевою метою є створення основ технології каталітичного генератора тепла з використанням аерозольного нанокаталізу.

### Висновки

Обґрунтовано доцільність проведення досліджень в напрямку створення каталітичних генераторів тепла з використанням технології аерозольного нанокаталізу. Наведено переваги даного методу перед іншими способами отримання теплової енергії

Експериментально доведено, що вміст діоксиду вуглецю в газах окиснення (а також і швидкість хімічних реакцій) при проведенні процесу в реакторі, заповненому каталітичною системою в 5,1 разів вище, чим в термічному процесі, і в 10 разів вище, чим в реакторі заповненому виключно диспергуючим матеріалом, що свідчить про ефективність застосування аерозольного нанокаталізу.

### Література

1. <https://patents.google.com/patent/RU2406954C1>
2. <https://patents.google.com/patent/RU2626043C1>
3. <https://patents.google.com/patent/RU2380612C1>
4. <https://patents.google.com/patent/EP0398658A2>
5. Глікіна І.М. Основи технології аерозольної нанокаталітичної переробки органічних сполук у віброзрідженому шарі. // Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук., Львів. 2005. 20 с.
6. Гликин М.А. Аэрозольный нанокатализ. Изучение процесса крекинга n-пентана до олефинов / Гликин М.А., Кудрявцев С.А., Гликина И.М., Мамедов Б.Б. // Химична промисловість України. – 2005. - №4. – С. 30-38.
7. Кудрявцев С.А. Основы технологии получения бензиновой фракции и этилена аэрозольным нанокатализом. Дисс... канд. техн. наук: 05.17.07. / Кудрявцев Сергей Александрович – Львов. – 2006. – 160 с.

### References

1. <https://patents.google.com/patent/RU2406954C1>
2. <https://patents.google.com/patent/RU2626043C1>
3. <https://patents.google.com/patent/RU2380612C1>
4. <https://patents.google.com/patent/EP0398658A2>
5. Glikina I.M. Osnovy tekhnologii aerosolnoji nanokatalitychnoji pererobky organichnykh spoluk u vibrozrizenomu shari. // Avtoreferat disertacii na zdobuttja naukovoogo stupenya kandidata technichnykh nauk., Lviv. 2005. 20 p.
6. Glikin M.A. Aerosolnyj nanokataliz. Izuchenije processa krekinga n-pentana do olefinov / Glikin M.A., Kudryavtsev S.A., Glikina I.M., Mamedov B.B. // Khimichna promislivost Ukrainy. -2005. - №4. – P. 30-38.
7. Kudryavtsev S.A. Osnovy tekhnologii poluchenija benzinovoj frakcii i etilena aerosolnym nanokatalysom. Diss.. k.t.n.: 05.17.07. / Kudryavtsev S.A.-Lvov.-2006.- 160 p.

**Король Д.Р., Филипс Тобенна, Кудрявцев С.А.  
Разработка каталитического генератора тепла с  
применением технологии аэрозольного нанокатализа**

*В статье рассмотрены преимущества каталитических генераторов тепла (КГТ) перед другими способами сжигания топлива. Описана созданная лабораторная установка – КГТ с использованием технологии аэрозольного нанокатализа. Рассмотрено влияние технологии аэрозольного нанокатализа на содержание диоксида углерода в газах окисления. Определены основные отличия термического и каталитического процесса в условиях аэрозольного нанокатализа. Предложены дальнейшие шаги по развитию исследований в направлении создания основ технологии КГТ с использованием аэрозольного нанокатализа.*

**Ключевые слова:** аэрозольный нанокатализ, КГТ, изопропиловый спирт, каталитическая система, вибро-ожигенный слой

**Korol D. R., Phillips Tobenna, S. O. Kudryavtsev  
Development of a catalytic heat generator using aerosol  
nanocatalysis technology**

*Catalytic free-flowing combustion is an effective energy- and resource-saving way of using solid, liquid and gaseous fuels. In this method, the oxidation of fuel occurs on the surface of the catalyst at a relatively low temperature. This ensures maximum conversion of fuel into products of complete oxidation and reduces emissions of harmful substances. The purpose of the work is to investigate the influence of aerosol nano-catalysis technology on the processes of oxidation of fuel in the unit of catalytic heat generator. A laboratory unit was*

*created and a series of experiments were conducted to determine the differences in the course of thermal and catalytic transformations. The expediency of conducting research in the direction of creation of catalytic heat generators using aerosol nano-catalysis technology is substantiated. The advantages of this method before other methods of obtaining thermal energy are given. It has been experimentally proved that the content of carbon dioxide in the gases of oxidation (as well as the rate of chemical reactions) during the process in a reactor filled with the catalytic system is 5,1 times higher than in the thermal process and 10 times higher than in the reactor filled exclusively dispersant. This is indicated the effectiveness of aerosol nanocatalysis.*

**Keywords:** aerosol nanocatalysis, CHG, isopropyl alcohol, catalytic system, vibro-spill layer, heat

**Король Данило Романович** – студент кафедри Хімічної інженерії та екології Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля

**Філіпс Тобенна Чімдіаді** – аспірант кафедри хімічно інженерії та екології Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля

**Кудрявцев Сергій Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент, декан факультету інженерії СНУ ім. В. Даля, sergeykudryavtsevsnu@gmail.com

*Рецензент:* д.т.н., проф. **Суворін О.В.**

Стаття подана 30.11.2018

УДК 54.03, 54.06

## ДО ПИТАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОРИСТОСТІ

Корчуганова О.М., Потапенко Е.В.

## TO THE PROBLEM OF POROSITIES DETERMINING

Korchuganova O., Potapenko E.

*В статті розглянуто метод вимірювання пористості з метою визначення поверхні, яка доступна для розчинника. Метод засновано на пікнометричному визначенні щільності твердого матеріалу. Для визначення об'єму пор використовуються однакові за дисперсним складом поруватий та щільний матеріали. Означений метод дозволить вимірювати об'єм пор та їх поверхню, що буде корисним для розрахунку швидкості розчинення твердих пористих матеріалів.*

**Ключові слова:** Пористість, розмір пор, поверхня пор, розчинення

**Вступ.** Пористі тіла широко поширені в природі і техніці (мінерали, деревина адсорбенти, каталізатори, будівельні матеріали, пігменти і т.п.). Відомо більше 60 методів дослідження пористої структури твердих тіл, що відрізняються інформативністю, межами застосовності і чутливістю [1]: пікнометричні, ртутно-порометричні, адсорбційно-структурні, мікроскопічні, колориметричні та ін. Численність і різноманітність методів дослідження пористої структури пов'язані як з різновидами існуючих пористих структур, так і з різноманітними дослідницькими завданнями різних галузей науки і техніки.

**Постановка проблеми.**

Пористість також може представляти інтерес при визначенні поверхні пористого твердого тіла (твердої сировини, в якій є пори), доступної для розчинення, що дозволить отримати більш точні моделі розчинення твердої сировини. Аналогічні завдання вирішуються в гідрохімії при визначенні складу підземних вод [3], і при формуванні пористої структури напівпровідникових матеріалів [4].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У хімічній технології пористість найчастіше визначають як якісну характеристику каталізаторів і сорбентів. Методи визначення об'єму пор каталізаторів і сорбентів зазвичай пов'язані з використанням специфічного і досить дорогого обладнання - ртутних поромірів або адсорбтомірів [2], за допомогою яких визначають не тільки загальний об'єм, а й розподіл

пор за розмірами, з визначенням об'єму мікро-, мезо- і макропор. Обладнання для таких досліджень зазвичай дороге й складне в обслуговуванні.

Пікнометричні методи визначення пористості є найбільш простими і доступними в порівнянні з іншими, але при визначенні істинної щільності матеріалу можуть виникнути певні складнощі. Для частинок монолітного матеріалу справжня й уявна щільності рівні між собою, оскільки пори в такому матеріалі відсутні. Пікнометричне визначення щільності дисперсного матеріалу техногенного походження зводиться до визначення уявної щільності, тому що зазвичай ці тверді матеріали утворюються в результаті процесів випалу, сушки, гранулювання і містять закриті пори, видалити газ з яких проблематично.

Шару твердих частинок моно- або полідисперсного складу завжди властива порозність – частка порожнеч, зосереджених між частинками. Методи визначення порозності відомі і досить широко висвітлені в науково-технічній літературі [5]. Розраховують порозність, використовуючи значення насипної і уявної щільності шару частинок, що визначаються пікнометричним способом [6]:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_n}{\rho_k} \quad (1)$$

де  $\rho_n$  - насипна щільність досліджуваного матеріалу;

$\rho_k$  - уявна щільність частинок твердого матеріалу.

Використовуючи дані про уявну та істинну щільність можна визначити сумарний об'єм пор [1].

$$V_{\Sigma} = \frac{1}{\rho_k} - \frac{1}{\rho_m} \quad (2)$$

$\rho_m$  - істинна щільність твердих частинок.

Тобто, по суті справи, величина порозності, розрахована за результатами пікнометричних визначень щільності (1) включає ще й об'єм пор, заповне-

них пікнометричною рідиною. На жаль, для багатьох матеріалів змішаного хімічного складу визначення істинної щільності утруднено.

**Результати досліджень.** Розглянемо результати пікнометричного визначення щільності монолітного матеріалу і пористого твердого матеріалу однакової дисперсності. Як монолітний матеріал використовувалося алюмо-боро-силікатне скло (ТУУ6-00209775.076-2001р), в якості пористого матеріалу – відпрацьований залізо-хромовий катализатор конверсії оксиду вуглецю. Дисперсність частинок визначалася за даними ситового аналізу. Дисперсний склад зразків, взятих для пікнометричних визначень щільності, представлений в таблиці 1.

В результаті визначень були отримані наступні значення насипної і уявної щільності дисперсних матеріалів (табл. 2).

Як пікнометрична рідина використовувався етиловий спирт (хч), визначення щільності проводилися в пікнометрові об'ємом 25 мл, при температурі 18°C, яка підтримувалася з точністю до ± 1 ° за допомогою водяного термостату.

Визначення проводилося паралельно на 2-х наважках, розбіжність між результатами визначень не перевищувала 3%.

Різниця щільності різних за крупністю фракцій одного й того ж матеріалу, зазначалося і раніше [6]. Пов'язано це як з особливостями будови, кристалічної структури та текстури дисперсних матеріалів,

так і зі способами приготування зразків ( $\Delta\rho_k \leq 0,5 \text{ г / мл}$ ).

Однак, як для дрібнодисперсних зразків, так і для зразків більшого дисперсного складу для пористого матеріалу величина порозності, розрахованої за формулою (1) виявилася вищою. Припустивши, що додатковий вільний обсяг зосереджений в порах твердого матеріалу, по різниці порозності розрахуємо сумарний об'єм пор:

$$V_{\Sigma} = \varepsilon_k - \varepsilon_c, \tag{3}$$

де  $\varepsilon_k$  - порозність твердого пористого матеріалу;  $\varepsilon_c$  - порозність монолітного матеріалу.

Обчислені таким чином обсяги пор, заповнених пікнометричною рідиною відповідно складуть для зразка 1к - 11,1% (0,08 мл / г), для зразка 2к - 2,11% (0,02 мл/г). Зменшення об'єму пор в дрібнодисперсному матеріалі свідчить про руйнування пор в ході подрібнення.

Було проведено порівняння з результатами фізико-хімічних досліджень пористої структури зразка 1к, виконаними на аналізаторі площі поверхні і розміру пор SA-3100 Plus. Об'єм та розподіл пор за розмірами розраховувалися за ізотермою адсорбції-десорбції при відносному тиску 0,9907, що дозволяє визначити об'єм пор з діаметром меншим або рівним 200 нм. Результати досліджень представлені в таблиці 3.

Таблиця 1

**Дисперсний склад зразків**

Зразки 1к, 1с										
Номер сита відповідно до [7]										
1,6	1	0,63	0,4	0,315	0,2	0,16	0,1	0,063	0,05	0,025
Залишок на ситі, %										
0,49	1,34	50,18	39,49	2,07	1,94	1,22	0,73	1,22	0,49	0,85
Середній діаметр частинок, мм										
2,05	1,3	0,815	0,515	0,3575	0,2575	0,18	0,13	0,5315	0,0565	0,025
Вміст частинок, %										
0,49	1,34	50,18	39,49	2,07	1,94	1,22	0,73	1,22	0,49	0,85
Зразки 2к, 2с										
Номер сита відповідно до [7]										
1,6	1	0,63	0,4	0,315	0,2	0,16	0,1	0,063	0,05	0,025
Залишок на ситі, %										
-	-	-	0,22	0,53	15,19	2,26	30,32	21,27	9,15	21,06
Середній діаметр частинок, мм										
2,05	1,3	0,815	0,515	0,3575	0,2575	0,18	0,13	0,5315	0,0565	0,025
Вміст частинок, %										
-	-	-	0,22	0,53	15,19	2,26	30,32	21,27	9,15	21,06

Таблиця 2

**Результати пікнометричних визначень щільності дисперсних матеріалів**

Матеріал	Номер зразку	$\rho_n, \text{г/мл}$	$\rho_k, \text{г/мл}$	$\varepsilon$
Скло	1с	1,5	2,06	0,27
	2с	1,47	2,39	0,38
Залізо-хромовий катализатор	1к	1,35	2,19	0,38
	2к	1,11	1,87	0,40

Таблиця 3

## Результати досліджень пор на SA-3100 Plus

Діаметр пор, нм	Сумарний об'єм пор, мл/г
190,68 – 173,58	0,00025
190,68 – 159,33	0,0005
190,68 – 136,94	0,0101
190,68 – 120,13	0,00151
190,68 – 96,57	0,00254
190,68 – 77,7	0,00681
190,68 – 65,1	0,0131
190,68 – 56,08	0,02078
190,68 – 49,29	0,03571
190,68 – 39,77	0,05499
190,68 – 33,38	0,06943
190,68 – 28,8	<b>0,07935</b>
<28,8	0,022

**Висновок.** Таким чином, визначення пористості запропонованим методом [8], заснованим на різниці об'ємів рідини, що поглинаються однаковими шарами порошкоподібних пористого і монолітного матеріалів, дозволяє визначити об'єм пор діаметром > 28 нм. Запропонована методика може використовуватися для визначення об'єму пор і інших твердих пористих порошкоподібних матеріалів. Розмір пор, доступних для розчинника залежить від фактора форми пор, розміру сольватованих іонів розчинника, фізико-хімічних властивостей розчинника, температури, тиску і т.д. Тому, з метою визначення об'єму пор твердого матеріалу, доступних для розчинника рекомендується враховувати всі ці фактори.

## Література

1. Черемской П. Г. Методы исследования пористости твердых тел / П. Г. Черемской. – Москва: Энергоатомиздат, 1985. – 112 с.
2. Zhu L. Influence of distributed pore size and porosity on MTO catalyst particle performance: Modeling and simulation / L. Zhu, W. Ma, Z. Luo. // Chemical Engineering Research and Design. – 2018. – №137. – С. 141 – 153.
3. Храмченков В. Г. Элементы физико-химической механики природных пористых сред / В. Г. Храмченков. – Казань: Изд-во КМО, 2003. – 178 с.
4. A robust NMR method to measure porosity of low porosity rocks / W. Yan, J. Sun, Y. Sun, N. Golsanami. // Microporous and Mesoporous Materials. – 2018. – № 269. – С. 113–117.
5. Аэров М. Э. Аппараты со стационарным зернистым слоем: Гидравлические и тепловые основы работы / М. Э. Аэров, О. М. Тодес, Д. А. Наринский. – Ленинград: Химия, 1979. – 176 с.
6. Коузов П. А. Методы определения физико-химических свойств промышленных пылей. / П. А. Коузов, Л. Я. Скрыбина. – Ленинград: Химия, 1983. – 143 с.
7. Межгосударственный стандарт. Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками. Технические условия. ГОСТ 6613-86 – Москва: Стандартиформ, 1986. – 11 с.

## References

1. Cheremskoi P. H. Metody yssledovaniya porystosti tverdykh tel / P. H. Cheremskoi. – Moskva: Enerhoatomyzdat, 1985. – 112 s.
2. Zhu L. Influence of distributed pore size and porosity on MTO catalyst particle performance: Modeling and simulation / L. Zhu, W. Ma, Z. Luo. // Chemical Engineering Research and Design. – 2018. – №137. – С. 141 – 153.
3. Khramchenkov V. H. Elementy fizyko-khymycheskoi mekhaniky pryrodnykh porystykh sred / V. H. Khramchenkov. – Kazan: Yzd-vo KMO, 2003. – 178 s.
4. A robust NMR method to measure porosity of low porosity rocks / W. Yan, J. Sun, Y. Sun, N. Golsanami. // Microporous and Mesoporous Materials. – 2018. – № 269. – С. 113–117.
5. Aerov M. E. Apparaty so statsyonarnym zernystym sloem: Hydravlycheskye y teplovye osnovy raboty / M. Э. Aerov, O. M. Todes, D. A. Narynskiy. – Lenynhrad: Khymiya, 1979. – 176 s.
6. Kouzov P. A. Metody opredeleniya fizyko-khymycheskykh svoystv promyshlennykh pylei. / P. A. Kouzov, L. Ya. Skriabyna. – Lenynhrad: Khymiya, 1983. – 143 s.
7. Mezhhosudarstvennyi standart. Setky provolochnyye tkanye s kvadratnymy yacheikamy. Tekhnicheskye usloviya. HOST 6613-86 – Moskva: Standartynform, 1986. – 11 s.

**Корчуганова Е.Н., Потапенко Э.В. К вопросу определения пористости**

*В статье рассмотрен метод измерения пористости с целью определения поверхности, которая доступна для растворителя. Метод основан на пикнометрическом определении плотности твердого материала. Для определения объема пор используются одинаковые по дисперсному составу пористый и плотный материалы. Указанный метод позволит измерять объем пор и их поверхность, что будет полезным для расчета скорости растворения твердых пористых материалов.*

**Ключевые слова:** пористость, размер пор, поверхность пор, растворения

**Korchuganova O., Potapenko E. To the problem of porosities determining**

*The article deals with the method of porosities measuring in order to determine the surface available for the solvent. The method is based on the pycnometric determined of the solid material density. Porous and dense materials was used in the study had an identical disperse composition to determine the pore volume. This method will allow measuring the volume of the pore and its surface, which will be suitable for calculating the rate of dissolution of hard porous materials.*

**Keywords:** porosity, pore size, pore surface, dissolution

**Корчуганова Олена Миколаївна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімії та охорони праці, Східноукраїнський національний університет ім. Володимира Даля

**Потапенко Едуард Володимирович** – доктор хімічних наук, доцент, проректор з наукової роботи, Східноукраїнський національний університет ім. Володимира Даля

*Рецензент:* д.т.н., проф. **Суворін О.В.**



УДК: 66.097.3-039.7

## ПРОМИСЛОВІ ПРОЦЕСИ ГІДРОФОРМІЛЮВАННЯ ЇХ ОСОБЛИВОСТІ ТА КАТАЛІЗАТОРИ ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ

Кохан І.В., Кудрявцев С.О.

### INDUSTRIAL PROCESSES OF HYDROFORMYLATION FEATURES AND USED CATALYSTS

Kokhan I., Kudriavtsev S.

*У статті проводиться огляд промислових процесів гідроформілювання. Розглянуто процеси, що розроблені різними компаніями й використовуються як у промисловості основного органічного синтезу, так й в тонкому органічному синтезі для отримання альдегідів різної будови. При розгляді процесів приділяється увага умовам проведення реакції, типу використовуваного каталізатора й особливостям відділення каталізатора від продуктів реакції. Додатково розглянуті основні типи металокомплексних каталізаторів гідроформілювання й особливості їх застосування. Проаналізовано подальші напрямки розвитку металокомплексного каталізу для процесу гідроформілювання.*

**Ключові слова:** гідроформілювання, оксосинтез, металокомплексний каталіз, гомогенний каталіз, карбоніли кобальту, кобальтові каталізатори, родієві каталізатори, ліганди що містять фосфор, фосфорорганічні сполуки.

Процес гідроформілювання, також відомий як оксосинтез, є важливим способом отримання альдегідів з алкенів, й тому має велике промислове значення. При проведенні цього процесу відбувається приєднання формільної групи ( $-CHO$ ) й атома водню по подвійному вуглець-вуглецевому зв'язку олефінів. Процес гідроформілювання постійно розвивається й вдосконалюється з моменту його створення Реленом у 1938 році й до теперішнього часу. Значний інтерес до вдосконалення цього процесу викликаний тим, що одержувані за його допомогою альдегіди легко перетворюються у велику кількість важливих вторинних продуктів. Наприклад, одним з найважливіших напрямків подальшої переробки отриманих альдегідів є їх гідратування до спиртів, які в подальшому використовуються для отримання миючих засобів. Однак, гідроформілювання використовується не тільки в основному

органічному синтезі. Так цікавим й затребуваним напрямком застосування цього процесу в тонкому органічному синтезі є отримання напівпродуктів що у подальшому використовуються для синтезу запашних речовин й лікарських препаратів.

У зв'язку з великим промисловим інтересом до процесу гідроформілювання, розроблені й технічно реалізовані в промислових умовах різні технологічні процеси, що належать різним компаніям. Сутністю процесу гідроформілювання є обробка алкену сумішшю окису вуглецю й водню (синтез-газом), зазвичай, при досить високому тиску (від 2 до 100 атмосфер в залежності від застосовуваного каталізатора й технологічного процесу). Діапазон температур при яких проводиться реакція також залежить від технологічного процесу й може знаходитись в межах від 40 до 200 °С. Загальним для всіх видів реалізованих технологічних процесів є використання каталізаторів на основі перехідних металів, які розчиняються в реакційному середовищі. Таким чином гідроформілювання є найбільш типовим прикладом використання гомогенного каталізу як в промисловості основного органічного синтезу, так й у тонкому органічному синтезі.

Виконуючи огляд існуючих промислових технологічних процесів гідроформілювання, попередньо зазначимо, що їх класифікацію можна проводити за кількома критеріями. Так промислові процеси гідроформілювання можуть бути класифіковані залежно від довжини ланцюга олефіну, що бере участь в процесі гідроформілювання, а також в залежності від перехідного металу й лігандів, які беруть участь у процесі в якості каталізатора. Й нарешті можемо застосувати класифікацію за методом проведення такого важливого етапу процесу

гідроформілювання, як спосіб вилучення каталізатору із суміші продуктів реакції.

Історично першим індустриально реалізованим процесом гідроформілювання був процес, що належить компанії Ruhrchemie, що призначений для виробництва пропаналю (пропіонового альдегіду, пропіональдегіду) з етилену й синтез-газу з використанням тетрагідрокарбонілу кобальту. Доречі кобальтові каталізатори також часто використовуються й у сучасних промислових процесах. Це, наприклад процеси компаній BASF, Exxon і Shell, які в основному використовуються для виробництва продуктів із середнім й довгим ланцюгом, тоді як каталізатори на основі родію зазвичай використовуються для гідроформілювання пропілену. Порівнюючи каталізатори по використуваному перехідному металу, слід зазначити, що родієві каталізатори є значно дорожчими, за кобальтові. Ще одним істотним чинником, що впливає на економічні показники процесу, є те, що при гідроформілюванні олефінів з більш довгим вуглецевим ланцюгом вилучення каталізатора із отриманих альдегідів ускладнено.

Розглянемо основні промислові технологічні процеси гідроформілювання й зупинимося на їх особливостях.

#### **Процес Ruhrchemie/Rhone — Poulenc.**

Цей процес (RCRPP) заснований на застосуванні родієвого каталізатора, зокрема використовується водорозчинний TPPTS в якості ліганда (так званий каталізатор Kuntz Cornils). Процес RCRPP використовується для гідроформілювання пропілену. Наявність фосформістного ліганда забезпечує гідрофільні властивості металорганічного комплексу. Каталітичний комплекс добре розчинний у воді (близько 1 кг/л), але в той же час не розчинний у фазі продукту реакції, що утворюється. Для проведення процесу водорозчинний TPPTS використовується в надлишку, завдяки чому вилуговування каталізатора ефективно пригнічується. Реагентами в цьому процесі є пропілен й синтез-газ, що складається з водню і оксиду вуглецю в співвідношенні 1,1:1. В результаті проведення процесу виходить суміш бутіральдегіду (масляного альдегіду) й ізобутиральдегіду (ізомасляного альдегіду) в співвідношенні 96:4, а так само утворюється невелика кількість побічних продуктів, таких як спирти, складні ефіри. Процес RCRPP є першою комерційно доступною двухфазною системою, в якій каталізатор присутній у водній фазі. В ході реакції утворюється фаза органічного продукту, яка безперервно відділяється за допомогою поділу фаз, при цьому водна каталітична фаза залишається у реакторі.

Щодо особливостей апаратурного оформлення процесу RCRPP, слід зазначити наступне. Процес проводять у реакторі з мішалкою, де олефін й синтез-газ утримуються у нижній частині реактора під фазою каталізатора при інтенсивному

перемішуванні. У той же час отримана сира альдегідна фаза відділяється зверху від водної фази. Водний розчин, що містить каталізатор, відбирають й повторно нагрівають через теплообмінник, після чого закачують назад у реактор. В той же час надлишок олефіну й синтез-газу відокремлюють від альдегідної фази в отпарній колоні й так само подають назад у реактор. Оскільки реакція гідроформілювання є екзотермічна, то тепло, що генерується під час проведення реакції використовується для вироблення технологічної пари, що використовується для подальшої перегонки отриманої органічної фази яка містить продукти реакції й таким чином поділяється на бутіральдегід (масляний альдегід) та ізобутиральдегід (ізомасляний альдегід). Потенційні каталітичні отрути, що надходять із синтез-газу, та потрапляють у органічну фазу видаляються із реакції разом із альдегідом. Таким чином, не відбувається накопичення каталітичних отрут, й необхідність у додатковому ретельному тонкому очищенні синтез-газу може бути виключена.

#### **BASF-оксо процес.**

BASF-оксо процес використовується головним чином для переробки вищих олефінів у альдегіди. Процес використовує каталізатор на основі карбонілу кобальту. В процесі слід зазначити наступну особливість: проводячи реакцію при низьких температурах, можна спостерігати підвищену селективність на користь лінійного продукту. Процес проводять під високим тиском, близько 30 МПа й в температурних межах від 150 до 170 °С. Кобальт виділяють з рідкого продукту реакції шляхом окислення до водорозчинного  $\text{Co}^{2+}$  із наступним додаванням водного розчину мурашиної або оцтової кислоти. Цей процес обробки дає розчин кобальту у водній фазі, яка потім може бути перероблена з метою вилучення каталізатора. Втрати каталізатора, що мають місце при цьому, компенсуються додаванням солей кобальту.

#### **Exxon процес.**

Процес Exxon, також відомий як Kuhlmann- або PCUK-оксо процес, використовується для гідроформілювання олефінів із довжиною ланцюга  $\text{C}_6 - \text{C}_{12}$ . Подібно процесу BASF, процес Exxon заснований на кобальтових каталізаторах. Однак вилучення каталізатора із суміші продуктів реакції, тобто із органічної фази відбувається в інший спосіб, а саме шляхом додавання у водний розчин каталізатора, гідроксиду натрію або карбонату натрію. Після екстракції олефіном й нейтралізації шляхом додавання розчину сірчаної кислоти під тиском в середовищі монооксиду вуглецю можна вилучити карбонільгідрид кобальту. Таким чином він видаляється за допомогою синтез-газу, поглинається олефіном і повертається в реактор. Аналогічно процесу BASF, процес Exxon проводять під тиском близько 30 МПа й при температурі близько 160 - 180 °С.

**Shell процес.**

У Shell процесі застосовують кобальтові комплекси, модифіковані фосфіновими лігандами. Цей процес використовують для гідроформілювання олефінів із довжиною ланцюга  $C_7 - C_{14}$ . Альдегіди, що отримуються в результаті проведення реакції відразу ж, безпосередньо в реакторі гідруються до спиртів, які в свою чергу далі відділяються від реакційної маси перегонкою, що дозволяє організувати зручну рециркуляцію каталізатора. Процес має гарну селективність по відношенню до лінійних продуктів реакції, які знаходять застосування в якості напівпродуктів для отримання миючих засобів. Shell процес проводиться при тиску близько 4 - 8 МПа й в діапазоні температур близько 150 - 190 °С.

**Union Carbide процес.**

Як можна бачити з наведеного вище огляду, особливістю більшості розглянутих процесів, є використання високого тиску. Що, врівні зі складністю вилучення каталізатора з реакційної маси, створює деякі технологічні труднощі. В свою чергу процес Union Carbide (UCC), також відомий як оксопроцес низького тиску (LPO), ґрунтується на родієвому каталізаторі, розчиненому у висококиплячому густому маслі, яке є високомолекулярним продуктом. Цей процес використовується для гідроформілювання пропілену. Реакційну суміш відокремлюють від легко летючих компонентів у випарнику із падаючою плівкою. Після чого рідку фазу піддають перегонці, а бутіральдегід (масляний альдегід) видаляють як продукт, в той час як каталізатор, що містить інші продукти, повертають у процес. Цей процес проводять при невисокому тиску, близько 1,8 МПа й температурі 95 - 100 °С, що є значною конкурентною перевагою цього процесу.

Таким чином, розглянувши основні промислові процеси гідроформілювання, що застосовуються у промисловості основного органічного синтезу в даний час, можна виділити наступні шляхи подальшого вдосконалення цієї технології. Зусилля з

удосконалення процесів гідроформілювання в даний час можуть бути спрямовані на розробку нових каталізаторів, що дозволяють проводити процес при більш м'яких умовах: зниженому тиску й невисоких температурах. Іншим важливим напрямком вдосконалення процесу гідроформілювання є вдосконалення методів вилучення каталізатора з суміші продуктів реакції для подальшої регенерації й повернення каталізатора у реактор.

Розглянемо наразі основні типи каталізаторів, що використовуються у процесах гідроформілювання. Історично першим типом каталізаторів, були кобальтові. У реакційну систему кобальт можна вводити у вигляді металу, гідроксиду, карбонату, сульфату, ацетилацетонату, солей жирних кислот, оскільки в подальшому при протіканні реакції вони перетворюються в карбоніли кобальту, які й є справжніми каталізаторами процесу гідроформілювання.

Умови проведення реакції при використанні цього типу каталізатора, досить жорсткі. Так, реакцію проводять при тиску близько 30 МПа. Такий тиск є необхідний для того, щоб забезпечити стабільність карбонілів кобальту. Режим проведення реакції гідроформілювання визначається необхідністю забезпечити стабільний стан карбонілів кобальту в реакційній зоні, що залежить насамперед від температури й парціального тиску СО. Крім того, для збільшення швидкості реакції необхідно також невелике підвищення тиску трохи вище мінімально необхідного для забезпечення стабільності карбонілів.

Суттєвими недоліками процесів гідроформілювання, в яких в якості каталізатора використовуються карбоніли кобальту, є невисока активність каталізатора, а так само й його невисока селективність. Ще одним недоліком цього типу каталізаторів є складність вилучення каталізатору цього типу із суміші продуктів реакції, а так само складність процесів регенерації каталізатора.

Таблиця

**Порівняння основних промислових процесів гідроформілювання**

Процес	Продукти	Тип каталізатора	Робочий тиск	Робочі температури
Ruhrchemie/Rhone - Poulenc	Пропілен	Родієвий каталізатор з фосфорвмісними лігандами	10 МПа	50 - 130 °С
BASF	Вищі олефіни	Карбоніли кобальту	30 МПа	150 - 170 °С
Exxon	$C_6 - C_{12}$	Кобальтові каталізатори	30 МПа	160 - 180 °С
Shell	$C_7 - C_{14}$	Кобальтові комплекси, модифіковані фосфіновими лігандами	8 МПа	150 - 190 °С
Union Carbide	Пропілен	Родієвий каталізатор	1,8 МПа	95 - 100 °С

Необхідність вилучення із суміші продуктів реакції карбонілу кобальту, й як наслідок, необхідність наявності в технологічній схемі стадії тонкого очищення від карбонілів, визначається не тільки міркуваннями економічної доцільності. Так наявність навіть невеликої кількості невилучених карбонілів призводить не тільки до додаткових витрат на поповнення об'єму каталізатора в реакторі, а й істотно знижує товарні якості альдегідів: викликає конденсацію альдегідів при подальшій їх ректифікації, забарвлює продукт й отруює каталізатор гідрування альдегідів до спиртів.

Однак, оскільки розглянутий тип каталізаторів продовжує використовуватися в згаданих вище процесах, ведуться роботи з їх модифікації, наприклад фосфінами й деякими третинними амінами.

Другим важливим типом каталізаторів гідроформілювання, є родієві каталізатори. В якості каталізаторів гідроформілювання найчастіше використовують карбоніли родію, а також його фосфінові й арсінові комплекси. Основною перевагою цього типу каталізаторів є те, що в їх присутності перебіг реакції відбувається селективно й за м'яких умов.

Карбоніли родію активні при 75 - 150 °С та при тиску від 5 до 20 МПа. Однак суттєвим недоліком цього типу каталізаторів є те, що вони недостатньо стабільні й руйнуються під час перебігу реакції, хоча вони є в 100 - 1000 разів активніші ніж карбоніли кобальту (при гідроформілюванні олефінів C<sub>3</sub> - C<sub>6</sub>). Також слід зазначити, що при підвищеному вмісті родію в реакційній масі інтенсивно протікає реакція з гідрування альдегідів в спирти.

Для підвищення стабільності й активності карбонілів родію в якості каталізаторів гідроформілювання проводять їх модифікацію фосфінами арсінами або амінами. При проведенні такої модифікації карбонілів родію, вдається отримати каталізатори, які є активними навіть при кімнатній температурі й атмосферному тиску.

Таким чином зазначений другий тип каталізаторів гідроформілювання характеризується більш високою активністю (на 2 - 3 порядки) в порівнянні з активністю аналогічних комплексів кобальту, мінімальною кількістю побічних реакцій й високою селективністю щодо утворення альдегідів.

Розглядаючи подальші перспективи розвитку такого напрямку як металокомплексний каталіз у реакціях гідроформілювання, слід зазначити, що основним завданням щодо вдосконалення цього процесу є створення нових, високоселективних, стійких і економічно вигідних каталізаторів для проведення процесу гідроформілювання олефінів в найбільш м'яких умовах. Робота зі створення нових лігандів для металокомплексного каталізу процесу гідроформілювання в даний час ведеться на факультеті Хімічної інженерії Східноукраїнського

національного університету імені Володимира Даля (Україна, м. Сєверодонецьк).

#### Л і т е р а т у р а

1. Имянитов Н. С., Рудковский Д. М. / Гидрирование и гидроформилирование в присутствии карбониллов кобальта, родия и иридия. // Нефтехимия. — 1963. — Т. 3. — № 2 — С. 198—200.
2. P.W.N.M. van Leeuwen, C.Claver Eds. / Rhodium Catalyzed Hydroformylation. // Springer. — 2002. ISBN 1-4020-0421-4
3. Piet W.N.M. van Leeuwen / Homogeneous Catalysis: Understanding the Art. // Springer. — 2005. ISBN 1-4020-3176-9
4. Лапидус А. Л. / Гидроформилирование. // Химическая энциклопедия. — М.: Советская энциклопедия, 1988 — Т. 1. — С. 568
5. Фальбе Ю., Синтез на основе окиси углерода, пер. с нем., Л., 1971;

#### References

1. Imyanitov N. S., Rudkovsky D. M. / Hydrogenation and hydroformylation in the presence of cobalt carbonyls, rhodium and iridium. // Petrochemistry. — 1963. — P. 3. — No. 2 — p. 198—200.
2. P.W.N.M. van Leeuwen, C.Claver Eds. / Rhodium Catalyzed Hydroformylation. // Springer. — 2002. ISBN 1-4020-0421-4
3. Piet W.N.M. van Leeuwen / Homogeneous Catalysis: Understanding the Art. // Springer. — 2005. ISBN 1-4020-3176-9
4. Lapidus A. L. / Hydroformylation. // Chemical encyclopedia. — M.: Soviet Encyclopedia, 1988 — P. 1. — p. 568
5. Jurgen Falbe, Synthesen mit Kohlenmonoxyd, translation from german, L., 1971;

#### **Кохан І.В., Кудрявцев С.А., Промышленные процессы гидроформилирования их особенности и используемые катализаторы.**

*В статье проводится обзор промышленных процессов гидроформилирования. Рассмотрены процессы, разработанные различными компаниями и использующиеся как в промышленности основного органического синтеза, так и в тонком органическом синтезе для получения альдегидов различного строения. При рассмотрении процессов уделяется внимание условиям проведения реакции, типу используемого катализатора и особенностям отделения катализатора от продуктов реакции. Дополнительно рассмотрены основные типы металлокомплексных катализаторов гидроформилирования и особенности их применения. Проанализированы дальнейшие направления развития металлокомплексного катализа для процесса гидроформилирования.*

**Ключевые слова:** гидроформилирование, оксисинтез, металлокомплексный катализ, гомогенный катализ, карбонилы кобальта, кобальтовые катализаторы, родиевые катализаторы, фосфорсодержащие лиганды, фосфорорганические соединения.

**Ivan Kokhan, Sergiy Kudriavtsev, Industrial processes of Hydroformylation. Features and used catalysts.**

*This article provides an overview of the industrial processes of hydroformylation. Processes that developed by different companies and used in the industry of basic organic synthesis and in fine organic synthesis for obtaining aldehydes of different structure are considered. In the processes overview, attention is paid to the conditions of the reaction, the type of catalyst used and the characteristics of the separation of the catalyst from the products of reaction. A comparative analysis of the conditions of the main industrial hydroformylation processes provides conceptions of the development trends in this field. In additionally, the main types of metal-complex hydroformylation catalysts and their application are considered. Further directions of development of the new metal complex catalysts for the hydroformylation process are analyzed.*

**Keywords:** *hydroformylation, oxosynthesis, metallocomplex catalysis, homogeneous catalysis, cobalt carbonyls, cobalt catalysts, rhodium catalysts, phosphorus-containing ligands, organophosphorus compounds.*

**Кохан І. В.** – аспірант другого курсу навчання, Східноукраїнського Національного Університету ім. В. Даля, Факультет Інженерії, Кафедра Хімічної Інженерії та Екології, спеціальність Хімічні технології органічних речовин, e-mail [ivan.v.kokhan@gmail.com](mailto:ivan.v.kokhan@gmail.com)

**Кудрявцев С. О.** – к. т. н., доцент, Декан Факультету Інженерії, Східноукраїнського Національного Університету ім. В. Даля, e-mail [sergeykudryavtsevsnu@gmail.com](mailto:sergeykudryavtsevsnu@gmail.com)

*Рецензент:* д.т.н., проф., **Глікін М.А.**

Стаття подана 10.12.2018.

УДК 541.128.13

## ОДЕРЖАННЯ АКРИЛОВОЇ КИСЛОТИ КОНДЕНСАЦІЄЮ ОЦТОВОЇ КИСЛОТИ З ФОРМАЛЬДЕГІДОМ НА В-Р-В-V-O<sub>x</sub> КАТАЛІЗАТОРАХ НА ОСНОВІ АЕРОСИЛІВ РІЗНИХ МАРОК

Кубіцька І. І., Комарецька А. А., Небесний Р. В.

## ACRYLIC ACID OBTAINING BY CONDENSATION OF ACETIC ACID WITH FORMALDEHYDE ON B-P-W-V-O<sub>x</sub> CATALYSTS BASED ON FUMED SILICA OF DIFFERENT BRANDS

Kubitska I.I., Komarets'ka A.A., Nebesnyi R.V.

Досліджено ефективність В-Р-В-V/O<sub>x</sub> каталітичних системи на основі аеросилів з різними питомими площами поверхні (50, 200, 300 м<sup>2</sup>/г) в процесі одержання акрилової кислоти конденсацією оцтової кислоти з формальдегідом. Встановлено, що селективність утворення акрилової кислоти залежить від питомої поверхні носія, який використано для приготування каталізаора. Найвища селективність утворення акрилової кислоти отримана на каталізаторі на основі аеросилу марки А-50; в оптимальних умовах (час контакту 8 с, температура реакції 648 К) вихід цільового продукту становить 60 % при селективності його утворення 94,6 %.

**Ключові слова:** акрилова кислота, альдольна конденсація, аеросил, каталіз, оцтова кислота, формальдегід.

**1. Вступ.** Акрилова кислота (АК) є цінним продуктом та вихідною сировиною для багатьох процесів органічного синтезу [1]. АК є основою для виробництва високоякісної лакофарбової продукції, органічного скла, як допоміжна речовина в текстильній промисловості, у виробництві суперабсорбентів, у медицині [2-5]. Світове виробництво акрилової кислоти з кожним роком зростає становить понад 5 млн тонн / рік [2]. Одним із найбільш перспективних методів одержання АК, який становить велику цікавість для науковців є альдольна конденсація оцтової кислоти (ОК) з формальдегідом (ФА) [7]. Конденсація оцтової кислоти з формальдегідом дозволяє розширити сировинну базу одержання акрилової кислоти за умови розробки ефективних каталізаторів. Вивченню альдольної конденсації присвячено значна кількість наукових праць, проте проблема пошуку активних та високоселективних каталізаторів для цього процесу залишається актуальною.

### 2. Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Ключем для успішного впровадження виробництва АК на основі ОК та ФА є розроблення ефективних каталізаторів для даного процесу. Відомо, що реакції альдольної конденсації можуть проходити за двома механізмами (основний та кислотний каталіз). Попередньо нами було синтезовано каталізатори двох типів та встановлено, що каталізатори кислотного типу володіють більш високою активністю і ефективністю, ніж основні каталізатори [1, 6]. Але, не дивлячись на певні успіхи у розробленні каталізаторів альдольної конденсації ОК з ФА, бажаний рівень їх ефективності досі не досягнуто.

В попередніх дослідженнях досліджено закономірності здійснення процесу альдольної конденсації оцтової кислоти з формальдегідом в акрилову кислоту у газовій фазі при використанні носіїв різної природи: SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> анатаз з TiO(OH), ZrO<sub>2</sub>, SnO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В-Р-В-V-O<sub>x</sub> каталізатори нанесені SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> анатаз з TiO(OH), ZrO<sub>2</sub>, SnO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> та Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Вихід цільового продукту, як і селективність його утворення при використанні різних носіїв відрізняється, що свідчить про вплив природи носія на каталітичні властивості. Оптимальною температурою для здійснення процесу є температура 648 К і час контакту 8 с. В зазначених умовах вдалося досягти виходу акрилової кислоти 49 % при селективності її утворення 94 % та конверсії ОК 52 % на каталізаторі з використанням носія TiO<sub>2</sub> анатаз з TiO(OH) [8].

### 3. Матеріали і результати досліджень.

Для досліджень процесу альдольної конденсації ОК з ФА приготувано каталітичні системи на основі аеросилів з різними питомими площами поверхні (50, 200, 300 м<sup>2</sup>/г) методом випарювання компонентів активної фази В-Р-В-V-O<sub>x</sub>. Атомне співвідношен-

ня компонентів в каталізаторі В:Р:(W+V) становить 3:1:0,3; атомне співвідношення W:V = 2:3. Каталітичні властивості одержаних каталізаторів досліджено в реакції альдольної конденсації ОК з ФА в температурному діапазоні від 573 до 673 К, часі контакту 8 с при еквімолярному співвідношенні вихідних реагентів.

Як джерело ФА для дослідження процесу альдольної конденсації використовували формалін, який одержували з параформу безпосередньо перед здійсненням процесу.

Дослідження проводили у реакторі проточного типу з імпульсною подачею реагентів і стаціонарним шаром каталізатора. Продукти реакції аналізували методом газової хроматографії.

В усьому дослідженому інтервалі температур при збільшенні температури до 673 К конверсія оцтової кислоти суттєво збільшується для всіх типів каталізаторів (рис.1). Мінімальне значення конверсії ОК спостерігається при температурі 573 К для каталізатора А-200 і А-300 і становить відповідно 26,4 та 27,8 %. Найвище значення конверсії спостерігаються при температурі 673 К для каталітичної системи А-200, а саме 73,4 %.

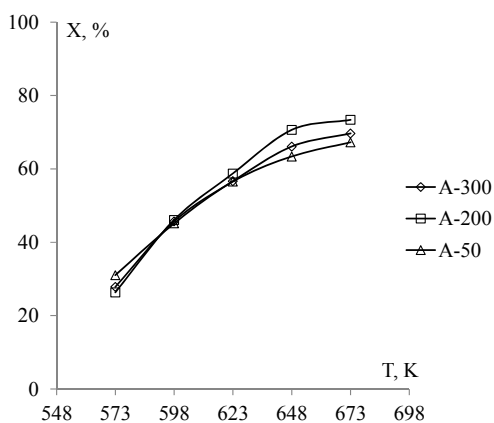


Рис. 1. Вплив температури на конверсію ОК (X, %) у присутності каталізаторів А-300, А-200, А-50. Мольне співвідношення ОК:ФА=1:1, час контакту 8 с

Селективність утворення АК при збільшенні температури до 623 К для каталітичних систем А-200 та А-300 помітно зростає (рис. 2). При подальшому збільшенні температури процесу від 623 до 673 К селективність утворення АК плавно зменшується. Для каталітичної системи А-50 селективність утворення АК знаходиться на високому рівні для всіх значень температури. Максимальне значення селективності становить 95,4 % при температурі процесу 623 К та часі контакту 8 с.

Вихід АК для всіх каталітичних систем зростає до температури 648 К, а вже при підвищенні температури до 673 К вихід АК несуттєво зменшується (рис. 3). Як видно з рис. 3, максимальне значення виходу АК спостерігається при температурі процесу 648 К і становить 63 % для каталізатора А-200 при часі контакту є 8 с. Таким чином, оптимальною температурою здійснення процесу одержання АК аль-

дольною конденсацією є 648 К, оскільки при цій температурі спостерігається найвище значення виходу АК.

За виходом акрилової кислоти при температурі 648 К розроблені каталітичні системи можна розмістити в ряд: А-300 (59,8 %) ≤ А-50 (60,0 %) < А-200 (63,0 %).

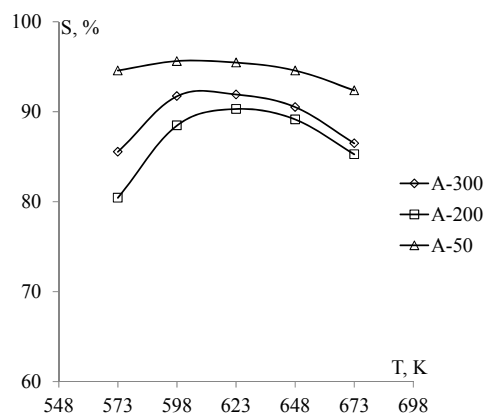


Рис. 2. Вплив температури на селективність утворення АК (S, %) у присутності каталізаторів А-300, А-200, А-50. Мольне співвідношення ОК:ФА=1:1, час контакту 8 с

За селективністю утворення акрилової кислоти при температурі 648 К розроблені каталітичні системи можна розмістити в ряд: А-200 (89,1 %) ≤ А-300 (90,5 %) < А-50 (94,6 %). Аеросил марки А-50 слід вважати кращим серед досліджених для синтезу каталізатора, оскільки при його використанні селективність утворення цільового продукту є максимально.

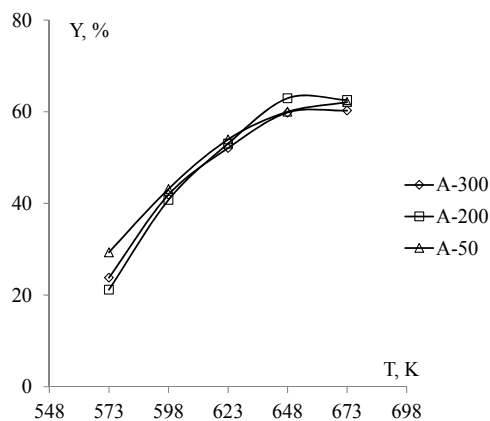


Рис. 3. Вплив температури на вихід АК (Y, %) у присутності каталізаторів А-300, А-200, А-50. Мольне співвідношення ОК:ФА=1:1, час контакту 8 с

Оптимальними умовами здійснення процесу конденсації ОК з ФА в АК є температура 648 К та час контакту 8 с на каталізаторі А-50. В зазначених умовах вдалося досягти виходу акрилової кислоти 60 % при високій селективності її утворення 94,6 % та конверсії ОК 63,4 %.

На рис. 4. наведено порівняння каталітичної активності [9] попередньо розробленого каталізатора на основі силікагелю марки КСКГ та основі аеросилу марки А-50 в оптимальних умовах процесу

– температурі процесу 648 К, часі контакту 8 с у процесі альдольної конденсації оцтової кислоти з формальдегідом.

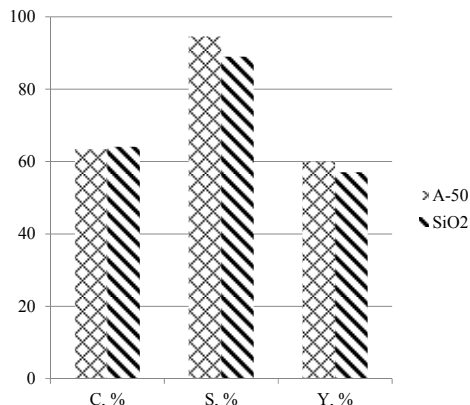


Рис. 4. Порівняння каталітичної активності оптимального каталізатора носій SiO<sub>2</sub> та A-50

Так, на каталізаторі з використанням носія SiO<sub>2</sub> марки КСКГ (питома площа поверхні 365 м<sup>2</sup>/г) вихід акрилової кислоти становить 57 % при селективності її утворення 89 % та конверсії оцтової кислоти 64,1 % в зазначених умовах. А при використанні носія на основі аеросилу марки А-50 вихід акрилової кислоти становить 60 % при селективності її утворення 94,6 % та конверсії ОК 63,4 %. Таким чином, заміна носія каталізатора на аеросил марки А-50 дозволяє підвищити селективність утворення та вихід цільового продукту реакції – акрилової кислоти.

**4. Висновки.** Досліджено закономірності здійснення процесу альдольної конденсації оцтової кислоти з формальдегідом в акрилову кислоту у газовій фазі при використанні аеросилів з різними питомими площами поверхні (300, 200, 50 м<sup>2</sup>/г). Питома поверхня каталізатора (носія) впливає на селективність утворення продуктів в процесі альдольної конденсації оцтової кислоти з формальдегідом. Найвищу селективність утворення акрилової кислоти отримано на каталізаторі з питомою поверхнею 50 м<sup>2</sup>/г (аеросил марки А-50). Оптимальною температурою для здійснення процесу є температура 648 К і час контакту 8 с. В зазначених умовах вдалося досягти виходу акрилової кислоти 60 % при селективності її утворення 94,6 % та конверсії ОК 63,4 % на каталізаторі з використанням аеросилу з питомою площею поверхні 50 м<sup>2</sup>/г.

#### Л і т е р а т у р а

1. R. Nebesnyi, V. Ivasiv, Y. Dmytruk, N. Lapychak, «Acrylic acid obtaining by acetic acid catalytic condensation with formaldehyde», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 6, no 6(66), pp. 40-42, 2013.
2. X. Li, Y. Zhang, «Highly Efficient Process for the Conversion of Glycerol to Acrylic Acid via Gas Phase Catalytic Oxidation of an Allyl Alcohol Intermediate», *ACS Catalyst*, Vol. 6 (1), pp. 143–150, 2016.
3. S.K. Bajpai, M. Jadaun, M. Bajpai, P. Jyotishi, F. F. Shaha, S. Tiwar, «Controlled release of Doxycycline from gum

acacia/poly(sodium acrylate) microparticles for oral drug delivery», *International Journal of Biological Macromolecules*, Vol. 104, pp. 1064-1071, 2017.

4. S. Wang, J. Xu, Q. Wanga, X. Fana, Y. Yu, P. Wang, Y. Zhang, J. Yuan, A. Cavaco-Paulo, «Preparation and rheological properties of starch-g-poly(butyl acrylate) catalyzed by horseradish peroxidase», *Process Biochemistry*, Vol. 59, pp. 104-110, 2017.
5. W. Yao, Y. Li, X. Huang, «Fluorinated poly(meth)acrylate: Synthesis and properties», *Polymer*, Vol. 55 (24), pp. 6197-6211, 2014.
6. Р.В. Небесний, В.В. Івасів, В.М. Жизневський, С.В. Шибанов, С.В. Майкова, «Конденсація оцтової кислоти з формальдегідом у акрилову кислоту на В-Р-Мо-Сs-Ох каталізаторах в газовій фазі», *Вісник НУ "ЛП"*, "Хімія, технологія речовин та їх застосування", № 667, с.196–199, 2010.
7. R. Nebesnyi, «Complex oxide catalysts of acrylic acid obtaining by aldol condensation method», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 1, no 6(73), pp. 13-16, 2015.
8. І.І. Шпирка, Р.В. Небесний, З.Г. Піх, В.В. Сидорчук, С.В. Халамейда, О.В. Цимбаліста, Х.Р. Хома, «Одержання акрилової кислоти альдольною конденсацією оцтової кислоти з формальдегідом в присутності В–Р–W–V–Ox каталізаторів на мезопористих носіях», *Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України*, № 28(6), с. 89–92, 2018.
9. Р.В. Небесний, З.Г. Піх, В.В. Івасів, В.В. Сидорчук, І.І. Шпирка, Н. І. Лапичак «Підвищення ефективності В<sub>2</sub>О<sub>3</sub>–Р<sub>2</sub>О<sub>5</sub>–WО<sub>3</sub>–V<sub>2</sub>О<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> каталізатора процесу альдольної конденсації оцтової кислоти з формальдегідом шляхом гідротермальної обробки носія», *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*. Хімія, технологія речовин та їх застосування. № 841. с. 113–118. 2016.

#### References

1. R. Nebesnyi, V. Ivasiv, Y. Dmytruk, N. Lapychak, «Acrylic acid obtaining by acetic acid catalytic condensation with formaldehyde», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 6, no 6(66), pp. 40-42, 2013.
2. X. Li, Y. Zhang, «Highly Efficient Process for the Conversion of Glycerol to Acrylic Acid via Gas Phase Catalytic Oxidation of an Allyl Alcohol Intermediate», *ACS Catalyst*, Vol. 6 (1), pp. 143–150, 2016.
3. S.K. Bajpai, M. Jadaun, M. Bajpai, P. Jyotishi, F. F. Shaha, S. Tiwar, «Controlled release of Doxycycline from gum acacia/poly(sodium acrylate) microparticles for oral drug delivery», *International Journal of Biological Macromolecules*, Vol. 104, pp. 1064-1071, 2017.
4. S. Wang, J. Xu, Q. Wanga, X. Fana, Y. Yu, P. Wang, Y. Zhang, J. Yuan, A. Cavaco-Paulo, «Preparation and rheological properties of starch-g-poly(butyl acrylate) catalyzed by horseradish peroxidase», *Process Biochemistry*, Vol. 59, pp. 104-110, 2017.
5. W. Yao, Y. Li, X. Huang, «Fluorinated poly(meth)acrylate: Synthesis and properties», *Polymer*, Vol. 55 (24), pp. 6197-6211, 2014.
6. R.V. Nebesnyi, V.V. Ivasiv, V.M. Zhyznovsky, S.V. Shybanov, S.V. Maykova, «Condensation of acetic acid with formaldehyde to acrylic acid over B-P-Mo-Cs-Ox catalysts in the gas phase», *Visnyk NU «LP» «Chemistry, technology of substances and their applications»*, no 667, pp. 196-199, 2010 (in Ukrainian).



7. R. Nebesnyi, «Complex oxide catalysts of acrylic acid obtaining by aldol condensation method», Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 1, no 6(73), pp. 13-16, 2015.
8. I. I. Shpyrka, R. V. Nebesnyi, Z. G. Pikh, V. V. Sydorчук, S. V. Khalameida, O. V. Tsymbalista, K. R. Khoma, «Acrylic acid obtaining by aldol condensation of acetic acid with formaldehyde in the presence of B – P–W – V–O<sub>x</sub> catalysts on mesoporous carrier», Scientific Bulletin of UNFU, Vol. 28, no 6, pp.89-92, 2018.
9. Nebesnyi R.V., Pikh Z.G., Ivasiv V. V., Sydorчук V.V., Shpyrka I.I., N. I. Lapychak, “Improving the efficiency of B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>–WO<sub>3</sub>–V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> catalyst the aldol condensation of acetic acid with formaldehyde by hydrothermal treatment of carrier”, Visnyk NU “LP” “Khimia, tekhnologiya rechovyn ta yikh zastosuvannia”, no. 841, P. 113–118, 2016.

**Кубицкая И.И. Небесный Р.В., Комарецкая А.А. Получение акриловой кислоты конденсацией уксусной кислоты с формальдегидом на В–Р–W–V–O<sub>x</sub> катализаторах на основе аэросилов разных марок**

*Исследована эффективность В–Р–W–V/O<sub>x</sub> каталитических систем на основе аэросилов с разными удельными площадями поверхности (50, 200, 300 м<sup>2</sup>/г) в процессе получения акриловой кислоты конденсацией уксусной кислоты с формальдегидом. Установлено, что селективность образования акриловой кислоты зависит от удельной поверхности носителя, который использовался для приготовления катализатора. Наивысшая селективность образования акриловой кислоты получена на катализаторе на основе аэросила марки А-50; в оптимальных условиях (время контакта 8 с, температура реакции 648 К) выход целевого продукта составляет 60 % при селективности его образования 94,6 %.*

**Ключевые слова:** акриловая кислота, альдольная конденсация, аэросил, катализ, уксусная кислота, формальдегид.

**Kubitska I.I., Nebesnyi R.V., Komaretskaya A.A. Acrylic acid obtaining by condensation of acetic acid with formaldehyde on b-p-w-v-o<sub>x</sub> catalysts based on fumed silica of different brands**

*The effectiveness of B-P-W-V / O<sub>x</sub> catalytic systems based on aerosols with different surface area specifics (50, 200, 300 m<sup>2</sup> / g) was investigated. in the process of obtaining acrylic acid by condensation of acetic acid with formaldehyde. It has been established that the selectivity of the formation of acrylic acid depends on the specific surface of the carrier used for the preparation of the catalyst. The highest selectivity of the formation of acrylic acid is obtained on a catalyst based on the aerosol brand A-50; under optimal conditions (contact time 8 s, reaction temperature 648 K) yield of the target product is 60% with selectivity of its formation 94,6%.*

**Keywords:** acrylic acid, aldol condensation, fumed silica, catalysis, acetic acid, formaldehyde.

**Кубицька Ірина Іванівна** – молодший науковий співробітник кафедри технології органічних продуктів, Національний університет «Львівська політехніка»; м. Львів, Україна; e-mail: iryna.i.shpyrka@lpnu.ua.

**Небесний Роман Володимирович** – кандидат технічних наук, Національний університет «Львівська політехніка», докторант кафедри технології органічних продуктів; м. Львів, Україна; e-mail: nebesnyi@lp.edu.ua.

**Комарецька Анастасія Анатоліївна** – студент кафедри технології органічних продуктів, Національний університет «Львівська політехніка»; м. Львів, Україна; lino4ka11.11.2011@gmail.com.

*Рецензент:* д.т.н., проф. **Глікін М.А.**

Стаття подана 24.12.2018.

УДК 621.91

**СТІЙКІСТЬ ІНСТРУМЕНТІВ З КРУГОВОЮ РЕЖУЧОЮ КРОМКОЮ****Мелконов Г.Л. Глазунов Я.І.****THE RESISTANCE OF TOOLS WITH CIRCULAR CUTTING EDGE****Melkonov G.L. Glazunov Ya.I.**

*Розглянутий процес контролю за стійкістю чашкового різця протягом певного часу роботи. Запропоновані технологічні показники, які є критеріями зносу інструменту. Розроблена методика проведення експериментальних досліджень. Надані результати проведених стійкісних випробувань. За проведеними випробуваннями зроблені висновки. Завдяки підвищенню стійкості інструменту можливість підвищити швидкість різання. Підвищення швидкості різання добре позначилося на продуктивності та на вартості операції. Побудований графік залежності величин износу задньої поверхні від часу роботи.*

**Ключові слова:** стійкість чашкового різця, види зносу, час роботи, технологічні параметри.

**1. Введення** Підставою для вибору установки режимів різання є вимоги до якості обробленої поверхні, а також до стійкості будь-якого різального інструменту і, зокрема, чашкового.

Стійкість різального інструменту - це здатність зберігати працездатність різучого леза на протязі певного періоду часу. Стійкість різального інструменту істотно впливає на економічні показники обробки - продуктивність і вартість операції.

**2. Аналіз літературних даних і формулювання мети** Аналіз літературних джерел [1, 2] показав, що застосування інструментів з круговою кромкою, що обертається, веде до значного підвищення періоду стійкості і, як наслідок, до підвищення продуктивності процесу обробки.

В основі таких змін лежить заміна тертя ковзання на тертя кочення між заготовкою, що оброблюється, стружкою та інструментом.

Результатами виконаних досліджень вищенаведених авторів стало те, що стійкість чашкового інструменту зросла в десятки й більше разів.

Разом з підвищенням стійкості інструменту з'явилася можливість підвищити швидкість різання. Підвищення швидкості різання сприятливо позначилося на продуктивності та вартості операції. Продуктивність зросла, а ціна операції знизилася. В основі підвищення стійкості чашкового інструменту лежить збільшення довжини леза. Обертання ін-

струменту сприяє активному тепловідведенню температури з поверхні інструменту.

Дослідження, які були проведені останнім часом, вказують на те, що загальноприйняті степеневі залежності між стійкістю інструмента, режимами різання, геометрією різучого леза і іншими параметрами, в зв'язку з розширенням номенклатури оброблюваних матеріалів і розвитком верстатного парку, виявляються непридатними. Тому з'явилася проблема встановлення нових залежностей, які відповідають сучасним вимогам.

Виходячи з вищевикладеного, можна сформулювати мету даної статті: визначення залежності періоду стійкості різального леза чашкового різця від часу його роботи до періоду стійкості.

**2. Методика проведення експериментальних досліджень** Методика проведення експериментальних досліджень передбачає обґрунтування обраного напрямку досліджень, програму конкретних експериментів, оцінку точності і достовірності отриманих даних, виведення емпіричної залежності стійкості інструменту від часу роботи. З огляду на вищевикладене, необхідно задатися наступними умовами для режимів різання, які під час проведення експерименту будуть постійними. Значення величин режимів різання вибиралися з літературних джерел [1 - 3, 4], а також в ході проведення попередніх експериментів. У цих експериментах критерієм вибору найбільш сприятливих режимів різання служили мінімальні значення висоти та шорсткості обробленої поверхні.

Результатом цієї роботи є наступні режими різання:  $V = 100 \frac{\text{м}}{\text{мм}}$ ;  $S = 0,4 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$ ;  $t = 0,4 \text{ мм}$ .

Одним з важливих параметрів, які впливають на процес обробки, є кут схрещування осей оброблюваної заготовки і інструмента  $\gamma = 37^{\circ}$ . В якості виробу, що оброблюється, був прийнятий карданний вал шахтового насоса. Карданний вал є нежорсткою деталлю ( $L > 10d$ ) і одночасно виконує відповідальну роль в конструкції насоса. Тому дуже важли-

во виготовити його відповідно до вимог креслення. Для виготовлення карданного валу використовувалася заготовка зі сталі марки 40X діаметром 45 мм, довжиною 410 мм. Креслення карданного валу наведено на рис. 1.



Рис. 1. Креслення карданного валу

Заготовку карданного валу обробляли чашковим інструментом, який представляє собою твердосплавну пластинку марки T15K10, з зовнішнім діаметром ріжучого леза 32 мм, завтовшки 10 мм, з кутом нахилу бічної (задньої) поверхні  $6^\circ$ . Цей інструмент використовувався виключно для чистової операції (рис. 2).

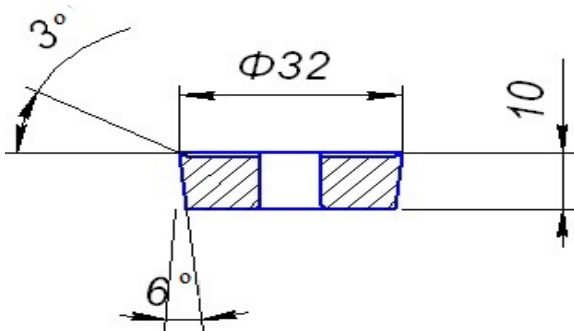


Рис. 2. Твердосплавна кругла пластинка

Стійкість чашкового інструменту контролювалася за двома параметрами: за діаметром твердосплавної пластини за ріжучим лезом і за паском зносу за задньою поверхнею. Контрольовані параметри представлені на рис. 3.

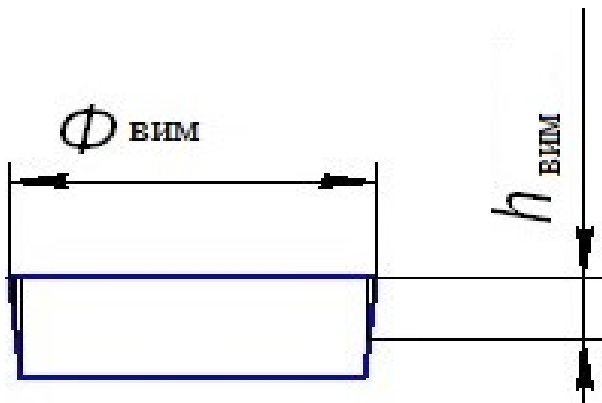


Рис. 3. Схема зносу твердосплавної чашкової пластини

В якості вимірювального інструменту використовувався штангенциркуль з годинниковим індикатором, з ціною поділки 0,1 мм, і інструментальний мікроскоп БМІ-1 з точністю розподілу до 0,005 мм.

**3. Результати проведених досліджень** Заготовка карданного валу, призначеного для чистової обробки, встановлювалася на токарному верстаті моделі 16К20. Один кінець затискався в патроні верстата, другий кінець підтискався центром задньої бабки. Чашковий різець встановлювався в центрах токарного верстата під кутом  $\gamma = 37^\circ$ . Режими різання встановлювалися відповідно до наведених у довіднику, які рівні  $V = 100 \frac{\text{м}}{\text{хв}}$ ;  $S = 0,4 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$ ;  $t = 0,4 \text{ мм}$ . На чистову операцію витрачено  $t = 126 \text{ хв}$ . Заготованці повідомлялося обертання зі швидкістю 100 м/хв, в зону різання підводився чашковий різець і проводилася чистова обробка. Після завершення чистової операції деталь знімалася з верстата, а на її місце встановлювалася нова заготовка. Після кожної обробки деталі проводилися виміри ріжучого леза чашкового різця на предмет визначення зносу, а результати протоколювалися у табл. 1.

Проводилися заміри й приймалися середні значення діаметра ріжучого леза і ширини фаски задньої поверхні.

З огляду на той факт, що в даній роботі ставилася мета визначення часу, в перебіг якого чашковий різець буде зберігати працездатність, аналіз таблиці показав, що найменший знос чашки за діаметром задньої поверхні буде в діапазоні часу  $T = 10 \text{ хв} - 300 \text{ хв}$ . Понад 300 хв. настає катастрофічний знос. Критерієм зносу чашкового різця є якість обробленої поверхні - шорсткість, сили різання і температура різання.

За результатом проведених експериментів встановлено, що досягнення зносу фаски задньої поверхні  $h_{\text{зн}} = 0,85 - 1 \text{ мм}$  негативно позначилося на висоті мікронерівностей обробленої поверхні. З аналізу таблиці 1 і рисунка 4 видно, що шорсткість обробленої поверхні в початковий період точіння вала становила 1,6 мкм в часовому відрізку від 20 хв до 200 хв. обробки, висота мікронерівностей залишалася практично незмінною і склала  $R_a = 2 \text{ мкм}$ .

За результатами проведення досліджень побудовано графік залежності величини зносу задньої поверхні від часу роботи.

При подальшій обробці висота мікронерівностей змінювалася від  $R_a = 2 \text{ мкм}$ . до  $R_a = 20 \text{ мкм}$ . Коли чашкові різці з обробки карданних валів відпрацьовували 300 хв., наступав катастрофічний знос. Розмір фаски задньої поверхні склав  $h_{\text{зн}} = 1,7 - 2 \text{ мм}$ , що призвело до катастрофічного зносу. Висота мікронерівностей досягла  $R_z = 51 \text{ мкм}$ . Аналогічна картина спостерігалася і при дослідженні залежності сили різання і температури від тимчасового зносу чашкового різця. Найменші значення сили різання і температури були при  $t = 220 \text{ хв}$ , потім спостерігалася підвищення до  $t = 320 \text{ хв}$ . Із досягненням часу роботи більше 300 хв. ці показники різко зростали і досягли  $P_y = 1600 \text{ Н}$ ,  $Q^0 = 713^\circ$ . Це також свідчить про катастрофічний знос чашкового різця. В процесі проведення експериментальних досліджень залежність зміни висоти шорсткості обробленої поверхні, сили різання і температури від зносу чашкового різ-

ця за діаметром не встановлено. Аналізуючи проведені експериментальні дослідження, можна зробити припущення, що стійкість інструменту  $S$  від часу роботи  $T$  буде представлятися в загальному ді:  $S = f(t)$ . Провівши аналіз таблиці, представленої на рис. 1, і графіка, побудованого за даними з таблиці 1, можна зробити висновок, що крива підпорядковується наступному закону:

$$h_{зм} = \sqrt{T}, \quad (1)$$

тобто буде представляти із себе криву, наближено нагадуючи гіперболу.

Таблиця 1

**Результати вимірювань зносу чашкового різця за діаметром різального леза і зносу фаски задньої поверхні**

№ п/п	Час роботи різця $T$ , хв	Знос за діаметром $D_{вим}$ , мм	Величина зносу $\Delta D = D - D_{вим}$ , мм	Знос задньої поверхні $h_{вим}$ , мм	Шорсткість звор. Поверхні $R_a$ і $R_z$ , мкм	Складова сила різання $P_y$ (Н)	Температура в зоні різання $Q^0$
1	10	32	-	-	$R_a=1,6$	800	300
2	20	31,97	0,03	0,1	$R_a=1,6$	800	300
3	40	31,94	0,06	0,2	$R_a=1,6$	800	300
4	60	31,9	0,1	0,3	$R_a=1,6$	800	310
5	80	31,7	0,3	0,37	$R_a=1,6$	810	310
6	100	31,58	0,42	0,42	$R_a=1,7$	810	320
7	120	31,52	0,48	0,5	$R_a=1,79$	850	330
8	140	31,47	0,53	0,56	$R_a=1,82$	870	370
9	160	31,4	0,6	0,61	$R_a=1,88$	900	390
10	180	31,3	0,7	0,68	$R_a=2$	930	415
11	200	31,3	0,7	0,71	$R_a=2,5$	980	447
12	220	31,25	0,75	0,75	$R_a=2,5$	1050	493
13	240	31,1	0,9	0,8	$R_z=15$	1120	515
14	260	31,1	0,9	0,85	$R_z=18$	1190	534
15	280	31,1	0,9	0,89	$R_z=20$	1200	600
16	300	31,1	0,9	1	$R_z=25$	1280	620
17	320	31	1	1,3	$R_z=30$	1350	643
18	340	29	3	1,7	$R_z=38$	1410	670
19	360	28	4	2	$R_z=51$	1600	713

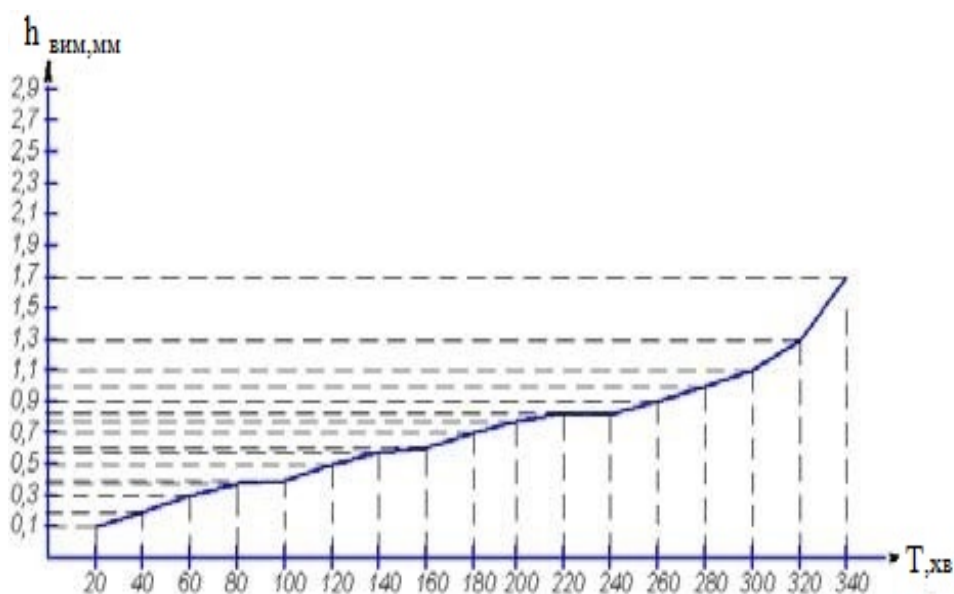


Рис. 4. Графік залежності зносу чашки  $h_{вим}$  від часу роботи  $T$

**Висновки.** Основною метою проведених експериментальних досліджень є встановлення залежності стійкості чашкового інструменту від часу безперервної експлуатації.

Критерієм зносу чашкового різця була поява матовою стрічки на задній поверхні. Зі збільшенням часу безперервної роботи чашкового різця ширина матовою стрічки збільшувалася.

За основу критеріїв зносу чашкового різця прийнятий технологічний показник - висота мікронерівностей обробленої поверхні карданного валу. Також досліджувався вплив величини зносу чашкового інструменту на такі параметри, як сила різання і температура різання.

Встановлено, що з плином часу від 0 хв до 220 хв величина зносу задньої поверхні була мінімальною і становила  $h_{\text{зн}} = 0,75$  мм, висота мікронерівностей дорівнювала  $R_a = 2,5$  мкм, сила різання коливалася в межах  $P_y = 800 - 980$  Н, температура різання  $Q^0 = 300 - 500^0$ . З подальшою експлуатацією чашкового різця  $t = 300$  хв фаска зносу досягла  $h_{\text{зн}} = 1$  мм; висота шорсткості  $R_z = 25$  мкм; сила різання  $P_V = 1280$  Н і температура в зоні різання  $Q^0 = 620^0$ . З подальшою експлуатацією чашкового різця наступав катастрофічний знос при  $t = 320$  хв і всі експериментальні показники досягли свого максимуму  $R_a = 51$  мкм;  $P_V = 1600$  Н;  $Q^0 = 713^0$ .

Подальше проведення експериментальних досліджень було недоцільним, тому що вже була б зона чорнового точіння, а не чистового.

Виведена емпірична залежність (1), яка дозволить визначити величину зносу задньої поверхні інструменту без проведення додаткових експериментальних досліджень.

### Література

1. Валиев Р.З. Развитие равноканального углового пресования для получения ультрамелкозернистых металлов и сплавов // - Металлы. - 2004. - №1. - С. 15-21.
2. Рааб Г.И. К вопросу промышленного получения объемных ультрамелкозернистых материалов // - Физика и техника высоких давлений. - 2004. Т.15. № 1. - С. 72-80.
3. Бейгельзимер Я.Е. Винтовая экструзия – процесс накопления деформаций: підруч. [для студ. вищ. нач. закл.] / Я.Е.Бейгельзимер, В.Н.Варюхин, Д.В. Орлов, С.Г. Сынков. – Донецк: ТЕАН, 2003. – 87с.
4. Beygelzimer Y. A new severe plastic deformation method: Twist Extrusion / Y. Beygelzimer, D. Orlov, V. Varyukhin // - Ultrafine Grained Materials II: «Proceed. of TMS (The Minerals, Metals & Materials Society)». – 2002. – P. 297-304.
5. Varyukhin V.N. High pressure effects in severe plastic deformation / V. N. Varyukhin, Y.Y. Beygelzimer, B.M. Efros, O.V. Prokof'eva, V.P. Pilyugin // - Физика и техника высоких давлений. - 2004. – том 14. - №4. - С. 9-18.
6. Синков С.Г. Технологические схемы процессов накопления больших пластических деформаций // - Вестник двигателестроения – 2007, - №2, - С. 146-149.
7. Прокоф'єва О.В. Оценка величины давления металла на стенки матрицы при винтовой экструзии / О.В. Прокоф'єва, Я.С. Бейгельзимер // - ВІСНИК Домбаської державної машинобудівної академії -2005, - №1, - С.57-61.
8. Прокоф'єва О.В. Влияние профиля сечения матрицы на параметры винтовой экструзии / О.В. Прокоф'єва, Я.С. Бейгельзимер // - Физика и техника высоких давлений. - 2005. – том 15, - №4. - С. 65-71.
9. Пат. 64346 України, МПК В21С25/00 Матрица для зміцнення матеріалу при багаторазовому пресуванні /В.А. Тітов, М.С. Тривайло, Н.К. Злочевська, Е.В. Кондратюк, Г.І. Пейчев /заявл. 10.03.2011; опубл. 10.11.2011, Бюл.21
10. Алексеев Ю.Н. Введению в теорию обработки металлов давлением прокаткой и резанием. - Харьков: ХГУ, 1969. - 108с

### References

1. Valiev R.Z. Journal of Metallurgy, 2004. no 1. pp. 15-21.
2. Raab G.I. Journal of Fizika i tehnika vysokih davlenij, 2004. Vol.15. no 1. pp. 72-80.
3. Beygelzimer J.E., Varjuhin V.N., Orlov D.V, Synkov S.G. Vintovaja jekstruzija – process nakoplenija deformacij [Twist extrusion - process for deformation accumulation] Donetsk, 2003. 87p.
4. Beygelzimer Y., Orlov D., V. Varyukhin V. Journal of Ultrafine Grained Materials II: Proceed. of TMS (The Minerals, Metals & Materials Society). 2002., pp. 297-304.
5. Varyukhin V. N. Beygelzimer Y.Y, Efros B.M., Prokof'eva O.V., Pilyugin V.P. Journal of Fizika i tehnika vysokih davlenij 2004. vol. 14. no 4. pp. 9-18.
6. Sinkov S.G. Journal of Vestnik dvigatelestroenija. 2007, no 2. pp. 146-149.
7. Prokof'eva O.V. Beygelzimer Y.Y HERALD of the Donbass State Engineering Academy. 2005. no 1, pp.57-61.
8. Prokof'eva O.V. Beygelzimer Y.Y Journal of Fizika i tehnika vysokih davlenij. 2005. vol. 15. no 4, pp. 65-71.
9. V.A. Titov, M.S. Trivajlo, N.K. Zlochevs'ka, E.V. Kondratjuk, G.I. Pejchev matricja dlja zmicennja materialu pri bagatorazovomu presuvanni [A matrix is for strengthening of material at the frequent pressing] Patent Ukraini no 64346 10.11.2011
10. V.A. Titov, M.S. Trivajlo, N.K. Zlochevs'ka, E.V. Kondratjuk, G.I. Pejchev matricja dlja zmicennja materialu pri bagatorazovomu presuvanni [A matrix is for strengthening of material at the frequent pressing] Patent Ukraini no 64346 10.11.2011

### Мелконов Г.Л., Глазунов Я.И. Стойкость инструментов с круговой режущей кромкой

*Рассмотрен процесс контроля за стойкостью чашечного резца в течении определенного времени работы. Предложены технологические показатели, являющиеся критериями износа инструмента. Разработана методика проведения экспериментальных исследований. Представлены результаты проведенных стойкостных испытаний. По проведенным исследованиям сделаны выводы. С повышением стойкости инструмента и за счет этого появилась возможность повысить скорость резания. Повышение скорости резания благоприятно сказалось на*

производительности и стоимости операции. Построен график зависимости величины износа по задней поверхности от времени работы.

**Ключевые слова:** стойкость чашечного резца, виды износа, время работы, технологические параметры.

**Melkonov G. L., Glazunov Y.I. The resistance of tools with circular cutting edge**

*The process of monitoring the resistance of the Cup cutter for a certain amount of time. The proposed process indicators are criteria of tool wear. The technique of experimental studies. Presents results of tests of. According to research findings. With increased tool life and because of this it has been possible to increase the cutting speed. The higher speeds have a positive impact on the performance and cost of operation. We plot the values of flank wear with time. Derived an empirical relation (1) will determine the amount of flank wear of the tool without the necessity of additional experimental studies. Further experimental research was inappropriate because it would already be area rough turning and not finishing. The methodology of experimental studies*

*provides a rationale for the chosen directions of experimental research or specific experiments, evaluate the accuracy and reliability of received data, output the empirical dependence of tool life from time to time.*

**Key words:** vitality bowl cutter, wear, work, technological options.

**Мелконов Григорій Леонідович** – к.т.н., доцент кафедри машинобудування, верстатів та інструментів Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. E-mail: G.melkonov78@gmail.com

**Глазунов Ярослав Ігорович** – студент IV-го курсу Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, групи ММ-151. E-mail: Yaroslav7888@gmail.com

*Рецензент:* д.т.н., проф. **Соколов В.І.**

Стаття подана 20.12.2018.

УДК 621.91

**ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ТЕМПЕРАТУРИ РІЗАННЯ ВІД РЕЖИМІВ РІЗАННЯ Й КУТА СХРЕЩУВАННЯ ПРИ ЧИСТОВОМУ ТОЧЕННІ ВАЛІВ ЧАШКОВИМИ РІЗЦЯМИ, ЩО ПРИМУСОВО ОБЕРТАЮТЬСЯ****Мелконов Г.Л., Ткачов Р.П.****DETERMINATION OF THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE CUTTING ANGLE OF THE CUTTING, AND WHEN CROSSING FINISH TURNING OF SHAFTS ROTATING CUTTERS TO FORCE CUP****Melkonov G.L., Tkachov R.P.**

*Підібрано найбільш прийнятний метод визначення температури в зоні різання, що має назву метод термопар. Встановлено залежність зміни температури в зоні різання від режимів різання й кута схрещування інструмента та заготовки. Наведені протоколи залежностей температури від кута схрещування, швидкості різання, подачі й глибини різання, за якими побудовані графіки. Наведено оптимальне значення режимів різання й кута схрещування.*

**Ключові слова:** чашковий різець, що примусово обертається; метод термопар; режими різання; кут схрещування; температура в зоні різання.

**1. Введення.** В процесі обробки робочих поверхонь гвинтових валкових калібрів чашковими різцями, що примусово обертаються, в зоні різання виникають значні сили різання, а також тертя по задній і передній поверхнях інструмента, які призводять до пластичного деформування обробленої поверхні. Внаслідок вищевказаного, в зоні різання виникає температура. Величина температури істотно впливає на процес обробки: стійкість інструмента; якість поверхневого шару; геометричні параметри готової деталі.

Метою даної роботи є визначення величини температури, що виникає в зоні різання.

**2. Основний зміст роботи.** З нашої точки зору, найбільш прийнятним методом для дослідження температури в зоні різання є експериментальні методи.

Основним об'єктом дослідження буде температура, що виникає в зоні різання, й зміна її величини в залежності від режимів обробки й кута між осями заготовки та інструмента (кута схрещування).

З усіх існуючих методів для визначення температури в зоні різання найбільш прийнятним є метод природно утвореної термопари.

Однак виміряти температуру в зоні різання при точенні заготовок різцем, що примусово обертається, доволі проблематично. Це зумовлено постійним обертанням інструмента і є наслідком відновлення в зоні різання різальної кромки. Тобто процес обробки розділено на дві ділянки:

1 – безпосередньо робоча зона;

2 – галузка інструмента з «холостим» пробігом.

Цим і зумовлена важкість заміру температури різання в зоні різання.

Однак обраний нами метод вимірювання температури є найбільш точним, тому що вимірювання проводиться через ЕДС, а вона виникає безпосередньо в зоні контакту.

Сутність даного метода полягає в наступному: в процесі різання в контактній зоні заготовка-інструмент відбувається зіткнення передньої поверхні інструмента зі стружкою, а задньої поверхні – з обробленою поверхнею, в результаті чого природним шляхом створюються термопари. Електродами для термопар є матеріал заготовки, що оброблюється, та матеріал різальної кромки інструмента. Включаючи деталь та інструмент в замкнений ланцюг, сприяємо виникненню ЕДС, величина якої практично відповідає температурі в зоні різання.

Для перетворення показань мілівольметра в градуси Цельсія термопара піддається спеціальній тарировці.

Схема вимірювання температури при точенні методом природно утвореної термопари зображена на рис. 1. Болванка 1, що оброблюється, ізолювана від патрона 3 і центра задньої бабки ебонітовими прокладками 5. Чашковий різець 2, виготов-

влений з швидкоріжучої сталі або твердого сплаву, ізольований від різцеутримувача ебонітовою втулкою 5. Різець роблять цільним для того, щоб в місці зварювання або припаювання різальної пластинки до корпуса різця не утворювались паразитні термопари. Болванка з'єднана мідним провідником з гнучким валом 6, закріпленим в ебонітовій втулці, яка встановлена на кінці шпинделя верстата 4. Контактний наконечник 7 гнучкого валу опущений у ванночку зі ртуттю 8. Мілівольтметр 9 однією клемою з'єднаний з торцем різка, а другою – з ртутним токоз'ємником. Замкнений електричний ланцюг складається з болванки – провідника – гнучкого вала – токоз'ємника – мілівольтметра – різка – болванки. Болванку ізолюють від станка для усунення впливу паразитних термопар, які можуть виникнути між окремими деталями станка. Однак роль паразитних термопар при високій температурі контактних поверхонь інструмента незначна, й за рахунок деякого зниження точності вимірювання установку можна спростити, відмовившись від ізоляції болванки і зберігаючи ізоляцію тільки інструмента.

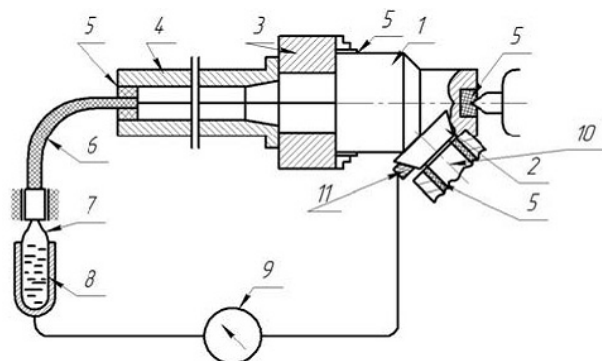


Рис. 1. Схема вимірювання температури різання природно утворюваною термопарою

Ізоляція чашкового інструмента, що примусово обертається, в деякій мірі проблематична через необхідність ізолювати верстат не всю установку, а саме чашковий різець. Це зумовлено тим, що в приводному механізмі чашкового різця багато поверхонь, що сполучаються, в точках контакту яких виникають різні термоелектродвижні сили. При чому ці сили різні і постійно змінюються. Тому ізолюють всю приводну систему різця від верстата, а чашковий різець ізолюють від привода на його шпинделі 10. ЕДС чашкового різця знімають за допомогою рухомого контакту. В ролі рухомого контакту використовувався мідно-графітовий матеріал 11.

Проведеними лабораторними дослідженнями практично встановлено, що температура різання в значній мірі залежить від режимів різання і кута схрещування осей заготовки, що оброблюється, і чашкового інструмента. В результаті цих досліджень отримано експериментальні дані, які, в свою чергу, занесені до таблиць 1-4. За ними побудуємо криві залежності температури в зоні різання від ре-

жимів різання й кута схрещування осей заготовки та інструмента.

Таблиця 1

**Залежність температури різання від кута схрещування при  $V=8$  м/с,  $S=0,38$  мм/об,  $t=0,4$  мм**

Кут схрещування	Температура в град
105	460
110	440
115	400
120	380
125	370
130	340
135	320
140	300
145	290
150	260
155	250

Таблиця 2

**Залежність температури різання від швидкості різання при  $\gamma_C = 140^\circ$ ,  $S=0,38$  мм/об,  $t=0,4$  мм**

Швидкість різання V	Температура в град
3	275
4,5	320
6	350
7,5	380
9	400
10,5	450
12	475

Таблиця 3

**Залежність температури різання від подачі при  $V=8$  м/с,  $\gamma_C = 140^\circ$ ,  $t=0,4$  мм**

Подача S	Температура в град
0,2	260
0,4	270
0,5	290
0,6	320
0,7	340
0,9	340
1,2	360

Таблиця 4

**Залежність температури різання від глибини різання при  $V=8$  м/с,  $S=0,38$  мм/об,  $\gamma_C = 140^\circ$**

Глибина різання t	Температура в град
0,2	280
0,4	310
0,6	340
0,8	360
1	360
1,2	400
1,4	420

Аналіз графіків (рис.2) показує, що температура різання зменшується при збільшенні кута схрещування ( $\gamma_C = 105^\circ \dots 130^\circ$ ), а при збільшенні  $\gamma_C$  до  $160^\circ$  залишається приблизно на одному рівні.



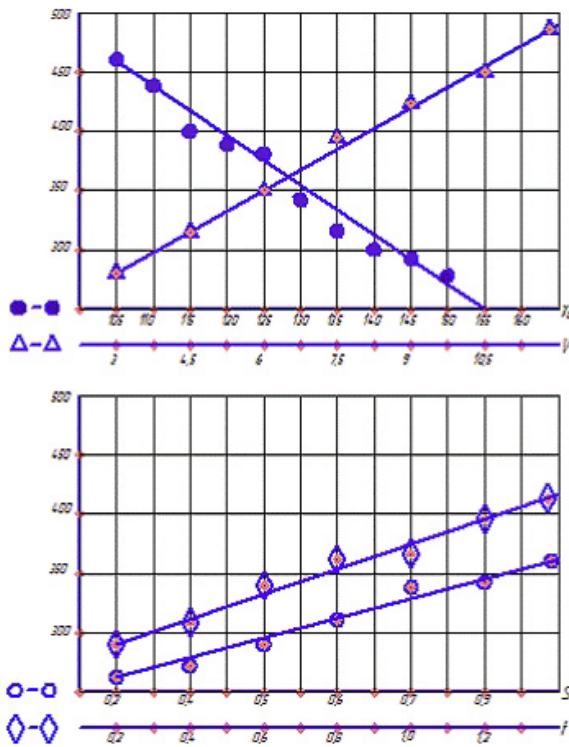


Рис. 2. Залежність температури різання від кута схрещування  $\gamma_c$ , швидкості різання  $V$ , подачі  $S$  й глибини різання  $t$

При збільшенні швидкості різання ( $V = 3,5 \dots 12 \text{ м/с}$ ) зменшується пластична деформація, а відповідно, зменшується температура, що утворюється в зоні різання.

При збільшенні глибини різання ( $t = 0,2 - 1,5 \text{ мм}$ ) збільшується довжина леза, що покращує тепловідвід і знижує температуру різання.

При збільшенні подачі зростає тиск стружки на інструмент і збільшується площа контакту стружки з передньою поверхнею. Тиск стружки сприяє підвищенню температури, а площа контакту її знижує. Зі збільшенням подачі ( $S = 0,2 - 1,4 \text{ мм/об}$ ) температура зростає.

На основі експериментальних даних, отриманих при точенні валів чашковими різцями, що примусово обертаються, за якими побудовано графіки, була отримана наступна емпірична залежність температури різання:

$$Q = C \cdot V^{0,2} \cdot S^{0,14} \cdot t^{0,2} \cdot \gamma^{-0,09} \quad (1),$$

де  $C$  – коефіцієнт, що враховує вплив властивостей матеріалу, що оброблюється, на температуру різання.

Проведені експериментальні дослідження, побудовані за ними графіки (рис. 2) і виведена формула (1) дозволяють зробити наступні висновки й

рекомендувати оптимальні режими різання і кути схрещування.

**Висновки**

1. При змінненні кута схрещування осей заготовки валкового калібру і чашкового різця, що примусово обертається, температура змінюється наступним чином: зі збільшенням кута схрещування ( $\gamma_c = 105^\circ \dots 130^\circ$ ) відбувається зниження температури від  $460^\circ \text{C}$  до  $340^\circ \text{C}$ . Подальше збільшення кута схрещування  $\gamma_c$  на величину температури чине незначний вплив.

2. Збільшення швидкості різання від 3 м/с до 12 м/с призводить до різкого збільшення температури в зоні різання від  $275^\circ \text{C}$  до  $475^\circ \text{C}$ .

3. Аналіз графіків залежності температури в зоні різання від збільшення подачі в межах 0,2 – 1,2 мм/об: при збільшенні глибини різання температура в зоні різання плавно зростає. Звідси можна зробити висновок, що найбільш оптимальна температура в зоні різання спостерігається при куті схрещування  $\gamma_c = 135^\circ - 140^\circ$ ; швидкості різання  $V = 4,5 - 6 \text{ м/с}$ ; подачі  $S = 0,6 - 0,7 \text{ мм/об}$ ; глибині різання  $t = 0,8 - 1 \text{ мм}$ .

**Література**

1. Гун А.С. Обработка прокатных валков [Текст] / Соколов В.Е., Огарков Н.Н. - М.: Металлургия, 1983. -112 с.
2. Северденко В.П. Валки для профильного проката [Текст] / Бахтинов Ю.Б, Бахтинов В.Б - М.:Металлургия, 1979. - 224 с.
3. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов М.:Машиностроение,1975.-345с.
4. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. - М:Машиностроение.1976.-200с.
5. Целиков А.И. Специальные прокатные станы [Текст]/ Барбарич М.В., Васильчиков М.В., Грановский С.П.,Жуневич-Стоша Е.А. - М.: Металлургия, 1971. - 336 с
6. Мелконов Л.Д. Принудительное вращающийсячашечный резец - М.: Машиностроение, №3, 1980. с.19
7. Мелконов Л.Д. Точение по методу обкатки – В кн. :«Автомобильная промышленность», №4, 1981, с. 29
8. Мелконов Л.Д. Технологическое обеспечение качества и точности обработки валов принудительно вращающимися резцами[Текст] / диссертация кандидата техн. наук ./-М: 1985г.-188с.
9. Ильюшин А.А. Сопrotивление материалов. // Ильюшин А.А., Ленски В.С. / М: Физматгиз, 1959. - 365 с.
10. Зорев Н.Н. Исследование элементов механики процесса резания// Зорев Н.Н. / М: Машгиз, 1952. - 363 с.

**References**

1. Gun A.S. Obrabotka prokatnyih valkov [Tekst] / Sokolov V.E., Ogarkov N.N. - M.: Metallurgiya, 1983. -112 s.
2. Severdenko V.P. Valki dlya profilnogo prokata [Tekst] / Bahtinov Yu.B, Bahtinov V.B - M.: Metallurgiya, 1979. - 224 s.
3. Bobrov V.F. Osnovy teorii rezaniya metallov M.: Mashinostroenie,1975.-345s.

4. Makarov A.D. Optimizatsiya protsessov rezaniya. -M: Mashinostroenie.1976.-200s.
5. Tselikov A.I. Spetsialnyie prokatnyie stanyi [Tekst] / Barbarich M.V., Vasilchikov M.V., Granovskiy S.P., Zhunevich-Stosha E.A. - M.: Metallurgiya , 1971. -336 s
6. Melkonov L.D. Prinuditelnoe vraschayuschiysya chashechniy rezets - M.: Mashinostroenie , №3, 1980. s. 19
7. Melkonov L.D. Tochenie po metodu obkatki – V kn. : «Avtomobilnaya promyshlennost», №4, 1981, s. 29
8. Melkonov L.D. Tehnologicheskoe obespechenie kachestva i tochnosti obrabotki valov prinuditelno vraschayuschimisya reztsami [Tekst] / dissertatsiya kandidata tehn. nauk / .-M: 1985g.-188s.
9. Ilyushin A.A. Soprotivlenie materialov. // Ilyushin A.A., Lenski V.S. / M: Fizmatgiz, 1959. -365 s.
10. Zorev N.N. Issledovanie elementov mehaniki protsessa rezaniya// Zorev N.N. / M: Mashgiz, 1952. -363 s.

**Мелконов Г.Л., Ткачѐв Р.П. Определение зависимости температуры резания от режимов резания и угла скрещивания при чистовом точении валов чашечными принудительно вращающимися резцами**

*Подобран наиболее приемлемый метод определения температуры в зоне резания. Это метод термопар. Установлена зависимость изменения температуры в зоне резания от режимов резания и угла скрещивания инструмента и заготовки. Приведенные протоколы зависимостей, по которым построены графики. Приведено оптимальное значение режимов резания и угла скрещивания.*

**Ключевые слова:** чашечный принудительно вращающийся резец; метод термопар; режимы резания; угол скрещивания; температура в зоне резания.

**Melkonov G. L. Determination of the temperature dependence of the cutting angle of the cutting, and when crossing finish turning of shafts rotating cutters to force cup.**

*Selected the most appropriate method for determining the temperature in the cutting zone. This method of thermocouple. The dependence of temperature in the cutting zone of the cutting tool and the angle of crossing and the work piece. These protocols are dependencies on which the graphs. We give an optimal value of the cutting angle and the crossing. Protocols dependencies, which built graphics. Given the optimal value of cutting parameters and angle of crossing. The aim of this work is to determine the magnitude of occurring temperature in the cutting zone. Increasing the depth of the cutting temperature in the cutting zone increases smoothly. The optimal temperature in the cutting zone will be at the angle of crossing. It is established that the cutting temperature largely depends on the cutting conditions and the angle of crossing of axes of the work piece and the Cup tool. The main object of study will be temperatures encountered in the cutting zone and changes in its value, depending on the treatment modes and the angle between the axes of work piece and tool.*

**Keywords:** cup forcibly rotating blades, the method of thermocouples, cutting conditions, the angle of crossing, the temperature in the cutting zone.

**Мелконов Григорій Леонідович** – к.т.н., доцент кафедри машинобудування, верстатів та інструментів Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. E-mail: G.melkonov78@gmail.com

**Ткачов Руслан Петрович** – студент IV-го курсу Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, групи ММ-151.

E-mail: morandian-gel97@gmail.com

*Рецензент:* д.т.н., проф. **Соколов В.І.**

Стаття подана 15.12.2018.

УДК 66.095.132

**ЕСТЕРИФІКАЦІЯ ЖИРНИХ КИСЛОТ СОАПСТОКУ  
ЕСТЕРО-АЛЬДЕГІДНОЮ ФРАКЦІЄЮ****Мельник Ю.Р., Онуфрак К.О., Андрушко В.О., Мельник С.Р.****ESTERIFICATION OF SOAPSTOCK FATTY ACIDS  
BY THE ESTER-ALDEHYDE FRACTION****Melnyk Yu., Onufrak K., Andrushko V., Melnyk S.**

*Досліджено закономірності естерифікації жирних кислот соапстоку естеро-альдегідною фракцією виробництва етилового спирту в присутності *n*-толуенсульфокислоти. Встановлено, що проведення реакції в стаціонарних умовах не дозволяє досягнути конверсії вільних жирних кислот понад 45 % навіть при мольному співвідношенні вільних жирних кислот і етанолу 1 : 15,8. Здійснення процесу в нестаціонарних умовах із застосуванням для відведення води бензену дозволяє підвищити конверсію вільних жирних кислот до 80,1 % за 360 хв реакції при одночасному зниженні мольного співвідношення реагентів до 1 : 2,3. Екстрагування вільних жирних кислот із соапстоку естеро-альдегідною фракцією з подальшою естерифікацією одержаної витяжки в присутності бензену дозволяє знизити мольне співвідношення вільних жирних кислот та етанолу до 1 : 1,4, зменшити тривалість реакції до 120 хв і досягнути конверсії вільних жирних кислот 76,4 %.*

**Ключові слова:** естерифікація, вільні жирні кислоти, соапсток, естеро-альдегідна фракція, етанол.

**Вступ.** Естери ненасичених жирних кислот, які отримують трансестерифікацією тригліцеридів (ТГ) та естерифікацією вільних жирних кислот (ВЖК) знаходять широке застосування як біодизель, розчинники, харчові добавки, присадки до палив та мастил тощо [1, 2].

**Постановка проблеми.** Сировиною для процесу трансестерифікації є олії та тваринні жири, а для естерифікації – ВЖК [4, 3]. Оскільки у виробництві олій утворюється значна кількість відходів, які містять ВЖК – соапсток або кислоти, отримані після його нейтралізації [5], – доцільно дослідити умови отримання естерів із такої сировини. З метою зниження вартості отриманих естерів як джерело спиртів також доцільно застосовувати спиртовмісні побічні продукти ряду виробництв, зокрема естеро-альдегідну фракцію

(ЕАФ) одержання етилового спирту – джерело етанолу (ЕС).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Як каталізатори естерифікації найчастіше використовують кислоти Бренстеда або кислоти Льюїса. Естерифікацію ВЖК досліджують як індивідуальний процес, так і як першу стадію процесу трансестерифікації неочищених або відпрацьованих олій, які містять ВЖК. В останньому випадку процес найчастіше здійснюють у дві стадії: перша – естерифікація ВЖК у присутності кислотного каталізатора, друга – власне трансестерифікація в присутності лужних каталізаторів [6]. Зокрема, застосування як каталізатора естерифікації ВЖК пальмової олії сульфатної кислоти дозволяє при мольному співвідношенні ВЖК : ЕС – 1 : (4,5-10,5) за 60 хв досягнути конверсії кислот достатньої, щоб отримана реакційна суміш могла б бути піддана трансестерифікації із застосуванням лужних каталізаторів [7]. При естерифікації ВЖК, які входять до складу відпрацьованої рослинної олії, в присутності  $\text{SnCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  за умови 120-кратного мольного надлишку ЕС за 12 год конверсія кислот становить понад 90 % [8].

Естерифікація дистиляту ВЖК пальмової олії 2-пропанолом у присутності сульфатної кислоти при 333 К та мольному співвідношенні ВЖК : спирт – 1 : 5 дозволяє за 6 год досягнути конверсії кислот 80 % [9]. Для естерифікації метанолом ВЖК, отриманих із соапстоку, застосовують твердий кислотний каталізатор – катіоніт Amberlyst-15, який при мольному співвідношенні ВЖК : спирт – 1 : (3–9) і температурі 353 К забезпечує конверсію кислот понад 90 % [10].

Залежно від умов процесу естерифікації ненасичених жирних кислот соапстоку 2-метилпропан-1-олом і 3-метилбутан-1-олом та їх сумішшю (сивушною олією) в присутності *n*-толуен-

сульфо кислоти (*n*ТСК) або катіоніту КУ-2-8 досягається конверсія ненасичених жирних кислот 83,2–95,1 % [11]. При застосуванні цього самого каталізатора для естерифікації 2-етилгексанолом побічних продуктів виробництва адипінової кислоти – нижчих дикарбонових кислот практично повний ступінь перетворення кислотних груп відбувається за 40–60 хв реакції [12].

Таким чином, умови реакції естерифікації вільних жирних кислот, наявних в оліях, відходах їхнього виробництва, аліфатичних карбонових кислот, які містяться в інших побічних продуктах, дуже різняться. Тому для ефективної переробки такої сировини потрібен індивідуальний підхід для визначення оптимальних умов процесу.

**Мета статті.** Метою досліджень було визначити оптимальні умови естерифікації жирних кислот соапстоку (ЖКС) естеро-альдегідною фракцією виробництва етилового спирту.

**Результати дослідження.** Естерифікацію ЖКС етанолом здійснювали в стаціонарних умовах при температурі 349 К у присутності каталізатора – *n*-толуенсульфо кислоти (*n*ТСК) концентрацією  $(1,3–1,5) \cdot 10^{-2}$  моль/дм<sup>3</sup>.

Встановлено, що незважаючи на різну динаміку зміни кислотного числа (КЧ) при різних співвідношеннях реагентів, конверсія кислот за 5 год реакції є практично однаковою. Так, при мольному співвідношенні ВЖК : ЕС – 1 : 11,0 за 300 хв конверсія кислот становить 44,2 %. Підвищення мольного співвідношення реагентів до 1 : 15,8 дозволяє за той самий час досягнути практично ідентичної конверсії ВЖК – 44,5 %.

Оскільки реакція естерифікації є рівноважною, то утворена вода буде зміщати рівновагу в бік утворення реагентів. Необхідно також враховувати, що певна кількість води також надходить із реагентом – ЕАФ.

Для підвищення конверсії ВЖК у процесі естерифікації ЖКС з відведенням води з реакційної суміші тривалість реакції визначали за її накопиченням у пастці Діна-Старка – його припинення практично вказувало на завершення реакції.

Як видно з табл. 1, при мольному співвідношенні ВЖК : ЕС – 1 : 4,4, вмісті бензену в реакційній суміші 13,7 мас. % та концентрації каталізатора *n*ТСК  $1,1 \cdot 10^{-2}$  моль/дм<sup>3</sup> конверсія кислотних груп у нестационарних умовах за 300 хв становить лише 44,2 %, що є ідентичним до показників реакції, яку здійснювали у стаціонарних умовах. Також очевидно, що підвищення вмісту бензену в реакційній суміші та зниження мольного співвідношення ВЖК : ЕС з 1 : 4,4 до 1 : 2,3 дозволяє істотно підвищити конверсію ВЖК, а подальше зниження мольного співвідношення реагентів до 1 : 1,5 призводить до зменшення тривалості реакції, але, одночасно, і до зниження конверсії ВЖК до 65,0 %.

Таблиця 1

**Показники процесу естерифікації ЖКС естеро-альдегідною фракцією в нестационарних умовах. Концентрація *n*ТСК –  $1,2 \cdot 10^{-2}$  моль/дм<sup>3</sup>**

Мольне співвідношення ВЖК : ЕС	Вміст C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> , мас. %, %	Тривалість реакції, хв	Конверсія ВЖК, %
1 : 4,4	13,7	300	44,2
1 : 2,3	19,5	360	80,1
1 : 1,5	26,4	240	65,0

Оскільки ЖКС, які застосовували в дослідженні, містять значну кількість домішок як кислотного, так і не кислотного характеру можна припустити, що саме ці сторонні речовини переважно є інертними в реакції естерифікації та виконують функцію розбавника, що призводить до зниження діючих концентрацій реагентів та каталізатора.

Для усунення вказаних домішок здійснено екстрагування ВЖК із жирних кислот соапстоку за допомогою ЕАФ при трьох масових співвідношеннях ЖКС : ЕАФ – 0,3 : 1, 1,1 : 1 та 3,5 : 1. Очевидно, що зі збільшенням співвідношення ЖКС : ЕАФ закономірно зростають маса одержаного осаду (нерозчинних компонентів ЖКС) та вміст ВЖК у витяжці, про що свідчить збільшення її КЧ (рис. 1).

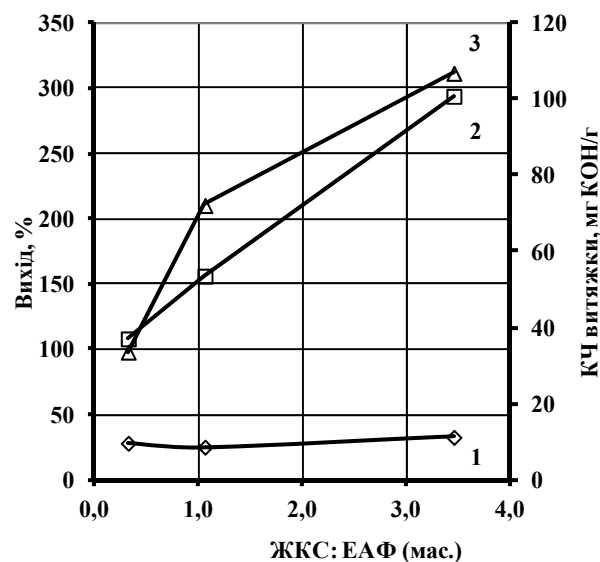


Рис. 1. Залежність виходу осаду на ЖКС (1), виходу витяжки на ЕАФ (2) та КЧ витяжки (3) від масового співвідношення ЖКС : ЕАФ

Як видно, з рис. 1, зі збільшенням надлишку ЖКС вихід осаду в перерахунку на взятую на екстрагування кількість ЖКС практично не змінюється і знаходиться в межах 28,2–32,7 %. Якщо ж перерахувати вихід одержаної витяжки на кількість ЕАФ, взятої на екстрагування, то видно, що він лінійно збільшується з 108,1 до 293,9 %,

тобто практично у 3 рази, при збільшенні масового співвідношення ЖКС : ЕАФ з 0,33 : 1 до 3,5 : 1.

Зі збільшенням масового співвідношення ЖКС : ЕАФ у витяжці зростає кількість ВЖК та різко знижується вміст ЕС, хоча він залишається в мольному надлишку відносно ВЖК (рис. 2).

Одночасно у витяжці закономірно знижується кількість води, яка надходить разом з ЕАФ, що повинно позитивно вплинути на перебіг реакції естерифікації.

Розрахована за КЧ відносна молекулярна маса кислот у витяжці становить 274–299 (рис. 3), що відповідає молекулярним масам таких кислот як лінолева чи олеїнова (280,4 та 282,4).

Розраховане значення відносної молекулярної маси кислот в осаді є значною мірою умовним, оскільки саме в осаді залишаються зазначені вище інертні речовини, які за рахунок його розбавлення, призводять до такого високого значення молекулярної мас. Зниження молекулярної маси при збільшенні частки ЖКС, внесеної на екстрагування, зумовлене збільшенням кількості ВЖК, які залишилися в осаді.

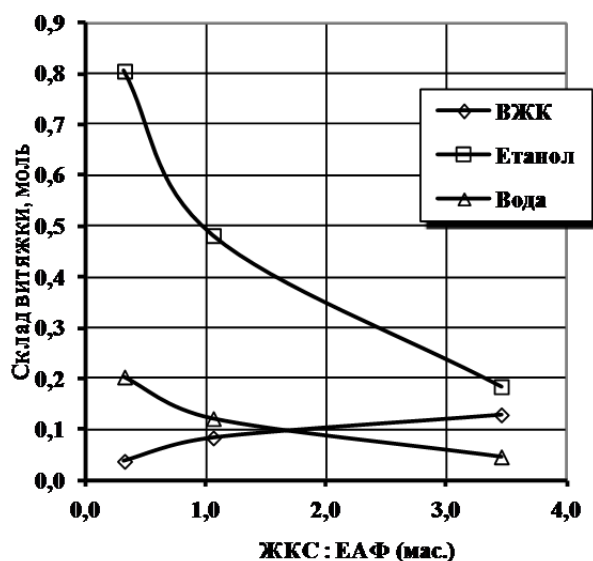


Рис. 2. Залежність мольного складу витяжки з ЖКС від масового співвідношення ЖКС : ЕАФ

Отримана витяжка є фактично сумішшю ВЖК та ЕС і, відповідно, сумішшю реагентів для естерифікації. Мольне співвідношення цих реагентів розраховували за складом витяжки (рис. 2).

Встановлено, що під час естерифікації компонентів цієї витяжки при мольному співвідношенні ВЖК : ЕС – 1 : 21,2 у присутності катализатора (*n*ТСК) у кількості  $1,5 \cdot 10^{-2}$  моль/дм<sup>3</sup> конверсія кислот за 180 хв становить 40,0 %. Зниження мольного співвідношення ВЖК : ЕС до 1 : 6,7 дозволяє за 150 хв досягнути конверсії кислот 47,0 %, а за 270 хв – 60,4 % (рис. 4).

Подальше зниження у витяжці мольного співвідношення ВЖК : ЕС до 1 : 1,4 та підвищення

вмісту бензену в реакційній суміші з 8,3 мас. % до 13,0 мас. % дозволяє за 120 хв реакції досягнути конверсії ВЖК 76,4 %, а за 180 хв – 78,3 % (рис. 4). Збільшення тривалості реакції ще на 60 хв не дозволяє підвищити конверсію ВЖК, яка за 240 хв конверсія кислот становить 78,4 %.

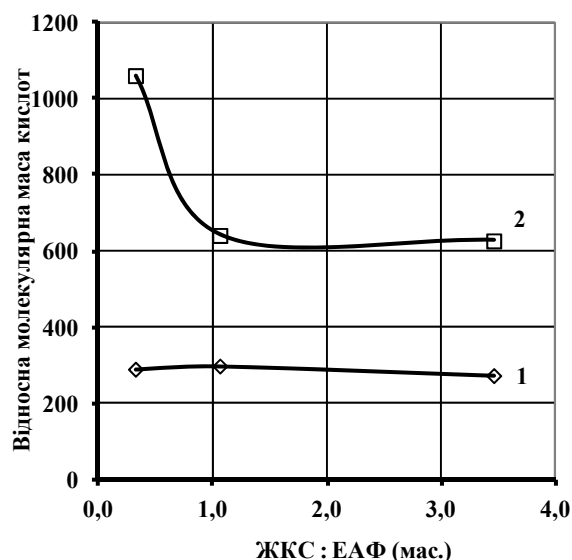


Рис. 3. Залежність відносної молекулярної маси кислот, що містяться у витяжці (1) та осаді (2), від масового співвідношення ЖКС : ЕАФ

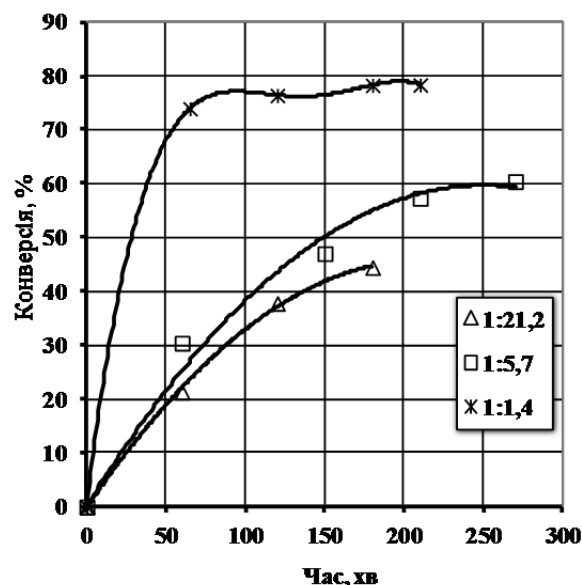


Рис. 4. Залежність конверсії ВЖК від часу при різному мольному співвідношенні ВЖК : ЕАФ. Концентрація *n*ТСК –  $1,5 \cdot 10^{-2}$  моль/дм<sup>3</sup>

Отже, естерифікація витяжки ВЖК є більш ефективною, ніж естерифікація безпосередньо ЖКС. При естерифікації витяжки ВЖК за 120 хв при мольному співвідношенні ВЖК : ЕС – 1 : 1,4 досягнута практично така сама конверсія кислот, як

і при естерифікації ЖКС при мольному співвідношенні реагентів 1 : 2,3 за 360 хв. Крім того, за рахунок екстрагування відділяється шлам, який при естерифікації ЖКС залишається у продуктах реакції, погіршуючи їх показники.

**Експериментальна частина.** Для дослідження використовували ЖКС світлих олій (ДСТУ 4860:2007) як джерело вільних жирних кислот та естеро-альдегідну фракцію виробництва ЕС (ДСТУ 7402:2013) як джерело етанолу.

Як каталізатор реакції естерифікації застосовували *n*-толуенсульфокислоту (у вигляді моногідрату).

Екстрагування ВЖК здійснювали ЕАФ при масових співвідношеннях ВЖК : ЕАФ – 1 : 0,3, 1,1 : 1 та 3,5 : 1 при кімнатній температурі. Отриману витяжку відокремлювали від нерозчинного залишку фільтруванням крізь вісім шарів марлі.

Естерифікацію здійснювали в тригорлій колбі, обладнаній термометром та пасткою Діна-Старка із зворотним холодильником. Реакційну суміш перемішували за допомогою магнітної мішалки. У колбу вносили ЖКС та ЕАФ або витяжку ВЖК, а тоді – каталізатор. Для розшарування водної та органічної фази в пастці Діна-Старка до реакційної суміші додавали бензен, який утворює потрійний азеотроп бензен–вода–етанол. Реакцію в нестационарних умовах здійснювали за кипіння реакційної суміші.

Періодично з реакційної суміші відбирали проби, в яких визначали кислотне число.

**Висновки.** Одержані результати показують, що перспективним методом одержання естерів ВЖК та ЕС із ЖКС є попереднє екстрагування ВЖК естеро-альдегідною фракцією при масовому співвідношенні ЖКС : ЕАФ – 3,5 : 1. Естерифікація отриманої витяжки в присутності каталізатора – *n*ТСК ( $1,5 \cdot 10^{-2}$  моль/дм<sup>3</sup>) та бензену (13,0 мас. %) дозволяє за 120 хв досягнути конверсії ВЖК 76,4 %.

#### Література

- Schuchardt U. Transesterification of Vegetable Oils: a Review / U. Schuchardt, R. Sercheli, R. M. Vargas // Journal of the Brazilian Chemical Society. – 1998. – №1(9). – P. 199–201.
- Srinivas D. Challenges and opportunities in biofuels production / D. Srinivas, J. Satyarthi // Indian Journal of Chemistry. – 2012. – №51. – P. 174–185.
- Singh S. P. Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: A review / S. P. Singh, D. Singh // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2010. – №14. – P. 200–216.
- Preparation of Supported Nanosized Sulfated Zirconia by Strontia and Assessment of Its Activities in the Esterification of Oleic Acid / H. Nayebzadeh, N. Saghatoleslami, A. Maskooki, B. R. Vahid // Chem. Biochem. Eng. Q. – 2014. – №28(3). – P. 259–265.
- O'Brien, R. D. Fats and Oils: Formulating and Processing for Applications / R. D. O'Brien. – Boca Raton: CRC Press, 2008. – 680 с.
- Canakci, M. Biodiesel production from oils and fats with high free fatty acids / M. Canakci, J. Gerpen // Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. – 2001. – №44(6). – P. 1429–1436.
- Suppalakpanya K. Production of ethyl ester from esterified crude palm oil by microwave with dry washing by bleaching earth / K. Suppalakpanya, S. Ratanawilai, C. Tongurai // Applied Energy. – 2010. – №87. – P. 2356–2359.
- Cardoso A. Esterification of Oleic Acid for Biodiesel Production Catalyzed by SnCl<sub>2</sub>: A Kinetic Investigation / A. Cardoso, S. Neves, M. Silva // Energies. – 2008. – №1. – P. 79–92.
- Production of biodiesel from soapstock using an ion-exchange resin catalyst / [J. Park, D. Kim, Z. Wang та ін.] // Korean J. Chem. Eng. – 2008. – №25(6). – P. 1350–1354.
- Deshmane V. G. Ultrasound assisted synthesis of isopropyl esters from palm fatty acid distillate / V. G. Deshmane, P. R. Gogate, A. B. Pandit // Ultrasonics Sonochemistry. – 2009. – №16. – P. 345–350.
- Мельник Ю. П. Естерифікація ненасичених жирних кислот спиртами сивушної олії / Ю. П. Мельник, В. В. Безділь, С. Р. Мельник. // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – №45 (1321). – С. 179–185.
- Research into esterification of mixture of lower dicarboxylic acids by 2-ethylhexan-1-ol in the presence of *p*-toluenesulfonic acid / S. Melnyk, Yu. Melnyk, I. Nykulyshyn, L. Shevchuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – №6/6(90). – 2017. – P. 10–16.

#### References

- Schuchardt U. Transesterification of Vegetable Oils: a Review / U. Schuchardt, R. Sercheli, R.M. Vargas // Journal of the Brazilian Chemical Society. – 1998. – №1(9). – P. 199–201.
- Srinivas D. Challenges and opportunities in biofuels production / D. Srinivas, J. Satyarthi // Indian Journal of Chemistry. – 2012. – №51. – P. 174–185.
- Singh S. P. Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: A review / S. P. Singh, D. Singh // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2010. – №14. – P. 200–216.
- Preparation of Supported Nanosized Sulfated Zirconia by Strontia and Assessment of Its Activities in the Esterification of Oleic Acid / H.Nayebzadeh, N. Saghatoleslami, A. Maskooki, B. R. Vahid // Chem. Biochem. Eng. Q. – 2014. – №28(3). – P. 259–265.
- O'Brien R. D. Fats and Oils: Formulating and Processing for Applications / R. D. O'Brien. – Boca Raton: CRC Press, 2008. – 680 p.
- Canakci M. Biodiesel production from oils and fats with high free fatty acids / M. Canakci, J. Gerpen // Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. – 2001. – №44(6). – P. 1429–1436.
- Suppalakpanya K. Production of ethyl ester from esterified crude palm oil by microwave with dry washing by bleaching earth / K. Suppalakpanya, S. Ratanawilai, C. Tongurai // Applied Energy. – 2010. – №87. – P. 2356–2359.
- Cardoso A. Esterification of Oleic Acid for Biodiesel Production Catalyzed by SnCl<sub>2</sub>: A Kinetic Investigation /

- A. Cardoso, S. Neves, M. Silva // *Energies*. – 2008. – №1. – P. 79–92.
9. Production of biodiesel from soapstock using an ion-exchange resin catalyst / J. Park, D. Kim, Z. Wang, J. Lee, S. Park and J. Lee // *Korean J. Chem. Eng.*. – 2008. – №25(6). – P. 1350–1354.
  10. Deshmane V. G. Ultrasound assisted synthesis of isopropyl esters from palm fatty acid distillate / V. G. Deshmane, P. R. Gogate, A. B. Pandit // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2009. – №16. – P. 345–350.
  11. Melnyk Yu., Bezdil V., Melnyk S. Esterification of unsaturated fatty acids with fusel oil alcohols. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, No 45 (1321), P. 179–185.
  12. Research into esterification of mixture of lower dicarboxylic acids by 2-ethylhexan-1-ol in the presence of *p*-toluenesulfonic acid / S. Melnyk, Yu. Melnyk, I. Nykulyshyn, L. Shevchuk // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – №6/6(90). – 2017. – P. 10–16.

**Мельник Ю. Р., Онуфрак К.О., Андрушко В.О., Мельник С. Р. Этерификация жирных кислот соапстока эфираальдегидной фракцией.**

*Исследованы закономерности этерификации жирных кислот соапстока эфираальдегидной фракцией производства этилового спирта в присутствии *p*-толуолсульфокислоты. Установлено, что проведение реакции в стационарных условиях не позволяет достичь конверсии свободных жирных кислот более 45 % даже при мольном соотношении свободных жирных кислот и спирта 1 : 15,8. Осуществление процесса в нестационарных условиях с применением для отвода воды бензола позволяет повысить конверсию свободных жирных кислот до 80,1 % за 300 мин реакции при одновременном снижении мольного соотношения реагентов до 1 : 2,3. Экстрагирование свободных жирных кислот из соапстока эфираальдегидной фракцией с последующей этерификацией полученной вытяжки в присутствии бензола позволяет снизить мольное соотношение свободных жирных кислот и этанола до 1 : 1,4, уменьшить время реакции до 120 мин и достичь конверсии свободных жирных кислот 76,4 %.*

**Ключевые слова:** этерификация, свободные жирные кислоты, соапсток, эфираальдегидная фракция, этанол.

**Melnyk Yu., Onufrak K., Andrushko V., Melnyk S. Esterification of soapstock fatty acids by the ester-aldehyde fraction.**

*The esterification of the soapstock fatty acids by the ester-aldehyde fraction of ethyl alcohol production in the presence of *p*-toluenesulfonic acid was studied. It was established that carrying out the reaction in stationary conditions does not allow achieving a free fatty acids conversion of more than 45 % even with a molar ratio of free fatty acids and alcohol of 1 : 15.8. The implementation of the esterification process under unsteady conditions with the use of benzene in purpose of water removal made it possible to increase the free fatty acids conversion to 80.1 % in 300 minutes while reducing the molar ratio of reagents to 1 : 2.3. The esterification of the free fatty acid extract obtained by mixing the soapstock fatty acids and the ester-aldehyde fraction made it possible to further reduce the molar ratio of the reactants (to 1 : 1.4) and significantly reduce the reaction time. In the presence of benzene and *p*-toluenesulfonic acid as catalyst for 120 minutes it is possible to achieve a free fatty acids conversion of 76.4 %.*

**Keywords:** esterification, free fatty acids, soapstock, ester-aldehyde fraction, ethanol.

**Мельник Юрій Романович** – к.т.н., доцент, доцент кафедри технології органічних речовин, Національний університет «Львівська політехніка» (м. Львів), yurii.g.melnyk@lpnu.ua

**Онуфрак Катерина Орестівна** – студент кафедри технології органічних речовин, Національний університет «Львівська політехніка» (м. Львів), katty12onufrak@gmail.com

**Андрушко Вікторія Орестівна** – студент кафедри технології органічних речовин, Національний університет «Львівська політехніка» (м. Львів), vikaandr2@gmail.com

**Мельник Степан Романович** – д.т.н., професор, професор кафедри технології органічних речовин, Національний університет «Львівська політехніка» (м. Львів), stepan.g.melnyk@lpnu.ua

*Рецензент:* д.т.н., проф., **Глікін М.А.**

Стаття подана 10.12.2018.

УДК 66.02.532.556

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КОРОТКОГО ДИФFUЗОРА. ПОДГОТОВКА К ЭКСПЕРИМЕНТУ

Москалик В. М., Карпюк Л. В., Табунщиков В. Г.

## EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE HYDRAULIC RESISTANCE COEFFICIENT OF A SHORT DIFFUSER. PREPARATION FOR THE EXPERIMENT

Moskalyk V. M., Karpyuk L. V., Tabunshchikov V. G.

*Предложены новый способ и конструкция устройства равномерного распределения потока по поперечному сечению аппарата, основанные на самоорганизации. Разработана установка для экспериментального определения коэффициента гидравлического сопротивления короткого диффузора, являющегося важным элементом распределительного устройства. обстоятельно доказано, что коэффициент гидравлического трения трубки можно рассчитывать по известному из литературы уравнению, а коэффициенты гидравлического сопротивления на входе в трубку и выходе из трубки принять постоянными величинами.*

**Ключевые слова:** самоорганизация, профиль скорости, короткий диффузор, коэффициент гидравлического трения, коэффициент гидравлического сопротивления.

**Введение.** Распределение потока внутри промышленного аппарата оказывает значительное влияние на его тепло- и массообменную эффективность. В промышленных аппаратах в основном предусмотрен боковой способ ввода потока с поворотом вверх/вниз, который является основным источником неравномерности в распределении потока по поперечному сечению аппарата (существуют также вводы аксиальный, радиальный и др.). Например, в промышленном тарельчатом абсорбере боковой ввод газа приводит к неравномерности работы первых трех-четырех тарелок, что снижает их эффективность по Мерффи и в целом уменьшает коэффициент массопередачи аппарата, величину уменьшения которого расчетным путем учесть достаточно трудно [1, 2]. Снижение коэффициента массопередачи инженер-проектировщик компенсирует вводом дополнительных тарелок, повышая стоимость аппарата и снижая его конкурентоспособность.

Известны два способа достижения равномерного распределения газа по поперечному сечению ап-

парата [3-5]. Первый способ основан на создании дополнительного гидравлического сопротивления распределительной решетки с коэффициентом гидравлического сопротивления, превышающим расчетную оптимальную величину  $\zeta_{\text{опт}}$ . Второй способ основан на разделении входного патрубка перегородками на отдельные секции или на установке дополнительных направляющих лопаток внутри самого аппарата. Главным недостатком данных способов является то, что они не гарантируют эффективную работу аппарата в широком диапазоне нагрузок по пару/газу, к тому же конструкции распределителей, созданные на данных способах, сложные и громоздкие.

Предлагается новый способ равномерного распределения пара/газа основанный на самоорганизации потоков [6]. Конструкция устройства согласно новому способу представляет собой глухую тарелку, устанавливаемую по ходу распределяемого газа с вертикально смонтированными в нее проточными клапанами. Клапаны выполнены в виде патрубков с размещенными внутри них короткими диффузорами с уменьшенными по потоку входными отверстиями. Подаваемый снизу под глухую тарелку газ поступает в проточные клапаны. Между стенками диффузора и проточного клапана образуется обратный ток, формируя поперечное сечение газа. Чем большее количество газа поступит в проточный клапан, тем меньшее сечение газа сформируется на его входе и наоборот, чем меньшее количество газа поступит в проточный клапан, тем большее сечение газа сформируется на его входе. Таким образом, первичный неоднородный поток газа, который образовался под глухой тарелкой, будет равномерно распределен по саморегулирующим количеством газа проточным



клапанам, в результате переменных в них поперечных сечений газа.

**Постановка задачи и путь ее решения.** Для надежного промышленного применения нового устройства равномерного распределения пара/газа [6], необходимо иметь надежные данные по коэффициентам гидравлического сопротивления внутренних устройств саморегулирующих клапанов – коротких диффузоров, вследствие чего проведены обстоятельные экспериментальные исследования.

**Описание экспериментальной установки и ее элементов.** С целью экспериментального определения коэффициента гидравлического сопротивления короткого диффузора была специально разработана экспериментальная установка, представленная на рис. 1. Воздух на установку нагнетали поршневым компрессором 1, расход его регулировали вентилем 2 по показаниям ротаметра 3. Основным устройством, в котором проводилось измерение гидравлическое сопротивление короткого диффузора дифференциальным манометром 4, являлся экспериментальный блок 5.

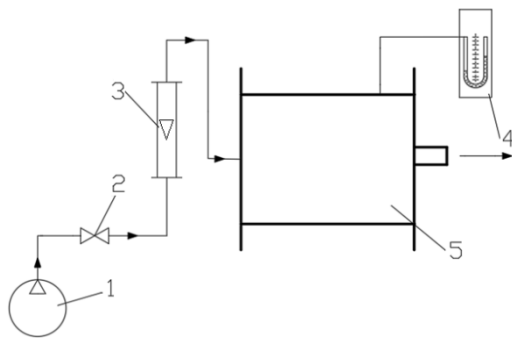


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:  
1 – поршневой компрессор; 2 – вентиль; 3 – ротаметр;  
4 – дифференциальный манометр;  
5 – экспериментальный блок

На рис. 2 показаны основные устройства экспериментальной установки – дифференциальный манометр 1, ротаметр 2 и экспериментальный блок 3.

Разрез экспериментального блока изображен на рис. 3. Основное предназначение экспериментального блока - это создание ровного профиля скорости воздуха в поперечном сечении трубы на входе в короткий диффузор и измерение его гидравлического сопротивления. Воздух от компрессора поступал во входной патрубок 1, после чего оказывался в перфорированной обечайке 2, где разворачивался на 90° и попадал во внутреннее пространство экспериментального блока, а затем заходил под крышку 3. Крышка 3 соосно расположена со стаканом 4. Многократный разворот воздуха формировал ровный профиль скорости на входе в стакан 4 с полированной поверхностью. Короткий диффузор 5, подвергающийся измерению, помещали в трубку 6 внутренним диаметром  $D_1=24$  мм и длиной  $L=122$  мм. Все элементы экспериментального блока герметично располагались в его корпусе 7. Измерение гид-

равлического сопротивления проводилось дифференциальным манометром 8, местом отбора статического давления служило отверстие в стакане 4.



Рис. 2. Основные устройства экспериментальной установки: 1 – дифференциальный манометр; 2 – ротаметр; 3 – экспериментальный блок

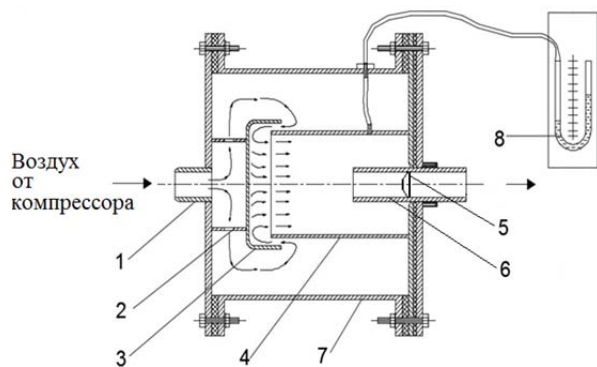


Рис. 3. Экспериментальный блок:  
1 – входной патрубок; 2 – перфорированная обечайка;  
3 – крышка; 4 – стакан; 5 – диффузор; 6 – выходная трубка; 7 – корпус; 8 – дифференциальный манометр

**Сравнительный анализ экспериментального и теоретически рассчитанного коэффициентов гидравлического сопротивления трубки.** Для надежного измерения коэффициента гидравлического

го сопротивления короткого диффузора необходимо знание коэффициента гидравлического трения  $\lambda$  трубки, вделанной в стенку экспериментального блока с возможностью осевого перемещения на расстояние  $b/D_1=1,25\div 3,75$ , где  $b$  – длина трубки в стакане от места среза трубки до стенки, в которую она заделана. В результате проведенных измерений и расчетов проводили сопоставление коэффициентов гидравлического сопротивления трубки, полученных экспериментальным путем  $\zeta^p$  и расчетным  $\zeta^p$ .

Экспериментальный  $\zeta^p$  находили из уравнения

$$\zeta^p = \frac{2 \cdot \Delta P}{\rho_{p.u.} \cdot W_1^2}, \quad (1)$$

где  $\Delta P$  – экспериментально измеренное дифференциальным манометром гидравлическое сопротивление, Па;

$\rho_{p.u.}$  – плотность воздуха при рабочих условиях, кг/м<sup>3</sup>;

$W_1$  – скорость воздуха в трубке, м/с.

Расчетный  $\zeta^p$  находили из уравнения

$$\zeta^p = \zeta_{вх} + \zeta_{тр} + \zeta_{вых}, \quad (2)$$

где  $\zeta_{вх}$ ,  $\zeta_{вых}$  – коэффициенты гидравлического сопротивления соответственно на входе в трубку и выходе из трубки;

$\zeta_{тр}$  – коэффициент гидравлического сопротивления трения.

Известно [7], что гидравлическое сопротивление входа потока в прямую трубку постоянного поперечного сечения зависит от относительной толщины  $\delta/D_1$  и относительного расстояния  $b/D_1$ , где  $\delta$  – толщина трубки, равная 4 мм. В наших условиях

проведения эксперимента  $\delta/D_1 > 0,05$  и  $b/D_1 > 0,5$ , что позволяло принять  $\zeta_{вх} = 0,5$ .

Экспериментальный блок формировал на входе в стакан ровный профиль скорости воздуха. Поскольку стакан имел относительно малую длину, то можно предположить, что на входе в трубку так же формировался ровный профиль скорости. Руководствуясь сказанным и учитывая рекомендации [7], было принято  $\zeta_{вых} = 1,0$ .

Коэффициент  $\zeta_{тр}$  рассчитывали из уравнения

$$\zeta_{тр} = \lambda \frac{L}{D_1}, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения, зависящий от числа Рейнольдса в трубке

$$Re_1 = \frac{W_1 \cdot D_1}{\nu}, \quad (4)$$

где  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м<sup>2</sup>/с и шероховатости ее поверхности.

Для расчета  $\lambda$  для гладких круглых труб при турбулентном режиме  $Re_1 > 4000$  по рекомендациям [7] воспользовались зависимостью

$$\lambda = \frac{1}{(1,8 \cdot \lg Re_1 - 1,64)^2}, \quad (5)$$

Результаты обработки экспериментальных и расчетных данных сведены в таблицу. Анализ сопоставления экспериментального и теоретически рассчитанного коэффициентов гидравлического сопротивления трубки показывает, что их относительная ошибка находится в допустимых пределах погрешности измерений, равной 18%.

Таблица

Результаты обработки данных

b/D <sub>1</sub>	Эксперимент				Расчет					δ, %
	ΔP, Па	Re <sub>1</sub>	W <sub>1</sub> , м/с	ζ <sup>p</sup>	ζ <sub>вх</sub>	λ	ζ <sub>тр</sub>	ζ <sub>вых</sub>	ζ <sup>p</sup>	
1,25	50	12426	7,708	1,40	0,5	0,0305	0,155	1,0	1,655	-18,21
	90	16701	10,360	1,40		0,0281	0,143		1,643	-17,36
	160	20975	13,011	1,57		0,0265	0,135		1,635	-4,14
	250	25249	15,662	1,70		0,0253	0,129		1,629	+4,24
	360	29523	18,314	1,79		0,0243	0,124		1,623	+9,33
2,50	25	8152	5,057	1,63	0,5	0,0343	0,174	1,0	1,674	-2,70
	55	12426	7,708	1,54		0,0305	0,155		1,655	-7,47
	95	16701	10,360	1,47		0,0281	0,143		1,643	-11,77
	155	20975	13,011	1,52		0,0265	0,135		1,635	-7,57
	250	25249	15,662	1,70		0,0253	0,129		1,629	+4,18
360	29523	18,314	1,79	0,0243	0,124	1,623	+9,33			
3,75	50	12426	7,708	1,40	0,5	0,0305	0,155	1,0	1,655	-18,21
	90	16701	10,360	1,40		0,0281	0,143		1,643	-17,36
	165	20975	13,011	1,62		0,0265	0,135		1,635	-0,926
	240	25249	15,662	1,63		0,0253	0,129		1,629	+0,061
	345	29523	18,314	1,71		0,0243	0,124		1,623	+5,088

**Выводы.** В ходе исследований установлено, что при изучении на данной установке экспериментального коэффициента гидравлического сопротивления короткого диффузора при числах Рейнольдса  $Re_1 > 4000$  расчет коэффициента гидравлического трения для трубки можно вести по уравнению (5), а коэффициенты гидравлического сопротивления входа в трубку и выхода из нее соответственно принять, равными 0,5 и 1,0. Проведенные подготовительные мероприятия позволяют гарантировать достаточно высокую точность полученных в дальнейшем результатов.

#### Л и т е р а т у р а

1. Александров И. А. Ректификационные и абсорбционные аппараты. Методы расчета и конструирования. 3-е изд. перераб. / И. А. Александров – М.: Химия, 1978. – 280 с.
2. Долгова А. Н. Определение эффективности массообменных тарелок с учетом неравномерности распределения фаз / А. Н. Долгова, Е. А. Лаптева – Нефтегазовое дело: электронный журнал. – 2013. – № 6. – С. 283-309.
3. Идельчик И. Е. Аэродинамика промышленных аппаратов / И. Е. Идельчик – М.: Энергия, 1964. – 287 с.
4. Рамм В. М. Абсорбция газов / В. М. Рамм. – М.: Химия, 1976. – 656 с.
5. Розен А. М. Масштабный переход в химической технологии: разработка промышленных аппаратов методом гидродинамического моделирования / А. М. Розен и др. – М.: Химия, 1980. – 320 с.
6. Патент України 78789 У, МКИ В01D 3/04, В01D 3/16, В01D 3/32, В01D 53/14, В01F 3/02, В01F 3/04. Пристрій для однорідного розподілу пари (газу). // В. М. Москалик. – № u201213717; Заявл. 30.11.2012; Опубл. 25.03.2013. Бюл. № 6. – 5 с.
7. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М.О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

#### R e f e r e n c e s

1. Aleksandrov I. A. Rektifikatsionnyie i absorbtionnyie apparaty. Metodyi rascheta i konstruirovaniya. 3-e izd. pererab. Khimiya, Moscow, 1978. 280 p.
2. Dolgova A. N., Lapteva E. A. Opredelenie effektivnosti massoobmennyih tarelk s uchetoм neravnomernosti raspredeleniya faz. – Neftegazovoe delo: elektronnyy zhurnal, 2013, no. 6, pp. 283-309.
3. Idelchik I. E. Aerodinamika promyshlennyih apparatov. Energiya, Moscow, 1964. 287 p.
4. Ramm V. M. Absorbtsiya gazov. Khimiya, Moscow, 1976. 656 p.
5. Rozen A. M. Masshtabnyy perehod v himicheskoy tehnologii: razrabotka promyshlennyih apparatov metodom gidrodinamicheskogo modelirovaniya / Rozen A. M. i dr. Khimiya, Moscow, 1980. 320 p.

6. Moskalyk V. M., Pristriy dlya odnoridnogo rozpodilu pari (gazu). Patent Ukraine, no. 78789, 2013.
7. Idelchik I. E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam / Pod red. M.O. Shteynberga. 3-e izd., pererab. i dop. Mashinostroenie, Moscow, 1992. 672 p.

**Москалик В. М., Карпюк Л. В., Табунціков В. Г. Експериментальне визначення коефіцієнта гідравлічного опору короткого диффузора. Підготовка до експерименту.**

*Запропоновано новий спосіб і конструкція пристрою рівномірного розподілу потоку за поперечним перерізом апарата, засновані на самоорганізації. Розроблено установку для експериментального визначення коефіцієнта гідравлічного опору короткого диффузора, який є важливим елементом розподільчого пристрою. Докладно доведено, що коефіцієнт гідравлічного тертя трубки можна розраховувати за відомим з літератури рівнянням, а коефіцієнти гідравлічного опору на вході в трубку і виході з трубки прийняти сталими величинами.*

**Ключові слова:** самоорганізація, профіль швидкості, короткий дифузор, коефіцієнт гідравлічного тертя, коефіцієнт гідравлічного опору.

**Moskalyk V. M., Karpyuk L. V., Tabunshchikov V. G. Experimental determination of the hydraulic resistance coefficient of a short diffuser. Preparation for the experiment**

*A new method and design of the device a uniform flow distribution over the cross section of the apparatus based on self-organization are proposed. The device for experimental determination of the coefficient of hydraulic resistance of a short diffuser, which is an important element of the switchgear is developed. It is thoroughly proved that the coefficient of hydraulic friction of the tube can be calculated by means of the known literature equation. The coefficients of hydraulic resistance at the entrance to the tube and the tube exit have constant values.*

**Keywords:** self-organization, speed profile, short diffuser, coefficient of hydraulic friction, the coefficient of hydraulic resistance.

**Москалик Валерій Михайлович** – к.т.н., доцент кафедри машинознавства та обладнання промислових підприємств СХУ імені В. Даля.

**Карпюк Людмила Вікторівна** – старший викладач кафедри машинознавства та обладнання промислових підприємств СХУ імені В. Даля.

**Табунціков Володимир Георгійович** – старший викладач кафедри машинознавства та обладнання промислових підприємств СХУ імені В. Даля.

*Рецензент:* д.т.н., проф. **Архипов О. Г.**

Стаття подана 20.12.2018.

УДК 004.94

## МЕТОД ПОДОЛАННЯ РІЗНОРІДНОСТІ ДАНИХ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ШАХРАЙСТВА ПРИ ІНСТАЛЮВАННІ МОБІЛЬНИХ ДОДАТКІВ

Польгуль Т. Д., Яровий А. А.

## THE INPUT DATA HETEROGENEITIES RESOLUTION METHOD DURING MOBILE APPLICATIONS INSTALLATION FRAUD DETECTION /

Polhul T., Yarovyi A.

*У роботі запропоновано метод та алгоритми подолання різномірності даних для виявлення шахрайства при інсталюванні мобільних додатків. Процедура виявлення шахрайства на основі розробленого методу дозволяє виявити шахраїв та визначити їх характеристики і шаблони. Здійснено експериментальні дослідження на основі обраної поміченої вибірки. В експериментах мітки класів не використовувались, проте вони необхідні для перевірки точності процедури прийняття рішень, розробленої на основі запропонованого методу, що склала 99,14 %.*

**Ключові слова:** виявлення шахрайства, подолання різномірності, інтелектуальний аналіз даних, виявлення аномалій, інсталювання мобільних додатків.

**Постановка проблеми.** Наявність шахрайства при інсталюванні мобільних додатків стала досить поширеною та вагомою (дорогою) проблемою. Так, наприклад, дослідження AppLift «Fighting Mobile Fraud in the Programmatic era» [1] показало, що загалом, 34% мобільного трафіку, за яким спостерігали, був шахрайським. У коштах це представляє більше ніж \$4,5 млрд втрат.

Задачею шахрайства при інсталюванні мобільних додатків є внесення даних у додаток шахрайськими способами. Внесені дані шахраї намагаються зробити якомога більш наближеними до дій органічних користувачів. Оскільки компанії-розробники мобільних додатків витрачають кошти на маркетингові компанії, що у свою чергу повинні привести органічних користувачів, то метою такого шахрайства є виведення коштів з компаній-розробників без введення органічних користувачів у відповідь. На цьому етапі слід виділити наступні відомі способи шахрайства при інсталюванні мобільних додатків:

- мобільне викрадення (mobile hijacking) [2 – 3] - відбувається, коли справжній мобільний додаток виконує деякі несанкціоновані дії. Наприклад, запускає приховані оголошення і формує кліки від імені

користувача у фоновому режимі. У цілому, програма у цьому випадку буде працювати за сценарієм, що максимально імітуватиме поведінку людини;

- кліковий спам (click spamming) [2 – 5]. Цей спосіб відноситься до програм, які генерують підроблені запити кліків програмним способом;

- ферми дій (action farms) [2 – 3]. Шахраї винагороджують людей по всьому світу за інсталювання мобільних додатків у ручному режимі, тобто фактично відбувається найняття людей для того, щоб вони інсталювали мобільні додатки.

На даний момент існують аналоги виявлення шахрайства, так, наприклад, Kraken [4], Fraudlogix [5], Appsflyer [6], які ще називають системами для боротьби з шахрайством (anti fraud systems). Проте вирішення задачі виявлення шахрайства все одно можна вважати частковим, оскільки більшість існуючих систем-аналогів працюють наступним чином:

- визначають шахраїв неповністю, оскільки використовують готові бази даних IP-адрес користувачів, так наприклад Appsflyer [6] чи Kraken [4]. Через такий підхід деякі шахраї будуть невизначені;

- більшість систем працюють по жорстким алгоритмам або за жорсткими правилами. Відсоток виявлення шахраїв з використанням таких систем недостатньо високий, оскільки кількість шахраїв та їх характеристик може зростати з кожним інсталюванням, а жорсткі правила, у свою чергу, не будуть це враховувати;

- використовують не всі вхідні дані, оскільки на даний момент існує мало сучасних алгоритмів подолання різномірності усіх типів даних. Невраховування деяких вхідних даних також призводить до невизначення деяких з шахраїв. Під різномірністю даних розуміємо те, що дані можуть бути як кількісними і якісними, так і множинами кількісних та якісних даних. Якісні дані у свою чергу можуть бути з неви-

значеною множиною категорій-значень, а сучасні алгоритми подолання різномірності працюють лише з визначеною кількістю категорій якісних даних.

Тобто ефективність таких систем недостатньо висока, тому існує потреба розробки автоматизованої системи виявлення шахрайства, яка використовує нові методи та алгоритми на базі інтелектуального аналізу даних, що дозволить знаходити не лише явних шахраїв, але й виявляти їх шаблони та характеристики і створювати бази даних та бази знань шахраїв для подальшого і ефективного їх використання.

Отже, враховуючи складність і різномірність вхідних даних для систем, що розглядаються, дана робота присвячена розробці методу подолання різномірності даних з метою підвищення ефективності виявлення шахрайства при інсталюванні мобільних додатків та нових шахрайських і органічних шаблонів, характеристик і залежностей.

**Аналіз літератури.** Розглянемо найбільш відомі та популярні системи виявлення шахрайства при інсталюванні та відслідковуванні дій мобільних додатків. Алгоритми пошуку шахраїв з більшості систем-аналогів не розкриваються розробниками, проте за отриманими результатами зрозумілі їх основні рішення. Отже, розглянемо відомі характеристики, переваги та недоліки деяких з них:

- система Fraudlogix [7] має лише чорний список IP-адрес, тобто аналізує користувачів лише по одному критерію. Недоліком даної системи є те, що вона не враховує появу нових шахраїв, ботів з новими параметрами та характеристиками та не враховує усі дані користувача;

- російська розробка Кракен [6] перевіряє належність джерела конверсії до будь-якої з відомих ферм ботів, через що має такий же недолік, як і попередня система. Також дана система не масштабується і робить перевірку на шахрайство лише вибірково по визначеним дням тижня, чим упускає велику кількість шахраїв;

- Adjust [9] використовує не всю множину вхідних даних, а перевіряє лише наявність IP-адреси в базі даних VPN, вивчає кількість однакових кліків з одного джерела та порівнює час між подіями. Використання більшої кількості вхідних даних дозволило б більш точно зробити оцінку користувачів та виявити шахраїв;

- Kochava [10] виявляє шахраїв лише за визначеними критеріями. Критеріїв підібрано достатньо багато, але недоліком такого підходу є те, що у шахраїв з'являються нові характеристики і нові дані, які кожного разу необхідно оновлювати. Також, дана система не використовує усі наявні дані користувача, що знижує її ефективність виявлення шахрайства;

- TMC Attribution Analytics [11] також використовує не всі вхідні дані користувача та має обмежену кількість критеріїв, за якими визначається шахрайство, через що має такі ж недоліки, як і попередня система;

- відома система виявлення шахрайства FraudShield [12] має досить зручний інтерфейс та можливість налаштування кожного критерію. Проте саме власне налаштування вносить недоліки у дану систему, оскільки через деякі її налаштування можна або пропустити дуже багато шахраїв, або навпаки, через деякі налаштування система вважатиме всіх користувачів шахрайськими;

- ще одна існуюча система Forensiq [13] є достатньо відомою, кожен конверсію характеризує відповідним рівнем ризику (низький, середній, високий) та перерахуванням підозрілих ознак. Проте неможливо дізнатись чи відстежити, як система визначає рівень ризику та оцінку. Часто ці знання є важливими, особливо, у випадках, коли необхідно довести причину визначення користувачів, приведених певною маркетинговою кампанією, як шахрайських при судових позовах;

- AppsFlyer [8] є провідною платформою мобільної атрибуції і маркетингової аналітики, яка не так давно випустила власну систему захисту від шахраїв Protect360 [14]. Система має величезну базу IP-адрес та пристроїв, які позначені міткою шахрайства. Як говорить сама компанія, визначена ними мітка шахрайства – це лише привід для додаткової експертизи, оскільки не завжди вона є коректною. Також, неможливо дізнатись причину позначення користувача шахраєм, важливість даної можливості вказана у попередній системі;

- FraudScore [15] є системою, яка на відміну від більшості має оновлення своїх алгоритмів та має самонавчальну систему на базі нейронної мережі. Проте усі свої оцінки вона робить на основі лише деяких даних (таких як дані про пристрій користувача, геодані, дані, пов'язані з операційною системою тощо). Але аналіз не усіх даних також спричиняє невиявлення деяких шахраїв;

- AppMetrica [16] у свою чергу просто провела інтеграцію з попередньо розглянутою системою FraudScore, а отже має ті самі характеристики та недоліки, що і попередня система.

Слід зазначити, що більшість розглянутих систем, використовуються не лише для виявлення шахрайства при інсталюванні мобільних додатків, а є узагальненими для всіх мобільних транзакцій. Це спричиняє невикористання специфічних даних, які притаманні саме мобільним додаткам, що знижує ефективність.

Використання усіх даних користувачів підвищило б ефективність виявлення шахрайства, завдяки знаходженню усіх можливих нових шаблонів, характеристик та залежностей шахраїв з використанням інтелектуального аналізу даних. Проте для використання усіх даних необхідно вирішити задачу подолання їх різномірності.

**Мета статті.** Розробка методу подолання різномірності даних при виявленні шахрайства під час інсталюванні мобільних додатків, який на відміну від існуючих використовує усю множину вхідних даних, що дозволяє знаходити нові шахрайські шаб-

лони, їх характеристики та залежності для виявлення як явних, так і неявних шахраїв та підвищення ефективності процесу виявлення шахрайства при інсталюванні мобільних додатків в цілому.

**Аналіз даних при інсталюванні мобільних додатків.** З метою автоматизації процесу виявлення шахрайства та розробки методу подолання різномірності, що лежатиме в основі процесу, здійснимо аналіз всіх даних про користувачів, на основі яких приймається рішення про наявність шахраїв. Для цього спочатку проаналізуємо ці дані. Зазначимо, що множина усіх подій користувача, яку необхідно проаналізувати для виявлення шахрайства, поділятиметься на:

- множину подій до реєстрації;
- множину внутрішніх подій додатку;
- множину подій після використання додатку.

У свою чергу, типи подій та дані по кожному з них по кожній з множин представлено на рисунках 1 – 3 відповідно.

Множина подій користувача до реєстрації містить такі типи подій як:

- подія інсталювання додатку. Даний тип події супроводжується такими даними як ідентифікатор користувача, IP-адреса користувача, ідентифікатор пристрою користувача, операційна система пристрою користувача та час події;

- подія отримання підтвердження про інсталювання додатку, яка супроводжується такими ж даними як і подія інсталювання додатку, а також має бінарну відмітку про те, чи інсталювання було підтвержене, чи ні;

- подія відкриття користувачем додатку супроводжується усіма спільними з попередніми даними.

Множина внутрішніх подій додатку, які відрізняються від попередніх наступними полями, така:

- подія про реєстрацію користувача – крім спільних зі всіма подіями даних, містить інформацію про користувача, фото користувача, дату народження користувача;

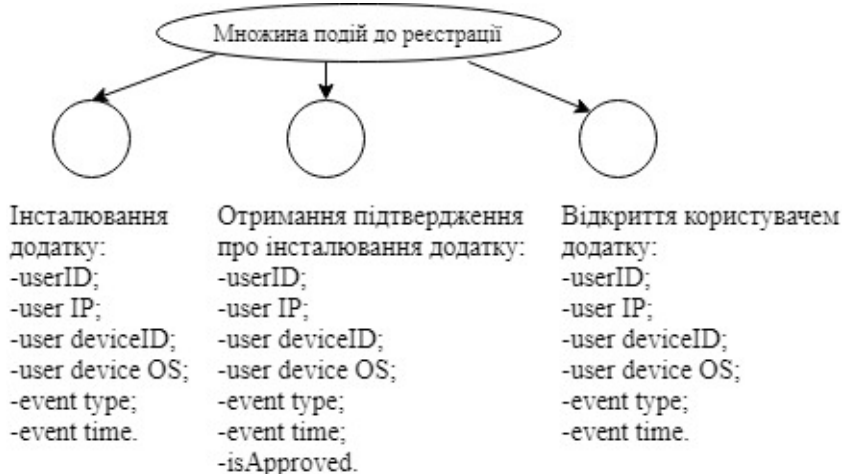


Рис. 1. Множина типів подій користувача та їх дані до реєстрації мобільного додатку

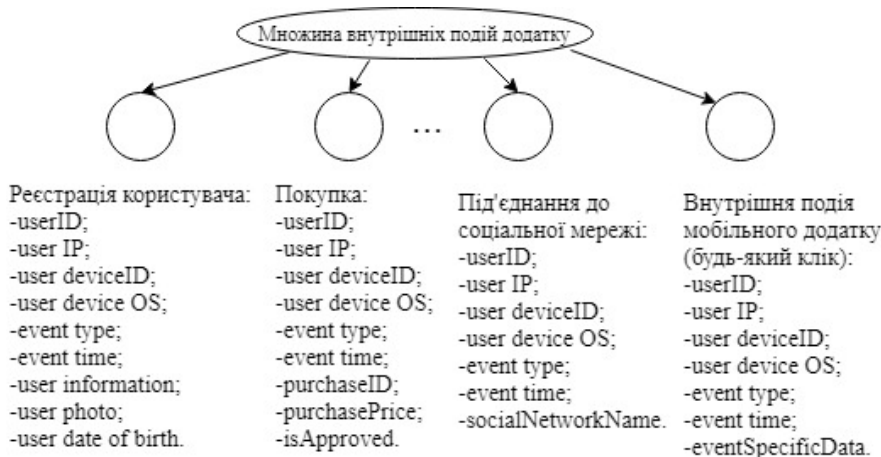


Рис. 2. Множина типів внутрішніх подій додатку та їх дані

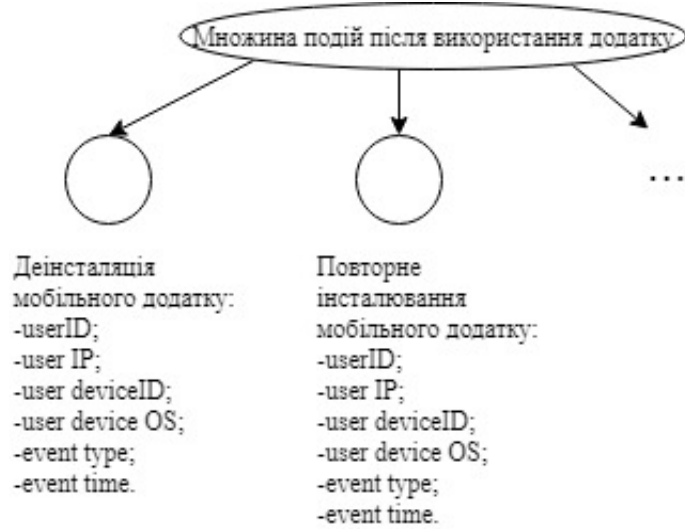


Рис. 3. Множина типів подій користувача після використання додатку та їх дані



Рис. 4. Класифікація вхідних даних мобільного додатку

- подія про покупку, крім спільних даних, також містить ідентифікатор покупки, ціну покупки та бінарну ознаку, що показує, чи покупка була підтверджена магазином за вказаним ідентифікатором;

- подія, що сповіщує про під'єднання користувачем до соціальної мережі, містить додаткову інформацію про назву соціальної мережі;

- кожна з внутрішніх подій додатку містить специфічну для поточної події інформацію.

Множина подій після використання додатку наступна:

- подія про деінсталювання мобільного додатку;

- подія про повторне встановлення мобільного додатку.

Події даної множини не містять особливих даних.

Відповідно, дані по кожному з типів подій, які показано на рисунках 1 – 3 можна характеризувати за групами, представленими на рисунку 4.

На рисунку 4 показано різноманітні дані, що є в наявності для виявлення шахрайства при встановленні мобільних додатків. Розглянемо їх більш детально:

- до кількісних даних відноситься час події, що присутній у всіх типах подій, кількість друзів у соціальної мережі та кількість здійснених покупок. Зауважимо, що розглянуті системи-аналоги не використовують дані з соціальних мереж та дані про кількість здійснених покупок при виявленні шахрайства;

- існуючі якісні дані можна поділити на категорійні та дихотомічні. До категорійних даних відноситься назва мобільної платформи користувача, тип події, IP-адреса користувача, ідентифікатор пристрою користувача, інформація про користувача,



тип соціальної мережі та фото користувача. Слід зазначити, що існуючі методи переведення якісних даних (ознак) у кількісні, такі наприклад як one-hot encoding [17], працюють лише тоді, коли існує відома кількість значень категорій даної ознаки. Проте якщо кількість значень мобільної платформи та типу події може бути однозначно визначена, то кількість значень усіх інших ознак неможливо однозначно визначити, оскільки вони будуть різні у кожного користувача, а дехто з користувачів матимуть декілька значень цих ознак. І якщо розглянуті вище системи-аналоги [6 – 16] працюють з виявленням аномалій по такій ознаці з невизначеною кількістю категорій-значень як IP-адреса, то по іншим таким ознакам вони не здійснюють виявлення шахрайства, що також впливає на їх ефективність, оскільки упускає важливі дані. До дихотомічних даних відносяться такі як: соціальні мережі (прив'язаний чи ні), інсталювання мобільного додатку (підтверджене чи ні), тип події (покупка чи ні), покупка (підтверджена чи ні).

Значимо, що більшість розглянутих вище аналогів [6 – 16] відкидають багато даних про користувачів. Проте на нашу думку використання усіх даних є важливим, тому що, як показано на рисунку 5, сукупність деяких даних може породжувати аномалію, яка є ознакою явного шахрайства. А відкинувши частину вхідних даних, існує можливість упустити деяких шахраїв та втратити інформацію для створення нових шаблонів і визначення основних їх ознак та характеристик. Так наприклад, на рисунку 5 за допомогою діаграм Венна подана множина вхідних даних  $A = \{x_1, z_1, x_2, z_2, \dots, x_n, \dots, z_k, \dots \mid x \in X \text{ і } z \in Z\}$ , де елементи підмножини  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n, \dots \mid P_1(x) \text{ і } P_2(x) \text{ і } \dots \text{ і } P_s(x)\}$  мають властивості  $P_1(x)$  і  $P_2(x)$  і  $\dots$  і  $P_s(x)$  та є не аномальними даними, елементи підмножини  $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_k, \dots \mid P_{a1}(z) \text{ або } P_{a2}(z) \text{ або } \dots \text{ або } P_{k1}(z)\}$  у свою чергу не мають цих властивостей, що означає, що вони є аномальними у заданій множині даних  $A$ , та всі мають різні властивості – одну з:  $P_{a1}(z)$  або  $P_{a2}(z)$  або  $\dots$  або  $P_{k1}$ , тому во-

ни хаотично розкидані, відповідно  $X \subseteq A$  та  $Z \subseteq A$  та  $X \cap Z = \emptyset$ .

Таким чином, різномірність даних для задачі, що розглядається, настільки велика, що використовувати існуючі методи інтелектуального аналізу даних неможливо. Тому, виникла необхідність створення методів та алгоритмів, які б дозволили використовувати всю різномірну інформацію про користувачів.

**Метод подолання різномірності даних.** Проведений вище аналіз даних, а також досвід розробників систем-аналогів показав, що в купі всі ці дані неможливо використовувати, крім того, що вони різномірні, їх дуже багато. І хоча сучасні методи інтелектуального аналізу даних можуть аналізувати величезну кількість даних, то вони не можуть подолати їх різномірність (рисунок 4).

На нашу думку, для того, щоб використовувати всі наявні різномірні дані, необхідно провести їх шкалювання як один із стандартних підходів подолання різномірності. Але у зв'язку із складністю та кількістю даних, здійснимо шкалювання не однією, а декількома шкалами, об'єднуючи дані по групам. Такий підхід був запропонований авторами роботи у вигляді трьох алгоритмів подолання різномірності на базі шести шкал згрупованих даних.

Алгоритм 1 подолання різномірності вхідних даних при інсталюванні мобільних додатків:

$$1. \text{ Отримання даних } \bar{I} \begin{pmatrix} u_1(i_1, i_2, \dots, i_{s1}) \\ u_2(i_1, i_2, \dots, i_{s2}) \\ \dots \\ u_n(i_1, i_2, \dots, i_{sn}) \end{pmatrix}.$$

2. Визначення типу даних.

3. Перетворення даних алгоритмами 2 та 3, в залежності від їх типу, з метою зведення їх до однорідних даних.

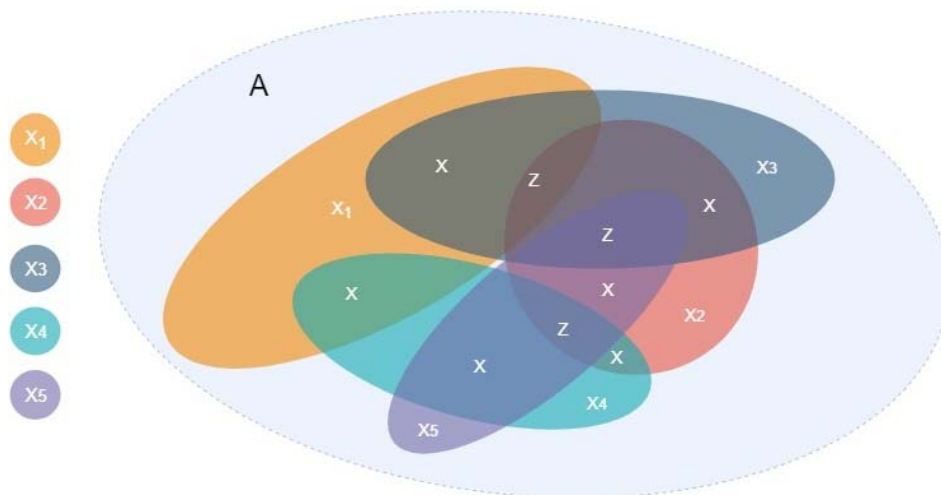


Рис. 5. Діаграма Венна, що зображає приклади шахрайства як навмисної аномалії в даних, де  $X_i$  – підмножини неаномальних даних,  $Z$  – підмножина аномальних даних



Для виконання пункту 3 алгоритму 1, пропонуємо алгоритм 2 шкалювання даних, який дає можливість переходу від різнорідних даних до коефіцієнтів, значення яких можуть бути або 0, що означатиме, що користувач є шахраєм, або 1, що позначатиме користувача як органічного. Тобто результатом шкалювання всіх даних являються 8 коефіцієнтів, значення яких бінарні – а саме 0 або 1. Бінарність значень коефіцієнтів визначається кінцевою ціллю задачі – чи користувач з певними даними являється шахраєм чи ні. Тому в першу групу  $G_1$  входять дані, результатом аналізу яких є бінарна відповідь «так» або «ні» (0 або 1). А ті дані, які неможливо привести до бінарного типу, групуються у другу групу даних  $G_2$ , для яких у даній роботі розроблений метод (на базі алгоритму 3) інтелектуального аналізу даних з використанням коефіцієнтів схожості та системи правил з розробленою базою знань. Якщо ж даний метод не визначає користувача ні як шахрая, ні як органічного, то даний користувач включається в групу підозрілих користувачів, для аналізу якої застосовуються алгоритми нечіткої логіки на основі попередньо сформованих правил з бази знань, яка в процесі експлуатації постійно нарощується.

Слід зазначити, що не всі вхідні дані можна відразу ж однозначно шкалювати. Тому в роботі розроблений алгоритм 2 шкалювання вхідних даних, який оснований на розбитті всіх даних на 2 групи, над однією з яких однозначно проводиться шкалювання. Алгоритм 2 шкалювання вхідних даних:

1. Поділ усіх даних  $\bar{I}$  на дві групи  $G_1$  і  $G_2$ :

1.1. До першої групи  $G_1$  входять дані, за якими однозначно можна буде визначити коефіцієнт від 0 до 1, де 0 означатиме, що користувач є шахраєм, а 1 означатиме, що користувач є органічним (шкала 1, 2, 3 рисунок 6). Так, наприклад, значення коефіцієнту  $k_1$ , що відповідає визначенню шахрайства за IP-адресою, визначатиметься за допомогою перевірки належності IP-адреси користувача  $IP$  до множини відомих шахрайських IP-адрес  $FRAUD\_IP$ , а саме, якщо виконується умова  $P_1(IP) = IP \in FRAUD\_IP$ , то користувач є шахраєм. Аналогічно, наприклад, значення коефіцієнту  $k_3$ , що відповідає визначенню шахрайства за унікальним ідентифікатором пристрою користувача  $DeviceID$ , визначатиметься умовою  $P_3(DeviceID) = DeviceID \in FRAUD\_DeviceID$ , виконання якої помічатиме користувача шахраєм. Зазначимо, що  $FRAUD\_DeviceID$  – це множина усіх відомих ідентифікаторів пристроїв шахраїв. Коефіцієнт  $k_3$  буде рівний значенню 0, якщо користувач відправив запит з ідентифікатором покупки  $PurchaseID$ , яка не була підтверджена мобільним магазином (атрибут покупки  $isConfirmed$  позначений як  $false$ ). У цьому випадку визначення шахрая можна задати умовою  $P_5(PurchaseID) = (PurchaseID.isConfirmed = false)$ .

1.2. До другої групи  $G_2$  входять дані, за якими неможливо однозначно визначити значення коефіцієнту. Так, наприклад, невідомі граничні значення часу між подіями, за допомогою яких можна

однозначно визначити, чи користувач є шахраєм чи органічним користувачем. Один із коефіцієнтів визначатиметься на основі типів подій, які робить користувач. Даний коефіцієнт не може входити до першої групи  $G_1$ , оскільки по таким даним не існує чітко визначеної умови, яка не буде змінюватися з часом.

2. Визначення значень коефіцієнтів на основі даних першої групи  $G_1$  та побудова моделі даних групи  $G_1$  (рисунок 6).

3. Визначення однозначних шахраїв, органічних та підозрілих користувачів на основі значень коефіцієнтів першої групи  $G_1$ , формування їх шаблонів та занесення їх у базу знань.

4. Визначення характеристик однозначно визначених користувачів, формування їх шаблонів та занесення їх у базу знань.

Для аналізу другої групи даних  $G_2$  в роботі розроблено метод інтелектуального аналізу даних, оснований на алгоритмі 3:

1. Визначення значень коефіцієнтів другої групи даних  $G_2$  на основі правил попередньо сформованої бази знань (шкали 4, 5 рисунок 7):

1.1. Отримання шаблонів та характеристик шахраїв з бази даних, що була сформована при аналізі групи  $G_1$ .

1.2. Знаходження коефіцієнту схожості між поточним користувачем та шаблоном і характеристиками шахрая (рисунок 7). Зазначимо, що значення коефіцієнтів схожості належить проміжку  $[0; 1]$ . Значення 1 означає, що користувачі ідентичні за даною ознакою, 0 у свою чергу означає, що користувачі не мають нічого спільного за даною ознакою. Так, наприклад, розглянувши такі дані як час між подіями, матимемо множину часу між подіями поточного користувача  $T_U = \{t \mid t > 0\}$  та множини часу між подіями кожного із однозначно визначених на кроках алгоритму 3, 4 шахраїв  $T_I = \{t \mid t > 0\}$ . Маючи дві множини не бінарних, проте однорідних даних  $T_U$  та  $T_I$ , застосуємо відповідний коефіцієнт схожості користувачів. Для множин такого типу в роботі обрано коефіцієнт Танімото  $K_T(T_U, T_I)$  [2, 4, 18], який визначається як

$$K_T(T_U, T_I) = \frac{N_C}{N_A + N_B - N_C}, \text{ де } N_C - \text{кількість спільних для множин } T_U \text{ та } T_I \text{ елементів, } N_A - \text{кількість елементів у множині } T_U, N_B - \text{кількість елементів у множині } T_I. \text{ У свою чергу, для множин бінарних даних, таких як множина з бінарними значеннями по кожному з існуючих типів подій мобільного додатку, де 0 означатиме, що користувач не використовував таку подію, а 1 означатиме,}$$

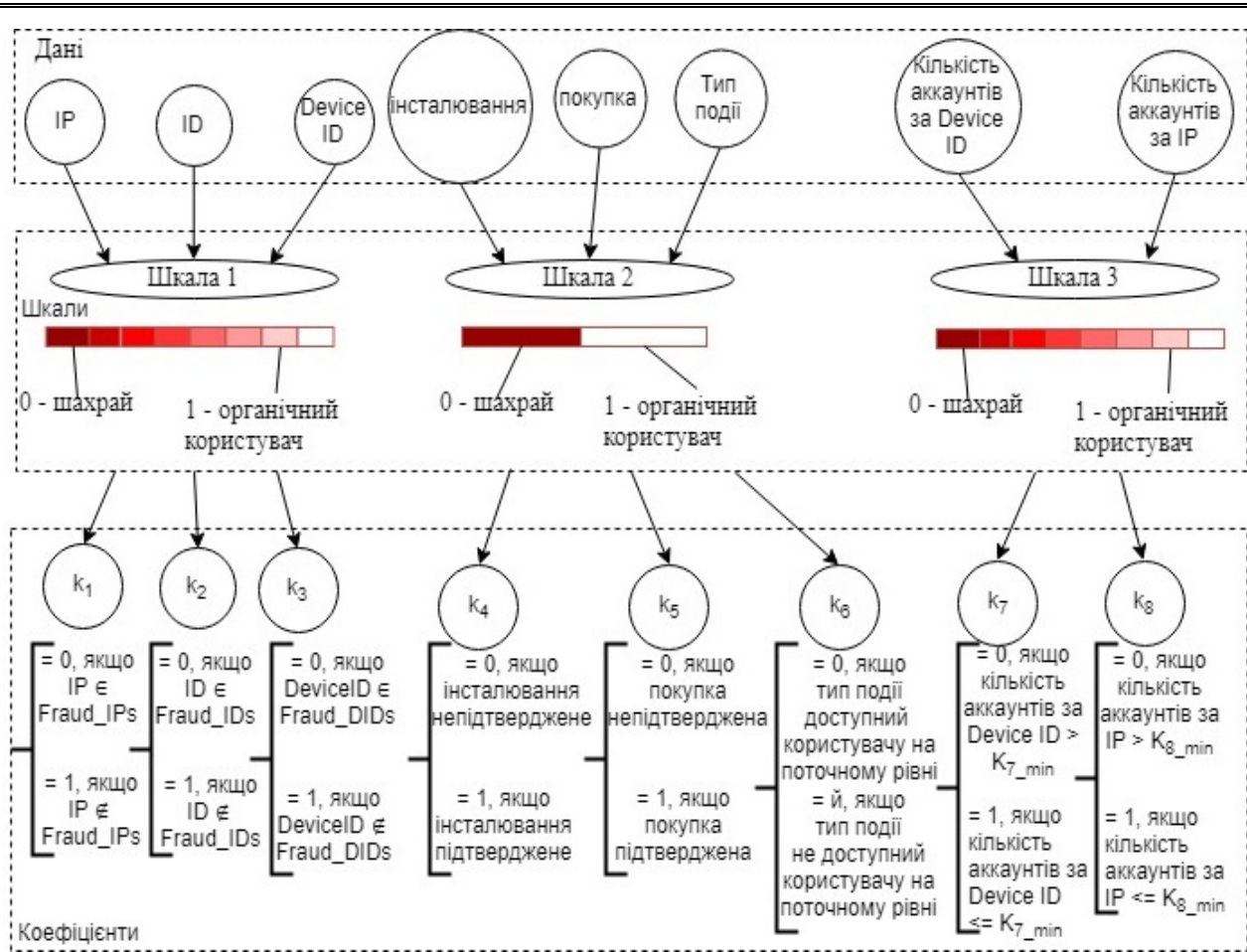


Рис. 6. Модель даних першої групи  $G_1$

що використовував, коефіцієнти схожості користувачів визначаються з використанням коефіцієнту косинусної схожості  $K_{COS}(A_1, A_2)$  [2, 4, 18], який найефективніше працює з бінарними даними. У свою чергу

$$K_{COS}(A_1, A_2) = \cos(A_1, A_2) = \frac{A_1 \cdot A_2}{|A_1| \cdot |A_2|}, \text{ де}$$

$A_1, A_2$  – множини з вище вказаними бінарними даними поточного користувача та шахрайського користувача відповідно.

1.3. Формування масиву значень коефіцієнтів схожості поточного користувача з кожним із однозначно визначених шахрайських користувачів  $G_{2\_fraud}$  з бази знань.

1.4. Виконання кроків 1.1 – 1.3 для однозначно визначених органічних користувачів  $G_{2\_org}$  з бази знань.

1.5. Інверсія масиву значень коефіцієнтів схожості поточного користувача з кожним із однозначно визначених органічних користувачів  $G_{2\_org}$  з бази знань.

1.6. Формування спільного масиву коефіцієнтів  $G_2 = G_{2\_fraud} \cup (1 - G_{2\_org})$  по поточній ознаці на основі масивів, отриманих на кроках 1.3, 1.5, 1.6.

1.7. Формування вектору підозрілих користувачів  $G_{2\_susp}$ .

2. Формування вектору відшкальованих коефіцієнтів по кожному користувачу, об'єднавши дані, отримані на кроці 2 алгоритму 2 та кроці 1.7 алгоритму 3.

3. Віднесення підозрілих користувачів до класу шахраїв або органічних з використанням нечіткої логіки. Зв'язок між функціями належності входу  $i_j$  з бази знань можна визначати нечіткими логічними рівняннями

$$\mu^{d_j}(y) = b_{j1} [\mu^{j1}(i_1) \wedge \mu^{j1}(i_2) \wedge \dots \wedge \mu^{j1}(i_n)] \vee$$

$$\vee b_{j2} [\mu^{j2}(i_1) \wedge \mu^{j2}(i_2) \wedge \dots \wedge \mu^{j2}(i_n)] \vee \dots$$

$$\vee b_{jp} [\mu^{jp}(i_1) \wedge \mu^{jp}(i_2) \wedge \dots \wedge \mu^{jp}(i_n)], j = \overline{1, m},$$

які можна спростити до виразу

$$\mu^{d_j}(y) = \max_{p=1, k_j} \left\{ a_{jp} \min_{i=1, n} [\mu^{jp}(i_j)] \right\}, j = \overline{1, m},$$

де  $b_i^p$  – нечіткий терм. Нечіткий терм у свою чергу

визначається як  $b_i^p = \int_{\underline{i}_j}^{\overline{i}_j} \frac{\mu^p(i_j)}{i_j}$ , де  $\mu^p(i_j)$  –

функція належності входу  $i_j$  нечіткому терму  $b_i^p$ ,  $p = k_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, m}$ .

В результаті виконання кроків 1 та 2 алгоритму 2, проведено шкалювання даних групи  $G_1$  та за допомогою коефіцієнтів  $k_1, k_2, k_3, \dots, k_8$  різномірні дані приведено до однорідного стану, що дозволяє однозначно визначити шахраїв, якщо значення хоча б одного з коефіцієнтів дорівнює 0.

Зазначимо, що запропонований метод та алгоритми алгоритм можна автоматизувати. Також, з кожним повторним використанням алгоритмів, будуть

знаходитись все нові характеристики органічних та шахрайських користувачів, які заноситимуться у базу знань. Це дозволить удосконалювати подальше виявлення шахрайства.

Таким чином, запропонований метод подолання різномірності вхідних складається з трьох алгоритмів: алгоритм 1 подолання різномірності даних, алгоритм 2 шкалювання даних, алгоритм 3 визначення коефіцієнтів подібності з використанням інтелектуального аналізу даних на основі нечіткої логіки, та двох розроблених моделей даних, що дозволяє суттєво підвищити точність прийняття рішення та точність кінцевих результатів, що підтверджено результатами експериментальних досліджень.

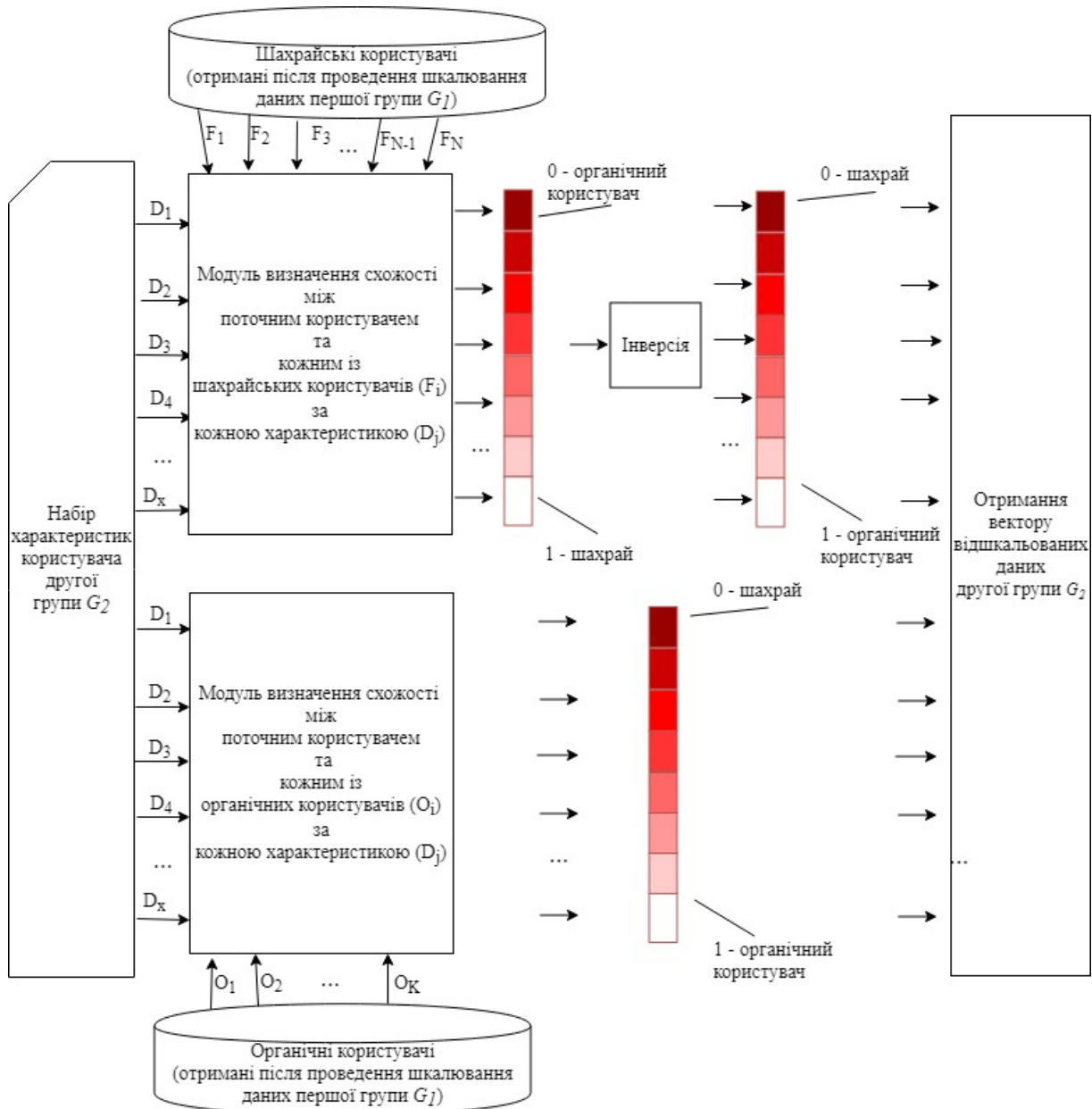


Рис. 7. Модель шкалювання даних другої групи  $G_2$

### Результати експериментальних досліджень.

У роботі розроблено програмне забезпечення, в основі якого лежать запропоновані алгоритми подолання різномірності. Для проведення експериментальних досліджень взято вибірку з 300567 записами з реального мобільного додатку, всі дані якої різномірні та кожен користувач якої помічений класом (шахрай чи органічний). Розроблена авторами система не знає про мітки користувачів, а помічений набір було обрано для подальшої перевірки точності розробленої системи. Точність виявлення шахрайства при інсталюванні мобільних додатків на обраній вибірці склала 99,14 % в результаті того, що подолана різномірність даних за допомогою запропонованого вище методу та алгоритмів, що дало можливість використовувати усі дані про користувачів, та використано метод виявлення схожості користувачів [17 – 18]. Також, завдяки розробленому методу подолання різномірності даних, були більш точно визначені характеристики шахраїв та сформовані правила в базу знань. Для реалізації обрано мову програмування Python та бібліотеку TensorFlow, розроблену компанією Google. Результати експериментального дослідження, що розроблені на основі програмних модулів, на які отримано авторські свідоцтва [19 – 20] представлено на рисунку 8.

```
Percent of fraudulent transactions: 0.001727485630620034
/Users/tetianapoluh/PycharmProjects/CreditCardFraudDetecti
return f(*args, **kwargs)
2018-07-24 23:33:11.755811: I tensorflow/core/platform/cpu_
Epoch: 0 Current loss: 1.4053 Elapsed time: 1.58 seconds
Current accuracy: 0.15%
Epoch: 10 Current loss: 1.4053 Elapsed time: 1.32 seconds
Current accuracy: 0.15%
Epoch: 20 Current loss: 1.3875 Elapsed time: 1.20 seconds
Current accuracy: 0.15%
Epoch: 30 Current loss: 1.3002 Elapsed time: 1.25 seconds
Current accuracy: 66.30%
Epoch: 40 Current loss: 1.1396 Elapsed time: 1.21 seconds
Current accuracy: 93.02%
Epoch: 50 Current loss: 1.0138 Elapsed time: 1.21 seconds
Current accuracy: 97.49%
Epoch: 60 Current loss: 0.9332 Elapsed time: 1.29 seconds
Current accuracy: 99.00%
Epoch: 70 Current loss: 0.8944 Elapsed time: 1.14 seconds
Current accuracy: 99.46%
Epoch: 80 Current loss: 0.8729 Elapsed time: 1.33 seconds
Current accuracy: 99.65%
Epoch: 90 Current loss: 0.8608 Elapsed time: 1.16 seconds
Current accuracy: 99.62%
Final accuracy: 99.14%
Final fraud specific accuracy: 82.76%
```

Process finished with exit code 0

Рис. 8. Результати комп'ютерного моделювання, здійсненого на основі даних, отриманих з методу подолання різномірності вхідних даних

**Висновки.** Наукову новизну запропонованої роботи складають:

Розроблено метод подолання різномірності даних при виявленні шахрайства під час інсталювання мобільних додатків, який на відміну від існуючих, використовує усю множину вхідних даних, що дозволяє знаходити нові шахрайські шаблони, їх характеристики та залежності та підвищує ефективність процесу виявлення шахрайства при інсталюванні мобільних додатків.

Розроблений метод складається з трьох запропонованих алгоритмів: алгоритм 1 подолання різно-

рідності вхідних даних, алгоритм 2 шкалювання даних, алгоритм 3 визначення коефіцієнтів подібності з використанням інтелектуального аналізу даних на основі нечіткої логіки, та двох розроблених моделей даних. Таке поєднання алгоритмів дозволяє суттєво підвищити точність прийняття рішення та точність кінцевих результатів.

1. Результати експериментальних досліджень на вибірці з 300567 записів з реального мобільного додатку, всі дані якої різномірні та кожен користувач якої помічений класом (шахрай чи органічний), дозволили отримати точність 99,14 %.

Практична цінність підходу заключається у можливості його використання при вирішенні задач автоматичного виявлення шахрайства при інсталюванні мобільних додатків за допомогою спеціально розробленого програмного забезпечення.

### Література

1. S. Benndorf, G. Kakulapati, A. Pham and others (2015), "Fighting Mobile Fraud in the Programmatic era: AppLift". AppLift GmbH, 14 p.
2. А. А. Яровий, О. Н. Романюк, І. Р. Арсенюк, та Т. Д. Польгуль (2017) "Виявлення шахрайства при інсталюванні програмних додатків з використанням інтелектуального аналізу даних". Наукові праці Донецького національного технічного університету Серія: "Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка", Покровськ, №2 (25) – С. 126-131.
3. "Our take on mobile fraud detection", available at: <http://geeks.jampp.com/data-science/mobile-fraud/>
4. Vacha Dave, Saikat Guha, Yin Zhang, "ViceROI: Catching Click-Spam in Search Ad Networks", available at: <http://www.sysnet.ucsd.edu/~vacha/ccs13.pdf>
5. Dave, V., Guha, S., Zhang Y. (2012), "Measuring and Fingerprinting Click-Spam in Ad Networks. In Proceedings of the Annual Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM)". Helsinki, Finland, Aug. 2012. – 175 – 186 pp.
6. "Кракен Антибот", available at: <http://kraken.run/>
7. "Fraudlogix: Ad Fraud Solutions for Exchanges, Networks, SSPs & DSPs", available at: <https://www.fraudlogix.com/>
8. "AppsFlyer: Measure In-App To Grow Your Mobile Business", available at: <https://www.appsflyer.com/>
9. "Adjust", available at: <https://www.adjust.com/>
10. "Kochava Uncovers Global Ad Fraud Scam", available at: <https://www.kochava.com/>
11. "TMC Attribution Analytics", available at: <https://help.tune.com/marketing-console/attribution-analytics/>
12. "Fraudwatch", available at: <http://www.fraudshields.com/>
13. "Impact: Forensiq by Impact Earns MRC Accreditation for SIVT Detection and Filtration and Viewability Measurement", available at: <https://impact.com/ad-fraud-detection/>
14. "AppsFlyer: Protect your data from mobile fraud: Protect360", available at: <https://www.appsflyer.com/product/protect360/>
15. "FraudScore: FraudScore fights ad fraud using Machine Learning", available at: <https://fraudscore.mobi/>
16. "AppMetrica: Аналітика прилежний от и до", available at: <https://appmetrica.yandex.ru/>
17. Aurélien Géron (2017), "Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn and TensorFlow: Concepts, Tools, and

- Techniques to Build Intelligent Systems”. O’Reilly Media, 574 p.
18. Кюльян А. Г., Польгуль Т. Д., Хазін М.Б. (2012), “Математична модель рекомендаційного сервісу на основі методу колаборативної фільтрації”, Комп’ютерні технології та Інтернет в інформаційному суспільстві, 226–227 с.
  19. А.А. Яровий, Т.Д. Польгуль. (2018). Комп’ютерна програма «Програмний модуль збору даних інформаційної технології» виявлення шахрайства при інсталюванні програмних додатків. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №76348, К.: Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, 26.01.18.
  20. А.А. Яровий, Т.Д. Польгуль. (2018). Комп’ютерна програма «Програмний модуль визначення схожості користувачів інформаційної технології виявлення шахрайства при інсталюванні програмних додатків», Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №76347, К.: Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, 26.01.18.

### References

1. S. Benndorf, G. Kakulapati, A. Pham and others (2015), “Fighting Mobile Fraud in the Programmatic era: AppLift”. AppLift GmbH, 14 p.
2. A. A. Yaroviy, O. N. Romanyuk, I. R. Arsenyuk, and T. D. Polhul (2017) " Application Install Fraud Detection Using Data Mining ". *Scientific Works of Donetsk National Technical University, Series: "Informatics, cybernetics and computing technique"*, Pokrovsk, №2 (25) – p. 126-131.
3. “Our take on mobile fraud detection”, available at: <http://geeks.jammp.com/data-science/mobile-fraud/>
4. Vacha Dave, Saikat Guha, Yin Zhang, “ViceROI: Catching Click-Spam in Search Ad Networks”, available at: <http://www.sysnet.ucsd.edu/~vacha/ccs13.pdf>
5. Dave, V., Guha, S., Zhang Y. (2012), “Measuring and Fingerprinting Click-Spam in Ad Networks. In Proceedings of the Annual Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM)”. Helsinki, Finland, Aug. 2012. – 175 – 186 pp.
6. Kraken Antibot”, available at: <http://kraken.run/>
7. Fraudlogix: Ad Fraud Solutions for Exchanges, Networks, SSPs & DSPs”, available at: <https://www.fraudlogix.com/>
8. “AppsFlyer: Measure In-App To Grow Your Mobile Business”, available at: <https://www.appsflyer.com/>
9. “Adjust”, available at: <https://www.adjust.com/>
10. “Kochava Uncovers Global Ad Fraud Scam”, available at: <https://www.kochava.com/>
11. “TMC Attribution Analytics”, available at: <https://help.tune.com/marketing-console/attribution-analytics/>
12. “Fraudwatch”, available at: <http://www.fraudshields.com>
13. “Impact: Forensiq by Impact Earns MRC Accreditation for SIVT Detection and Filtration and Viewability Measurement”, available at: <https://impact.com/ad-fraud-detection/>
14. “Appsflyer: Protect your data from mobile fraud: Protect360”, available at: <https://www.appsflyer.com/product/protect360/>
15. FraudScore: FraudScore fights ad fraud using Machine Learning”, available at: <https://fraudscore.mobi/>
16. “AppMetrica”, available at: <https://appmetrica.yandex.ru/>
17. Aurélien Géron (2017), “Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn and TensorFlow: Concepts, Tools, and

- Techniques to Build Intelligent Systems”. O’Reilly Media, 574 p.
18. Kulian A. H., Polhul T. D., Khazin M.B. (2012), “Mathematical model of recommendation service based on the method of collaborative filtration” (Ukr.), Computer Technologies and Internet in information society, 226–227 pp.
  19. А.А. Яровий, Т.Д. Польгуль, Computer Program «Software module for data gathering of information technology of fraud detection in the process of software applications installation», Certificate of registration of copyright to a work №76348, К.: Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine, 26.01.18. (Ukr.).
  20. А.А. Яровий, Т.Д. Польгуль, Computer Program «Software module of users similarity definition of information technology of fraud detection in the process of software applications installation», Certificate of registration of copyright to a work №76347, К.: Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine, 26.01.18. (Ukr.).

### Польгуль Т. Д., Яровой А. А. Метод преодоления разнородности данных для выявления мошенничества при инсталлировании мобильных приложений

В работе предложено метод и алгоритмы преодоления разнородности данных для выявления мошенничества при инсталлировании мобильных приложений. Процедура выявления мошенничества на основе разработанного метода позволяет выявить мошенников и определить их характеристики и шаблоны. Осуществлены экспериментальные исследования на основе выбранной помеченной выборки. В экспериментах метки классов не использовались, однако они необходимы для проверки точности процедуры принятия решений, разработанной на основе предложенного метода, которая составила 99,14%.

**Ключевые слова:** выявление мошенничества, преодоление разнородности, интеллектуальный анализ данных, выявление аномалий, инсталлирование мобильных приложений.

### Polhul T., Yaroviy A. The input data heterogeneities resolution method during mobile applications installation fraud detection

The data heterogeneities resolution method and algorithms during mobile applications installation fraud detection were proposed in the paper. The fraud detection procedure on the basis of the developed method allows to detect scammers, their characteristics and patterns. The experimental studies on the basis of the selected labeled sample were performed. Samples class labels were not used in experiments, but they are necessary to verify the accuracy of the decision-making procedure developed on the basis of the proposed method system, which is 99,14 %.

**Keywords:** fraud detection, heterogeneities resolution, data mining, anomaly detection, mobile applications installation.

Польгуль Т. Д. – аспірант кафедри комп’ютерних наук Вінницького національного технічного університету, e-mail: tanapolg93@gmail.com

Яровий А. А. – д.т.н., професор, завідувач кафедри комп’ютерних наук Вінницького національного технічного університету, e-mail: a.yaroviy@vntu.edu.ua

Рецензент: д.т.н., проф. Рязанцев О.І.



УДК 629.592

**ТОРМОЗНАЯ СИСТЕМА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЭЛЕКТРОПОЕЗДА ЭКР1****Сафронов А. М., Крамаренко М.В., Лутонин С.В., Водяников Ю. Я.****BRAKE SYSTEM OF HIGH-SPEED ELECTRIC TRAIN EKRI****Safronov O.M., Kramarenko M.V., Lutonin S.V., Vodyannikov Yu. Ya.**

*В статье приведено описание тормозной системы двухсистемного электропоезда ЭКР1 для движения со скоростями 200 км/ч. Показаны основные комплектующие, а также принципиальные схемы тормоза. Анализ показал, что тормозная система отвечает лучшим мировым аналогам.*

**Ключевые слова.** Электропоезд, тормозная система, противоюзная защита, электронный блок, принципиальная схема.

**Постановка проблемы.** Дальнейшее развитие железнодорожного транспорта предусматривает существенное качественное изменение автотормозной техники, связанное с необходимостью повышения удельной тормозной силы поездов, особенно в диапазоне высоких скоростей, и улучшением управляемости поездами при движении их в тормозных режимах. Создание высокоскоростного пассажирского движения в одну из основных выдвигает задачи создания высоконадежных и эффективных тормозных систем. От свойств и состояния тормозного оборудования подвижного состава в значительной степени зависит безопасность движения. Особую актуальность для высокоскоростного подвижного состава приобретают задачи снижения человеческого фактора как управлением движением, так тормозным процессом. Для реализации высокоскоростного движения требуется решение ряда проблем, к числу наиболее важных из которых относятся: информативность о состоянии тормозной системы и ее способности выполнять свои функции, вопросы безопасности при возникновении нештатных ситуаций, защита поверхности колесных пар от повреждений в процессе торможения (юз колесных пар) при неблагоприятных погодных условиях и др. Поэтому для высокоскоростного подвижного состава должны быть наиболее тщательно проработаны все компоненты тормозной системы.

**Целью работы** является описание тормозной системы и ее особенностей для высокоскоростного электропоезда.

**Изложение основного материала.** Крюковским вагоностроительным заводом совместно с отечественными и зарубежными компаниями был создан электропоезд ЭКР1 с конструктивной скоростью 200 км/ч, который преимущественно состоит из комплектующих отечественного производства: ходовые части, внутренний интерьер, системы жизнеобеспечения, вентиляции, отопления и кондиционирования, оборудование контроля и диагностики. Разработка “КВСЗ” позволит в дальнейшем обеспечить качественный скачок, позволяющий перейти в скором будущем к организации сети высокоскоростного железнодорожного транспорта на Украине.

Электропоезд состоит из девяти жестко соединенных между собой вагонов (рис. 1) и предназначен для одновременной перевозки 609 пассажиров на расстояние 700 км со скоростью до 200 км/ч и может эксплуатироваться на электрифицированных участках железнодорожного пути как с постоянным, так и с переменным напряжением сети [1].

Головной и хвостовой вагоны – моторные, средние 7 вагонов – прицепные (промежуточные), которые выполнены на базе вагонов улучшенной комфортабельности. Стоимость комфортабельного девятивагонного двухсистемного электропоезда на 30% дешевле корейского. В его конструкции были реализованы все требования заказчика, оговоренные техническим заданием. Конструкторы максимально учли действующие нормативные требования, специфику и опыт эксплуатации электропоездов в Украине, а также максимально эффективно осуществить его интеграцию в существующую инфраструктуру железных дорог.

Электропоезд обладает современным дизайном внешнего вида (рис.2,) и кабины машиниста (рис. 3), а также системой управления и диагностики (рис. 4).

Система контроля и диагностики электропоезда обеспечивает запись его основных параметров, их архивирование и, при необходимости, вывод параметров на дисплей, расположенный на пульте управления (рис. 5).

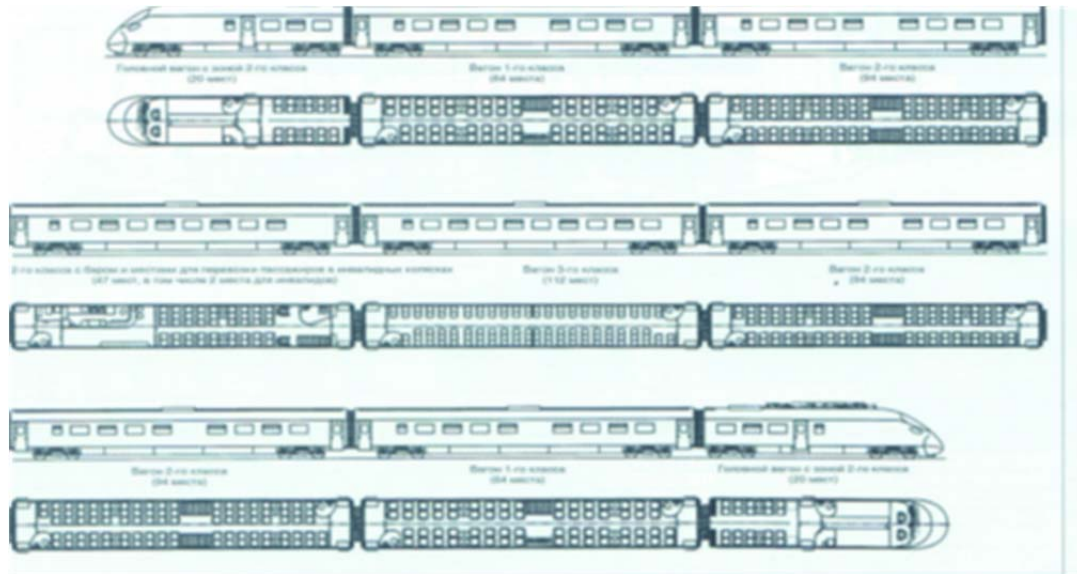


Рис. 1. Схема двухсистемного електропоезда для міжрегіонального сообщення



Рис. 2. Внешний вид електропоезда

Електропоезд на 70 % является национальным продуктом, а ряд комплектующих (тяговые двигатели, редукторы, компоненты тормозной системы) закупаются у иностранных фирм (в основном австрийских и немецких). В разработке и постройке электропоезда принимали участие, кроме ПАО «КВСЗ», фирмы «Knorr-Bremse», «STEMMANN» (Германия), «MEDCOM» (Польша), «Хартрон-Экспресс» (Харьков), «МДС» (Днепропетровск), и др.



Рис. 3. Внешний вид кабины машиниста



Рис. .5. Дисплей отображения диагностической информации



Рис. 4. Рукоятки и кнопки управления, а также дисплей отображения диагностической информации

Так как электропоезд спроектирован для скорости движения 200 км/ч, то на осях немоторных вагонов были установлены по три тормозных диска (рис. 6), диски на моторных вагонах - на колесном центре (рис. 7).

Важнейшей составной частью электропоезда является тормозная система, которая обеспечивает безопасность движения и пассажиров. Поэтому для указанной системы были наиболее тщательно проработаны все ее компоненты. Следует отметить, что применение на электропоезде элементов тормозного оборудования производства компании «Knorr-Bremse» (Германия) послужило основой для создания тормозной системы с достаточно высокой эффективностью и надежностью (рис. 8).

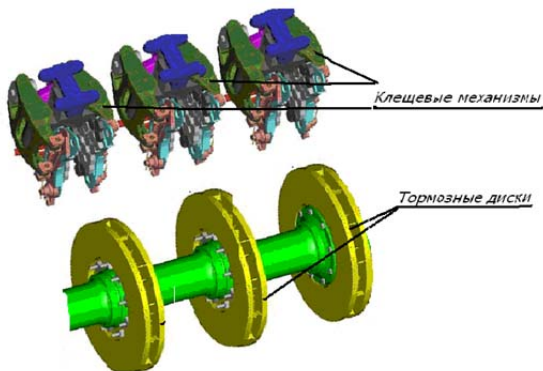


Рис. 6. Тормозные диски на оси промежуточных вагонов электропоезда

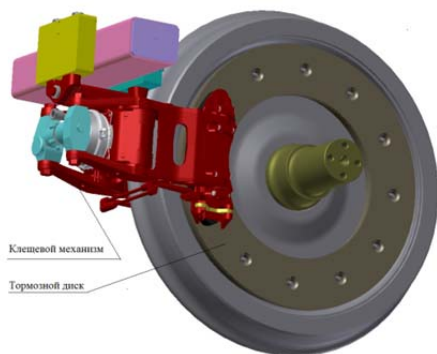


Рис. 7. Дисковый тормоз, установленный на моторных вагонах электропоезда

Тормозная система электропоезда оснащена следующими видами тормозов [9]:

- рекуперативно-реостатным электродинамическим тормозом (только для головных моторных вагонов);

- электропневматическим прямодействующим фрикционным дисковым тормозом, который является основным - рабочим;

- пневматическим не прямодействующим фрикционным дисковым тормозом (резервный, автоматический);

- автоматическим стояночным тормозом с пружинным аккумулятором, который воздействует на накладку фрикционного дискового тормоза вагона.

Пневматическое оборудования тормозной системы электропоезда (рис. 9 и 11) по своему функциональному назначению может быть представлена в виде следующих составных частей:

- ✓ - приборы питания тормоза сжатым воздухом (компрессорные безмасляные агрегаты, предохранительные клапаны, воздухоосушительные установки и др.);

- ✓ - приборы управления и контроля (мастер-контроллер, в котором совмещены функции прибора для обеспечения тяги и торможения электродинамическим тормозом; резервный тормозной контроллер, предназначенный для управления пневматическим тормозом; панель системы управления тормозной магистралью; блокировочное устройство; манометры; приборы системы контроля и диагностики, др.);

- ✓ - приборы безопасности (автостоп; система КЛУБ; скоростемер; аварийная кнопка, др.);

- ✓ - приборы торможения и отпуска (контейнер тормозного оборудования; запасные и питательные резервуары);

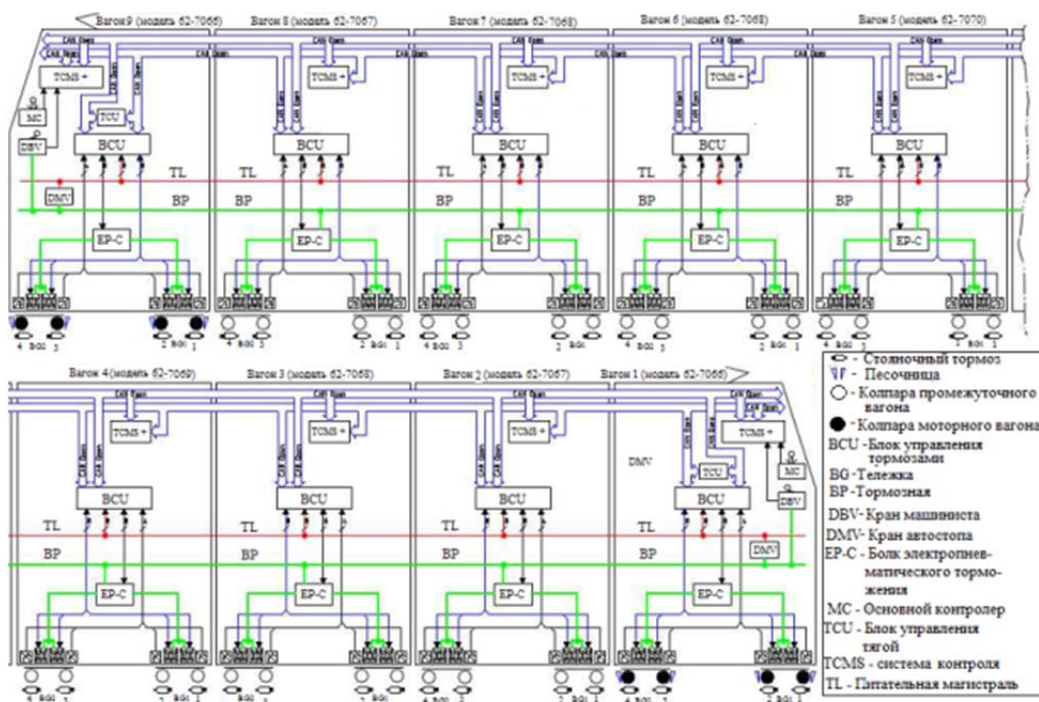


Рис. 8. Схема тормозной системы



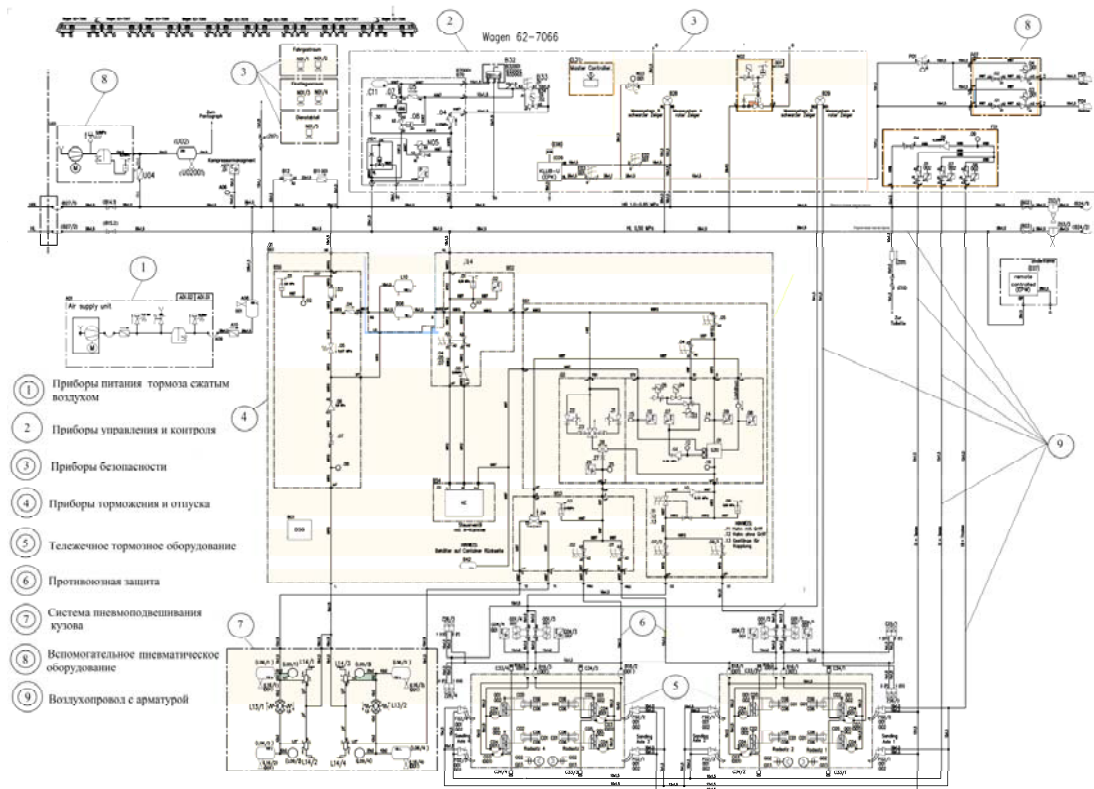


Рис. 9. Схема пневматического оборудования тормозной системы головного вагона электропоезда

✓ - тележечное тормозное оборудование (колесные и осевые тормозные диски; клещевые механизмы, в т. ч. с пружинными аккумуляторами для автоматического стояночного тормоза);

✓ - противоюзная система (противоюзные датчики; клапаны противоюзной защиты и др.);

✓ - система пневмоподвешивания кузова (пневмоподушки; клапаны высоторегулирования; перепускные клапана и резервуары дополнительной жесткости);

✓ - вспомогательное пневматическое оборудование (приборы пескоподачи; тифоны; приборы управления пантографами и др.)

✓ - воздухопровод с арматурой (трубопроводы тормозной, питательной и др. магистралей; разъединительные краны; концевые краны; краны экстренного торможения; соединительные рукава, и др.).

Энергоносителем тормозной системы является сжатый воздух, который подается системой подачи сжатого воздуха, с использованием безмасляных поршневых компрессорных агрегатов (рис. 10) в количестве 2 штук, установленных вместе с осушителями воздуха в подвагонном пространстве головных вагонов.

Компрессоры обеспечивают воздухом, наряду с тормозной, и другие системы: пневмоподвешивания вагона, устройство управления микроклиматом, управления дверьми, стеклоочистители, токоприемники, тифон. Управление компрессорами произво-

дится при помощи системы управления поездом. При зарядке тормозной системы оба компрессора работают параллельно, а в диапазоне от 8,5 до 10 кгс/см<sup>2</sup> используется один из компрессоров. При выходе из строя одного из компрессоров, другой включается автоматически. В этом случае математически рассчитанное время его работы при 9-вагонном электропоезде составляет 91%. т. е., в аварийном режиме с помощью одного компрессора обеспечивается работа всего пневматического оборудования электропоезда. Включение и выключение компрессоров осуществляется датчиками давления в пределах от 8,5 до 10 кгс/см<sup>2</sup>. Поддержание давления в питательной магистрали в таких пределах гарантировано обеспечивает надежную работу всего пневмооборудования электропоезда, в т. ч. противоюзной системы и системы пневмоподвешивания.



Рис. 10. Безмасляный компрессорный агрегат типа «W-180Т»

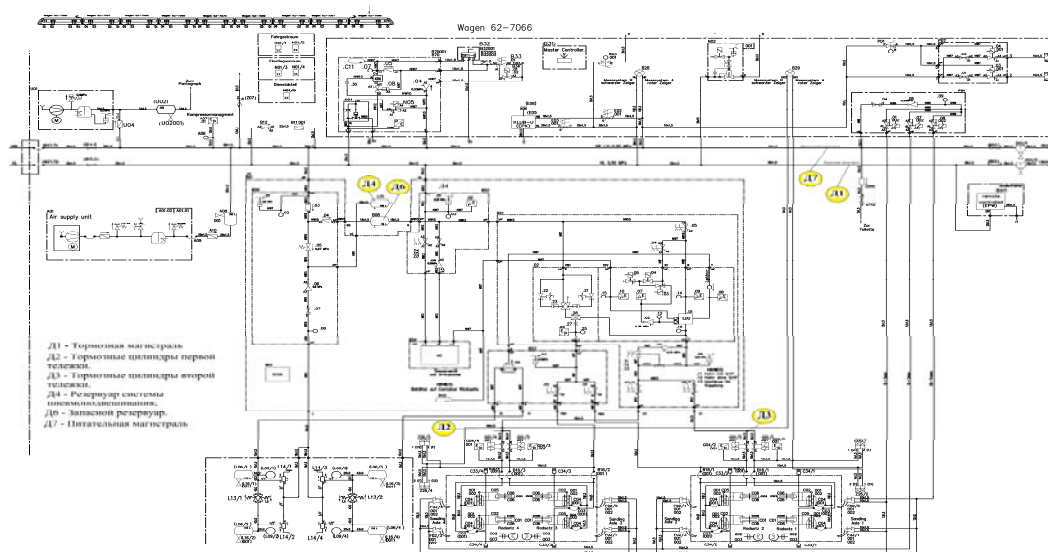


Рис. 11. Схема пневматического оборудования тормозной системы промежуточного вагона электропоезда

Управление тормозами осуществляется контейнерным блоком (рис. 12), который располагается в подвагонном пространстве и содержит функционально увязанные между собой блоки (модули), представленные на рис. 13.

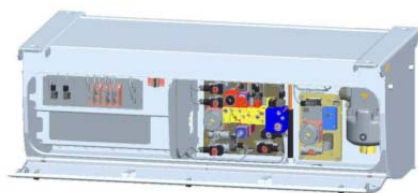


Рис. 12. Контейнерный блок

Каждый из блоков в свою очередь может состоять из набора электропневматических и др. пневматических приборов, призванных выполнять определенные функции, например, таких как:

- электропневматические клапаны;
- редукционные, обратные клапаны;
- датчики давления;
- реле давления;
- фильтры;
- разъединительные краны пр.

Кроме того, в контейнере находится воздухо-распределитель типа КЕ и оборудование прямодействующего электропневматического тормоза.

Тормозная система поезда в рабочем (штатном) режиме управляется органами управления расположенными на пульте машиниста в кабинах управления головных вагонов при помощи мастер-контроллера (для управления электропневматическим тормозом) и краном машиниста – для управления пневматическим тормозом. При этом управляющие сигналы направляются в бортовой компьютер системы контроля, диагностики и управления.

Сигналы на торможение, поступающие с пульта управления в бортовой компьютер блока управления торможением, обрабатываются с помощью специа-

льной программы, а затем поступают в блоке электропневматического торможения (EP Compact) для реализации тормозной силы (давления в тормозных цилиндрах) в зависимости от загрузки вагона (давления в баллонах пневмоподвешивания).

При служебном торможении активируется электродинамический тормоз двигателями, работающими в генераторном режиме на моторных вагонах, и одновременно пневматическое фрикционное торможение прямодействующим тормозом на немоторных вагонах. В случае недостаточной эффективности электродинамического тормоза для остановки поезда, электродинамический тормоз на приводных вагонах дополняется прямодействующим пневматическим фрикционным тормозом.

После остановки поезда, для обеспечения его удержания, рабочий пневматический тормоз замещается 70% усилием автоматического стояночного тормоза.

В аварийном режиме работы тормозной системы поезда (саморасцепление поезда, по командам системы безопасности и т.д.), торможение выполняется резервным пневматическим непрямодействующим тормозом.

Кроме того, одной из функций тормозной системы является возможность перераспределять тормозную эффективность поезда, с учетом выхода из строя (отказа тормоза) одного или нескольких вагонов поезда. В этой ситуации, автоматически повышается тормозная сила пропорционально тормозной массе вагонов, на которых зафиксирован отказ.

Тормозная система вагонов оснащена электронной системой противоюзной защиты (рис. 14), в состав которой входят блок управления и сигнализатор давления, расположенные в тормозном контейнере, клапаны противоскольжения, установленные в подвагонном пространстве в непосредственной близости от тележки, датчики скорости и полюсные колеса, установленные в буксовых узлах тележек.

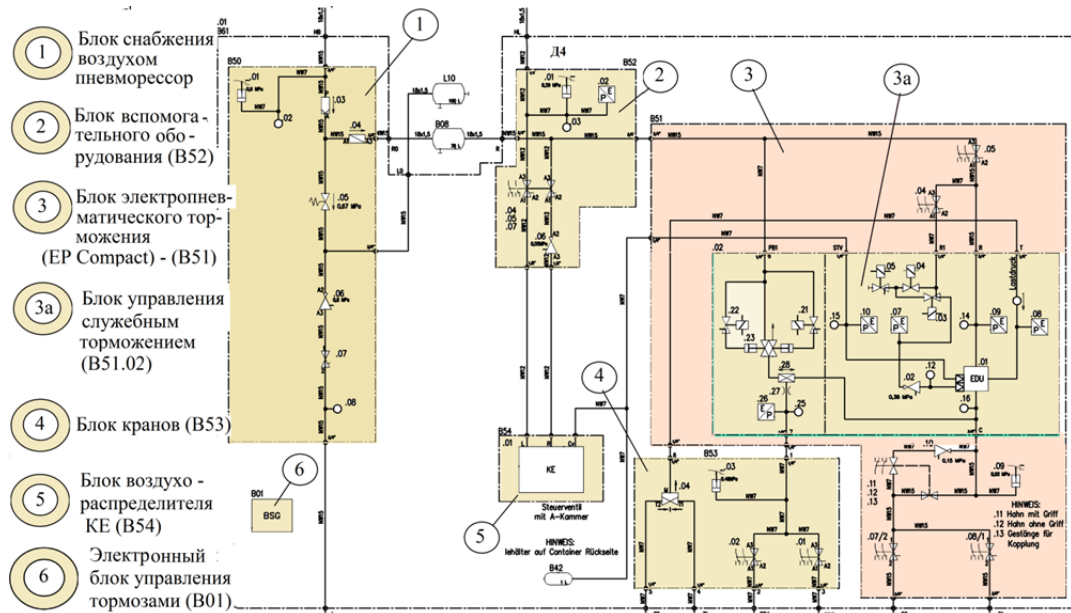


Рис. 13. Пневматическая схема контейнерного блока тормозного оборудования



Рис. 14. Электронная система противоюзной защиты

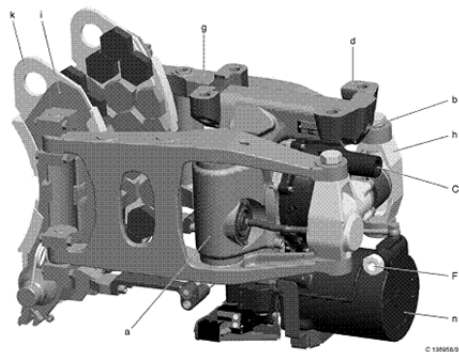


Рис. 15. Стояночный тормоз:  
 (a- корпус; b- болт кронштейн; d- опора кронштейна; e- мембранный цилиндр; g- рычаг клещевого механизма; h- регулятор с нажимной штангой; i - держатель накладки; k- тормозная накладка; n- пружинный аккумулятор с аварийным устройством отпуска; c- патрубок сжатого воздуха для служебного тормоза; F- патрубок сжатого воздуха для стояночного тормоза)

Принцип действия электронной системы противоюзной защиты заключается в том, что при помощи полюсных колес и датчиков скорости, блок управления определяет базовую скорость каждого вагона и угловую скорость каждой оси в отдельности. В случае отклонения в угловой скорости одной или нескольких осей от базовой скорости вагона, блок управления подает команду на соответствующие клапаны противоскольжения, обеспечивая кратковременное снижение давления в тормозных цилиндрах соответствующих осей, тем самым выравнивая угловую скорость начинающих скольжение колесных пар.

Все вагоны электропоезда оборудованы автоматическими пневмопружинными стояночными тормозами (рис. 15).

Тормозная сила стояночного тормоза обеспечивается за счет пружинного аккумулятора, интегрированного в тормозные клещевые механизмы. Принцип действия автоматического стояночного тормоза основан на том, что при отсутствии давления сжатого воздуха в тормозной магистрали, а также в полости соответствующего тормозного цилиндра, пружина прижимает тормозные накладки к тормозным дискам.

Для отпуска автоматического стояночного тормоза необходимо подать давление сжатого воздуха в соответствующую полость тормозного цилиндра, для обеспечения сжатия пружинного аккумулятора, что в свою очередь обеспечит отвод тормозных накладок от тормозного диска.

Для аварийного отпуска стояночного тормоза, при отсутствии возможности подачи сжатого воздуха в тормозные цилиндры, имеется механизм аварийного отпуска, рукоятки которого расположены по обеим сторонам каждой тележки.

Тормозная накладка, создающая силу нажатия на диск при торможении, выполнена из органического, не содержащего асбеста, материала Vesorit 984, с допустимой максимальной температурой на поверхности не выше 400°C, толщина новой накладки 35 мм, минимально допустимая в эксплуатации – 5 мм.

Тормозная система скоростного межрегионального двухсистемного электропоезда постройки Крюковского вагоностроительного завода обладает существенными отличиями от пассажирских вагонов:

✓ применена система подачи сжатого воздуха, с использованием безмасляных поршневых компрессорных агрегатов, установленных вместе с осушителями воздуха в подвагонном пространстве головных вагонов;

✓ при электропневматическом и пневматическом торможениях тормоз является практически неистощимым, т. к. давление в тормозных цилиндрах поддерживается за счет подпитки из запасных резервуаров, в которые через обратные клапана постоянно поступает воздух из питательной магистрали;

✓ использованы тормозные исполнительные приборы (дисковый тормоз с клещевыми механизмами и противоюзной защитой фирмы «Knorr-Bremse»), ранее опробованные и доказавшие высокую надежность и эффективность при эксплуатации пассажирских вагонов серийного ряда 788 на безлюечных тележках с пневмоподвешиванием;

✓ Управления тормозом осуществляется по заранее настраиваемой компьютерной программе, в которой задаются опорные параметры для выработки требуемого действия, с учетом поступающего сигнала из пульта управления.

✓ контейнерный блок, содержащий электронный блок с процессором, функционально объединен с блоком электро-пневматического торможения (EP Compact);

✓ система контроля и диагностики электропоезда обеспечивает запись его основных параметров, их архивирование и, при необходимости, вывод на дисплей, расположенный на пульте управления;

✓ Тормозная сила, реализуемая на тормозных дисках, регулируется за счет давления в тормозных цилиндрах в зависимости от загрузки вагона, задаваемым параметром для которой является давление в баллонах пневмоподвешивания;

✓ поезд оборудован автоматическим пневмопружиным стояночным тормозом. После останова поезда, для обеспечения его удержания, рабочий пневматический тормоз замещается 70% усилием автоматического стояночного тормоза;

✓ тормоз обладает возможностью сохранения тормозной эффективности при отказе тормоза на одном или нескольких вагонах путем распределения недостающей тормозной силы между вагонами сохранившими работоспособность тормозных систем;

✓ тормозная система обладает высокой степенью неистощимости, так как давление в тормозных приборах поддерживается через питательный резервуар объемом 150 л, связанным с питательной магистралью, давление в которой составляет (8,5-10) кгс/см<sup>2</sup>.

#### Выводы

1 Тормозная система электропоезда ЭКР1 отвечает лучшим мировым аналогам, а ее эффектив-

ность должна быть подтверждена экспериментальными исследованиями;

2 Дальнейшее повышение тормозной эффективности требует применения тормоза, не зависящего от сил сцепления колес с рельсами. Таким тормозом является магнитно-рельсовый, в котором на каждой тележке между колесными парами установлены два тормозных электромагнитных башмака, что позволит повысить скорость до 250 км/ч.

#### Литература

1. Пятаков О.О. Особенности тормозной системы электропоезда / О.О. Пятаков, Ю. Я. Водяніков, А.В.Гречко, С.М. Свистун - збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад», вип. 7, видавник ДП „УкрНДІВ”, м. Кременчук 2012, - 59-70 с.

#### References

1. Pyatakov O.O. Features of the brake system of electric train / O.O. Pyatakov, Yu. Ya. Vodyannikov, A.V.Grechko, S.M. Svistun - collection of scientific works «Rolling stock », p. 7, publisher SE „UkrNDIV”, Kremenchuk 2012, - 59-70p.

**Сафронов О. М., Крамаренко М.В., Лутонін С.В., Водяніков Ю. Я. Гальмівна система високошвидкісного електропоїзда ЕКР1**

*У статті наведено опис гальмівної системи двосистемних електропоїзди екР1 для руху зі швидкостями 200 км/ч. Показані основні комплектуючі, а також принципові схеми гальма. Аналіз показав, що гальмівна система відповідає кращим світовим аналогам.*

**Ключові слова.** Електропоїзд, гальмівна система, протиюзний захист, електронний блок, принципова схема.

**Safronov O.M., Kramarenko M.V., Lutonin S.V., Vodyannikov Yu. Ya. Brake system of a high-speed electric train EKR1**

*The article describes the braking system of the two-system electric train EKR1 for driving at speeds of 200 km / h. The main components are shown, as well as the brake circuit concepts. The analysis showed that the brake system meets the best world analogues.*

**Keywords.** Electric train, brake system, electronic unit, basic scheme.

**Сафронов Александр Михайлович** – к.т.н., директор Державного підприємства «Український науково-дослідний інститут вагонобудування» ДП «УкрНДІВ».

**Крамаренко Максим Вікторович** – технічний директор Публічного акціонерного товариства «Крюківський вагонобудівний завод».

**Лутонін Сергій Віталійович** – заступник технічного директора Публічного акціонерного товариства «Крюківський вагонобудівний завод».

**Водяніков Юрій Якович** – к. т. н, с. н. с., провідний науковий співробітник лабораторії електротехнічних, динамічних, теплотехнічних і міцносних досліджень залізничної техніки Державного підприємства «Український науково-дослідний інститут вагонобудування».

*Рецензент:* д.т.н., проф. **Стенцель Й. І.**

УДК 532.135.66.012

## МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ РОБОТИ ОДНОКОНТУРНИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

Сотнікова Т. Г.

## METHODS OF PERFORMANCE QUALITY IMPROVEMENT OF SINGLE-LOOP AUTOMATED CONTROL SYSTEMS

Sotnikova T.

*Дослідженнями встановлено, що до основних чинників, котрі викликають помилкові відхилення систем автоматичного регулювання (САР) технологічних об'єктів від нормованих значень, відносяться особливості реологічних перетворень матеріальних чи теплових процесів, котрі зумовлені відхиленням впливових параметрів від нормованих значень. Показано, що сучасні методи досліджень САР при зміні реологічних перетворень у технологічному процесі є недостатньо ефективними. Доведено, що вихідний сигнал САР не враховує особливостей реологічних перетворень в технологічному об'єкті, що приводить як до появи статичних і динамічних похибок регулювання.*

**Ключові слова:** метод, контроль, технологія, регулювання, реологія, вимірювання, регулятор.

**1.° Вступ.** Ефективність хіміко-технологічних процесів визначається точністю підтримування технологічних параметрів на заданому рівні, котрий нормується відповідним регламентом. З метою досягнення цієї мети вихідні координати об'єкта управління стабілізують з допомогою систем автоматичного регулювання (САР) [1-3]. Як правило, САР мають від'ємні зворотні зв'язки за вихідними координатами, котрі вимірюються відповідними засобами контролю. Останні формують відповідні вихідні сигнали, які поступають на вхід САР і направлені протилежно до сигналу задання регулятора. При відхиленні сигналу зворотного зв'язку від задання регулятора створюється сигнал неузгодженості, котрий поступає на вхід регулятора, що приводить до зміни положення регулюючого органу, а відповідно, до зміни матеріального або теплового потоку технологічного об'єкта управління (ТОУ) [4,5]. Так як вихідний сигнал ТОУ формується в технологічному апараті та є одночасно основним технологічним параметром перетвореного готового продукту, котрий виводиться з цього апарату для подальшого накопичення. Таким чином, контролю та стабілізації підлягають технологічні параметри, котрі є вихід-

ними для даного технологічного процесу. Так як процес стабілізації тої чи іншої вихідної координати передбачає вплив на ТОУ через зміну витрати матеріальних і теплових потоків, то ця їх зміна приводить до відповідного порушення розподілення маси цільових компонентів речовин і температури за об'ємом технологічного апарату. Це впливає на процес реологічного перетворення речовин, час їх перебування в апараті, а відповідно, на відхилення вихідних контролюючих параметрів від їх нормованих значень. Таким чином можна стверджувати, що динамічні характеристики САР будуть залежними не тільки від відхилення вихідних координат ТОУ від їх нормованих значень, але й від параметрів реологічних перетворень, котрі протікають у технологічному апараті. Як показано в [6], реологічні процеси в технологічних об'єктах управління можуть бути одностадійними та багатадійними. До одностадійних відносяться технологічні процеси, в котрих новий продукт або його фізична якість створюється за рахунок однієї дії між двома матеріальними потоками чи речовинами, наприклад, рідинні теплообмінники, рідинні та реактори, розміщувачі концентрацій тощо. Як правило, такі ТОУ мають одну основну вихідну координату – концентрацію або температуру. Враховуючи викладене, важливою є проблема розробки теоретичного обґрунтування впливу процесів реологічних перетворень, котрі мають місце в ТОУ, на динамічні характеристики САР.

**2.° Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз сучасних методів дослідження САР тими чи іншими вихідними параметрами ТОУ показує, що, по-перше, накладуються умови на певні ділянки статичних характеристик об'єктів управління, котрі повинні бути лінійними; по-друге, коефіцієнти перетворення на цих ділянках є сталими [7,8]. Тоді, виходячи з умови матеріального і теплового балансу на вході та виході технологічного апарату, розроб-



ляється його математичні моделі у диференціальній формі, котрі можуть мати наступний вигляд [9]:

$$\tau_{ny}^n \frac{d^n y}{dt^n} + \tau_{(n-1)y} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + \tau_{2y}^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + \tau_{1y} \frac{dy}{dt} + y = k_x \left( x + \tau_{1x} \frac{dx}{dt} + \tau_{2x}^2 \frac{d^2 x}{dt^2} + \dots \right), \quad (1)$$

де  $y$  - відносно відхилення в часі  $t$  вихідного параметра ТОУ;  $\tau_{1y}, \tau_{2y}, \dots, \tau_{ny}$  - сталі часу зміни вихідного параметра;  $k_x$  - коефіцієнт перетворення ТОУ за каналом  $y \rightarrow x$ ;  $x$  - відносно відхилення в часі вхідного параметра об'єкта управління;  $\tau_{1x}, \tau_{2x}$  - сталі часу зміни вхідного параметра.

Вхідними параметрами  $x$ , наприклад, для хіміко-технологічних об'єктів управління є масові або об'ємні витрати матеріальних потоків, а також витрати енергетичних потоків, наприклад, електричний струм, випромінююча електромагнітна енергія тощо. До основних вихідних параметрів таких об'єктів, як правило, відносяться: концентрація новостворених речовин, їх температура і тиск, а також рівень для рідинних процесів. Сталі часу як для вхідних, так і для вихідних параметрів у багатьох випадках залежать від швидкості руху відповідних потоків, а також від сукупності таких параметрів, як динамічна та кінематична в'язкість, прискорення земного тяжіння тощо і не залежать від швидкості перетворення речовин в ТОУ і часу їх перебування в апараті. Тому рівняння (1) не описує процесів реологічного перетворення речовин, тобто процесів перенесення імпульсу кількості маси, тепла та кількості руху. Сучасні методи дослідження САР не є досконаними. По-перше, при їх дослідженні приймається, що вхідний сигнал є однією ступінчастою (для дослідження перехідних процесів) або синусоїдальною функцією (для дослідження частотних характеристик). Для САР технологічними параметрами об'єктів хімічної, нафтопереробної, теплоенергетичної та інших галузей промисловості вхідними координатами є витрати матеріальних чи енергетичних потоків, з допомогою котрих стабілізуються задані значення вихідних координат, до котрих відносяться концентрація, температура, тиск, рівень і деякі інші. Вихідні координати ТОУ, як правило, характеризують параметри вихідного матеріального чи енергетичного потоку та посередньо оцінюють процеси, котрі мають місце в ТОУ, котрий знаходиться між вхідними та вихідними потоками. Як вказується в [10], ТОУ може мати внутрішні перехресні функціональні зв'язки, котрі можуть спонукати коливальні процеси в технологічному апараті, а відповідно, колювання вихідних координат. Так як ТОУ призначений для відповідного перетворення вхідного потоку за масою, температурою чи кількістю руху, то це перетворення відбувається в часі, котре називається часом перебування перетвореної

речовини в технологічному апараті [11]. Таким чином, сигнал за тою чи іншою вихідною координатою є зміщеним відносно зміни вхідної координати на величину часу перебування. Це значить, що у динамічному відношенні час зміни вхідної координати  $x$  не є рівним часу зміни вихідної координати  $y$ . Окрім того, час зміни вхідної координати обмежений часом перебування, а час зміни вихідної координати є необмеженим. Досліджень, котрі б вивчали вплив часу перебування визначального параметра (маси, температури чи кількості руху) на роботу САР у науковій літературі не виявлено. Тому проблема полягає в тому, щоби усунути цю прогалину та показати можливі характерні режими роботи одноконтурної САР та дослідити її динамічні характеристики.

**3.° Результати досліджень одноконтурної САР.** Як вказувалося вище, у динамічному відношенні час уведення вхідного потоку в ТОУ формально не може дорівнювати часу виведення готового по току з апарату. Виходячи з цього рівняння (1) запишемо в такій формі

$$\tau_{mx}^m \frac{d^m x}{d\theta^m} + \dots + \tau_{2x}^2 \frac{d^2 x}{d\theta^2} + \tau_{1x} \frac{dx}{d\theta} + x = \frac{1}{k_x} \left( \tau_{ny}^n \frac{d^n y}{dt^n} + \tau_{(n-1)y} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + \tau_{2y}^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + \tau_{1y} \frac{dy}{dt} + y \right), \quad (2)$$

де  $\theta$  - поточний час зміни вхідного потоку в технологічному апараті.

Ліва сторона рівняння (2) описує процес подачі вхідного потоку в технологічний апарат, а права - процес зміни вихідного параметра ТОУ (температури, концентрації, рівня тощо), котрим характеризується потік стоку з новими цільовими параметрами. У загальному вигляді  $\theta \neq t$ , так як вихідний сигнал ТОУ появляється на виході з деяким запізненням у часі  $\vartheta = t - \theta$ , котре зумовлене перебуванням речовини в апараті, а фактично часом перетворення вхідного потоку. Якщо час  $\vartheta$  незначний і ним можна знехтувати, то можна прийняти, що  $\theta = t$  і тоді приходимо до рівняння (1). При лабораторних дослідженнях перехідних процесів САР на її вхід, як правило, подається сигнал типу однієї ступінчастої функції та приймається, що вихідний сигнал описується рівнянням другого порядку. Тоді рівняння (1) приводиться до наступної стандартної форми

$$\tau_{2y}^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + \tau_{1y} \frac{dy}{dt} + y = k_x x. \quad (3)$$

Якщо експериментально отриманий перехідний процес такої САР є аперіодичним, то він описується такою математичною моделлю

$$y = k_x x \left[ 1 - \frac{p_2}{p_2 - p_1} \exp(-p_1 t) + \frac{p_1}{p_2 - p_1} \exp(-p_2 t) \right], \quad (4)$$

де  $p_{1,2} = -\frac{\tau_{1y}}{2\tau_{2y}^2} \pm \sqrt{\left(\frac{\tau_{1y}}{2\tau_{2y}^2}\right)^2 - \frac{1}{\tau_{2y}^2}}$  - корені характеристичного рівняння.

Експериментально отриманий коливальний перехідний процес описується наступною математичною моделлю

$$y = k_x x \left[ 1 - \exp(-\alpha_0 t) (\cos(\omega_0 t) + (\alpha_0 / \omega_0) \sin(\omega_0 t)) \right], \quad (5)$$

де  $\alpha_0 = \tau_{1y} / 2\tau_{2y}^2$  - ступінь загасання коливань;  
 $\omega_0 = \sqrt{1/\tau_{2y}^2 - (\tau_{1y} / 2\tau_{2y}^2)^2}$  - кутова частота власних коливань системи.

Передавальна функція такої САР має вигляд

$$W(s_t) = \frac{k_x}{\tau_{2y}^2 s^2 + \tau_{1y} s + 1}, \quad (6)$$

де  $s$  - оператор Лапласа, котрий при нульових початкових умовах прирівнюється до оператора диференціювання  $d/dt$  за часом  $t$ .

Якщо вхідний параметр  $x$  змінюється з деякою швидкістю  $v_x = dx/d\theta = x_H / \theta$ , де  $x_H$  - номінальне значення вхідного параметра;  $\theta$  - час його руху, то рівняння (2) приводиться до такої форми

$$\tau_{2y}^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + \tau_{1y} \frac{dy}{dt} + y = k_x x_H \delta x \left( 1 + \frac{\tau_{1x} v_x}{x_H} \right), \quad (7)$$

де  $\delta x = x/x_H$  - відносне відхилення вхідного параметра від номінального (заданого) значення  $x_H$ .

Для такої САР перехідні процеси описуватимуться наступними рівняннями:

- якщо  $\tau_{1y} / \tau_{2y} > 2$  - аперіодичний перехідний процес

$$y_a(t) = k_x x_H \delta x \left( 1 + \frac{\tau_{1x} v_x}{x_H} \right) \left[ 1 - \frac{p_2}{p_2 - p_1} \exp(-p_1 t) + \frac{p_1}{p_2 - p_1} \exp(-p_2 t) \right]. \quad (8)$$

- якщо  $\tau_{1y} / \tau_{2y} < 2$  - коливальний перехідний процес

$$y_k(t) = k_x x_H \delta x \left( 1 + \frac{\tau_{1x} v_x}{x_H} \right) * \left[ 1 - \exp(-\alpha_0 t) (\cos(\omega_0 t) + (\alpha_0 / \omega_0) \sin(\omega_0 t)) \right]. \quad (9)$$

Не трудно бачити, що відношення  $v_x / x_H = 1/\theta$ . Час  $\theta$  руху вхідного параметра  $x$  в технологічному апараті є проміжком часу, за котрий цей параметр викликає фізичну чи фізико-хімічну зміну вихідної його координати. Цей час називається часом перебування вхідного параметра в технологічному апараті. А так як САР охоплює зворотним зв'язком ТОУ, то зміна сигналу зворотного зв'язку буде продовжуватися до тих пір, поки об'єкт не перетворить весь об'єм вхідного потоку, котрий було уведено в апарат. Тому можна припустити, що час регулювання САР  $t_p$  дорівнює часу  $\theta$  перебування вхідного параметра в апараті. У цьому разі передавальна функція САР має наступний вигляд

$$W(s_t) = \frac{k_x}{\tau_{2y}^2 s_t^2 + \tau_{1y} s_t + 1} \left( 1 + \frac{\tau_{1x} v_x}{x_H} \right). \quad (10)$$

З рівняння (10) видно, що перехідний процес буде другого порядку, а амплітуда амплітудно-частотної та дійсної частотної характеристики є залежною як від зміни сталої часу  $\tau_{1x}$ , швидкості  $v_x$  перенесення речовини в об'єкт управління, котрі є характерними для даного технологічного процесу.

Розглянемо випадок, коли час  $\theta$  перенесення вхідного параметра в технологічному апараті змінюється одночасно з часом створення нового продукту  $t$ . Тоді рівняння (2) при раніше обумовлених припущеннях та умові, що  $\theta = t$  приймає таку форму

$$\tau_{2y}^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + \tau_{1y} \frac{dy}{dt} + y = k_x \left( \tau_{1x} \frac{dx}{dt} + x \right). \quad (11)$$

Якщо вхідний параметр  $y$  є пропорційним вхідному, тобто  $x = k_y y$ , то рівняння (11) приводиться до наступного вигляду

$$\tau_{2y}^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + \tau_{1y} \frac{dy}{dt} + y = k_x x. \quad (12)$$

де  $\tau_1 = \tau_{1y} - (k_x / k_y) \tau_{1x}$  - еквівалентна стала часу технологічного процесу.

Для такого випадку роботи САР можна зробити наступні висновки. По-перше, еквівалентна стала часу  $\tau_1$  є завжди меншою від талої часу  $\tau_{1y}$ , що приводить до зменшення часу регулювання, а відповідно, підвищує якість САР. По-друге, якщо  $\tau_1 \ll \tau_{1y}$ , то система регулювання переходить в коливальний режим роботи і може викликати значні перерегулювання. По-третє, при  $\tau_1 = 0$  перехідний

процес САР стає коливальним з постійною амплітудою та частотою коливань. Такий режим роботи САР є найбільш розповсюджений у промисловій практиці, наприклад, при стабілізації концентрації цільового компонента в рідинному реакторі, температури в теплообмінниках тощо за рахунок зміни витрати рідинних реагентів чи теплоносіїв. У таких випадках відношення  $k_x/k_y = 1$  і  $\tau_{1y} = \tau_{1x}$ . Аналогічні процеси спостерігаються, як правило, при автоматизації взаємопов'язаних об'єктів управління, наприклад, апаратів під тиском, у котрих вихідні координати, як тиск і рівень є взаємозалежними та стабілізуються зміною різних матеріальних потоків. У таких випадках час переміщення регулюючого органа основного та допоміжного потоку повинен бути таким, щоби амплітуда коливання визначальної вихідної координати була мінімальною.

При роботі САР можуть бути ситуації, коли швидкість переміщення регулюючого органу та швидкість зміни вхідного потоку в технологічному апараті є однаковими, тобто  $v_y = dy/dt$  дорівнює  $v_x = dx/dt$ . У тому випадку рівняння (11) приймає наступну форму

$$W(s) = \frac{k_x(1 + \tau_{1x}s)}{\tau_{2y}^2 s^2 + \tau_{1y}s + 1} = \frac{k_x}{\tau_{2y}^2 s^2 + \tau_{1y}s + 1} + \frac{k_x \tau_{1x}s}{\tau_{2y}^2 s^2 + \tau_{1y}s + 1} = W_1(s) + W_2(s) \quad (13)$$

Таким чином з (13) видно, що САР перетворюється на дві динамічні системи, включених паралельно, перша з котрих являє собою аперіодичну ланку другого порядку з передавальною функцією  $W_1(s) = k_x / (\tau_{2y}^2 s^2 + \tau_{1y}s + 1)$ , а друга реальну диференціальну ланкою з передавальною функцією  $W_2(s) = k_x \tau_{1x}s / (\tau_{2y}^2 s^2 + \tau_{1y}s + 1)$ . Як відомо, диференціальна складова в складі САР приводить до зменшення часу регулювання, а відповідно, до покращення якості її роботи.

Якщо стала часу  $\tau_{1y} = \tau' + \tau''$ , а  $\tau_{2y} = \sqrt{\tau' \tau''}$ , то рівняння (13) приймає наступну форму

$$W(s) = \frac{k_x(1 + \tau_{1x}s)}{(\tau's + 1)(\tau''s + 1)} = \frac{k_x}{(\tau's + 1)} \quad (14)$$

або

$$W(s) = \frac{k_x(1 + \tau_{1x}s)}{(\tau's + 1)(\tau''s + 1)} = \frac{k_x}{(\tau''s + 1)} \quad (15)$$

Якщо  $\tau_{1x} = \tau'$  або  $\tau_{1x} = \tau''$ , то передавальна функція САР приводиться до аперіодичної ланки першого порядку. Так як  $\tau' < \tau_{1y}$  і  $\tau'' < \tau_{1y}$ , то цей

приводить до підвищення якості перехідного процесу САР за рахунок зменшення часу регулювання та відсутності перерегулювання.

**6.° Висновки.**° Запропоновано технологічні процеси розділяти на дві основні частини перенесення маси, енергії та кількості руху. Першою частиною є процес перенесення маси, енергії та кількості руху від регулюючого органа вхідного потоку (притоку) та його розповсюдження за об'ємом технологічного апарату. Другою частиною є реологічне перетворення вхідного потоку з подальшим його вилученням (с током) з апарату через регулюючий орган в якості готової іншої маси, енергії та кількості руху.

Показано, що між вхідною та вихідною частинами перенесення маси, енергії та кількості руху існують відповідні функціональні зв'язки, котрі пов'язані реологічними перетвореннями. Кожна з частин процесу перенесення маси, енергії та кількості руху здійснюється за своїм часом і є зміщеними на час перебування маси, енергії та кількості руху а апараті.

Доказано, що якість процесу регулювання вихідних координат технологічного об'єкта залежить від часу перебування маси, енергії та кількості руху в апараті. За рахунок впливу на час перебування перехідний процес САР може змінюватися від коливального до аперіодичного з мінімальним часом регулювання.

#### Л і т е р а т у р а

1. Зайцев Г. Ф. Теория автоматического управления и регулирования. [Текст] / Г. Ф. Зайцев. – К.: Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 431 с.
2. Крутов В. И. Основы теории автоматического регулирования. [Текст] / В. И. Крутов, Ф. М. Данилов, Кузмик П. К. и др. – М.: Машиностроение, 1984. – 368 с.
3. Теория автоматического управления. Ч1. [Текст] / Под ред. А. А. Воротнова. – М.: Высш. шк. 1986. – 367 с.
4. Шувалов В. В. Автоматизация производственных процессов химической промышленности. [Текст] / В. В. Шувалов, Г. А. Огаджанов, В. А. Голубятников. – М.: Химия, 1991. – 480 с.
5. Автоматическое управление в химической промышленности: Учебник для вузов. [Текст] / Под ред. Е. Г. Дудникова. – М.: Химия, 1987. – 368 с.
6. Стенцель Й. І. Математичне моделювання хімічних процесів на основі теорії реологічних переходів. [Текст] / Й. І. Стенцель. Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, № 5(111). Ч2. – Луганськ: 2007. – С. 91-97.
7. Иващенко Н. Н. Автоматическое регулирование. [Текст] / Н. Н., Иващенко. – М.: Машиностроение, 1978. – 736 с.
8. Топчиев Ю. А. Атлас для проектирования систем автоматического регулирования. [Текст] / Ю. А. Топчиев. – М.: Машиностроение, 1989. – 752 с.
9. Стенцель Й. І., Поркуян О.В. Автоматизация технологических процессов химических производств. [Текст] / Й. І.



- Стенцель, О. В. Поркуян. – Луганськ: вид-во Східно-укр. нац. ун-ту ім. В. Даля, 2010. – 300 с.
10. Химико-технологические системы. Синтез, оптимизация и управление. [Текст]. /Под ред. И. П. Мухленова. – Л.: Химия, 1986. – 424 с.
  11. Кафаров В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. [Текст]. /В. В. Кафаров. – М.: Химия, 1985. – 448 с.
  12. Гуров А. М. Автоматизация технологических процессов. [Текст]. / А. М. Гуров, С. М. Починкин. – М.: Высш. шк. 1979. – 355 с.
  13. Стенцель Й. І. Автоматика та автоматизація хіміко-технологічних процесів. [Текст]. /Й. І. Стенцель. Навчальний посібник. – Луганськ: вид-во Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. 2004. – 376 с.
  14. Бойко Н. П., Стеклов В. К. Системы автоматического управления на базе микро-ЭВМ. [Текст] /Н. П. Бойко, В. К. Стеклов. – К.: Тэхника, 1989. – 182 с.

### References

1. 1. Zaytsev G. F. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya i regulirovaniya. [Tekst] /G. F. Zaytsev. – K.: Vyshcha shk. Golovnoye izd-vo. 1989. – 431 s.
2. Krutov V. I. Osnovy teorii avtomaticheskogo regulirovaniya. [Tekst] /V. I. Krutov, F. M. Danilov, Kuzmuk P. K. i dr. – M.: Mashinostroyeniye. 1984. – 368 s.
3. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Ch.1. [Tekst] /Pod red. A. A. Vorotnova. – M.: Vyssh. shk. 1986. – 367 s.
4. Shuvalov V. V. Avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov khimicheskoy promyshlennosti. [Tekst] / V. V. Shuvalov, G. A. Ogadzhyanov, V. A. Golubyatnikov. – M.: Khimiya. 1991. – 480 s.
5. Avtomaticheskoye upravleniye v khimicheskoy promyshlennosti: Uchebnik dlya vuzov. [Tekst] /Pod red. E. G. Dudnikova. – M.: Khimiya. 1987. – 368 s.
6. Stentsel Y. I. Matematychno modeliyuvannya khimichnykh protsesiv na osnovi teorii reolohichnykh perekhodiv. [Tekst] / Y. I. Stentsel. Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu im. V. Dalia, № 5(111). Ch 2. – Luhansk: 2007. – S. 91-97.
7. Ivashchenko N. N. Avtomaticheskoye regulirovaniye. [Tekst] /N. N. Ivashchenko. – M.: Mashinostroyeniye. 1978. – 736 s.
8. Topchiyev Yu. A. Atlas dlya proyektirovaniya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya. [Tekst] /Yu. A. Topchiyev. – M.: Mashinostroyeniye. 1989. – 752 s.
9. Stentsel Y. I., Porkuan O.V. Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh protsesiv khimichnykh vyrobnytstv. [Tekst] / Y. I. Stentsel, O. V. Porkuan. – Luhansk: vyd-vo Skhidnoukr. nats. un-tu im. V. Dalia, 2010. – 300 s.
10. Khimiko-tekhnologicheskiye sistemy. Sintez, optimizatsiya i upravleniye. [Tekst]. /Pod red. I. P. Mukhlenova. – L.: Khimiya. 1986. – 424 s.
11. Kafarov V. V. Metody kibernetiki v khimii i khimicheskoy tekhnologii. [Tekst]. /V. V. Kafarov. – M.: Khimiya. 1985. – 448 s.

12. Gurov A. M. Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov. [Tekst]. / A. M. Gurov. S. M. Pochinkin. – M.: Vyssh. shk. 1979. – 355 s.
13. Stentsel Y. I. Avtomatyka ta avtomatyzatsiia khimiko-tekhnolohichnykh protsesiv. [Tekst]. /I. I. Stentsel. Navchalnyi posibnyk. – Luhansk: vyd-vo Skhidnoukr. nats. un-tu im. V. Dalia. 2004. – 376 s.
14. Boyko N. P. Steklov V. K. Sistemy avtomaticheskogo upravleniya na baze mikro-EVM. [Tekst] /N. P. Boyko, V. K. Steklov. – K.: Tekhnika. 1989. – 182 s.

### Сотникова Т. Г. Методы повышения качества работы одноконтурных систем автоматического регулирования

*Исследованиями установлено, что к основным факторам, которые вызывают ошибочные отклонения систем автоматического регулирования (САР) технологических объектов от нормированных значений, относятся особенности реологических преобразований материальных или тепловых процессов, которые обусловлены отклонением влияющих параметров от нормированных значений. Показано, что современные методы исследования САР при изменении реологических преобразований в технологическом процессе являются недостаточно эффективными. Установлено, что выходной сигнал САР не учитывает особенностей реологических преобразований в технологическом объекте, что приводит к появлению статических и динамических погрешностей регулирования.*

**Ключові слова:** метод, контроль, технологія, регулювання, реологія, вимірювання, регулятор.

### Sotnikova T. Methods of Performance Quality Improvement of Single-Loop Automated Control Systems

*The research has established that the main factors that cause error deviations of the automated control systems (ACS) of the production facilities from the normalized data are the peculiarities of rheological transformations of material or thermal processes, which are caused by deviations of the influential parameters from the normalized data. It is shown, that modern methods of ACS research during the change of rheological transformations in the technological process are not effective enough. It is proved that the ACS output signal does not take into account the peculiarities of rheological transformations in the production facilities, thus leading to appearance of static and dynamic control errors.*

**Keywords:** method, control, technology, regulation, rheology, measurement, regulator.

**Сотнікова Т. Г.** – к.т.н., доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління ЧНУ ім.В.Даля, e-mail: tatiana.sotnikova1005@gmail.com

*Рецензент:* д.т.н., проф. Стенцель Й. І.

Стаття подана: 25.12.2018.

УДК 624.132.3

## ВИЗНАЧЕННЯ СИЛИ ОПОРУ ҐРУНТУ ПРИ ОЧИЩЕННІ СВЕРДЛОВИНИ ПІСЛЯ ЇЇ РОЗШИРЕННЯ КІЛЬЦЕВИМ НОЖЕМ

Супонєв В.Н.

### DETERMINATION OF THE RESISTANCE OF THE SOIL WHEN CLEANING THE BORE AFTER ITS EXPANSION RING KNIFE

Suponyev V.

*Одним з напрямів розвитку безтраншейного прокладання інженерних комунікацій є використання комбінованого способу утворення горизонтальних свердловин, який поєднує в собі дві технології розробки ґрунту: прокол з радіальним ущільненням ґрунту та продавлювання на етапі розширення свердловини кільцевими ножами. Зрізаний ґрунт видаляється скребком. В роботі встановлюються закономірності процесу очищення свердловини від ґрунту та визначаються зусилля на його видалення.*

**Ключові слова:** безтраншейні технології, прокол ґрунту, продавлювання ґрунту, комбінований метод, інженерні комунікації, горизонтальна свердловина.

**Вступ.** Серед існуючих технологій формування горизонтальних свердловин, які використовуються при безтраншейному прокладанні інженерних комунікацій, є комбінований метод, який використовує кращі особливості двох методів: статичного проколу та продавлювання. В першому випадку мінімізується об'єм ґрунту шляхом його радіального ущільнення. Але навколо свердловини утворюється велика зона деформації ґрунту, яка може привести до руйнування основи доріг та прилеглі комунікації. В другому випадку майже увесь ґрунт по профілю свердловини потрапляє в ґрунт, але не діє на навколишнє середовище. Поєднання позитивних якостей двох технологій дозволяє підвищити ефективність створення свердловини, що є актуальним питанням.

**Аналіз публікацій.** В ресурсах світової наукової періодики, можуть бути виділені роботи [1,2], де розглянуті активні методи безтраншейних технологій, але в них мало приділено уваги статичному проколу.

Дослідження [3,4] присвячені вибору способу виконання робіт, з детальним аналізом переваг та недоліків різних технологій. А в роботах [5,6] увагу приділяють безтраншейним технологіям спорудження та ремонту лінійно-протяжних трубопроводів. Також слід відмітити дослідження [7], яке присвячене вибору способу та планування виконання

особливо відповідальних робіт, що виконуються при безтраншейному прокладанні підземних комунікацій.

В роботі [8] описані можливості розширення безтраншейних технологій до потрібних розмірів та способи виконання робіт.

В дослідженнях [9] визначається вплив ґрунту на комунікації, що розташовані над ними, та на труби, що прокладені на певній глибині.

Вченими, які займаються вирішенням проблеми безтраншейного прокладання підземних комунікацій з мінімальними енергозатратами, в останні роки присвячено багато досліджень. Так, в роботах [10, 11] велику увагу приділено проколюванню ґрунту на невеликі відстані до 50 м. Одним з таких напрямів є дослідження комбінованого методу, який поєднує в собі методи проколу та продавлювання ґрунту [12].

**Мета роботи.** Метою роботи є визначення сили опору ґрунту при очищенні свердловини після її розширенні кільцевими ножами під час формування свердловин комбінованим методом.

У відповідності до поставленої мети слід визначити особливості процесу взаємодії скребкового робочого органу з ґрунтом при його екскавації з свердловини та визначити сили опору, які виникають при цьому.

**Визначення сили опору ґрунту при очищенні свердловини.** Об'єктом даного дослідження є процес взаємодії дискового скребкового робочого органу з ґрунтом при очищенні свердловини після його зрізання кільцевими ножами. Відсутність аналітичних розрахунків сил опору ґрунту від просування скребка по свердловині не дає можливості провести повноцінний аналіз процесу та оцінити вплив розміру свердловини та властивостей ґрунту на мінімальну довжину проходки при її очищенні скребковим робочим органом у вигляді круглого диску.

Після розширення свердловини кільцевим ножом всередині по всій її довжині залишається зрізаний розпушений ґрунт. Видалення його може здійснюватися виштовхуванням його очисним диском. Розглянемо що відбувається при цьому процесі.

На першому етапі по мірі руху диска перед ним буде накопичуватися ґрунт, доки не утвориться призма волочиння, рис. 1, етап I. При подальшому переміщенні диску весь перетин свердловини заповнюється ґрунтом і він починає стискатися, рис. 1, етап II. Наступне переміщення диска приводить до того, що виникаючий тиск диску настільки великий, що розташований перед ним ґрунт не тільки стискається, але і частково витискується у стінки свердловини, рис.1, етап III. Нарешті, подальше переміщення диску приводить до того, що тиск диску досягає максимальної

величини, при котрій весь ґрунт на відріжку переміщення диску вминається в стінки свердловини. Далі проходить стабільний процес очистки свердловини від ґрунту.

Визначимо величину нормального тиску диску на розташований перед ним ґрунт, рис. 2.

Виділимо на відстані від диску елемент ґрунта довжиною . На виділений елемент с обох його сторін будуть діяти нормальні тиски відповідно і . По периметру виділеного елемента буде діяти нормальний тиск . Визначається розпором стислого ґрунту и буде рівним:

$$\sigma_n = \xi \sigma, \tag{1}$$

де  $\xi$  – коефіцієнт бокового тиску;

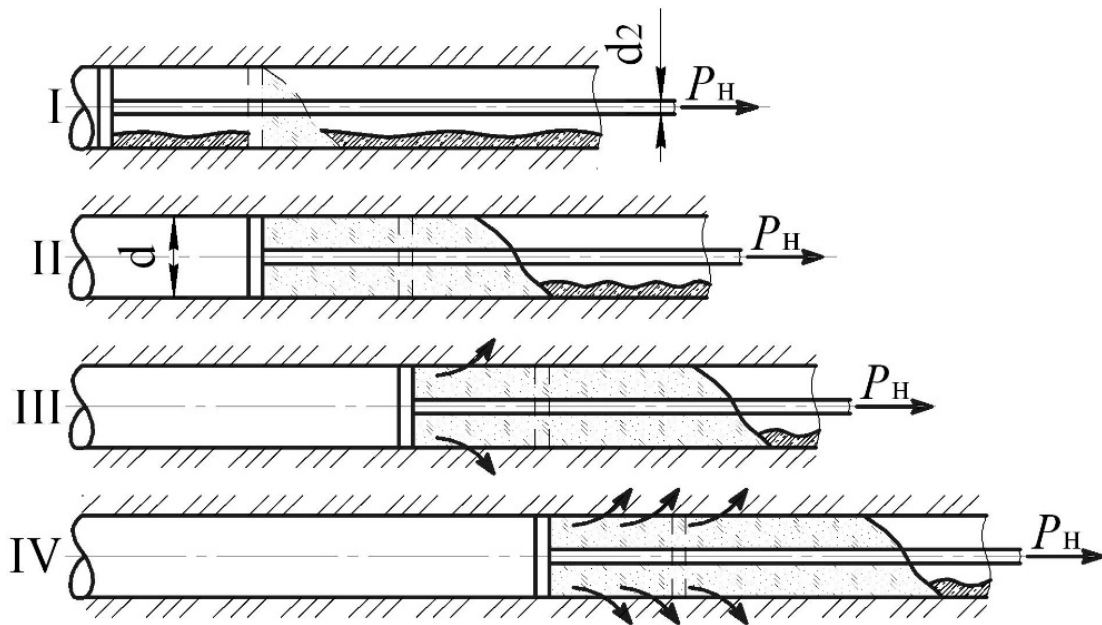


Рис. 1. Очищення свердловини від зрізаного ґрунту:  
 I етап – формування призми волочиння перед очисним диском;  
 II етап – деформування ґрунту диском; III етап – стиснення ґрунту диском с частковим ущільненням ґрунту в стінки свердловини; IV етап – стиснення ґрунту диском с повним витісненням ґрунту в стінки свердловини

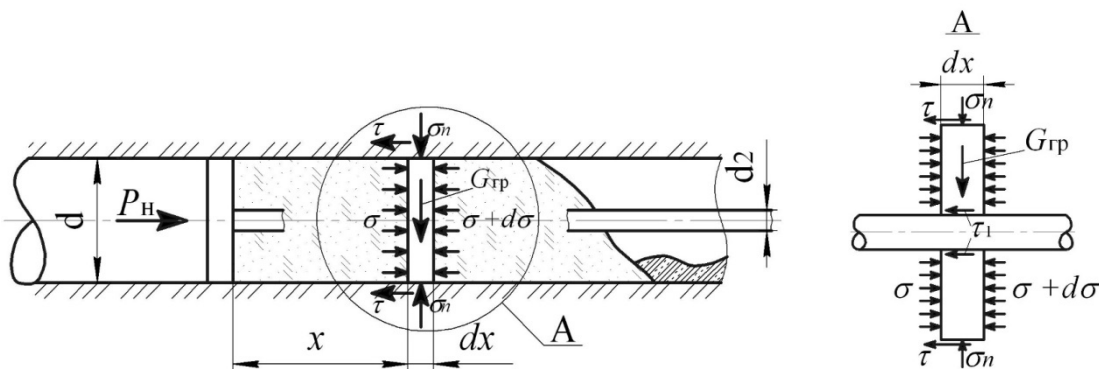


Рис. 2. Схема к визначенню величини тиску очисного диску на ґрунт, що виштовхується

При зміщенні виділеного елемента по його периметру будуть діяти дотичні напруження. Величину  $\tau$  можливо визначити як внутрішнє тертя ґрунту

$$\tau = \operatorname{tg} \rho \cdot \sigma_n = \xi \cdot \operatorname{tg} \rho \cdot \sigma, \quad (2)$$

де  $\rho$  – кут зовнішнього тертя ґрунту;  $\sigma$  – тиск ґрунту на поверхню скребка, який з умови взаємодії з розпушеним ґрунтом [27] може бути визначеним по залежності:

$$\sigma = \frac{2E_p I_2}{\alpha_1 (d_1 - 2\delta - d_2)}, \quad (3)$$

де  $\alpha_1$  – поправочний коефіцієнт, звичайно 1,25;  $E_p$  – модуль деформації розпушеного ґрунту.

Внаслідок деформації ґрунту виникає також зовнішнє тертя ґрунту о штангу:

$$\tau_1 = \xi \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \sigma, \quad (4)$$

де  $\varphi$  – кут зовнішнього тертя ґрунту.

Впливом ваги виділеного елемента ґрунту  $G_{zp}$  зневажаємо.

Складемо рівняння рівноваги для виділеного елемента ґрунту:

$$\frac{\pi}{4} d^2 \sigma = \frac{\pi}{4} d^2 (\sigma + d\sigma) + \xi \cdot \operatorname{tg} \rho \cdot \pi \cdot d \cdot \alpha x + \xi \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \pi \cdot d_2 \cdot \alpha x$$

Звідки:

$$\frac{d\sigma}{\left(4\xi \frac{\operatorname{tg} \rho}{d} + \xi \operatorname{tg} \varphi \frac{4d_2}{d^2}\right) \sigma} = -dx, \quad (5)$$

$$\frac{d^2}{4\xi (d \operatorname{tg} \rho + d_2 \operatorname{tg} \varphi)} \ln \sigma = -x + C$$

Постійну величину знайдемо з умови  $x = 0$ ;

$$\sigma = \sigma_{\max}$$

$$C = \frac{d^2}{4\xi (d \operatorname{tg} \rho + d_2 \operatorname{tg} \varphi)} \ln \sigma_{\max}, \quad (6)$$

де  $d$  – внутрішній діаметр свердловини.

Тоді залежність, яка описує розподіл тиску  $\sigma$  по довжині свердловини (рис. 3), буде:

$$\sigma = \sigma_{\max} \cdot e^{-\frac{4\xi (d \operatorname{tg} \rho + d_2 \operatorname{tg} \varphi)}{d^2} \cdot x} \quad (7)$$

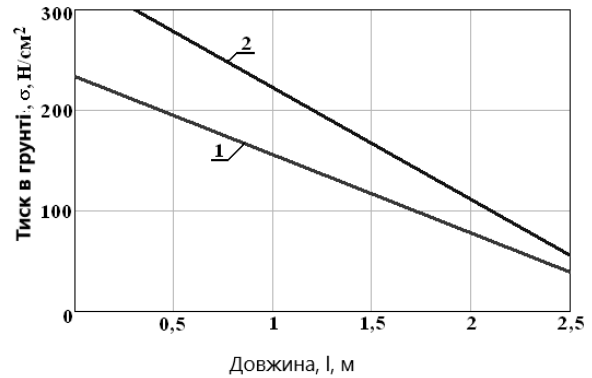


Рис. 3. Зміна тиску в призмі ґрунту в залежності від відстані до очисного диска: 1 – ґрунт II категорії міцності; 2 – ґрунт III категорії міцності

Величину  $\sigma$  визначимо з умови, що весь ґрунт перед очисним диском при його русі витискується в стінки свердловини. Схема просування ножа відображена на рис. 4.

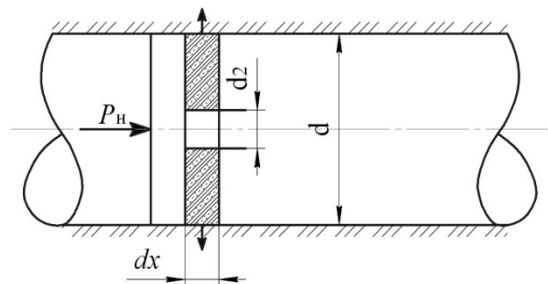


Рис. 4. Схема витиснення ґрунту в стінки свердловини

Виділимо поруч з диском елемент ґрунту товщиною  $dx$ . При переміщенні диска на величину  $dx$  виділений об'єм ґрунту буде повністю вдавлений в стінки свердловини, тобто:

$$\frac{\pi (d^2 - d_2^2)}{4} dx = \pi d \cdot dx \cdot \delta' \quad (8)$$

де  $\delta'$  – товщина вдавненого шару ґрунту.

Звідси:

$$\delta' = 0,25 \left( d - \frac{d_2^2}{d} \right) \quad (9)$$

Вдавити такий ґрунт може нормальний тиск  $\sigma_n$ :

$$\sigma_n = \frac{P_\partial}{\xi}, \quad (10)$$

де  $P_\partial$  – питомий опір ґрунту вдавлюванню, таблиця, [13].

Таблиця

Питомий опір ґрунту вдавлюванню,  $P_\partial$ , Н/см<sup>2</sup>

Тип и стан ґрунту	$P_\partial$ , Н/см <sup>2</sup>
Болото	4...6
Заболочений ґрунт	8...10
Мокра глина, пухкий пісок	20...40
Крупний пісок, волога середня глина	40...60
Середня глина и міцна глина волога	60...70
Міцна глина середньої вологості, мергель и ліс вологі	80...100
Міцна глина, мергель та ліс сухі	110...150

При виборі величини  $P_\partial$  слідкує пам'ятати, що вдавлювання відбувається в ущільнений ґрунт. Згідно даним табл. 2.3 и 2.4 його фізико-механічні властивості збільшуються в 1,5 – 2 рази.

На основі викладеного:

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_n}{\xi} = \frac{P_\partial}{\xi}. \quad (11)$$

Для очистки свердловини до натискного диска необхідно прикладати зусилля, рис. 5:

$$P_H = \frac{\pi P_\partial}{4\xi} (d^2 - d_2^2). \quad (12)$$

Ця залежність справедлива, коли довжина свердловини більше її мінімальної довжини.

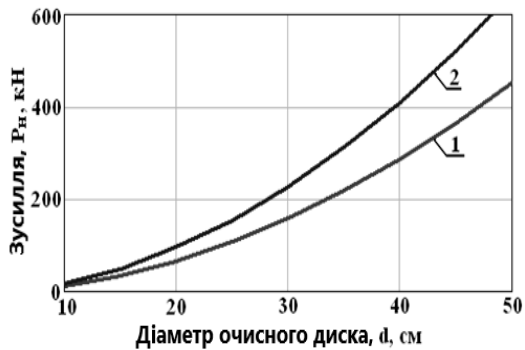


Рис. 5. Залежність зусилля очистки свердловини від її діаметру: 1 – ґрунт II категорії міцності; 2 – ґрунт III категорії міцності

Зневажаючи довжиною I етапу проходження свердловини, рис. 1 і використовуючи рівняння (9), (12) визначимо мінімальну довжину свердловини як суму довжин проходження диском II, III, IV етапів:

$$l_{\min} = l_{II} + l_{III} + l_{IV} = \frac{\alpha_1 p}{2\xi E_p} d + \frac{d^2}{4\xi (dtg\rho + d_2 tg\varphi)} \ln \frac{\xi \sigma_{\max}}{p} + \frac{d^2}{4\xi (dtg\rho + d_2 tg\varphi)} \ln \frac{\xi \sigma_{\max}}{P_{\text{атм}}} = \frac{\alpha_1 p}{2\xi E_p} d + \frac{d^2}{4\xi (dtg\rho + d_2 tg\varphi)} \ln \frac{\xi \sigma_{\max}^2}{p \cdot P_{\text{атм}}}, \quad (13)$$

де  $P_{\text{атм}}$  – атмосферний тиск повітря;

$p$  – опір ґрунту зминанню, який може розглядатися в даному випадку, як питомий опір ґрунту зм'якшенню. Для суглинку II та III категорії має значення 6...10 Н/см<sup>2</sup>, [13].

Враховуючи, що величина визначається співвідношенням (11), то (13) перепишемо у вигляді:

$$l_{\min} = \frac{\alpha_1 p}{2\xi E_p} d + \frac{d^2}{4\xi (dtg\rho + d_2 tg\varphi)} \ln \frac{P_\partial^2}{\xi \cdot p \cdot P_{\text{атм}}}. \quad (14)$$

Графіки залежності мінімальної довжини свердловини від її діаметру наведені на рис. 6.

Природно, коли виконують свердловину довжиною менше мінімальної, напірне зусилля для її очистки буде декілька менше. Однак при проектуванні установок слід користуватися залежністю (12)

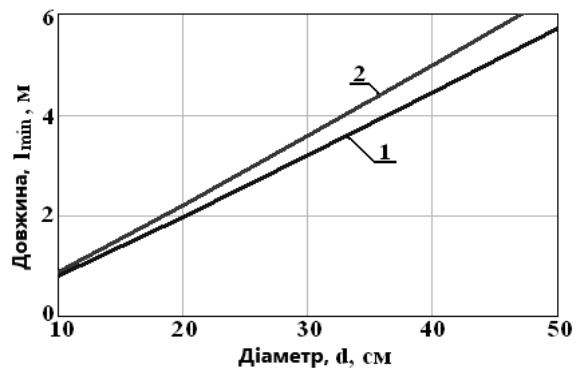


Рис. 6. Залежність мінімальної довжини свердловини від її діаметру: 1 – ґрунт II категорії міцності; 2 – ґрунт III категорії міцності

На рис. 5 і рис. 6 представлені графіки залежності розподілу тиску в ґрунтовій призмі при очистці свердловини в залежності від відстані до очисного диску, зусилля очистки свердловини від зрізаного ґрунту і залежності мінімальної довжини свердловини від її діаметру.

Мінімальна довжина свердловини, по якій розподіляється максимальний тиск на ґрунт при очистці свердловини, знаходиться практично в прямій залежності від її діаметру, рис. 6. Тиск же в ґрунті при віддаленні від скребка різко падає, рис. 3.

**Висновки.** Отримана теоретична залежність для визначення сили опору ґрунту при очищенні свердловини скребоквим органом, дозволила встановити, що опір ґрунту має змінний характер та суттєво зростає від величини діаметру свердловини.

Встановлено, що мінімальна довжина також визначається діаметром свердловини та для діаметру свердловини, наприклад 300 мм ефективною довжина очищення буде в межах 3,6...3,8 м. Міцність ґрунту на процес очищення свердловини має незначний вплив.

#### Література

- Erez N. Allouche, Samuel T. Ariaratnam, State-Of-The-Art-Review Of No-Dig Technologies for New Installations. Published online: April 26, 2012. [https://doi.org/10.1061/40641\(2002\)55](https://doi.org/10.1061/40641(2002)55).
- Pridmore A., Geisbush J. Developing a Successful Specification for Horizontal Directional Drilling // Pipelines 2017. Pipelines Planning and Design Book set, 2017. P. 553–563. <https://doi.org/10.1061/9780784480878>
- Hastak M., Gokhale S., Decision Tool for Selecting the Most Appropriate Technology for Underground Conduit Construction // Geological Engineering: Proceedings of the 1st International Conference. New York, 2009. DOI: 10.1115/1.802922.paper30
- Zhao Jun Ling Bian. Trenchless technology underground pipes. Machinery Industry Press, 2014. P. 187.
- Jian Xin. Application of Trenchless Pipeline Rehabilitation Technology // International Conference on Pipelines and Trenchless Technology. 2014. <https://doi.org/10.1061/9780784413821.051>
- Hastak Makarand, Gokhale Sanjiv. Decision Tool for Selecting the Most Appropriate Technology for Underground Conduit Construction // Geological Engineering: Proceedings of the 1st International Conference, Baosong Ma, ASME. doi: 10.1115/1.802922.paper30
- Sterling Raymond L. International Technology Transfer in Tunneling and Trenchless Technology // Geological Engineering: Proceedings of the 1st International Conference. Baosong Ma, ASME, 2009. doi: 10.1115/1.802922.paper6.
- Nilo Tsung, Mingming Zheng, Mohammad Najafi, Saleh Mehraban. A Comparative Study of Soil Pressure and Deformation of Pipes Installed by the Open-Cut Method and Trenchless Technology // Pipelines 2016: Out of Sight, Out of Mind, Not Out of Risk. 2016. <https://doi.org/10.1061/9780784479957.132>
- Кравець С., Посмітюха О., Супонев В. Аналітичний спосіб визначення опору занурення конусного накопичувача в ґрунт // СММ ПДАБА. 2017. Вып. 103. С. 91–98.
- Балесный С. Особенности процессов статического прокола грунта. *Вісник ХНАДУ*. 2017. Вып. 76. С. 138–141.
- Супонев В.Н., Хачатурян С., Олексин В. Исследование процесса изменения состояния грунта вокруг горизонтальной скважины после её формирования методом статического прокола грунта // *Вісник ХНАДУ*. 2016. Вып. 73. С. 196–202. 12.
- Олексин В.И. Комбинированный метод разработки горизонтальной скважины при бестраншейной прокладке коммуникаций / В.И Олексин // *Вестник ХНАДУ*. Сб. науч. ст. X.: – 2012. Вып. 57. – С. 207 – 213.
- Дорожные машины. Часть 1. Машины для земляных работ / [Алексеева Т.В., Артемьев К.А., Бромберг А.А. и др.]. – [3-е изд.]. – М.: – Машиностроение, 1972. – 504 с.

#### References

- Erez N. Allouche, Samuel A. (2012). State-Of-The-Art-Review Of No-Dig Technologies for New Installations. American Society of Civil Engineers, 8. [https://doi.org/10.1061/40641\(2002\)55](https://doi.org/10.1061/40641(2002)55)
- Pridmore, A., Geisbush, J. (2017). Developing a Successful Specification for Horizontal Directional Drilling. Pipelines 2017. Pipelines Planning and Design Book set, 553–563.
- Hastak, M., Gokhale, S. (2009). Decision Tool for Selecting the Most Appropriate Technology for Underground Conduit Construction. Geological Engineering: Proceedings of the 1st International Conference. New York, 18.
- Zhao Jun Ling Bian. (2014). Trenchless technology underground pipes. Machinery Industry Press, 187.
- Jian Xin. (2014). Application of Trenchless Pipeline Rehabilitation Technology. International Conference on Pipelines and Trenchless Technology. <https://doi.org/10.1061/9780784413821.051>
- Hastak Makarand, Gokhale Sanjiv. (2009). Decision Tool for Selecting the Most Appropriate Technology for Underground Conduit Construction. Geological Engineering: Proceedings of the 1st International Conference, Baosong Ma, ASME. New York, 18.
- Sterling Raymond L. (2009). International Technology Transfer in Tunneling and Trenchless Technology. Geological Engineering: Proceedings of the 1st International Conference. Baosong Ma, ASME. New York, 8.
- Nilo Tsung, Mingming Zheng, Mohammad Najafi, Saleh Mehraban. (2016). A Comparative Study of Soil Pressure and Deformation of Pipes Installed by the Open-Cut Method and Trenchless Technology. Pipelines 2016 : Out of Sight, Out of Mind, Not Out of Risk.
- Najafi, M., Brett, G., Davis, G. (2009). Details of Field Testing of Major Trenchless Technology Methods for Road Crossings. Geological Engineering: Proceedings of the 1st International Conference, Baosong Ma, ASME. New York, 9.
- Chehab, A. G., Moor, I. D. (2007). One-dimensional calculation for axial pullback for axial pullback distributions in pipes during directional drilling installations. Otta-vaGeo, 1140–1154.
- Guojun, Wen, Xiaoming, Wu, Han, Chen. (2009). Trenchless Pipe-Paving in Complex Hard Stratum by Directional Drilling Technology. Geological Engineering: Proceedings of the 1st International Conference (ICGE 2007), Baosong Ma, ASME. New York, 8.
- Oleksin V. (2012). Kombinirovanny method razrobotki sverdlloviny pruz beztransheynoy prokladke komunikaziy. Vtsnik HNADY/ Sb. Nauch. St. H. Vip. 57. – 207-213.

13. Alexeev T., (1972) Dorognii mashiny/. Pat. 1. Mashine dly zemlynih robot. . – М.: – Mashinostroenie. 504 p..

**Супонев В.Н. Определение силы сопротивления грунта при очистке скважины после её расширения кольцевым ножом.**

*Одним из направлений развития бестраншейных технологий прокладки инженерных коммуникаций является применение комбинированного способа формирования горизонтальных скважин. Этот способ объединяет в себе две технологии разработки грунта: прокол с радиальным уплотнением грунта и продавливания на этапе расширения скважины кольцевым ножом. Срезанный грунт удаляется скребком. В работе определяются закономерности процесса очистки скважины грунта и определяются усилия на его удаление.*

**Ключевые слова:** бестраншейные технологии, прокол грунта, продавливание грунта, комбинированный метод, инженерные коммуникации, горизонтальная скважина.

**Suponyev V. Determination of the resistance of the soil when cleaning the bore after its expansion ring knife.**

*One of the directions of development of trenchless technologies of laying engineering communications is the use of combined ways of forming horizontal wells. This way consolidate two technology ground: puncture in the ground radial seal and forcing expansion phase wells circular knife. With snipped primer is removed a scraper. In the work determining of patterns of the cleaning process and identifies the ground wells efforts on removing it.*

**Ключові слова:** безтраншейні технології, прокол ґрунту, продавлювання ґрунту комбінований метод інженерні комунікації, горизонтальна скважина.

**Супонев Володимир Миколайович** – к.т.н., доц. кафедри будівельних і дорожніх машин Харківський національний автомобільно-дорожній університет. E-mail: v-suponev@ukr.net.

*Рецензент:* д.т.н., проф. **Суворін О.В**

Стаття подана 15.12.2018.

УДК 691.328.5

**АЗБЕСТ. СТАН ПРОБЛЕМИ В УКРАЇНІ****Тарасов В. Ю., Захарова О.І., Зубцов Є.І., Заїка Р.Г.****ASBESTOS. STATE IN UKRAINE****Tarasov V. Yu., Zakharova O.I., Zubtsov Y.I., Zaika R.G.**

*Проаналізовані світові статистичні дані про нещасні випадки та професійні захворювання на виробництвах. Частина захворювань, що пов'язані з виробництвом та використанням азбесту у побуті постійно зростає, що може привести до загибелі від азбесто-індукованих мезотеліом більш ніж чверті мільйона людей у найближчі 35 років. Розглянуті чинні нормативно-правові акти України щодо контролю вмісту забруднюючих речовин в атмосферному повітрі. Показано необхідність зменшення використання азбесту у побуті.*

**Ключові слова:** азбест, міжнародна організація праці, захворювання.

**Вступ.** Азбест відомий людству на протязі століть завдяки тому, що він є доступним, дешевим та міцним матеріалом. Сьогодні азбест використовується при виготовленні більш ніж 3000 різноманітних виробів та композиційних матеріалів, насамперед у будівництві та виробництві фрикційних деталей [1, 2].

**Постановка проблеми.** Проблемою багатьох сучасних виробництв є небезпека для життя і здоров'я працівників. За даними Міжнародної організації праці за 2017 рік, кожного року на виробництві відбувається більш ніж 2,78 млн нещасних випадків з летальними наслідками. Тобто, кожного дня від промислових травм та захворювань людство втрачає близько 7700 людей. Крім того, травмування та професійні захворювання призводять до втрати працездатності працівників на тривалий час. І таких випадків кожного року фіксується понад 374 млн. [3]. Одним з матеріалів, при контакті з яким можуть виникати професійні захворювання, є азбест. Сьогодні, за даними Всесвітньої Організації Охорони Здоров'я, близько 125 млн працівників на своїх робочих місцях мають контакт з азбестом. Близько 50 відсотків летальних випадків від професійних онкологічних захворювань, за статистикою, викликані безпосередньо азбестом. Але азбест впливає на стан здоров'я не тільки в умовах виробництва, людство відчуває вплив азбесту вдома. [4]

**Аналіз стану проблеми.** Не зважаючи на досвід використання азбесту в промисловості та побуті, людство вважало його небезпечним. У 1907 році англійський доктор Мюррей виявив специфічне захворювання легень (азбестоз) у працівників, які контактували з азбестом. [5]. Не зважаючи на це відкриття і увагу медичної науки до проблеми азбесту, ще півсторіччя виробництво азбесту відбувалося за відсутності будь-якого захисту працівників. Пізніше у США та країнах Західної Європи з'явилися програми, які обмежували і забороняли використання азбесту, а також програми, які передбачали видалення азбесту з раніше збудованих споруд. У 1986 році Генеральною конференцією Міжнародної організації праці прийнята Конвенція № 162 «Про охорону праці при використанні азбесту». Конвенція вперше на міжнародному рівні запропонувала принцип контрольованого використання азбесту. Цю пропозицію підтримали уряди і профспілки 125 країн світу. Тотальну заборону азбесту не підтримали ті країни, які добувають і у великій кількості використовують матеріали, що містять азбест. В науковому середовищі думки різняться. Деякі науковці прогнозують пік захворювання на мезотеліому у країнах Західної Європи у 2015-2030 роках [6], смертність від азбесто-індукованих мезотеліом протягом 35 років складатиме чверть мільйона жителів планети. Найвищий рівень захворювання прогнозується серед чоловіків 1945-1950 років народження.

У 2012 році Міністерство охорони здоров'я України наказом від 01 жовтня 2012 року № 762 затвердило Державні санітарні норми та правила «Про безпеку і захист працівників від шкідливого впливу азбесту і азбестовмісних матеріалів». Водночас, постановою головного державного санітарного лікаря України від 02.07.2012 р. №16 було затверджено гранично допустимі концентрації (ГДК) волокон хризотилового азбесту у повітрі робочої зони – одне волокно/см<sup>3</sup>, 1 клас небезпечності, канцероген [7]

9 червня 2017 року був зареєстрований наказ МОЗ України № 339 «Про затвердження Державних санітарних і правил «Про безпеку та захист робітни-



кі від шкідливого впливу азбесту та азбествмісних матеріалів», який забороняє виробництво та використання всіх видів азбесту при виконанні будівельно-монтажних робіт. [8] Але, 11 серпня 2017 року було повідомлення Державної регуляторної служби України про скасування його реєстрації. [9]

**Мета статті.** Дослідження впливу азбесту на стан здоров'я людини.

**Результати досліджень.**

Мінеральні волокна мають відносну стійкість до зовнішніх умов, і тому деякий час знаходяться в навколишньому середовищі без суттєвих перетворень. Вони переміщуються на великі відстані з повітряними масами і водними потоками. Слід зазначити, що, якщо йдеться за досить великий проміжок часу, то мінеральні волокна, як у водному середовищі, так і в живих організмах зазвичай зазнають певних хімічних змін. Крім того, при попаданні до організму вони здатні накопичуватися (кумулятивний ефект) та адсорбувати різні органічні речовини. Найбільш негативний вплив на здоров'я людини спричиняє наявність волокон азбесту в повітрі. Волокна азбесту становлять відносно невелику фракцію волокнистого аерозолі в атмосфері, але присутні практично скрізь. Так, за даними [10] в сільських районах концентрація азбестових волокон в повітрі становить 0,03 - 3 волокон/м<sup>3</sup>, а у містах вміст азбесту складає вже 3-300 волокон/м<sup>3</sup>, що пов'язано зі складом будівельних матеріалів і проведенням будівельних робіт.

Розглянемо джерела азбесту та ризики для мешканців нашого міста.

У 1934 році почалося будівництво міста Северодонецька [11], який став одним з найбільших промислових центрів Луганської області. Сучасний Северодонецьк має загальну площу 41,551 км<sup>2</sup>, на якій проживає близько 121 тис. мешканців різних вікових груп (табл. 1). [12].

Доля житлового фонду м. Северодонецька містить близько 55% будівель, які мають дахове покриття з рулонних матеріалів на основі бітуму, решта переважно азбестоцементний шифер (рис.). Северодонецьким міським бюджетом 2016 року було заплановано ремонт покрівель у 19 багатоповерхівках на суму 5,6 мільйона грн. (табл. 2).

Таблиця 1

**Питома вага окремих вікових груп у загальній чисельності постійного населення у % [13]**

Вікова група, років	2013	2014	2015	2016	2017
	Жінки/Чоловіки				
0-9	9,3/11,5	9,6/11,8	9,7/12,0	9,7/12,0	9,7/12,0
10-19	8,6/10,6	8,4/10,3	8,3/10,2	8,2/10,1	8,3/10,1
20-24	6,5/7,9	6,1/7,5	5,8/7,1	5,5/6,7	5,2/6,4
25-29	7,8/9,4	7,6/9,2	7,4/9,0	7,2/8,7	6,9/8,4
30-34	7,1/8,4	7,3/8,7	7,5/8,9	7,7/9,1	7,8/9,3
35-39	6,8/7,7	6,9/7,8	6,9/7,9	7,0/8,0	7,0/8,1
40-44	6,6/7,2	6,6/7,3	6,8/7,4	6,8/7,5	6,9/7,6
45-49	6,7/6,9	6,5/6,8	6,4/6,7	6,5/6,8	6,5/6,9
50-54	7,8/7,6	7,7/7,5	7,5/7,4	7,2/7,1	7,0/6,8
55-59	7,2/6,4	7,4/6,6	7,5/6,7	7,7/7,0	7,7/7,1
60-69	10,9/8,5	11,5/8,9	12,0/9,3	12,6/9,8	13,0/10,1
70 і старші	14,7/7,9	14,4/7,6	14,2/7,4	13,9/7,2	14,0/7,2

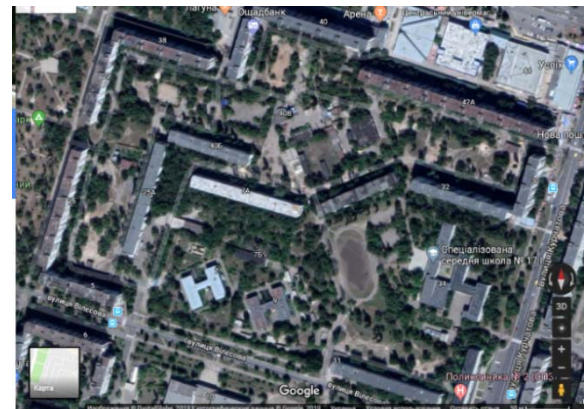
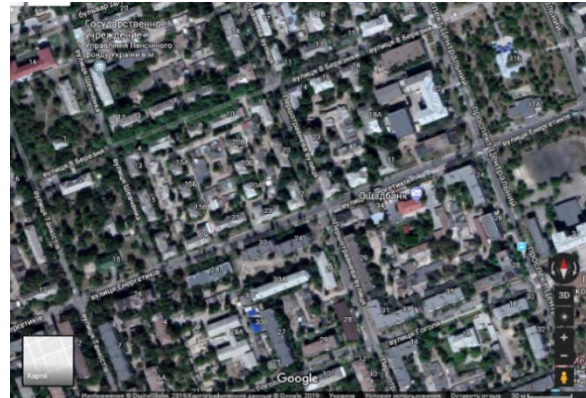


Рис. 18 и 77 мікрорайони м. Северодонецька

Таблиця 2

**Характеристика капітального ремонту [14]**

Житловий об'єкт	Вартість робіт, грн	Матеріал покривлі*
пр. Хіміків, 36	435344	шифер
вул. Дружби Народів, 49	601566	шифер
вул. Федоренко, 43	456319	шифер
вул. Сметаніна, 30	537902	шифер
пр. Центральний, 31	293695	шифер
вул. Горького, 14	250114	шифер
вул. Сгорова, 33	381211	рубероїд
вул. Донецька, 46	388236	рубероїд
вул. Гагаріна, 45	425046	рубероїд
вул. Донецька, 5	386168	рубероїд
вул. Курчатова, 7	531084	рубероїд
вул. Вілєсова, 21 а	682746	рубероїд
пр. Гвардійський, 55	281379	рубероїд
вул. Донецька, 26	201624	шифер
вул. Федоренко, 35	366600	шифер
вул. Маяковського, 25	435954	рубероїд
вул. Маяковського, 11	448909	рубероїд
вул. Горького, 11	129739	шифер
вул. Первомайська, 38	293300	шифер
вул. Богдана Ліщини, 17	191 178	шифер
пр. Центральний, 31	21 719	шифер
вул. Енергетиків, 28	303 821	рубероїд
пр. Хіміків, 25	362 922	рубероїд
вул. Первомайська, 45	257 086	рубероїд
вул. Первомайська, 31	367 201	рубероїд
пр. Центральний, 40	256 698	рубероїд
пр. Центральний, 32	196 446	рубероїд
пр. Центральний, 30	200 262	рубероїд
вул. Гоголя, 35	226 672	рубероїд
пр. Центральний, 24	361 649	рубероїд

\* - дані сервісу "Google Карты"

Аналіз даних таблиці 2 показує, що 37 % коштів витрачено на капітальний ремонт покрівель з азбестоцементного шиферу тих об'єктів, які були збудовані до 60-х років. Тобто природно-кліматичні умови, конструктивні рішення, технічний стан і режим експлуатації будівлі зумовили часткове руйнування покрівлі, яка протягом 50-60 років фактично була пасивним джерелом азбесту у повітрі. Суттєве збільшення концентрації азбесту відбувається при проведенні демонтажних робіт при капітальному або поточному ремонті, а також при утилізації азбесту. Нажаль, азбест сьогодні досить часто повторно використовується у приватних господарствах, що сприяє збільшенню концентрації азбестових волокон у повітрі.

Другим за значенням джерелом надходження азбесту в організм є питна вода. Середні концентрації азбесту в питній воді становлять 0,3-1,5 мкг/л. Однак у воді, обробленій навіть на муніципальних системах очищення, кількість азбесту істотно знижується.

Присутність виробничих майданчиків великих хімічних гігантів і гірничодобувних підприємств в регіоні не дозволяє визначити індивідуальний вплив азбесту.

**Висновок.** При розгляді потенційних переваг і недоліків використання азбесту важливо враховувати екологічні обмеження на тому ж рівні, що й економічні та соціальні питання. Для кожної країни вирішальне значення мають індивідуальні чинники, які залежать від стратегії розвитку, політики, культури тощо. Якщо розглядати досвід споживачів азбесту, таких як Сполучені Штати, у якості репрезентативного прикладу, то продовження виробництва і споживання азбесту, цілком ймовірно, спричинить за собою значні витрати на надання медичної допомоги і відновлення навколишнього середовища, включаючи видалення та утилізацію відходів, а також потенційні судові витрати і компенсаційні виплати.

### Література

1. Allen LP, Baez J, Stern MEC, Takahashi K, George F. Trends and the Economic Effect of Asbestos Bans and Decline in Asbestos Consumption and Production Worldwide. *Int J Environ Res Public Health*. 2018;15(3):531. Published 2018 Mar 16. doi:10.3390/ijerph15030531 - <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5877076/>
2. Пługин А. А., Кагановский А. С., Градобоев О. В. Высокоэффективные композиционные материалы на основе минеральных и синтетических волокон: физико-химические свойства волокон //Науковий вісник будівництва. – 2014. – №. 2. – С. 94-102.
3. ISO 45001 - Occupational health and safety // ISO Central Secretariat — February 2018 — Режим доступу : <https://www.iso.org/files/live/sites/isoorg/files/store/en/PU B100427.pdf>
4. Asbestos: elimination of asbestos-related diseases // WHO — 15 February 2018 — Режим доступу : <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/asbestos-elimination-of-asbestos-related-diseases>

5. Асбест в Кыргызстане: практика применения, проблемы и рекомендации: Обзорное исследование. Т.И. Неронова, Н.С. Вашнева, В.А. Коротенко и др. - Б.: 2011. - 72 с. ISBN 978-9967-08-269-4 — Режим доступу: [http://www.wecf.eu/download/2011/september/InventoryKyrAsbestosRU\\_min.pdf](http://www.wecf.eu/download/2011/september/InventoryKyrAsbestosRU_min.pdf)
6. Музалевский П. Н. и др. Мезотелиома: распространенность и модифицирующие факторы (литературный обзор) //Сибирский онкологический журнал. – 2007. – №. 2. – с 11-83 [http://onco.tnims.ru/upload/zhurnal/soj\\_2007\\_2\\_77-83.pdf](http://onco.tnims.ru/upload/zhurnal/soj_2007_2_77-83.pdf)
7. Нові санітарні норми забороняють використання азбесту : (новини) [Електронний ресурс] // Урядовий портал — 23 червня 2017 року — Режим доступу: <https://www.kmu.gov.ua/ua/news/250094884>
7. ДСанПіН 3.5-179-2012. Про безпеку і захист працівників від шкідливого впливу азбесту і азбестовмісних матеріалів. — К.: Держстандарт України, 2012.
8. Постанова Київського апеляційного адміністративного суду від 14.03.2018 № 72803546 — справа № 826/15456/17 [Електронний ресурс] // YOUCONTROL – ПОВНЕ ДОСЬЄ НА КОЖНУ КОМПАНІЮ УКРАЇНИ (дата ухвалення 14.03.2018). – Режим доступу : <https://youcontrol.com.ua/catalog/court-document/72803546/>
9. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological profile for asbestos. – 2001.
10. Історія міста : (наше місто) [Електронний ресурс] // Северодонецька міська рада — 12-04-2016 — Режим доступу: <http://www.sed-rada.gov.ua/nashe-misto/istoriya-mista>
11. Географічне положення : (наше місто) [Електронний ресурс] // Северодонецька міська рада — 12-04-2016 — Режим доступу: <http://www.sed-rada.gov.ua/nashe-misto/geografichne-polozhennya>
12. Жінки і чоловіки в Україні / Статистичний збірник. – К.: Державна служба статистики в Україні, 2011. – 118 с. - [http://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat\\_u/publzhahist\\_u.htm](http://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/publzhahist_u.htm)
14. Выделены средства на капитальные ремонты 32 северодонецких крыш : (новини міста) [Електронний ресурс] // Северодонецька міська рада — 03-06-2016 — Режим доступу: [http://sed-rada.gov.ua/novini-mista/vydeleny-sredstva-na-kapitalnyye-remonty-32-severodoneckih-krysh\\_03-06-2016](http://sed-rada.gov.ua/novini-mista/vydeleny-sredstva-na-kapitalnyye-remonty-32-severodoneckih-krysh_03-06-2016)

### References

1. Allen LP, Baez J, Stern MEC, Takahashi K, George F. Trends and the Economic Effect of Asbestos Bans and Decline in Asbestos Consumption and Production Worldwide. *Int J Environ Res Public Health*. 2018;15(3):531. Published 2018 Mar 16. doi:10.3390/ijerph15030531 - <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5877076/>
2. Plugin A. A., Kaganovskij A. S., Gradoboev O. V. Vysokoeffektivnye kompozitsionnye materialy na osnove mineralnyh i sinteticheskikh volokon: fiziko-himicheskie svoystva volokon //Naukovij visnik budivnictva. – 2014. – №. 2. – С. 94-102.
3. ISO 45001 - Occupational health and safety // ISO Central Secretariat — February 2018 — Rezhim dostupu: <https://www.iso.org/files/live/sites/isoorg/files/store/en/PU B100427.pdf>
4. Asbestos: elimination of asbestos-related diseases // WHO — 15 February 2018 — Rezhim dostupu : <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/asbestos-elimination-of-asbestos-related-diseases>

5. Asbest v Kyrgyzstane: praktika primeneniya, problemy i rekomendacii: Obzornoe issledovanie. T.I. Neronova, N.S. Vashneva, V.A. Korotenko i dr. - B.: 2011. - 72 s. ISBN 978-9967-08-269-4 — Rezhim dostupu : [http://www.wecf.eu/download/2011/september/InventoryKyrgyzAsbestosRU\\_min.pdf](http://www.wecf.eu/download/2011/september/InventoryKyrgyzAsbestosRU_min.pdf)
6. Muzalevskii P. N. i dr. Mezotelioma: rasprostranennost i modifiziruyushie faktory (literaturnyj obzor) //Sibirskij onkologicheskij zhurnal. – 2007. – №. 2. – с 11-83 [http://onco.tnime.ru/upload/zhurnal/soj\\_2007\\_2\\_77-83.pdf](http://onco.tnime.ru/upload/zhurnal/soj_2007_2_77-83.pdf)
7. 7.Novi sanitarni normi zaboronyayut vikoristannya azbestu : (novini) [Elektronnij resurs] // Uryadovij portal — 23 chervnya 2017 roku — Rezhim dostupu: <https://www.kmu.gov.ua/ua/news/250094884>
8. DSanPiN 3.5-179-2012. Pro bezpeku izahist pracivnikov vid shkidlivogo vplivu azbestu i azbestovmisnih materialiv. — K.: Derzhstandart Ukrayini, 2012.
9. Postanova Kiyivskogo apelyacijnogo administrativnogo sudu vid 14.03.2018 № 72803546 — sprava № 826/15456/17 [Elektronnij resurs] // YOUCONTROL – POVNE DOSYe NA KOZhNU KOMPANIYu UKRAYINI (data uhvalenya 14.03.2018). – Rezhim dostupu : <https://youcontrol.com.ua/catalog/court-document/72803546/>
10. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological profile for asbestos. – 2001.
11. Istoriya mista : (nashe misto) [Elektronnij resurs] // Syevyerodonecka miska rada — 12-04-2016 — Rezhim dostupu: <http://www.sed-rada.gov.ua/nashe-misto/istoriya-mista>
12. Geografichne polozhennya : (nashe misto) [Elektronnij resurs] // Syevyerodonecka miska rada — 12-04-2016 — Rezhim dostupu: <http://www.sed-rada.gov.ua/nashe-misto/geografichne-polozhennya>
13. Zhinki i choloviki v Ukrayini / Statistichnij zbirnik. – K.: Derzhavna sluzhba statistiki v Ukrayini, 2011. – 118 с. - [http://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat\\_u/publzahist\\_u.htm](http://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/publzahist_u.htm)
14. Vydeleny sredstva na kapitalnye remonty 32 severodoneckih krysh : (novini mista) [Elektronnij resurs] // Syevyerodonecka miska rada — 03-06-2016 — Rezhim dostupu: [http://sed-rada.gov.ua/novini-mista/vydeleny-sredstva-na-kapitalnye-remonty-32-severodoneckih-krysh\\_03-06-2016](http://sed-rada.gov.ua/novini-mista/vydeleny-sredstva-na-kapitalnye-remonty-32-severodoneckih-krysh_03-06-2016)

**Тарасов В.Ю., Захарова О.И., Зубцов Е.И., Заика Р.Г. Асбест. Состояние проблемы на Украине.**

*Проанализированы мировые статистические данные о несчастных случаях и профессиональных заболеваниях на производствах. Доля заболеваний, связанных с производством и использованием асбеста в быту постоянно растет, что может привести к гибели от асбесто-индуцированных мезотелиом более чем четверти миллиона человек в ближайшие 35 лет. Рассмотрены чинні нормативно-правові акти України щодо контролю вмісту забруднюючих речовин в атмосферному повітрі. Показана необхідність уменшення використання асбеста в быту.*

**Ключевые слова:** асбест, международная организация труда, заболевания.

**Tarasov V. Yu., Zakharova O.I., Zubtsov Y.I., Zaika R.G. Asbestos. State in Ukraine.**

*World statistics on accidents and occupational diseases in the workplace were analyzed. The number of diseases associated with the production and use of asbestos in everyday life is constantly growing, which can lead to the death of more than a quarter of a million people due to asbestos-induced mesothelioma in the next 35 years. The article provides an overview of existing legal acts of Ukraine to monitor the content of pollutants in the air. An assessment of the potential health risk from environmental pollution asbestos. The Severodonetsk contains about 55% of the building, that has a roof covering of rolled materials on the basis of bitumen, the rest mainly asbestos-cement slate The age groups of the population constantly residing in the city are analyzed. The need to reduce the use of asbestos in everyday life is shown.*

**Keywords:** asbestos, international labour organization, diseases.

**Тарасов Вадим Юрійович** – к.т.н., доцент, доцент кафедри хімії та охорони праці Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. [vatarasov81@gmail.com](mailto:vatarasov81@gmail.com)

**Захарова Ольга Іванівна** – к.х.н., доцент, доцент кафедри хімії та охорони праці Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. [rubej10@gmail.com](mailto:rubej10@gmail.com)

**Зубцов Євген Іванович** – к.т.н., доцент, доцент кафедри хімічної інженерії та екології Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. [mining\\_07@i.ua](mailto: mining_07@i.ua)

**Заїка Раїса Григорівна** – к.т.н., доцент, зав. кафедри доцент кафедри хімії та охорони праці Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. [chemistry@snu.edu.ua](mailto:chemistry@snu.edu.ua)

*Рецензент:* д.т.н., проф. **Суворін О.В.**

Стаття подана 15.11.2018

УДК 69.059.7

**ЛІКВІДАЦІЙНИЙ ЦИКЛ ОБ'ЄКТУ ІНВЕСТИЦІЙНО-БУДІВЕЛЬНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ.  
ОСОБЛИВОСТІ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЕКТУВАННЯ****Уваров П.Є., Татарченко Г.О., Шпарбер М.Є.****LIQUIDATION CYCLE OF OBJECT OF INVESTMENT AND BUILDING ACTIVITIES.  
FEATURES OF ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL DESIGN.****Uvarov P.E., Tatarchenko G.O., Shparber M.E.**

*Розглянуто особливості та методичні засади проектування технологій і форм організації будівельного ліквідаційного циклу типових уніфікованих серій житлових будинків. Наведено системний підхід формування необхідних параметрів і показників структури комплексного технологічного процесу розбирання, руйнування і знесення конструктивних елементів та будівель в цілому. Сформовано мультіграф замкнутої моделі взаємозв'язків параметрів організаційно-технологічних рішень будівельного ліквідаційного циклу.*

**Ключові слова:** ліквідаційний цикл об'єкту; ліквідаційна функціональна система; організаційно-технологічне проектування

**Вступ.** Розвиток теорії та практики будівельних процесів, розробка нових технологій і форм організації будівельно-ліквідаційного циклу типових серій житлових будинків з використанням сучасних технічних засобів і обладнання є надзвичайно важливим напрямом наукових досліджень в області комплексної реконструкції кварталів (мікрорайонів) застарілого і аварійно небезпечного житлового фонду.

Вказана категорія житлового фонду за своїм технічним станом не відповідає сучасним вимогам науково-технічного супроводу на різних етапах життєвого циклу будівельних об'єктів, встановленим державними будівельними стандартами, нормами і правилами [4, 5-7, 9, 12].

Теоретичною основою обґрунтування комплексної реконструкції кварталів і розгляду структури і параметрів будівельного ліквідаційного циклу, формування, моделювання та проектування може служити системна методологія, реалізована в системі техніки будівництва в розділі організаційно технологічного проектування [2,10 -12].

**Постановка проблеми.** Сучасний науково-технологічний рівень розвитку економіки, з одного боку диктує нові, як правило, підвищені вимоги до науково-технічного забезпечення і супроводу буді-

вельних об'єктів [6, 9], з іншого боку розкриває нові можливості для їх вдосконалення та оновлення. На сучасному етапі «будівельно-реконструктивного» виробництва до проектування ліквідаційної стадії життєвого циклу «житло-систем» ставляться такі вимоги: системність, безпека, гнучкість, ресурсозбереження, якість і ефективність [2, 10, 11, 12].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Виконаний аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано концептуально-теоретичні обґрунтування рішення даної проблеми [4, 10, 11] показав, що основна мета роботи по нормалізації будівельного ліквідаційного циклу об'єкта (БЛЦО) полягає в розробці концептуального підходу, методологічних принципів і основ організаційно-технологічного проектування будівельно-ліквідаційного циклу, формування інструментарію, що дозволяє моделювати процеси конструювання і здійснювати вибір раціонально-обґрунтованих організаційно-технологічних рішень у ліквідаційній функціональній системі (ЛФС), науково-технічної підготовки та інженерного супроводу завершального етапу життєвого циклу окремих будівель, мікрорайонів «застарілого житлового фонду».

**Мета статті.** На основі аналізу проблем будівельного ліквідаційного циклу об'єкта розробити замкнуту модель системи взаємозв'язків параметрів організаційно-технологічного проектування будівельно-ліквідаційного циклу будинків і споруд, що дозволяють нормалізувати (формалізувати), типізувати і уніфікувати організаційно-технологічні та ресурсні зв'язки в модулях процесів, завдань і рішень кожного із структурних рівнів типових серій житлових будинків.

**Результати досліджень.** Сукупність параметрів і характеристик, що визначають «конструкцію», в символах теорії відображення позначимо:

$$\{K\} = \{K_1, K_2, \dots, K_n\}. \quad (1)$$

Кожен з кількісних параметрів або якісних показників повинен задовольняти відповідним вимогам проекту:

$$K_{i \min} < K_i < K_{i \max} \quad (2)$$

Підсистема - «**матеріали**» включає в себе види будівельних матеріалів, використаних для створення конструкцій, що виводиться з експлуатації, а їх елементами є окремі характеристики, змінювані або незмінні в ході будівельного технологічного процесу ліквідаційного циклу (БТПл). Сукупність фізико-механічних, вагових, геометричних і інших характеристик і параметрів позначимо:

$$\{Q\} = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_i\} \quad (3)$$

При цьому кожен з використовуваних для створення «конструкції» матеріал характеризується сукупністю параметрів:

$$Q_{i \min} < Q_i < Q_{i \max} \quad (4)$$

Для розбирання, руйнування і знесення «конструкції», частин або будівлі в цілому в залежності від їх параметрів, складності, конфігурації, положення в просторі повинна бути сформована відповідна підсистема - «**технологічний процес**», який має певну послідовність і склад простих процесів і операцій (окремих потоків), які входять до нього. Сукупність параметрів, що характеризують «процес», позначимо:

$$\{P\} = \{P_1, P_2, \dots, P_m\} \quad (5)$$

Структура комплексного технологічного процесу (спеціалізованого потоку) визначається структурою виведення з експлуатації та ліквідації «конструкції». Підсистема «технологічний процес» містить в собі можливий набір часткових потоків, в результаті виконання яких змінюється хоча б одна з характеристик вихідного матеріалу, що створює можливість роз'єднання частин, вузлів, деталей конструкцій, частини або будівлі в цілому.

Підсистема - «**технічні засоби**» різних типів і видів руйнуючих дій складається з груп однотипних або різнотипних машин, механізмів, що реалізують один або кілька складових процесів технології. В якості елементів виступають окремі марки машин і механізмів, типи і види технічних пристроїв руйнівного впливу, ланки і бригади робітників для виконання елементів технологічних процесів, що входять до складу комплексу робіт і утворюють комплексно-механізований процес об'єктного потоку БЛЦО. Для стислості назвемо його «виконавцем». Сукупність параметрів, що відносяться до «виконавця», позначимо:

$$\{M\} = \{M_1, M_2, \dots, M_k\} \quad (6)$$

Кожен з параметрів, пов'язаний з наявністю необхідної кількості робочих, машин, устаткування, технічних пристроїв, можливістю залучення їх до роботи на даному об'єкті, їх станом, може мати відповідні обмеження:

$$M_{i \min} < M_i < M_{i \max} \quad (7)$$

Таким чином, будівельна технологія і організація БЛЦО відображає сутність відносин «конструкції», «матеріалу», «процесу», «технічних засобів». Зв'язки між цими елементами і всередині їх обумовлюють модель структури технології будівельно-ліквідаційного циклу об'єкта ( $S_m$ ), що задається відображенням:

$$m_T: K \times P \times M \times Q \rightarrow S_m, \quad (8)$$

Чим сильніше організаційно-технологічний зв'язок і повніше відповідність одного елемента іншому, тим вище показники ефективності будівельного процесу БЛЦО:

$$\{E\} = \{E_1, E_2, \dots, E_n\} \quad (9)$$

При цьому показники ефективності мають проектні значення:

$$E_{i \min} < E_i < E_{i \max} \quad (10)$$

До числа проектних значень відносяться: тривалість, витрати машинного часу і праці робітників на здійснення БТПл, вартісні показники, параметри якості.

Для будівельно-ліквідаційного циклу основна особливість виробництва полягає в тому, що зв'язки між  $S_m$  і зазначеними елементами в більшості випадків ускладнені, невизначені, а іноді і взагалі відсутні. Це породжує багатофакторність вихідних даних, варіантність рішень.

Здійснення БТПл пов'язано з виконанням будівельних робіт з розбирання (демонтажу), руйнування, зносу, транспортуванню відходів та їх утилізацією на конкретному будівельному об'єкті. Цей зв'язок виражається групою параметрів і факторів, які назвемо особливостями та умовами виконання робіт (технічні, технологічні, геоекологічні, регіональні та ін.). Сукупність цих «умов і особливостей» позначимо:

$$\{T\} = \{T_0, T_1, T_2, \dots, T_n\} \quad (13)$$

де кожен з параметрів має діапазон зміни розрахункових значень:

$$T_{i \min} < T_i < T_{i \max} \quad (14)$$

Розгляд технологічної структури БТПл в конкретних умовах виробництва робіт ліквідаційного циклу на будівельному об'єкті з прив'язкою до шкали часу дозволяє ввести поняття організаційно-технологічної структури будівельно-ліквідаційного технологічного процесу (ОТСл). Модель ОТСл можна представити у вигляді:

$$m_{ОТС}: S_m \times R \times T \rightarrow S_L \quad (15)$$

або, з урахуванням виразу (8) структура будівельної технології і організації ліквідаційного циклу ( $S_L$ ) може бути представлена у вигляді:



$$m_{OTS}: K \times P \times M \times Q \times R \times T \rightarrow S_L \quad (16)$$

де:  $K$  - сукупність (безліч) властивостей параметрів і характеристик, що визначають «конструкцію»;

$P$  - технологічний процес з параметрами, які характеризують «процес»;

$M$  - сукупність (безліч) властивостей параметрів відносяться до «виконавця»;

$Q$  - сукупність фізико-механічних, вагових, геометричних та ін. характеристик і параметрів «матеріалу» конструкцій;

$R$  - сукупність групи параметрів і факторів, умов, особливостей виробництва робіт (виконавців);

$T$  - сукупність параметрів, що характеризують «час» протікання  $S_L$ .

Представлена модель має значення для розуміння сукупності технологічних і організаційних взаємозв'язків між елементами будівельних технологій ліквідаційного циклу, їх відмінності та спільності.

Побудова моделі ОТСл має проводитися на етапах проектування виведення об'єкта з експлуатації та підготовки будівельного виробництва ліквідаційного циклу в рамках проекту організації ліквідаційного циклу будівництва (після) та проекту виконання робіт (ПВРл) ліквідаційного циклу, зміст яких повинен бути орієнтований на передові технології виробництва робіт і проектування, і оформляються відповідно до вимог ДСТУ 3008:2015 або за правилами визначеними [4, 5, 6, 8, 11].

Мета моделювання ОТСл можна розглядати як кращий або заданий результат, на досягнення якого спрямовані функціонування систем ЛФС та БЛЦО. В якості цільової виступає функція змінних параметрів інтенсивності (продуктивності), тривалості, трудомісткості, вартості процесів ліквідаційного циклу об'єкта і від яких залежить досягнення параметричного критерію оптимальності (раціональної обґрунтованості).

Формування цільової функції виконується з урахуванням вихідних параметрів ЛФС об'єктів, що підлягають ліквідації і керованих змінних (керовані параметри) організаційно-технологічних та економічних рішень при відповідних обмеженнях внутрішнього середовища будинку і зовнішнього середовища інфраструктури комплексної реконструкції кварталу (мікрорайону).

Як ознаки критерію оптимальності, за яким оцінюється відповідність ЛФС і БЛЦО заданого результату при дотриманні зазначених обмежень, приймається мінімакний тип критерію оптимальності: мінімум тривалості ліквідаційного циклу будівлі за рахунок планування допустимого максимуму можливих поєднань циклів технічних і організаційно-технологічних рішень - спеціалізованих потоків (процесів) розбирання (демонтажу), руйнування і знесення конструкцій, частин і будівель в цілому, циклів транспортування, утилізації і вторинного використання матеріалів розбирання і знесення будівлі, рекультивативі порушених земель. Мінімізація параметрів тривалості ліквідаційного циклу дозволяє

скоротити тривалість впливу аварійних чи інших негативних явищ, максимально оперативно використовувати земельні площі міської інфраструктури, що звільняються для перебудови інфраструктури кварталів (мікрорайонів).

Об'єктний потік будівельного ліквідаційного циклу будівлі розглядається як організаційно-технологічний процес реалізації декількох спеціалізованих потоків в часі і просторі основних типів і видів руйнівних впливів на конструкції, зв'язки, елементи, частини та будівля в цілому, і може бути представлений у вигляді мультиграфа – системно-орієнтованої моделі замкнутого циклу взаємозв'язків параметрів: клас машин (засоби технічних пристроїв і обладнання); технології (методи, способи, типи та види руйнівних впливів); планування та організації формування інженерних рішень та ін. з вершинами  $K, O, N, Z, A, F, D, E$  (табл.1, рис.).

Таблиця 1

Елементи організаційно-технологічної моделі взаємозв'язку елементів БЛЦО

Підсистеми	Формування параметрів підсистем
K	Комплект рекомендованих машин, механізованих і роботизованих технічних пристроїв
O	Склад машин, механізмів, устаткування, засобів і оснащення що входить в комплект
N	Планувально-організаційна структура середовища територіальної інфраструктури (генплан, будгенплан та ін.)
Z	Тип, вид об'єкту, що підлягає виведенню з експлуатації та ліквідації
A	Конструктивне рішення об'єкту який підлягає ліквідації. Матеріали і взаємозв'язку елементів в просторі
F	Зовнішні та внутрішні перешкоди в умовах підсистеми N
D	Варіанти організаційно-технологічних схем залежно від виду руйнівного впливу
E	Додаткові умови, що визначають вимоги (обмеження) до застосування змісту підсистем K і O

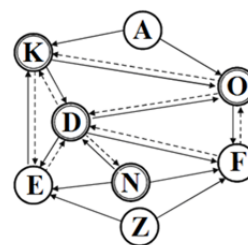


Рис. Мультиграф замкнутої моделі системи взаємозв'язків параметрів організаційно-технологічного проектування будівельно-ліквідаційного циклу будинків і споруд

Методи наочної візуалізації структури системи ЛФС дозволяють представити її у вигляді замкнутого мультиграфа організаційно-технологічної моделі взаємозв'язку елементів БЛЦО.

Формування моделі ґрунтується на «процесно-модульній» підході та принципах типових технологічних модулів (ТТМ) і організаційно-технологічних рішень (ОТР)., Тобто використання способів виробництва робіт, при яких всі технологічні операції як основні, так і допоміжні виконуються за допомогою організації комплектів взаємодоповнюючих один одного поєднань основних типів і видів машин (механізмів, технічних пристроїв і обладнання). Ув'язка машин і організаційно-технологічних моделей (ОТМ) через організаційно-технологічну схему виробництва робіт проводиться по головному робочому параметру-продуктивності, а також по основних конструктивних і інших параметрам - типам і видам руйнують (розчленовують) впливів машин і технічних пристроїв з урахуванням особливостей і обмеження процесу і універсальності нових типів машин - роботів, екскаваторів-кранів руйнівників з комплектом змінного навісного обладнання та комп'ютерно-інформаційного управління процесом.

Таблиця 2

**Основні організаційно-технологічні параметри для поточного виконання робіт БЛЦО**

Окремий потік (простий робочий процес, операція)	Спеціалізований потік (складні комплексні процеси, види робіт)	Об'єктний потік (комплекси робіт з розбирання, руйнування або ліквідації будівель, споруд, інженерних мереж, обладнання тощо)
<b>Технологічні параметри:</b>		
обсяг робіт $V_{ок};$	обсяг робіт $V_c;$	обсяг робіт $V_o$ (в наведених $m^2$ площі або $m^3$ об'єму);
тривалість $T_{ок};$	тривалість $T_c;$	період ліквідаційного циклу $T_o;$
інтенсивність $I_{ок} = \frac{V_{ок}}{T_{ок}}$	інтенсивність $I_c = \frac{V_c}{T_c}$	інтенсивність $I_o;$
трудомісткість $Q_{ок}$ машиноємність $M_{ок}$	трудомісткість $Q_c;$ машиноємність $M_c$	трудомісткість $Q_o;$ машиноємність $M_o$
<b>Комплект машин окремого потоку:</b>	<b>Комплект машин спеціалізованого потоку:</b>	<b>Комплект машин об'єктного потоку:</b>
<b>Технологічні параметри:</b>		
продуктивність $P_{ок};$	продуктивність $P_c;$	продуктивність $P_o$ основної машини в потоці;
кількість головних машин $N_{ок}$	кількість головних машин $N_{ск}$	кількість головних машин $N_{ок}$
параметри вибору машин і та їх розстановки	параметри вибору машин і та їх розстановки	параметри вибору машин і та їх розстановки

Отже, об'єктами типізації і нормалізації організаційно-технологічних рішень можуть прийматися способи виробництва роботи, комплекти машин (технічних пристроїв, обладнання руйнівного впливу та ін.) Для формування організації приватних спеціалізованих і об'єктних потоків (табл.2).

Значення варіантів параметра інтенсивності потоку (експлуатаційної продуктивності) відповідні обґрунтованості (організаційно-технологічних) рішень, можуть регулюватися в граничних величинах, параметрів, що забезпечують економічно доцільний термін тривалості ліквідаційного циклу будівель і споруд та використання ресурсу.

Поточно-послідовна (паралельна) організація виконання процесів

$$\frac{V_i}{T} \leq \varphi \frac{V_{in}}{T}$$

Послідовна організація виконання процесів

При цьому, раціональне використання загальної тривалості ліквідаційного циклу за проектними даними, тобто процесів з розбирання (демонтажу), руйнування і знесення будівель і споруд здійсненні на підставі організаційно-технологічного критерію мінімаксного типу: мінімум тривалості досягається за рахунок допустимого максимуму можливих поєднань окремих і спеціалізованих потоків в об'єктному потоці ліквідаційного циклу будівель і споруд.

Пошук рішення полягає у визначенні зони спільних рішень для будь-яких організаційно-технологічних рішень методами послідовного знаходження варіантів, які найкраще відповідають критерію оцінки поставленого завдання - забезпечення ефективної ліквідації будівельних об'єктів згідно з проектними даними.

**Висновки**

1. Взаємодія всіх учасників інвестиційно-будівельної діяльності при проектуванні інженерної підготовки виведення з експлуатації та ліквідації об'єкта, виробництві будівельних робіт ліквідаційного циклу може бути ефективним в разі, якщо воно базується на методологічних принципах і засадах нормалізації організаційно-технологічного процесу і використанні єдиної інформаційної моделі об'єкта.

2. Відповідно до модульної побудови структури типових серій житлових будинків та принципів нормалізації будівельних процесів (об'єктного потоку) ліквідаційного циклу може бути розроблений комплекс моделей, що дозволяють нормалізувати (формалізувати), типізувати і уніфікувати організаційно-технологічні та ресурсні зв'язки в модулях процесів, завдань і рішень кожного із структурних рівнів типових серій житлових будинків.

**Література**

1. Абарыков В.П. Оптимизация системы проектирования в строительстве/ Абарыков В.П. –М.: Грааль, 2000. – 317 с.
2. Гусакова Е.А. Системотехника организации жизненного цикла объекта строительства / Гусакова Е.А. – М.: Фонд Новое тысячелетие, 2004. - 256 с.
3. Кірнос В.М. Ліквідаційний цикл: організаційно-технологічні аспекти розбирання, руйнування і знесення об'єктів будівництва / Кірнос В.М., Уваров П.С., Кравчуновська Т.С та ін. // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. научн. трудов. – Днепропетровск: ПГАСА, 2008.–Вип. 47. – С. 305-312.

4. Олейник П.П. Разборка жилых зданий и переработка их конструкций и материалов для повторного использования / Колосков В.Н., Олейник П.П., Тихонов В.П. –М.: АСВ, 2004. - 200с.
5. Уваров П.Е.. Системи технологій життєвого циклу інвестиційно-будівельної діяльності: Навчальний посібник./ Уваров П.Е., Тянь Р.Б., Шпарбер, М.Е., і др. – Дніпропетровськ: Вид-во «Маковецький», 2010. – 344 с. –ISBN 978-966-1507-44-8
6. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Науково-технічний супровід будівельних об'єктів (ДБН В.1.2-5:2007). –Офіц. вид. — К.: Укрархбудінформ: Мінрегіонбуд України, 2007. – 14 с.
7. Дамаскин Б.С. Рекомендации з вибору прогресивних архітектурно-технічних рішень для реконструкції житлових будинків різних конструктивних систем./ Меняйло В.А., Дамаскин Б.С. –К.: Нора-Принт, 2001. -262 с.
8. Олейник С.П. Единая система переработки строительных отходов / Олейник С.П. –М.: SvR-Аргус, 2006. - 336 с.
9. Закон України. "Про комплексну реконструкцію кварталів (мікрорайонів) застарілого житлового фонду" № 525-V від 22.12.06.
10. Теличенко В.И. Системотехнические основы проектирования строительных технологий // Системотехника /Под редакцией А.А. Гусакова . –М.: Фонд «Новое тысячелетие», 2002. – С.353-375
11. Теличенко В.И. Гибкие строительные технологии строительного производства // Энциклопедический словарь /Под редакцией А.А. Гусакова. –М.: АСВ , 2004. –С. 269-270
12. Уваров Е.П. Теория циклов и закономерности формирования и управления проектами по упреждению и ликвидации аварий / Е.П.Уваров, В.М. Киринос, Р.Б. Тянь // Материалы первой Всеукраинской конференции "Аварии на будівлях і спорудах та їх попередження". – К.: АСУ НИИСК, –1997. -С. 31-38 .
8. Oleynik S.P. Edinaya sistema pererabotki stroitelnyih othodov / Oleynik S.P. –M.: SvR-Argus, 2006. - 336 s.
9. Zakon UkraYini. "Pro kompleksnu rekonstruktsiyu kvartaliv (mlkrorayoniv) zastarilogo zhitlovogo fondu" # 525-V vld 22.12.06.
10. Telichenko V.I. Sistemotekhnicheskie osnovy proektirovaniya stroitelnyih tehnologiy // Sistemotekhnika /Pod redaktsiyey A.A. Gusakova . –M.: Fond «Novoe tyisyachiletie», 2002. – S.353-375
11. Telichenko V.I. Gibkie stroitelnyie tehnologii stroitel'nogo proizvodstva // Entsiklopedicheskiy slovar /Pod redaktsiyey A.A. Gusakova. –M.: ASV , 2004. –S. 269-270
12. Uvarov E.P. Teoriya tsiklov i zakonomernosti formirovaniya i upravleniya proektami po uprezhdeniyu i likvidatsii avariyy / E.P.Uvarov, V.M. Kirnos, R.B. Tyan // Materialy pervoy Vseukrainskoy konferentsii "AvariYi na budivlyah I sporudah ta Yih poperedzhennya". – K.: ASU NIISK, –1997. -S. 31-38 .

**Уваров П.Е., Татарченко Г.О., Шпарбер М.Е. Ликвидационный цикл объекта инвестиционно-строительной деятельности. Особенности организационно-технологического проектирования.**

*Рассмотрены особенности и методические основы проектирования технологии и форм организации строительного ликвидационного цикла типовых серий жилых домов. Приведены системный подход к формированию необходимых параметров и показателей структуры комплексного технологического процесса разборки, разрушения и сноса объекта. Сформирован мультиграф замкнутой модели взаимосвязей параметров организационно-технологических решений строительного ликвидационного цикла.*

**Ключевые слова:** ликвидационный цикл объекта; ликвидационно-функциональная система; организационно-технологическое проектирование

**Uvarov P.E., Tatarchenko G.O., Shparber M.E. Liquidation cycle of object of investment and building activities. Features of organizational and technological design.**

*The features and methodological foundations of technology design and forms of organization of the construction liquidation cycle of model series of residential houses are considered. A systematic approach to the formation of the necessary parameters and indicators of the structure of the integrated technological process of disassembly, destruction and demolition of the object is presented. A multigraph of a closed model of interrelationships of parameters of organizational and technological solutions of a construction liquidation cycle has been formed.*

**Keywords:** object liquidation cycle; liquidation and functional system; organizational and technological design

**Татарченко Г.О.** – д.т.н., професор, завідувач кафедри «Будівництва, урбаністики та просторового планування» Східноукраїнський національний університет ім. Володимира Даля, E-mail: tatarchenkogalina@gmail.com.

**Уваров П.Е.** – к.т.н., доцент кафедри «Будівництва, урбаністики та просторового планування» Східноукраїнський національний університет ім. Володимира Даля, E-mail: budivelnik\_caf@ukr.net

**Шпарбер М.С.** – старший викладач кафедри «Будівництва, урбаністики та просторового планування» Східноукраїнський національний університет ім. Володимира Даля, E-mail: shparber\_m@ukr.net

*Рецензент:* д.т.н., проф. **Суворін О. В.**

Стаття подана 17.12.2018.

### References

1. Abaryikov V.P. Optimizatsiya sistemyi proektirovaniya v stroitelstve / Abaryikov V.P. –M.: Graal, 2000. – 317 s.
2. Gusakova E.A. Sistemotekhnika organizatsii zhiznennogo tsikla ob'ekta stroitelstva / Gusakova E.A. – M.: Fond Novoe tyisyacheletie, 2004. - 256 s.
3. Kirnos V.M. Likvidatsiyinyi tsikl: organizatsiynotekhnologichni aspekti rozbirannya, ruynuvannya i znesennya ob'ektiv budivnitstva / Kirnos V.M., Kravchunovska T.S., Barinov D.Yu., Uvarov P.E. // Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie : sb. nauchn. trudov. –Dnepropetrovsk: PGASA, 2008.–Vip. 47. – S. 305-312.
4. Oleynik P.P. Razborka zhilyih zdaniy i pererabotka ih konstruktsiy i materialov dlya povtornogo ispolzovaniya / Koloskov V.N., Oleynik P.P., Tihonov V.P. –M.: ASV, 2004. - 200s.
5. Uvarov P.E., Tyan R.B., Shparber, M.E., i dr. Sistemi tehnologii zhitt'evogo tsiklu Investitsiyno-budivelnioi diyalnosti: Navchalniy posibnik./ Uvarov P.E., Shparber, M.E. i dr. – Dnipro-petrovsk: Vid-vo «Makovetskiy», 2010. – 344 s.
6. Sistema zabezpechennya nadlynostf ta bezpeki budivelnih ob'ektiv. Naukovo-tehlichniy suprovld budivelnih ob'ektiv (DBN V.1.2-5:2007). –Ofits. vid. — K.: Ukrarhbudinform: MInreglonbud UkraYini, 2007. – 14 s.
7. Damaskin B.S. Rekomendatsiyi z voboru progresivnih arhitekturno-tehlichnih rishen dlya rekonstruktsiyi zhitlovih budinkiv rlnih konstruktivnih sistem./ Menyaylo V.A., Damaskin B.S., Necheporchuk A.A.. –K.: Nora-Print, 2001. -262 s.



УДК: 621.336

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА СКОЛЬЗЯЩЕГО КОНТАКТА «КОНТАКТНЫЙ ПРОВОД – ВСТАВКА ТОКОПРИЕМНИКА» НА ЕГО РЕСУРС

Устименко Д.В., Муха А.Н.

## ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE TEMPERATURE OF THE HEATING OF THE SLIDING CONTACT «CONTACT WIRE - INSERT OF CURRENT» ON ITS RESOURCE

Ustymenko D., Mukha A.

*В статье рассматривается вопрос сохранения работоспособности и ресурса электрического скользящего контакта «контактный провод – вставка токоприемника». Приведенные результаты стендовых испытаний электрического скользящего контакта, образованного медным контактным проводом МФ-100 и различными типами контактных вставок, на основе которых четко прослеживается зависимость температуры зоны контакта и его износа. Полученные результаты могут быть использованы для получения прогнозной модели скользящего контакта.*

**Ключевые слова:** контактный провод, прочность, термостойкость, стендовые испытания, износ

**Вступление.** В наземном электрическом транспорте очень распространенной схемой передачи энергии на борт есть применение силового скользящего контакта. Данный тип контактов состоит из контактного провода и токосъемных элементов, установленных на полозах токоприемников электроподвижного состава. Условия работы скользящего силового контакта являются особенно сложными и характеризуются широким диапазоном температур окружающей среды, наличием осадков в виде дождя и снега, отложений гололеда и изморози, загазованностью окружающей атмосферы и т.д.

Провода, используемые для контактной сети, при изготовлении протягивают в холодном состоянии, что приводит к увеличению временного сопротивления разрыву и уменьшению пластичности [1]. При нагревании провод утрачивает эти качества и тем больше, чем выше температура и время ее воздействия. Потеря прочностных качеств так или иначе связана со сроком службы контактного провода. Поэтому в соответствии с нормами [2] температура проводов контактной сети в самых неблагоприятных

условиях не должна превышать предельно допустимого значения.

Решению проблемы повышения эксплуатационных свойств контактных проводов и вставок токоприемников уделяется достаточного много внимания. Свойства любого электрического контакта определяются: величиной площади контакта, качеством контактной поверхности и контактным давлением. Из литературы известно [3], что фактическая площадь контакта составляет незначительную долю видимой площади соприкосновения. Таким образом, дискретный характер соприкосновения твердых тел является основной причиной повышенного электрического сопротивления между контактирующими плоскостями. Одна из особенностей скользящего электрического контакта «контактный провод – вставка токоприемника» состоит в относительно больших величинах токов при довольно малых силах контактного нажатия. Все вместе приводит к выделению большого количества тепла в областях соприкосновения [4, 5]. Что в свою очередь вызывает различного рода деградации: рекристаллизационный отжиг, размягчение металла, плавление, кипение и дугообразование.

В ряде работ показана низкая термостойкость безстыковых медных контактных проводов и потеря ими механических свойств уже при температурах 100°C и выше, и как решение предлагается использовать контактные провода, изготовленные из магниево-бронзы [6, 7]. Для улучшения качества токосъема предлагается также увеличивать натяжение контактного провода (до 20...30 кН), без снижения их износо- и термостойкости, и повышения электрического сопротивления, что может быть достигнуто легированием материала проводов или переходом на биметаллические контактные провода [8].

Кроме того, позитивный эффект может дать использование в качестве материала вставок токоприемников электропроводных композитов, обладающих эффектом самосмазывания и образующих в процессе работы на поверхности контактного провода тонкую защитную токопроводящую пленку [9].

**Целью работы** является анализ причин и факторов, приводящих к повышенному нагреву скользящего контакта «контактный провод – вставка токоприемника», а также их влияния на работоспособность и ресурс данного узла.

#### Изложение основного материала.

Считается, что износ контактных вставок токоприемников и контактного провода состоит из механической и электрической составляющих [3]. На сегодня детально рассмотрен широкий круг моделей трибологических систем (трение без передачи электрического тока) и разработана система показателей контактного взаимодействия, а также методов их определения. Введены геометрические характеристики поверхностей – макроотклонения, волнистость, шероховатость, субмикрошероховатость; характеристики площадей касания – видимая, контурная, фактическая; типы контактов – упругий, упруго-пластичный, пластичный и т.д. Учет же электрической составляющей во много зависит от определения фактической площади контакта и его переходного электрического сопротивления. Теоретическое решение задачи о фактической площади касания реальных поверхностей весьма затруднительно, поэтому широкое распространение при определении сопротивления электрических скользящих контактов твердых тел получили экспериментальные методы.

Известно, что повышение температуры приводит к ухудшению механических свойств проводниковых материалов (рис. 1), изменение которых сильно зависит от продолжительности нагрева [10]. Медленный (в течении 2 часов) нагрев твердотянутой меди (кривая 2) приводит к резкому уменьшению предела прочности на растяжение  $\sigma_{м.рас}$  при более низкой температуре, чем при их кратковременном (в течении 10 секунд) нагреве (кривая 1). Медленный нагрев твердотянутого медного стержня диаметром 50 мм (кривая 3) приводит к рекристаллизации стержня в зоне  $T=200^{\circ}\text{C}$  и далее к быстрому уменьшению его прочности до уровня прочности такого же стержня из мягкой меди (кривая 4) в зоне  $T=300^{\circ}\text{C}$ .

Величина энергии, выделяемая в контактной паре «контактный провод – вставка токоприемника» может быть определена следующим образом:

$$W = W_m + W_э, \quad (1)$$

где  $W_m$  – механическая составляющая выделяемой в скользящем электрическом контакте энергии, Дж;

$W_э$  – электрическая составляющая выделяемой в скользящем электрическом контакте энергии, Дж;

$$W_m = \mu F V t, \quad (2)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения;

$F$  – контактное нажатие, Н;

$V$  – скорость движения контактной вставки относительно контактного провода, м/с;

$t$  – время прохождения тока через скользящий контакт, с.

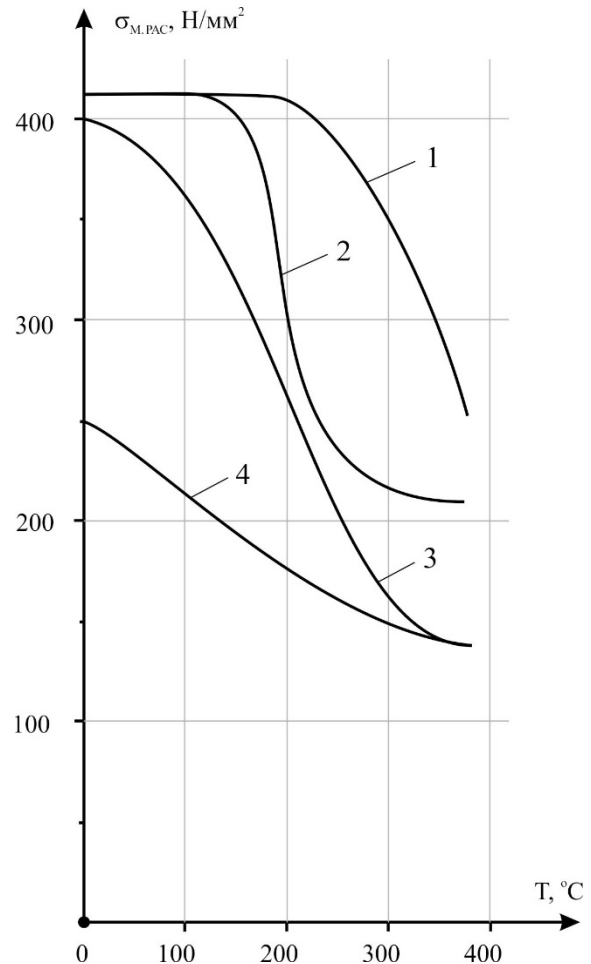


Рис. 1. Изменение механических свойств проводниковых материалов в зависимости от температуры и времени нагрева – для твердотянутой медной проволоки при ее быстром (1) и медленном (2) нагреве; 3 – для твердотянутого медного стержня диаметром 50 мм при медленном нагреве; 4 – то же для стержня из мягкой меди

При движении токоприемника точка контакта постоянно перемещается в пространстве со скоростью движения локомотива, поэтому для описания процессов, происходящих в движении, рассматривается часть контактного провода длиной равной ширине токосъемной пластины.

$$W_э = I^2 R t, \quad (3)$$

где  $I$  – сила тока, протекающего через скользящий электрический контакт, А;

$R$  – сопротивление контактной пары, Ом.

Сопротивление контактной пары является функцией температуры и зависит от времени постольку, поскольку температура контактного провода в неустановившемся режиме есть функция времени.

В условиях отраслевой научно-исследовательской лаборатории «Унификация и надежность электрооборудования подвижного состава» ДНУЖТ им. академика В. Лазаряна были проведены стендовые испытания контактной пары «контактный провод – вставка токоприемника» на износ с одновременным контролем температуры в зоне скользящего контакта, результаты представлены в табл.

Таблица

**Результаты стендовых испытаний скользящего контакта «контактный провод – вставка токоприемника» со вставками различного типа**

Тип контактной вставки	Установившееся значение температуры T, °C	Средний износ контактного провода, мм	Состояние поверхности контактного провода
РОМАНИТ-УВЛШ	35...45	0,01	Равномерный износ без видимых повреждений и задиrow
ВЖ-3П (со свинцовой пропиткой)	45...75	0,027	Равномерный износ без видимых повреждений и задиrow
ГЛОРΙΑ	360*	0,1356	Борозды и многочисленные задиrow, следы побелостей в результате действия значительной температуры
Графит тип А	220...230	0,0515	Имеет задиrow и видимые повреждения, изменения цвета
Графит тип Б	150...160	0,059	Имеет задиrow и видимые повреждения

\* – температура превысила пределы измерения тепловизора

Стендовые испытания проводились на кольце эллипсовидной формы, которое изготавливается из медного контактного провода МФ-100 ГОСТ 2584 [2]. При этом с контактным проводом взаимодействует два образца, которые изготавливаются из вставки соответствующего типа длиной 80±2 мм и шириной 30±1 мм каждая, что удовлетворяет требованиям ГОСТ 32680 [11].

Условия проведения стендовых испытаний:

- ток 300 А;
- линейная скорость в скользящем контакте 4,83 м/с (поддерживается автоматически);
- имитируется 10000 проходов вставки по контактному проводу;
- контактное нажатие 40 Н.

В процессе проведения испытаний при помощи тепловизора Testo 875 регистрируется температура в зоне контакта (рис. 2).

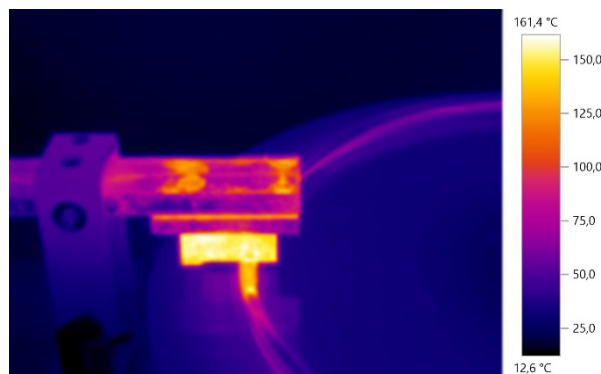


Рис. 2. Термограмма зоны скользящего контакта

При этом такие термограммы объекта регистрируются с заданной периодичностью. Анализируя полученные данные при помощи программного обеспечения IrSoft строят кривые нагревания элементов скользящего контакта (рис. 3).

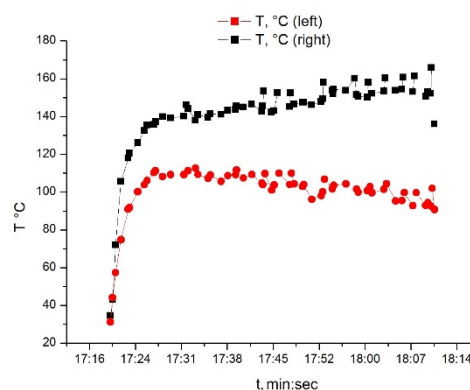


Рис. 3. Кривая нагревания скользящего контакта

Результаты, приведенные в табл. 1 позволяют установить связь между температурой скользящего контакта и износом: более высокая температура, являясь следствием большего переходного сопротивления контакта есть тем ключевым фактором, который определяет работоспособность и ресурс данного узла. Для того чтобы ответить на вопрос о ресурсе и работоспособности не только качественно, но и количественно потребуются ввести некий интегральный показатель, отражающий как механические, так и электрические факторы, действующие в контакте. Используя который можно построить прогнозную модель для электрического скользящего контакта «контактный провод – вставка токоприемника».

**Выводы**

По результатам стендовых испытаний установлено, что переходное омическое сопротивление электрического скользящего контакта «контактный провод – вставка токоприемника» его температура и

износ взаимосвязаны. Наибольшая температура в зоне контакта наблюдалась графитовыми вставками, причем ее величина значительно превосходит предельно допустимую для контактного провода. В результате действия высоких температур материал контактного провода теряет свои механические свойства, что отрицательно сказывается на его ресурсе.

Значительно лучше себя показали более современные материалы, применение самосмазывающихся материалов с низким удельным электрическим сопротивлением и низким коэффициентом трения позволило удержать температуру контакта на достаточно низком уровне износ контактного провода при этом также оказался минимальным.

Полученные результаты при соответствующей математической обработке могут быть положены в основу прогнозной модели для электрического скользящего контакта такого типа.

#### Л и т е р а т у р а

1. Марквардт К.Г. Учебник для вузов ж.-д. транспорта: Контактная сеть. / К. Г. Марквардт, 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1994. – 335с.
2. Провода контактные из меди и ее сплавов. Технические условия: ГОСТ 2584-86. – [действует от 1988-01-01]. – М.: ИПК изд. стандартов, 1998. – 9с. – (Межгосударственный стандарт).
3. Хольм Р. Электрические контакты. М.: Изд-во иностр. лит., 1961. 464 с.
4. Паранин А. В. Экспериментальное исследование работы электрического контакта «контактный провод – токосъемная пластина» в статическом положении / А. В. Паранин Н. А. Акиншин, А. Б. Батрашов // Транспорт Урала. – 2013. – №4(39). С. 93–96.
5. Baliichuk O. Y. Influence of contactor contact pressure in power circuits of electric stock on their plastic deformation and fusing / O. Y. Baliichuk, L. V. Dubynets, O. L. Marenych, D. V. Ustymenko. Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. 2017. – №2 (68). С. 81–91.
6. Берент В.Я. Совершенствование проводов контактной сети // Вестник ВНИИЖТ. – 2012. – Вып. 3. С. 40-45.
7. Гершман И. С., Миронос Н. В. Требования к контактными проводам для высокоскоростного железнодорожного транспорта // Вестник ВНИИЖТ. – 2011. – №3. С. 13–17.
8. Яндович В. Н. Сравнительный анализ контактных подвесок в странах Евросоюза и Украины: организация надежного токосъема / В. Н. Яндович, В. Г. Сыченко, А. В. Антонов // Электрифікація транспорту. – 2014. – № 7. С. 67–77.
9. Ustymenko D. V. Physico-technological aspects of work of lubricant films in the tribosystem «overhead line – current collector contact strip» // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. 2018. – №3 (75). С. 78–86.
10. Теория электрических аппаратов: Учебник для вузов / Г.Н. Александров, В.В. Борисов, Г.С. Каплан и др.; под ред. проф. Г.Н. Александрова. 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Изд-во СПбГТУ/ – 2000. 540с.
11. Токосъемные элементы контактные токоприемников электроподвижного состава. Общие технические усло-

вия: ГОСТ 32680-2014. – [действует от 2015-09-01]. – М.: Стандартинформ, 2016. – 16с. – (Межгосударственный стандарт).

#### R e f e r e n c e s

1. Markvardt K.G. Uchebnik dlya vuzov zh.-d. transporta: Kontaktnaya set'. / K. G. Markvardt. 4-e izd., pe-rerab. i dop. – М.: Transport, 1994. – 335s.
2. Provoda kontaktnye iz medi i ee splavov. Tekhni-cheskie usloviya: GOST 2584-86. – М.: IPK izd. standartov, 1998. – 9s.
3. Khol'm R. Elektricheskie kontakty. / R. Khol'm – М.: Inostrannaya literatura Publ., 1961. – 480 p.
4. Paraniin A. V. Eksperimentalnoe issleovanie raboty elektricheskogo kontakta «kontaktniy provod – tokosyemnaya plastina» v staticheskom polozhenii / A. V. Paraniin, N. A. Akinshin, A. B. Batrashov // Transport Urala. 2013. № 4 (39). – P. 93–96.
5. Baliichuk O. Y. Influence of contactor contact pressure in power circuits of electric stock on their plastic deformation and fusing / O. Y. Baliichuk, L. V. Dubynets, O. L. Marenych, D. V. Ustymenko. Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universitetu zaliznichnogo transportu. 2017. – №2 (68). С. 81–91.
6. Berent V.YA. Sovershenstvovanie provodov kontakt-noj seti // Vestnik VNIIZHT. – 2012. – Vyp. 3. P. 40-45.
7. Gershman I. S., Mironos N. V. Trebovaniya k kontaktnym provodam dlya vysokoskorostnogo zhelezno-dorozhnogo transporta // Vestnik VNIIZHT. – 2011. – №3. S. 13–17.
8. YAndovich V. N. Sravnitel'nyj analiz kontaktnyh podvesok v stranah Evrosoyuza i Ukrainy: organi-zaciya nadezhnogo tokos"ema / V. N. YAndovich, V. G. Sychenko, A. V. Antonov // Elektrifikaciya trans-portu. – 2014. – № 7. S. 67–77.
9. Ustymenko D. V. Physico-technological aspects of work of lubricant films in the tribosystem «overhead line – current collector contact strip» // Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universitetu zaliznichnogo transportu. 2018. – №3 (75). С. 78–86.
10. Teoriya ehlektricheskikh apparatov: Uchebnik dlya vu-zov / G.N. Aleksandrov, V.V. Borisov, G.S. Kaplan i dr.; pod red. prof. G.N. Aleksandrova. 2-e izd., pe-rerab. i dop. – SPb.: Izd-vo SPbGTU/ – 2000. 540s.
11. Tokosemnye elementy kontaktnye tokopriemnikov elektropodvizhnogo sostava. Obshchie tekhnicheskie usloviya: GOST 32680-2014. – М.: Standartinform, 2016. – 16 s.

**Устименко Д.В., Муха А.Н. Аналіз впливу температури нагрівання ковзного контакту «контактний провід – вставка струмоприймача» на його ресурс.**

*В статті розглядається питання збереження працездатності та ресурсу електричного ковзного контакту «контактний провід – вставка струмоприймача». Наведені результати стендових випробувань електричного ковзного контакту утвореного мідним контактним проводом МФ-100 та різними типами контактних вставок, на основі яких чітко просліджується залежність температури зони контакту і його зносу. Отримані результати можуть бути використаними для отримання прогновної моделі ковзного контакту.*

**Ключові слова:** контактний провід, міцність, термостійкість, стендові випробування, знос.

**Ustymenko D.V., Mukha A.M. Analysis of the effect of the temperature of the heating of the sliding contact «contact wire – insert of current» on its resource.**

*The article discusses the issue of preserving the working capacity and resource of the electrical sliding contact «contact wire - insert current collector». The results of bench testing of an electric sliding contact, formed by the MF-100 copper contact wire and various types of contact inserts, on the basis of which the dependence of the contact zone temperature and its wear is clearly traced. The results can be used to obtain a predictive model of a sliding contact.*

**Keywords:** contact wire, strength, thermal stability, bench testing, wear

**Устименко Д.В.** – к.т.н., доцент, докторант кафедри «Електротехніка та електромеханіка» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна, e-mail: [ustimenko.1979@gmail.com](mailto:ustimenko.1979@gmail.com)  
**Муха А.М.** – д.т.н., професор, завідувач кафедри «Електротехніка та електромеханіка» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна, e-mail: [mukha.andrii@gmail.com](mailto:mukha.andrii@gmail.com)

*Рецензент:* д.т.н., проф. **Чернецька-Білецька Н.Б.**

Стаття подана: 11.11.2018.

УДК 334.758

## НЕЕФЕКТИВНІСТЬ ЕКСПОРТУ ПРОДУКЦІЇ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНИХ КОМБІНАТІВ УКРАЇНИ

Федорова Ю.В.

## INEFFICIENCY OF EXPORT OF MINERAL-CONTAINING COMBINATES OF UKRAINE

Fedorova Y.

*Стаття присвячена проблемам неефективного використання сировинних ресурсів України. Доведено на прикладі діяльності провідного гірничо-збагачувального комбінату дію закону спадаючої віддачі. Підкреслено, що збільшення добутку та експорту залізорудної сировини призводить до неефективного її використання, зумовлює втрату можливостей розвитку вітчизняного машинобудування і не сприяє економічному та інноваційному піднесенню країни. Наголошено на необхідності зміцнення вектору українського експорту у бік продукції з більшою доданою вартістю, тобто заміщені металургійної сировини товарами машинобудівного виробництва.*

**Ключові слова:** гірничо-збагачувальний комбінат, експорт сировини, спадаюча віддача

**Вступ.** Сучасні дослідження технологічного розвитку України свідчать про подальший розвиток вітчизняної економіки в руслі експортно-сировинної моделі, спостерігається переривання технологічного ланцюжка у циклі металургійно-машинобудівного виробництва, що призводить до неефективного використання сировинного запасу країни. Збільшення виробництва, що засноване на природних ресурсах, веде до спадаючої віддачі і тому до збіднення країни в цілому. Історична та сучасна світова практика доводить, що країна може вирішити проблеми економічної відсталості лише шляхом індустріалізації та захисту виробництв з більшою інноваційною складовою.

**Постановка проблеми.** Незважаючи на призначення думки провідних вчених історичної школи захисту вітчизняного виробництва, українські олігархи продовжують збільшувати експорт сировини, що призводить до неефективного використання природних ресурсів, які не відновлюються. Тому ми вирішили проілюструвати справедливість думки сучасного економіста розвинутої країни Е.Раймонта та збагатити праці провідних українських науковців,

що стоять на захисті національних інтересів, яскравим прикладом неефективного використання української залізної руди на прикладі одного з провідних гірничо-збагачувальних комбінатів України.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанням підвищення ефективності промислового комплексу країни, інноваційному розвитку його галузей присвячували роботу відомі вчені М. Кейнс (Кейнс, 1936), Ф. Ліст, (Ліст, 1891), Й. Шумпетер (Шумпетер, 1942), А. Маршал (Маршал, 1890), пізніше Е. Райнерт (Райнерт, 2008). Цю проблему також досліджували українські вчені: Ансофф І., Булеєв І., Богачев С., Масленнікова Н., Мельникова М.В., Федулова Л.

Не дивлячись на значну кількість досліджень, присвячених даній проблемі, деякі питання залишаються недостатньо висвітленими. На наш погляд важливо доповнити дослідження провідних науковців яскравим прикладом неефективного використання сировинного ресурсу України в умовах інтеграції до світового простору за нижчими технологічними укладами.

**Метою статті** є доведення тези, що збільшення обсягів експорту залізорудної сировини гірничо-збагачувальними комплексами призводить до збіднення України та втрати унікальної можливості надати системність економіці за рахунок збільшення виробництва машинобудівної продукції з більшою доданою вартістю.

**Результати досліджень.** Цікавим дослідженням в області нерівномірного розвитку країн у процесі сучасної глобалізації збагатив відомий норвезький економіст Е.Райнерт. У традиціях Гарвардської школи бізнесу він дослідив це питання методом ситуаційного дослідження. На відміну від стандартної науки, яка бачить економічні процеси через призму методологічних та математичних лінз та ігнорує факти реального життя, цей підхід ґрунтується на історичних дослідженнях та збирає фактичні докази.

Автор дослідив еволюцію економічної та політичної думки за останні 500 років на підставі більш ніж 50 тис. томів літературних джерел. Основна ідея його книги «Як багаті країни забагатіли... і чому бідні країни лишаються бідними...» [1] полягає в тому, що економічний розвиток країни залежить від видів її діяльності. Саме промисловість автор відносить до виду діяльності зі зростаючою віддачею. На його думку, від видів виробництва залежить весь економічний устрій країни, а згодом і інститути, і навіть менталітет населення країни. Фундаментом цієї думки стали ідеї А. Маршалла, який дослідив різницю у здатності до відновлення між галузями зі зростаючою та спадаючою віддачею.

Види діяльності зі спадаючою віддачею характеризуються залежністю від природних факторів та обмеженою можливістю до диверсифікації, дифузії, синергетичного ефекту у суміжних галузях. Якщо хоч один з ресурсів має природне походження, то при розширенні виробництва за певними межами масштабів, продуктивність починає спадати. Так, при нарощуванні обробляючої сільськогосподарської техніки та збільшення кількості робітників у полі буде досягнута така межа, коли продуктивність кожної одиниці техніки або робітника почне спадати. В умовах досконалої конкуренції інновації як правило ведуть до зменшення ціни виробу, а не збільшення доходів виробника. Е. Райнерт зазначає: "країни, що поставляють сировину іншим країнам, рано чи пізно дійде до ситуації, коли віддача від їх діяльності стане спадаючою. Закон спадаючої віддачі наголошує, що у видах діяльності, що залежать від природних факторів, наприклад, у здобичі корисних копалин, рано чи пізно збільшення вкладень капіталу і праці призведе до тенденції збіднення, через зменшення кількості продукції на одиницю вкладеної праці або капіталу" [1].

У видах діяльності зі зростаючою віддачею, навпаки, з ростом обсягів виробництва витрати не збільшуються, а зменшуються. Наприклад, питомі витрати на мобільний зв'язок зменшуються зі збільшенням користувачів мережею. Цим видам діяльності притаманна недосконала конкуренція, існування бар'єрів входу на ринок. В таких видах діяльності немає активів, які залежать від природи, обмежених за кількістю або якістю. Для цих галузей важливо розширювати ринку збуту. Тому розвинуті країни, у яких завжди переважають види діяльності зі зростаючою віддачею, прагнуть до політики максимальної відкритості економік країни та до глобалізації в цілому.

Торгівля між рівними за видами діяльності країнами завжди вигідна обом сторонам. Та ось у разі «несиметричної» торгівлі, експорт багатих країн розвиває їх економіку, збільшує віддачу, а традиційний експорт бідних країн, навпаки, призводить до шкідливих для економіки наслідків. Ця ідея бере початок у працях Ф. Ліста [2]. У статті ми проілюструємо наслідки, здавалося б позитивної тенденції збільшення експорту залізничної сировини на прикладі одного з вітчизняних гірничо-збагачувальних комбінатів.

Та перед тим підкреслимо, що специфікою розвитку нашої країни є переважний розвиток низьких технологічних укладів, кінцева продукція яких характеризується незначною доданою вартістю. Так, металургійна галузь України відноситься до базових галузей національної економіки. Без металургії неможливий розвиток будівництва, транспорту, важкого машинобудування, а тому і науково-технічний прогрес у цих галузях. Металургія забезпечує понад 40% валютних надходжень країни. При цьому більшу частину в ній займає експорт сировини. Україна збільшує видобування корисних копалин при зменшенні виготовлення сталі та прокату, незначному збільшенні виробництва чавуну та труб, що свідчить про експортну орієнтацію вітчизняних металургії. В Україні переважає виробництво III та IV технологічних укладів, у той час, як усі розвинуті країни мають за основний V і розвивають VI технологічний уклад. У період стрімкого інноваційного розвитку, вільної міжнародної торгівлі та глобалізації це фактичне означає, що Україна свідомо займає нішу сировинних придатків.

Одна з причин невігідного позиціонування на світовому просторі, на наш погляд, зумовлена природними умовами. Наявність залізничних родовищ стала так званою пасткою на шляху інноваційного розвитку України. Можливість експортувати сировину зумовила переривання технологічного ланцюжку виробництва продукції з більш доданою вартістю [3]. Ця думка відображена у дослідженнях С. Гурієва [4], К. Соніна [5], Е. Райнерт [1] та інших.

Лобювання інтересів металургії також порушує рівновагу у структурі промислового виробництва. Так, Касьянова Н.В. [6] зазначає, що частка податків на машинобудування, яка формує споживчі ціни, в 2–3, 4, 7 рази перевищує частку податків металургії та обробки металу.

Другою причиною експортної спрямованості розвитку чорної металургії став недостатній попит на металопродукцію на внутрішньому ринку. Основними ринками збуту країн, найбільших виробників сталі, є їх внутрішні ринки. Венрег В.В. зазначає, що «Серед одинадцяти найбільших країн – виробників сталі Україна чи не єдина держава у світі, підприємства якої майже 80% виробленої металопродукції експортують і лише трохи більше 20% – реалізують на внутрішньому ринку» [7, С. 79]. Відповідно до світової практики споживання сталі за даними World Steel Association автор наголошує на наявності внутрішнього потенціалу споживання сталі за рахунок будівництва, машинобудування, автомобілебудування та металообробної галузі. Структурні перетворення неможливо здійснити без активної державної підтримки. Тому автори розробили пропозицію щодо розробки Державної програми модернізації та розвитку металургійної галузі України до 2027 року, яка має спиратися на пріоритети концепції неоіндустріалізації, в основі якої поставлено: власні ресурси; нові технології; активний внутрішній попит [7, С. 81].

Експортна орієнтація країни як стратегія потребує глибоких структурних змін галузевої структу-

ри, в якій металургія нарешті має поступитись місцем іншим високотехнологічним галузям. На жаль, аналіз кількісних та якісних складових економічного зростання свідчить, що, розвиток України повторно відтворюється у руслі експортно-сировинної моделі на основі кількісної складової економічного зростання. О. Пустовойт [8] дослідив вектор розвитку економіки України згідно зі Стратегією економічного та соціального розвитку України (2004-2015 рр.) «Шляхом європейської інтеграції» і зазначив, що чинники зростання ВВП у 2002-2004 рр. кардинально протилежні тим, які передбачалися за базовим сценарієм Стратегії. Є.В. Пономаренко [9] дослідив основні напрями здійснення промислової політики в 1996–2014 рр. та виявив проблеми й диспропорції у розвитку провідних галузей промисловості держави.

Ще учень Й. Шумпетера Ханс Зінгер продемонстрував, що «інновації, що з'являються у сировинних секторах країн третього світу, мають тенденцію до розповсюдження в країнах першого світу у вигляді зниження цін, у той час, як інноваційні продукти, що створюються в країнах першого світу розповсюджуються у вигляді більш високих заробітних плат громадян країн першого світу» [1]. Доведемо першу половину тези на прикладі одного з вітчизняних гірничо-збагачувальних комбінатів.

Полтавський ГЗК (нині Ferrexpo Poltava Mining, FPM, ПГЗК, що входить до Ferrexpo) більше 40 років займається добуванням та переробкою залізородної руди високої якості, є експортером залізородних обкотишів з 65% вмістом заліза. База - одне з найкрупніших родовищ залізної руди у Європі з приблизно 20 млрд. тонн ресурсів. У 1992 р. відбулася приватизація підприємства і згодом підприємство, яке побудувало молодь нового міста, стало активом швейцарської залізородної компанії Ferrexpo. Сьогодні Ferrexpo plc володіє 100% акцій Ferrexpo AG, якій, у свою чергу, належить 99,11% акцій Полтавського ГЗК, 100% Єриствіського ГЗК та 99,9% Біланівського ГЗК. Група Ferrexpo є найбільшим виробником та експортером обкотишів серед країн колишнього СРСР. У 2017 р. компанія виробила 10,4 млн. тонн залізородних обкотишів. Основними споживачами продукції є сталеливарні підприємства Австрії, Словаччини, Чехії, Німеччини та інших європейських країн, а також Японії, Тайваню, Південної Кореї та Китаю. Акції Ferrexpo котируються на основному майданчику Лондонської фондової біржі під тиккером FXPO.

Кожний автомобіль від Audi, BMW, Porsche, Honda, Toyota, Volkswagen, Mercedes, Skoda зроблено зі сталі, що містить залізну руду Полтавського ГЗК (Ferrexpo) [10]. Заявленою метою ГЗК є постійне нарощування здобичі залізної руди при збереженні статусу недорогого виробника. Підприємство наголошує на постійному технологічному оновленні, запровадженні інноваційних методів виробництва, модернізації обладнання. Аби бути конкурентоспроможним на світовому ринку залізородної сировини підприємство готове знижувати ціну на обкотиші. Як і інші виробники сировини, ПГЗК залежить від коливань зовнішньоекономічної кон'юнктури.

Під час внутрішньої кризи 2014-2015 рр. в Україні знецінився такий основний ресурс як людська праця. І не дивлячись на збільшення обсягів виробництва та продажу залізородної сировини, заробітна плата робітників ПГЗК також зменшилася. Дані табл. 1 відображають різницю між зміною EBITDA та заробітної плати в останні роки на ПГЗК.

Аналіз статистичних даних діяльності ПГЗК свідчить про те, що збільшення виробництва тісно корелює з обсягами продажу в натуральному виразі (рис. 1.), але суттєво різняться обсяги продажу в натуральному виразі та отриманий прибуток EBITDA (рис. 2). Це свідчить про явну залежність ПГЗК від світової кон'юнктури. ПГЗК, як і інші підприємства добувної промисловості жорстко залежать від цінової політики на світовому ринку, і доходи ПГЗК не завжди збільшуються при нарощенні виробничих потужностей. Цей факт яскраво свідчить про неефективність використання національних природних ресурсів.

Таблиця 1

## Показники діяльності Полтавського ГЗК

Показники	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Виробництво обкотишів, млн.тон	9,072	9,035	8,767	10,031	9,811	9,69	10,813	11,021	11,662	11,201	10,444
Продаж обкотишів, млн.тонн	9,261	8,711	9,015	9,721	9,876	9,675	10,689	11,167	11,33	11,697	10,467
<b>EBITDA, млн. \$</b>	<b>246</b>	<b>504</b>	<b>138</b>	<b>585</b>	<b>801</b>	<b>405</b>	<b>506</b>	<b>496</b>	<b>313</b>	<b>375</b>	<b>551</b>
Інвестування основний капітал,	55	206	65	118	250	316	191	155	33	-	24
Середньорічна заробітна плата, \$	-	-	-	-	-	-	658	628	356	231	190
Середньорічна заробітна плата, €	-	-	-	-	-	-	487	493	312	216	170
Погодинна заробітна плата, €	-	-	-	-	-	-	1,93	-	-	0,86	-

Джерело: Таблицю складено на основі даних [10].

Та більш цікавою є розбіжність темпів зростання прибутку EBITDA та рівнів зміни заробітної плати працівників (рис. 3).

Не дивлячись на позиціонування ПГЗК як лідера заробітної плати по Полтавській області, реальна оплата праці істотно зменшилася в останні роки. Так дані табл. 1 та рис. 1 свідчать, що заробітна плата не залежить від доходів підприємства. Такі розходження при незмінній податковій політиці частково



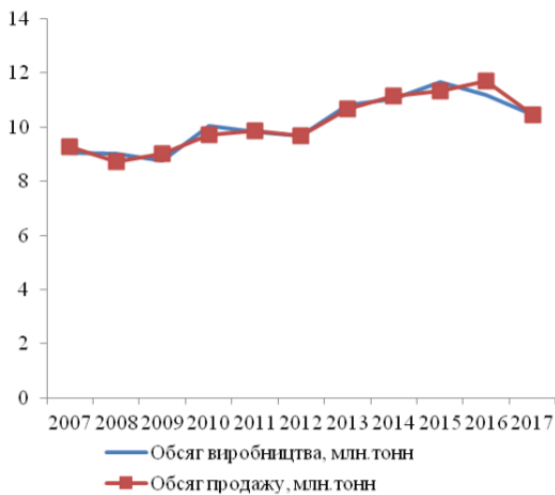


Рис. 1 Порівняння виробництва та продажу обкотишів

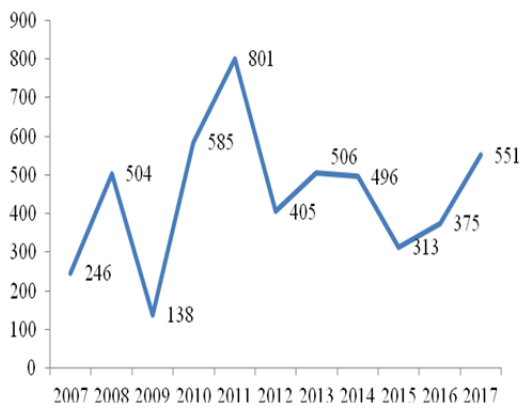


Рис. 2 ЕВІТДА, млн. \$ US, 2007-2017 pp.

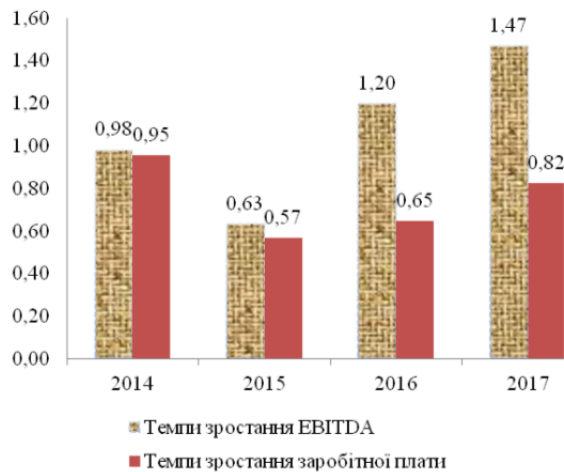


Рис. 3 Порівняння темпів зростання ЕВІТДА та заробітної плати робітників ПГЗК, 2014-2017 pp.

можна пояснити постійним зростанням витрат на модернізацію основного обладнання. Однак графіки демонструють незмінну тенденцію до стабільного спаду заробітної плати при зниженні капіталовкладень в останні роки за табл. 2. Це підтверджує, що у

разі експортної орієнтації підприємства, надприбуток у вигляді додаткових валютних надходжень отримують власники бізнесу, а заробітна плата місцевих працівників незмінно залежить від рівня середньої заробітної плати у країні.

Не дивлячись на декларування постійного підвищення заробітної плати працівників ПГЗК, оплата їх праці в рази нижче, ніж в розвинутих країнах. Збільшення частки заробітної плати у собівартості продукції значно відстає від збільшення вартості американського долару та, відповідно, суми валютних надходжень. Як зазначив О.В. Пустовойт: «єдиний ресурс, який в Україні продається виключно за особливою внутрішньою ціною, це робоча сила» [8, С. 83]. Для порівняння середня погодинна вартість робочої сили за даними Євростату в 2016 р. у ЄС-28 становила 24,40 євро. В Україні за підрахунками автора вона становила 1,38 євро (а у 2013 р. – вона дорівнювала 2,8 євро). На ПГЗК (підприємстві зі шкідливим виробництвом) заробітна плата дорівнювала у 2016 р. 0,86 євро (у 2013 р. – 1,93 євро). Додатковим доказом незадоволеності мешканців міста є масштабна міграція чоловічої робочої сили в країни з аналогічним виробництвом.

**Висновки.** Таким чином, на прикладі Полтавського ГЗК ми бачимо слабкий зв'язок між добробутом робітників та валютними надходженнями зорієнтованого на експорт сировини підприємства. Водночас, збільшення пропозиції залізородної сировини на світовому ринку призводить до зменшення експортної ціни, що зменшує фінансові надходження в цілому і призводить до неефективного використання вітчизняних природних ресурсів.

Усі розвинуті країни намагаються уникнути видів діяльності зі спадаючою віддачею та ринків з досконалою конкуренцією. Такі види діяльності позбавлені потенціалу для інновацій. Якщо виробники інноваційної продукції встановлюють ціну за методом "зняття вершків", то гірничо-збагачувальні комбінати вимушені зменшувати ціни, аби бути конкурентоспроможним на світовому ринку. Для отримання більших прибутків вони нарощують обсяги добутку природних національних ресурсів. Підтверджується ідея Е. Райнерта [1]: якщо в країні в основному розвинуте виробництво зі спадаючою віддачею, то чим більше виробництво на експорт, тим бідніше країна. Готовий продукт може коштувати у сотні разів більше ніж сировина, необхідна для його виготовлення, тому що між сировиною та готовою продукцією знаходиться мультиплікативний виробничий процес, що потребує знань та технологій.

Вважаємо, що надприбутки експортерів сировини необхідно перерозподіляти на користь виробників машинобудівної продукції в рамках однієї інтегрованої структури. Не втратила актуальності стратегія фундатора неокласичної теорії А. Маршала [11] щодо введення податків на діяльність зі спадаючою віддачею заради того, щоб субсидувати виробництво зі зростаючою віддачею.

## Література

1. Erik S. Reinert How Rich Countries Got Rich And Why Poor Countries Stay Poor / Anthem Press, 2008. 365p.
2. List F. National system of political economy. Saint-Petersburg: A. E. Martens, 1891 [in Russian].
3. Федорова Ю. В. Ловушки недоразвитости на пути инновационного развития Украины / Ю. В. Федорова, А. В. Косенко, А. П. Косенко // Вісник НТУ «ХПІ». – 2015. – № 60 (1169). – С. 155–158
4. Гуриев С. Экономическое развитие. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bloomberg.com/markets-magazine> Bloomberg Markets magazine
5. Сонин К. Экономика ресурсного проклятия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.otramovida.net/video/-/3nmYJFRa4rM.html>
6. Касьянова Н. В. Формування вертикально-інтегрованих високотехнологічних компаній [Електронний ресурс] / Н. В. Касьянова // Вісник ДДМА. – 2017. – № 1 (40). – С. 124–128.
7. Венгер В. В. Внутрішній ринок як фактор розвитку металургійної галузі України / В. В. Венгер, В. М. Осипов // Економіка і прогнозування. – 2017. – № 3. – С. 69–84
8. Пустовойт О. В. Економічне зростання України: проблеми та можливості прискорення / О. В. Пустовойт // Економіка і прогнозування. – 2017. – № 4. – С. 71–92.
9. Пономаренко Є. В. Нормативно-правова база державної підтримки розвитку промисловості України / Є. В. Пономаренко, А. Д. Олійник // Глобальні та національні проблеми економіки. – 2015. – № 4. – С. 225–232.
10. FERREXPO сайт [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.ferrexpo.com/investor-relations/11-year-summary-and-kpi-performance>
11. Marshall A. Principles of Economics [Electronic resource] / Alfred Marshall : 8th ed. 1890. – Access mode : <http://www.library.fa.ru/files/Marshall-Principles.pdf>.

## References

1. Erik S. (2008) Reinert How Rich Countries Got Rich And Why Poor Countries Stay Poor. Anthem Press, 365p.
2. List F. (1891). National system of political economy. Saint-Petersburg: A. E. Martens.
3. Fedorova YU. V. Lovushki nedorazvitosti na puti innovatsionnogo razvitiya Ukrainy / YU. V. Fedorova, A. V. Kosenko, A. P. Kosenko // Visnik NTU «HPI». – 2015. – № 60 (1169). – S. 155–158. [in Ukrainian]
4. Guriev S. Ekonomicheskoe razvitie. [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu: <http://www.bloomberg.com/markets-magazine> Bloomberg Markets magazine [in Ukrainian]
5. Sonin K. Ekonomika resursnogo proklyatiya [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu: <http://www.otramovida.net/video/-/3nmYJFRa4rM.html> [in Ukrainian]
6. Kas'yanova N. V. Formuvannya vertikal'no-integrovanih visokotekhnologichnih kompanij [Elektronnij resurs] / N. V. Kas'yanova // Visnik DDMA. – 2017. – № 1 (40). – S. 124–128. [in Ukrainian]
7. Venger V. V. Vnutrishnij rinok yak faktor rozvitku metalurgijnoi galuzi Ukraini / V. V. Venger, V. M. Osipov // Ekonomika i prognovuvannya. – 2017. – № 3. – S. 69–84 [in Ukrainian]
8. Pustovojt O. V. Ekonomichne zrostannya Ukraini: problemi ta mozhlivosti priskorennya / O. V. Pustovojt //

9. Ponomarenko C. V. Normativno-pravova baza derzhavnoi pidtrimki rozvitku promislovosti Ukraini / Є. В. Ponomarenko, А. D. Olijnik // Global'ni ta nacional'ni problemi ekonomiki. – 2015. – № 4. – S. 225–232. [in Ukrainian]
10. FERREXPO sajt [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <http://www.ferrexpo.com/investor-relations/11-year-summary-and-kpi-performance>
11. Marshall A. Principles of Economics [Electronic resource] / Alfred Marshall : 8th ed. 1890. – Access mode: <http://www.library.fa.ru/files/Marshall-Principles.pdf>.

## Федорова Ю.В. Неэфективность экспорта продукции горно-обогатительных комбинатов Украины

*Статья посвящена проблемам неэффективного использования сырьевых ресурсов Украины. Доказано на примере ведущего горно-обогатительного комбината действие закона убывающей отдачи. Подчеркнуто, что увеличение добычи и экспорта железорудного сырья приводит к неэффективному ее использованию, приводит к потере возможностей развития отечественного машиностроения и не способствует экономическому, инновационному подъему страны. Отмечена необходимость смещения вектора украинского экспорта в сторону продукции с большей добавленной стоимостью, то есть в сторону замещения металлургического сырья товарами машиностроительного производства.*

**Ключевые слова:** горно-обогатительный комбинат, экспорт сырья, уменьшающаяся отдача

## Fedorova Y. The inefficiency of export of mineral-containing combinates of Ukraine

*The problems of inefficient using Ukrainian raw materials is devoted in the article. It is proved by the example of the operation of the leading mining and processing enterprise of the operation of the law of decreasing returns. It was emphasized that the increase in production and export of iron ore raw materials leads to ineffective use of it, leads to a loss of opportunities for the development of domestic machine building and does not contribute to the country's economic and innovative upsurge. On the example of Ferrexpo Poltava Mining illustrates the weak link between the welfare of workers and the profit of the enterprise. It is proved that in the case of the export orientation of the enterprise, the profits in the form of additional foreign exchange earnings are received by business owners, and the salary of local workers invariably depends on the level of average wages in the country. The necessity of shifting the vector of Ukrainian exports towards higher value added products, that is, replaced the metallurgical raw materials with the goods of machine-building production, was emphasized.*

**Key words:** mining and concentrating plant, raw materials export, declining return

**Федорова Ю.В.** – к.е.н., доцент кафедри менеджменту Української інженерно-педагогічної академії, e-mail: [julia057fedorova@gmail.com](mailto:julia057fedorova@gmail.com)

Рецензент: д.т.н., проф., **Глікін М.А.**

УДК 711.551

## ОЦІНКА МАСШТАБУ СПІВУЧАСТІ МЕШКАНЦІВ МІСТ В РЕАЛІЗАЦІЇ ЗАВДАНЬ РОЗВИТКУ СИСТЕМ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Черних О.А., Соколенко К.В.

### EVALUATION OF THE CITY RESIDENTS PARTICIPATION IN IMPLEMENTATION OF DEVELOPMENT OBJECTIVES OF HEAT SUPPLY SYSTEMS

Chernih O.A., Sokolenko K.V.

*У статті проведено аналіз співучасті мешканців міських багатоповерхівок у вирішенні проблем впровадження заходів теплозбереження та теплової модернізації будівель.*

**Ключові слова:** *теплова модернізація будинків, централізоване теплопостачання, індивідуальне опалення квартир*

**Вступ.** Проблема пов'язана з вибором автономного чи централізованого типу опалення осель міських мешканців. Загалом ситуація у галузі досі є актуальною та багато в чому суперечливою.

**Постановка проблеми.** В першу чергу проблема стосується багатоповерхової міської забудови радянської доби. Усім відомі та зрозумілі чинники, що змушують мешканців не припиняти спроби відмовитися від централізованого теплопостачання та перейти на індивідуальне опалення власних помешкань. Сукупність факторів змушує мешканців обирати варіант автономного опалення та локального утеплення, не зважаючи на те, що подібне рішення є затратним, а про переваги центрального теплопостачання говорено багато та на різних рівнях. Проте, практично відсутні випадки, коли б володарі автономного опалення відмовлялись від нього на користь централізованого. А отже, суспільний попит визначено.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Традиційний перелік переваг та недоліків централізованого та індивідуального опалення в цілому складено з позицій переважно технічних. [1, 2].

**Мета статті.** Метою дослідження є визначення обсягу та масштабу співучасті мешканців міських багатоповерхівок у вирішенні проблеми загальнодержавного значення – впровадження заходів теплоенергозбереження та теплової модернізації будівель.

**Результати досліджень.** Перелік недоліків індивідуального (автономного) опалення є предметом обговорення та дискусії.

Поки що зберігається різниця цін на газ для промислових користувачів та населення, але загальна політика Кабінету Міністрів України спрямована на встановлення єдиного тарифу для споживачів. Питання щодо вирівнювання ціни на газ для населення активно обговорюється. Певно, слід врахувати прихований комерційний інтерес певних структур. Відомо, що обсяг видобутку власного газу в Україні приблизно дорівнює обсягу його споживання ЖКГ та населенням. Відомо, що собівартість газу вітчизняного видобутку значно нижча від комерційної ціни зовнішніх поставок. Відомо, що головні споживачі природного газу в промисловості належать приватним структурам.

Економічна доцільність ситуації диктує необхідність конкурування цін, заробітної платні, вартості послуг житлово – господарчого сектору.

Тобто даний фактор має практично соціально-політичний характер. Встановлення т.з. справедливої ціни сприятиме розвитку галузі в цілому та відповідатиме економічним інтересам учасників.

Другим аргументом є посилення на той факт, що індивідуальні дії мешканців стимулює руйнування систем ЦТ, розбалансовує тепломережу. Частково слушний аргумент, що втрачає вагу в межах правового поля. Або споживач отримує якісну послугу, або він починає шукати конкурентну пропозицію. Теплокомуненерго мають розробляти стратегію, програму діяльності та розвитку, що забезпечить їх фінансову успішність. суспільство має право наполягати на усуненні монопольних переваг. Окремо взятий мешканець, що дисципліновано сплачує за холодні труби та не отримує послуги від-

повідної якості, не може бути позбавлений права вибору.

Безумовно серйозним аргументом, який не можна ігнорувати, є чималі технічні складнощі при встановленні систем індивідуального опалення. Так, дійсно, необхідно забезпечувати професіоналізм, відповідальність, контроль на всіх стадіях погодження, проектування, встановлення, експлуатації. Випадки аварій, пов'язаних з неправильною експлуатацією індивідуального опалення, відомі. Будь яка технічна система спроможна вийти з ладу з руйнівними аварійними наслідками. Але системи централізованого теплопостачання також генерують численні аварії та матеріальні збитки. Фіксуються випадки вибуху балонного газу. Проте це не слугує підставою заборони його використання. Реальна статистика по надзвичайним ситуаціям при використанні електрообладнання та індивідуальних котлів населенням не виходить за прийнятну межу. Має значення масштаб збитків та їх наслідки. Темою окремого дослідження мають бути обсяги втрат, пов'язаних з масштабом простудних захворювань внаслідок недотримання санітарно-гігієнічних температур опалюваних приміщень. Т.з. зимові канікули закладів вищої освіти, на жаль, стає розповсюдженою нормою.

Вважаємо можливим стверджувати, що неефективна, занедбана та безгосподарна система центрального теплопостачання несе значно більші потенційні ризики та збитки, ніж автономні системи.

Логічним чином виходить аргументація стосовно інших недоліків індивідуального опалення. Відзначається, що в багатоповерхових домах без опалення полишаються підвали. Підтоплення підвалу при поривах мереж водопостачання і каналізації збільшує вологість та вогкість матеріалів стін.

Потребу у просушуванні підвалів слід вирішувати посиленою вентиляцією, а не їх бездумним обігрівом.

Перехід на індивідуальне опалення полишає під'їзди будинків без обігріву і це дійсно означає певні технічні ускладнення. Але, не зважаючи на достатню кількість позитивних прикладів, ще існує першочергова необхідність встановлення довідників на вхідні двері, утеплення дверей, улаштування вхідного тамбура.

Ще досі багато прикладів під'їздів з нещільними дверима, що не завжди зачиняються, з побитим склом віконних отворів, з вирізаними радіаторами опалення. Проте стіни сходової клітини є несучими, мають достатній запас міцності, і стверджувати, що порушення температурно - вологісного режиму, підвищена вологість здатна призвести до їх руйнування, непрофесійно.

У якості недоліків індивідуального опалення відзначається, що квартири першого і верхнього поверхів, кутові квартири потребують приблизно втричі більше газу на опалення. Проблема має технічне рішення - відповідне утеплення квартир. Так,

при цьому сума первинних витрат зростає, але окупність рішення має прийнятний термін.

На нашу думку часткове вирішення технічних проблем не має сенсу без належної організаційно-правової діяльності. Очевидним становиться завдання створення ОСББ. Завдання, що мають загальний характер мають вирішуватись колективним співвласником. Первинний аналіз свідчить, що поки що т.з. ЖЕК програють у якості надання послуг ОСББ.

Достатньо розумним є аргумент стосовно того, що комбінована генерація електричної та теплової енергії має більший ККД і це є одним з факторів порівняно дешевої електроенергії, без якої неможлива певна економія [3]. В даному випадку істина десь посеред. Тема достатньо заплутана, закрита, достовірної інформації про порядок ціноутворення та тарифах отримати складно, і внаслідок цього пересічному громадянину воно не надто цікаво. В теплий період року цей аргумент не діє, а щодо перспектив – більш актуальним стає розвиток альтернативної енергетики та використання постійного струму і діодної електроніки.

Додаймо до загального переліку інформаційні посилення центральної влади. Декларується та реалізується програма підвищення цін, вартості послуг у галузі енергетики та ЖКГ. Загальним пріоритетом вбачається тенденція на скорочення обсягів споживання енергоресурсів всіх видів. Очевидним є той факт, що граничний рівень ККД різних технічних систем не може бути еластичним. Витискати експоненційні відсотки економії недоцільно – слід змінювати систему на більш прогресивну.

Трохи дивним лишається той факт, що певним чином різні представники влади стверджують та роблять протилежні речі [4].

Як вже відзначено, в багатьох випадках згорають систему ЦТ та полишають людей наодинці з холодними квартирами та їх проблемами.

В іншому випадку діє заборона на встановлення систем індивідуального опалення, на підставі не завжди коректної аргументації.

Активний прошарок мешканців, попит яких має фінансове забезпечення, власним коштом намагаються вирішити проблему обігріву житла. Безперечним також є комплексний врівноважений господарчий підхід до облаштування квартир. Демонструється ініціативність, наполегливість, розуміння моменту, здатність йти на витрати.

Цю, безперечно, загальнопоширену ініціативу, доцільно підтримувати та спрямовувати. Очевидним стає необхідність забезпечення розгорнутої та професійної інформаційної політики.

Мешканці міст в зв'язку з широким соціально-демографічним розшаруванням можуть мати різні погляди та уподобання. Разом з правом мати різні погляди та уподобання. Влада місцева, регіональна, центральна повинна демонструвати професіоналізм, відповідальність, бажання сприяти потребам людей. Власне цього досить.

Трохи нижче ми зробили спробу первинного кількісного аналізу стану речей.

Міста Сєвєродонецьк та Лисичанськ мають суттєві відмінності у якості об'єктів розгляду.

Мікрорайони м. Сєвєродонецька є доволі підібними. Забудова міста тривала переважно у період другої половини ХХ сторіччя. Це молоде місто з сучасним розплануванням. В забудові переважають 5 та 9-поверхові будинки. Мікрорайони мають компактні розміри та ортогональну сітку міських вулиць. Середній вік будинків сягає  $50 \div 70$  років, та в цілому їх технічний стан оцінюється як задовільний.

Лисичанськ нараховує понад 200 років існування і в містобудівному сенсі має лінійно-видовжену планувальну структуру з окремими планувальними утвореннями-мікрорайонами. Будівельна типологія будинків відрізняється значною різноманітністю. Наявність мікрорайонів, що свого часу планувались та забудовувались з замкнутим балансом, призвело до того, що окремі мікрорайони «прив'язані» до промислового району/підприємства занепадають. Багато квартир простоюють без мешканців, багато квартир від'єднано від центрального опалення. Відповідно ситуація у місті відзначається більшою неоднорідністю.

Можна відзначити, що поточні та поновлювальні ремонтно-будівельні роботи за рахунок коштів міста мали зовсім незначні обсяги. Будь-яких значних обсягів робіт та робіт з капремонту не проводилось. За останні роки виконано певний обсяг робіт з ремонту дахів та термомодернізації будівель, але переважно громадських та комунальних об'єктів.

Переважно по всіх будинках змінено металеві водопровідні труби на пластикові, але не на 100 відсотків. Більша частина будинків облаштовано металевими дверима. автоматичні системи закриття входних дверей мають орієнтовно 80-90 відсотків під'їздів. Разом з тим, одиничні двері мають утеплення, тамбури фактично відсутні. Орієнтовно 90% вікон будинків замінено на металопластикові. Можна стверджувати, що нормативні вимоги щодо опору теплопередачі вікон переважно не дотримано. 8-12% поверхні фасадів житлових будинків утеплено мешканцями самостійно. Схема утеплення практично єдина – пінопластові або пінопілістерольні плити  $\delta = 30 \div 50$  мм, зрідка 100мм встановлено на полімерцементній клеєвій суміші, тобто т.з. «мокрый» спосіб.

Утеплення фасадів має хаотичний характер та не забезпечує системної термомодернізації будинків. Виключенням є новобудови та об'єкти з цільовою програмою реконструкції. Гострою полишається проблема балконів. Частина з них перебуває в аварійному стані та потребує підсилення. 15-27% балконів зашклено та обшито сайдингом, проте мови про архітектурний стиль, єдину кольорову гаму, якусь концепцію немає взагалі.

Індивідуальне автономне опалення встановлювалось мешканцями міста приватним чином. Факти-

чно всі квартири, по яких встановлено індивідуальне опалення, мають фасадне утеплення.

Фактично весь обсяг робіт було виконано мешканцями будинків за власні кошти. Роботи переважно виконувались по т.з. «сірим схемам» за готівкові кошти, що дає можливість виконати орієнтовну загальну оцінку.

За існуючих у місті розцінок, до речі, достатньо стабільних, витрати домогосподарств на заміну вікон та утеплення фасадів будинків достатньо впевнено обраховуються. Питома орієнтовна вартість утеплення фасадів складає 250-300 грн/м<sup>2</sup>. калькулятор вартості пластикового вікна ОС 15-18 дає середню цифру 5 тис. грн.

Слід врахувати соціологічну константу, визначену фахівцями ЖКГ. За будь-яких умов 5-7 % мешканців квартир не погоджуються/відмовляються вкладати кошти у утримання житла. У неблагополучних будинках (районах) цей відсоток може сягати 10-15.

Ми вважаємо, що попри деякі зауваження, які стосуються фундаментальних засад фінансової політики, готівкові розрахунки слід розглядати як позитив. В цьому випадку відпадає корупційна складова, практично виключені приписування обсягів робіт, жорстко контролюється якість, існує конкурентна пропозиція. Тобто все те, що не в змозі забезпечити державний контроль або участь держави.

Звісно, розрахунки мають примітивний та умовний характер, проте якісну характеристику стану справ дають виключно адекватну.

В перерахунку на один особовий рахунок середня сума витрат на первісну теплову модернізацію будинків (базова одиниця – однокімнатна квартира фасади + вікна) становить 24-25 тис. грн. або 800 - 900 у.о., що загалом є прийнятною сумою. За умов сприяння з боку держави, пільгового кредитування, часткової компенсації витрат – обсяги робіт з теплової модернізації мали б значно масовіший характер.

Фактично, на прикладі характерних мікрорайонів міст можна стверджувати, що значна частина заходів з відновлення інженерного стану будинків виконана мешканцями самостійно. З несуттєвими обмовками можна стверджувати, що проведено майже 100 % заміни сталевих труб на сучасні пластикові, 90-95 % під'їздів облаштовано дверима та упорядковано, 6/7 вікон замінено на більш сучасні та теплорезистивні металопластикові, фактично всі власники індивідуального опалення виконали теплоізоляцію фасадів своїх квартир. На жаль, участь держави та міста загалом обмежено заборонами на встановлення індивідуального опалення і критикою утеплення фасадів, що нібито спотворює образ будинків.

Досвід минулих опалювальних періодів свідчить, що якість послуг централізованого опалення не відповідає вартості. Не дотримується нормативний температурний режим приміщень.

За неофіційною інформацією, температура теплоносія на магістралях не відповідає нормативній.

### Висновки

Діюча програма підвищення енергоефективності у будівництві містить основні напрями та пропозиції стосовно покращення ситуації в галузі, проте в повному обсязі не виконується. Фактично існує два паралельних процеси: тепла модернізація об'єктів загальнодержавної та комунальної власності – що є безумовно позитивним зрушенням; неорганізований та багато в чому хаотичний процес індивідуального утеплення квартир мешканцями багатоквартирних будинків.

На підставі системного аналізу дії всіх факторів – технічних, соціально – економічних тощо, слід впроваджувати заходи, здійснення яких відповідає інтересам усіх причетних сторін, та буде безумовно підтримане мешканцями міст.

Безумовно перспективними діями є:

Створення ОСББ як колективного господаря, зацікавленого у реалізації програми масштабної термомодернізації житла;

Розробка програм та концепції комплексного утеплення багатоповерхових будинків. Реалізація піонерних проектів;

Розробка проектних рішень по встановленню додаткового – другого комплексу метало-пластових вікон, з розрахунком економії тепла та періодом окупності рішення;

Аналіз та обрахунок сукупного кошторису витрат на теплову модернізацію багатоквартирних будинків в розрізі місто/мікрорайон/житлова група/будинок.

### Література

1. Звягинцев В.Л. О центральном и индивидуальном теплоснабжении. / В.Л. Звягинцев // Энергосбережение, 2011. - №1 - С.12-1.
2. Атаманчук В.В. Переваги та недоліки централізованого та автономного опалення / В.В. Атаманчук // Містобудування та територіальне планування: Наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, 2007. – Вип. 27. – С.29-33.
3. Блащук А.С. Централізоване теплопостачання – безпека держави (презентація) / А.С. Блащук // Енергозбереження в будівництві та архітектурі: Наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, 2011р. – Вип. 1. – С.164-172.
4. Галузева програма підвищення енергоефективності у будівельній галузі на 2010 – 2014 роки / Розроблена на виконання Розпорядження Кабінету Міністрів України від 17.12.2008 р. № 1567-р «Про програми підвищення енергоефективності та зменшення споживання енергоресурсів». – Офіц. вид. – К., 2009. – 95 с.

### References

1. Zvyahyntsev V.L. O tsentral'nom y undyvydual'nom teplosnabzhenyy. / V.L. Zvyahyntsev // Enerhosberezhenye, 2011. - №1 - S.12-1.
2. Atamanchuk V.V. Perevahy ta nedoliky tsentralizovanoho ta avtonomnoho opalennya / V.V. Atamanchuk // Mistobuduvannya ta terytorial'ne planuvannya: Nauk.-tekh. zbirnyk. – K.: KNUBA, 2007. – Vyp. 27. – S.29-33.
3. Blashchuk A.S. Tsentralizovane teploposta-channya – bezpeka derzhavy (prezentatsiya) / A.S. Blashchuk // Enerhozberezhennya v budivnytstvi ta arkhitekturi: Nauk.-tekh. zbirnyk. – K.: KNUBA, 2011r. – Vyp. 1. – S.164-172.
4. Haluzeva prohrama pidvyshchennya enerhoefektyvnosti u budivel'niy haluzi na 2010 – 2014 roky / Rozroblena na vykonannya Rozporyadzhennya Kabinetu Ministriv Ukrayiny vid 17.12.2008 r. № 1567-r «Pro prohramy pidvyshchennya enerhoefektyvnosti ta zmeshennya spozhyvannya enerhoresursiv». – Ofits. vyd. – K., 2009. – 95 s.

**Черних О.А., Соколенко К.В. Оценка масштаба участия жителей городов в реализации задач развития систем теплоснабжения.**

*В статье проведен анализ совместного участия жителей многоэтажных жилых домов в решении проблем внедрения мероприятий теплосбережения и тепловой модернизации зданий.*

**Ключевые слова:** тепловая модернизация зданий, централизованное теплоснабжение, индивидуальное отопление квартир.

**Chernih O.A. Sokolenko K.V. Evaluation of the city residents participation in implementation of development objectives of heat supply systems.**

*The article analyzes the joint participation of residents of multi-storey residential buildings in solving the problems of implementing measures for heat saving and thermal modernization of buildings.*

**Keywords:** thermal modernization of buildings, centralized heat supply, individual heating of apartments

**Черних О.А.** – к.т.н., доцент кафедри «Будівництва, урбаністики та просторового планування» Східноукраїнський національний університет ім. Володимира Даля, E-mail: grafikchernih@gmail.com

**Соколенко К.В.** – магістр з будівництва, Східноукраїнський національний університет ім. Володимира Даля, E-mail: k96s@ukr.net

*Рецензент:* д.т.н., проф. **Суворін О.І.**

Стаття подана 17.12.2018.

УДК 656.056.4

**ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЦИКЛА СВЕТОФОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПЕРЕКРЕСТКА****Кравченя И.Н.****SIMULATION MODELING USAGE FOR OPTIMIZING THE PARAMETERS OF TRAFFIC SIGNALIZATION CYCLE AT THE CROSSROADS****Kravchenya I.N.**

*В статье предложен подход к имитационному моделированию в GPSS перекрестков и оптимизации циклов светофорного регулирования.*

*Исследован существующий цикл светофорного регулирования на перекрестке улиц Советская – Рогачевская – Тельмана. Создана имитационная модель перекрестка в GPSS и разработан алгоритм оптимизации светофорного цикла. По разработанному алгоритму оптимизирован цикл светофорного регулирования в час-пик на исследуемом перекрестке. Рассчитаны транспортные задержки на перекрестке с существующим циклом светофорного регулирования и оптимизированном.*

*Разработанная имитационная модель регулируемого перекрестка предоставляет возможность: анализировать работу светофорного цикла в зависимости от времени суток, дня недели и времени года; исследовать имитационную модель для различных видов транспортных средств; определять оптимальные значения длительности цикла и фаз при различных интенсивностях транспортного движения в разных направлениях; рассмотреть возможность выделения полосы для городского транспорта; рассмотреть различные законы распределения времени поступления и обслуживания транспортных потоков. Это позволит обеспечить бесперебойное движение транспорта, отсутствие пробок и удобство пешеходного перехода проезжей части.*

**Ключевые слова:** регулируемый перекресток, светофорный цикл, имитационное моделирование, системы массового обслуживания

**Введение.** Ввиду неэффективности режимов работы регулируемых перекрестков по причине неточных расчетов параметров цикла светофорного регулирования, актуальной является задача разработки программного обеспечения и методики его использования для оптимизации режимов работы светофорного регулирования.

Особое значение имеет продолжительность светофорного цикла, число и очередность фаз светофорного регулирования в часы «пик», когда перекрестки функционируют на пределе своей пропуск-

ной способности. Кроме того, пропускная способность автомобильных дорог не может быть выше пропускной способности перекрестков, которую, в том числе ограничивает и снижает неоптимальный режим работы светофорной сигнализации [1]. Оптимизация режимов работы светофорного регулирования позволит увеличить пропускную способность, сократить объем выбросов токсичных веществ и сократить аварийность.

Существующие аналитические методы [10], позволяющие рассчитывать параметры цикла светофорного регулирования, не всегда учитывают все показатели, а также их стохастическую природу или имеют сложные алгоритмы расчетов с учетом большого количества показателей. По этой причине наиболее эффективным методом исследования и оптимизации работы светофорного объекта является имитационное моделирование [11].

Анализ публикаций. На сегодняшний день существует множество различных методологий [2–9], а также представлен широкий спектр специализированных программных комплексов, предназначенных для имитационного моделирования транспортных потоков и участков дорожной сети. Многие современные публикации [5, 8, 9] посвящены разработке имитационных моделей перекрестков и транспортных колец в системе AnyLogic [12], которая имеет достаточно обширные функциональные возможности. Для оценки пропускной способности существующего пересечения дорог, а также обоснования проектных предложений авторами работы [3] использовалась методика компьютерного моделирования, выполненная с применением программного комплекса «Дорожный менеджер» от компании Mallenom Systems, являющегося аналогом программного комплекса PTV Vision. Перечень специализированных пакетов постоянно расширяется, однако большинство из них являются достаточно дорогостоящими и требуют переподготовки специалистов. По этой

причине работы [2, 6, 7] посвящены разработке собственных программных комплексов. Так в [7] для разработки модели системы перекрестков предложено использовать элементы теории систем массового обслуживания и клеточных автоматов.

**Целью данной работы является** создание имитационной модели (ИМ) перекрестка в пакете автоматизации имитационного моделирования GPSS World [ 11 ], разработка алгоритма оптимизации параметров цикла светофорного регулирования и его экономическое обоснование.

Изложение основного материала. Исследуемый объект расположен на пересечении улицы Советская, улицы Рогачевская и улицы Тельмана (рисунок 1). Улица Советская является одной из центральных улиц в г. Гомеле и относится к категории А.

Через исследуемый перекресток проходит около 40 % маршрутов общественного транспорта, однако движение грузовых автомобилей запрещено. Около данного перекрестка расположено три остановочных пункта. Состояние проезжей части и тротуаров хорошее. Освещение объекта состоит из

осветительных мачт, которые располагаются вдоль проезжей части.

Данный перекресток имеет 4 входа. Количество полос на входах: вход I (ул. Советская) – семь полос; вход II (ул. Тельмана) – три полосы; вход III (ул. Рогачевская) – четыре полосы; вход IV (ул. Советская) – семь полос.

Особенности пересечения ул. Советская – ул. Рогачевская – ул. Тельмана: на входах II, III и IV расположены регулируемые пешеходные переходы; по ул. Тельмана организовано одностороннее движение, которое позволяет выехать с перекрестка; на исследуемом перекрестке выделены отдельные полосы для движения направо (вход I и IV) и налево (вход III); основными объектами притяжения пешеходного потока являются универмаг «Гомель», множество промышленных и продуктовых магазинов, а так же аптеки и медицинских центры, остановочные пункты; ширина пешеходного перехода составляет на входах III и IV – 4 м, на входе II – 3 м; видимость транспортных, в том числе и дублирующих, пешеходных светофоров, хорошая.

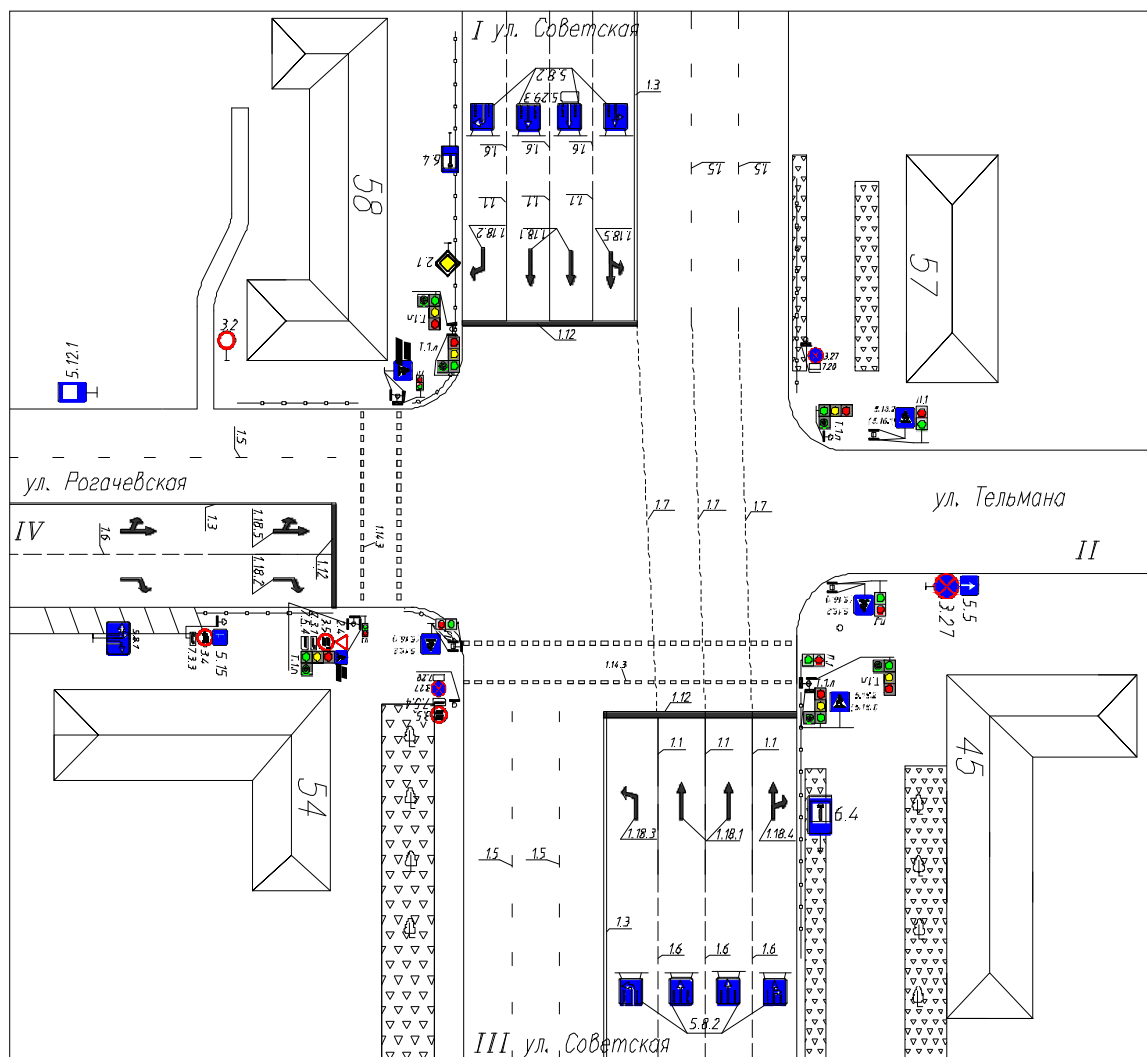


Рис. 1. Схема перекрестка ул. Советская – ул. Рогачевская – ул. Тельмана



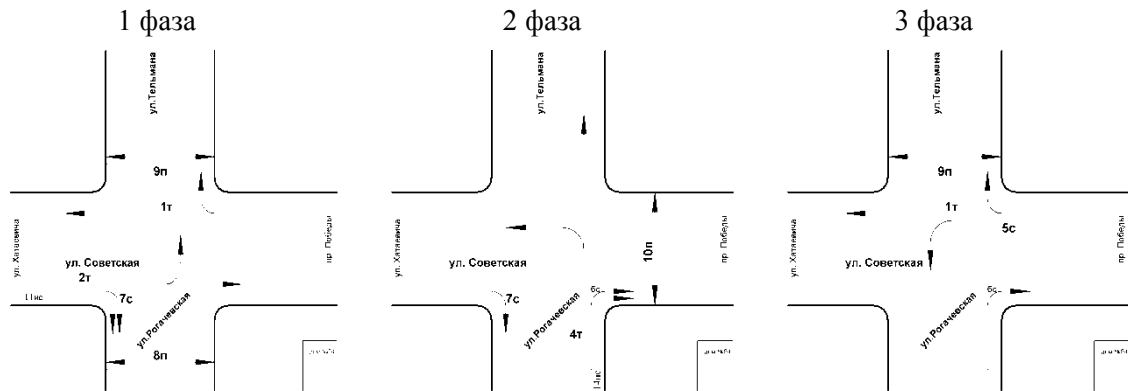


Рис. 2. Схема пофазного движения на перекрестке

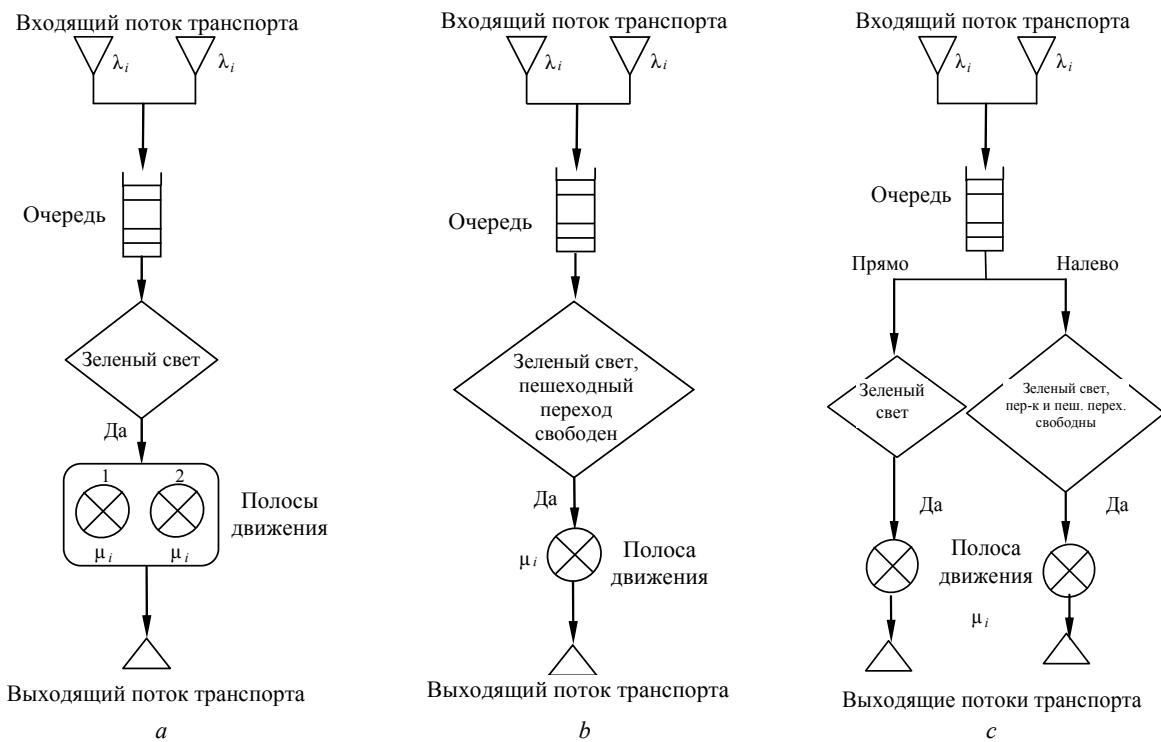


Рис. 3. Концептуальная модель перекрестка на входе I:  
 а – движение прямо б – движение направо с – движение прямо и налево

Цикл светофорного регулирования на перекрестке улиц Советская – Рогачевская – Тельмана составляет 84 секунды и включает 3 фазы. В час-пик производится переключение резервных программ. Рассмотрим работу светофорного регулирования: в период времени с 7.00 до 8.00: длительность 1-й фазы – 47 сек, 2-й фазы – 23 сек, 3-й фазы – 14 сек; в период времени с 16.00 до 18.30: длительность 1-й фазы – 44 сек, 2-й фазы – 27 сек, 3-й фазы – 13 сек; в период времени с 5.30 – 7.00, 8.00 – 16.00, 18.30 – 1.00: длительность 1-й фазы – 43 сек, 2-й фазы – 26 сек, 3-й фазы – 15 сек.

На рисунке 2 представлены схемы пофазного разезда транспортных средств на перекрестке.

Имитационная модель регулируемого перекрестка. Концептуальная модель регулируемого перекрестка улиц Советская – Рогачевская – Тельмана

представляется в виде системы массового обслуживания. Элементами исследуемой системы являются: входящие потоки транспортных средств  $i$ -го типа и пешеходов, очереди, полосы движения. Транспортные средства  $i$ -го типа (легковые автомобили, мотоциклы, городской транспорт и т.п.) поступают на перекресток, образуя три потока: движение прямо, движение направо и движение налево. Интервалы времени между прибытием транспортных средств на перекресток имеют экспоненциальное распределение с интенсивностью  $\lambda_i$ . Поступившие автомобили ожидают обслуживания (проезда перекрестка) в очередях. Время проезда перекрестка транспортным средством  $i$ -го типа подчинено равномерному закону распределения со средним значением  $\mu_i$  и зависит от: типа транспортного средства, возможности проезда перекрестка без остановки, параметров перекре-

стка, наличия встречного транспорта (поворот налево), наличия пешеходных переходов (поворот направо или налево).

Графическое изображение движения потоков транспортных средств на перекрестке для входа I приведено на рисунке 3. Транспортные средства  $i$ -го типа поступают на перекресток со входа I, образуя три потока: движение прямо (рисунок 3 а), движение направо (рисунок 3 б), движение прямо и налево (рисунок 3 с). Аналогично представлены движения потоков транспортных средств со входов III и IV.

Организация процесса движения пешеходов через пешеходный переход представлена на рисунке 4. Интервалы времени между поступлением пешеходов на перекресток имеют экспоненциальное распределение с интенсивностью  $\gamma_i$ . Время перехода пешеходом перекрестка подчинено равномерному закону распределения со средним значением  $v_i$ .

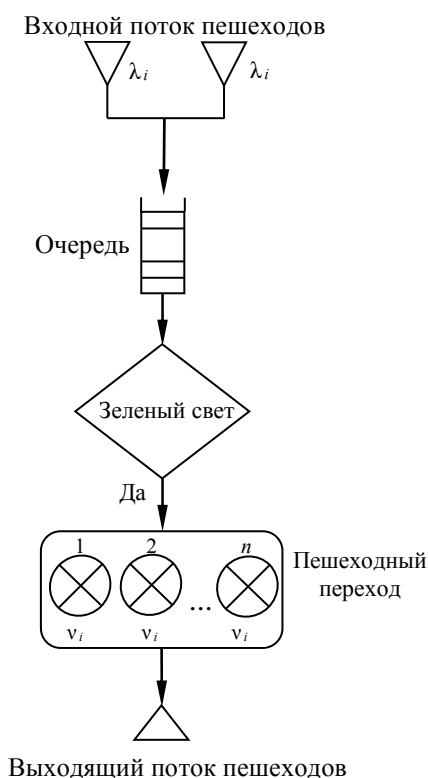


Рис. 4. Движение потоков пешеходов

Для организации тактов и фаз светофорного регулирования используется система массового обслуживания, которая представлена на рисунке 5.

В качестве критериев, используемых для определения оптимальной структуры светофорного цикла, рассматриваются: среднее время проезда перекрестка транспортным средством  $i$ -го типа, включающее среднее время простоя транспортных средств; количество транспортных средств, проехавших перекресток без остановки; максимальные и средние длины очередей на перекрестке; коэффициенты загрузки полос перекрестка.

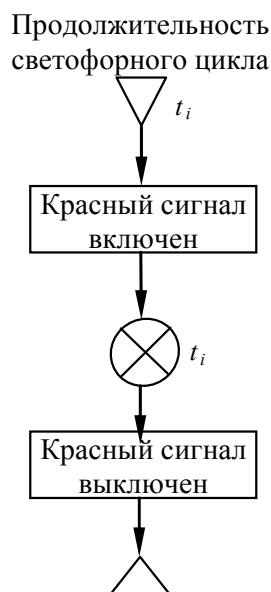


Рис. 5. Организация цикла работы светофора

Управляемыми переменными (параметрами) моделирования являются интенсивности поступления на перекресток транспортных средств  $i$ -го типа и пешеходов, а так же варианты организации циклов работы светофора на регулируемом перекрестке.

Ограничения имитационной модели связаны с условиями, накладываемыми на входящий поток поступающих транспортных средств и пешеходов (он предполагается простейшим, отсутствуют повторные заявки); отсутствием явлений, изменяющих закономерности времени проезда перекрестка транспортными средствами (отказы и сбои оборудования, ДТП, и т. д.).

Поскольку исследуемый перекресток представляется системой массового обслуживания, в которой все события связаны с перемещением транспортных средств и пешеходов – динамических объектов, то данном случае целесообразно использовать транзактный способ формализации компонентов имитационной модели. Предложенная модель массового обслуживания регулируемого перекрестка улиц Советская – Рогачевская – Тельмана реализована в пакете автоматизации имитационного моделирования GPSS World [ 11 ].

Для анализа имитационной модели исходные данные о потоках транспортных средств и пешеходов были получены путем наблюдения за работой перекрестка. Измерение интенсивности движения и изучение состава транспортного и пешеходного потоков производилось в час-пик и межпиковый период.

Испытание ИМ включало два этапа: верификацию и проверку адекватности. На этапе верификации убедились в правильности алгоритма функционирования ИМ, используя интерактивную способность пошаговой отладки модели, которая позволяет устанавливать контрольные точки в модели и возможность определять параметры транзактов в моде-

ли. С помощью верификации установлена верность логической структуры модели.

Верификация, выполненная в ходе комплексной отладки программы на реальных исходных данных, показала, что разработанная имитационная модель регулируемого перекрестка улиц Советская, Рогачевская, Тельмана во всех ситуациях соответствует работе исследуемого объекта.

Адекватность ИМ объекту исследования проверялась путем совпадения с заданной точностью значений характеристик функционирования ИМ с данными, полученными аналитическими методами расчета.

При оптимизации параметров светофорного цикла первоначальным этапом является перебор тактов цикла светофорного регулирования с учетом величины минимального и максимального цикла. В процессе сбора статистики имитации определяются такие данные, как: средние длины очередей на перекрестке ( $\eta_k$ ), время простоя транспортных средств ( $w_k$ ), количество транспортных средств, проехавших перекресток без остановки ( $N_k$ ), коэффициент загрузки полосы движения ( $\psi_k$ ). Затем для каждого устройства находится величина потери времени запросов транспортных средств на обслуживание в очередях:

$$LT_k = \eta_k \cdot w_k \quad (1)$$

Для полученных значений строятся диаграммы связи интенсивности загрузки полос движения с потерями времени простоя транспортных средств в очередях. Полосы движения с максимальным значением пары статистик имитации ( $LT_k; \psi_k$ ), считаются «узкими местами» перекрестка. Анализируя вышеуказанные диаграммы, выбираются оптимальные такты светофорного цикла. Далее по такому же принципу

идет перебор фаз светофорного цикла. В результате определяется оптимальный цикл светофорного регулирования перекрестка.

Для апробации алгоритма оптимизации параметров цикла светофорного регулирования рассмотрели работу модели перекрестка в период времени 7.00 – 8.00 и 16.00 – 18.30. Анализируя результаты моделирования (таблицы 1 – 2) и диаграммы связи интенсивности загрузки полос движения с потерями времени запросов на обслуживание в очередях, можно сделать вывод: в час «пик» заторы возникают утром при движении прямо по улице Советская в центр города и повороте налево на улицу Рогачевская, вечером по улице Советская в обоих направлениях и повороте налево на улицу Рогачевская.

По составленному алгоритму была проведена оптимизация параметров цикла светофорного регулирования в пиковый период времени (7.00 – 8.00 и 16.00 – 18.30).

В период времени 7.00 – 8.00 был принят один оптимальный цикл светофорного регулирования, длительность которого составила 82 секунды: длительность 1-й фазы – 45 сек; длительность 2-й фазы – 23 сек; длительность 3-й фазы – 14 сек.

Основные показатели работы перекрестка при оптимизированных параметрах цикла светофорного регулирования в период времени 7.00 – 8.00 приведены в таблице 3.

Анализируя результаты моделирования для полученного оптимального цикла можно отметить, что среднее время простоя и средняя длина очереди на проблемных участках перекрестка уменьшилась, а количество транспортных средств, проехавших перекресток без остановки, увеличилось. Однако, полностью решить проблему заторов на перекрестке не удалось.

Таблица 1

Результаты моделирования движения транспортных средств в период времени 7.00 – 8.00

Параметры	Вход I			Вход III			Вход IV		
	прямо 2t	направо 7с	налево 2t	прямо 1t	направо 1t	налево 5с	прямо 4 t	направо 4 t	налево 6с
$w_k$ , мин	28,662	1,437	15,752	7,025	1,574	36,896	1,351	5,489	1,542
$\eta_k$ , ТС	13,026	0,144	0,26	1,951	0,013	1,041	0,125	1,523	0,154
$N_k$ , %	0,4	60,1	24,1	43,5	74,1	3,6	63,7	57,4	61,4
$\psi_k$	0,777	0,4	0,34	0,38	0,1	0,113	0,24	0,32	0,24
$LT_k$	373,35	0,21	4,10	13,71	0,02	38,41	0,17	8,36	0,24

Таблица 2

Результаты моделирования движения транспортных средств в период времени 16.00 – 18.30

Параметры	Вход I			Вход III			Вход IV		
	прямо 2t	направо 7с	налево 2t	прямо 1t	направо 1t	налево 5с	прямо 4 t	направо 4 t	налево 6с
$w_k$ , мин	18,865	0,409	3,882	17,319	9,759	37,116	5,42	5,21	5,64
$\eta_k$ , ТС	4,972	0,016	0,083	6,920	0,734	1,109	0,56	0,49	0,61
$N_k$ , %	13,2	84,12	62,72	5,79	29,59	3,10	42,3	46,8	51,2
$\psi_k$	0,433	0,16	0,38	0,766	0,532	0,119	0,21	0,29	0,34
$LT_k$	93,80	0,01	0,32	119,85	7,16	41,16	0,17	8,36	0,24

Таблиця 3

## Результаты моделирования движения транспортных средств в период времени 7.00 – 8.00

Параметры	Вход I			Вход III			Вход IV		
	прямо 2t	направо 7с	налево 2t	прямо 1t	направо 1t	налево 5с	прямо 4 t	направо 4 t	налево 6с
$w_k$ , мин	27,796	1,434	15,385	7,195	1,651	34,874	1,15	5,12	1,42
$\eta_k$ , ТС	12,067	0,143	0,254	1,998	0,014	0,984	0,114	1,436	0,148
$N_k$ , %	0,37	60,33	25,62	42,49	74,14	4,55	61,4	56,8	60,9
$\Psi_k$	0,776	0,400	0,481	0,381	0,196	0,113	0,273	0,318	0,298
$LT_k$	335,41	0,21	3,91	14,38	0,02	34,32	0,13	7,35	0,21

Таблиця 4

## Результаты моделирования после оптимизации в период времени 16.00 – 18.30 (вариант 1)

Параметры	Вход I			Вход III			Вход IV		
	прямо 2t	направо 7с	налево 2t	прямо 1t	направо 1t	налево 5с	прямо 4 t	направо 4 t	налево 6с
$w_k$ , мин	16,264	0,406	3,378	13,838	8,074	37,100	5,18	5,46	5,23
$\eta_k$ , ТС	4,282	0,016	0,072	5,530	0,607	1,109	0,54	0,61	0,61
$N_k$ , %	18,14	84,05	64,87	10,28	32,67	3,13	44,1	46,2	58,79
$\Psi_k$	0,422	0,16	0,186	0,749	0,421	0,12	0,21	0,264	0,295
$LT_k$	69,64	0,01	0,24	76,52	4,90	41,14	2,80	3,33	3,19

Таблиця 5

## Результаты моделирования в период времени 16.00 – 18.30 (вариант 2)

	Вход I			Вход III			Вход IV		
	прямо 2t	направо 7с	налево 2t	прямо 1t	направо 1t	налево 5с	прямо 4 t	направо 4 t	налево 6с
$w_k$ , мин	17,851	0,399	3,631	15,909	8,968	34,857	4,46	5,12	5,71
$\eta_k$ , ТС	4,680	0,016	0,078	6,357	0,674	1,042	0,48	0,467	0,685
$N_k$ , %	13,83	84,24	63,54	6,69	30,82	3,66	46,11	51,04	53,7
$\Psi_k$	0,429	0,16	0,096	0,762	0,114	0,12	0,179	0,276	0,349
$LT_k$	83,54	0,01	0,28	101,13	6,04	36,32	2,14	2,39	3,91

В период времени 16.00 – 18.30 было отобрано два альтернативных оптимальных решения.

В одном из них длительность цикла светофорного регулирования не изменилась, однако изменилась длительность фаз: длительность 1-й фазы – 47 сек; длительность 2-й фазы – 23 сек; длительность 3-й фазы – 14 сек.

Во втором варианте длительность цикла уменьшилась до 80 секунд, численные значения фаз получились следующие: длительность 1-й фазы – 42 сек; длительность 2-й фазы – 25 сек; длительность 3-й фазы – 13 сек.

Основные показатели работы перекрестка при оптимизированных параметрах цикла светофорного регулирования в период времени 16.00 – 18.30 приведены в таблицах 4-5.

Рассчитаны транспортные задержки на перекрестке с существующим циклом светофорного регулирования и оптимизированным. Наименьшие суммарные экономические потери от задержек транспортных средств и пешеходов наблюдаются при первом варианте оптимизированного цикла светофорного регулирования.

**Выводы.** Предложенная имитационная модель регулируемого перекрестка позволяет: совершенствовать режимы работы светофоров, подбирать оптимальные значения для длительности цикла и фаз при различных задаваемых сочетаниях интенсивности транспортного движения в разных направлениях таким образом, чтобы пропускная способность заданного перекрестка увеличивалась; анализировать работу светофорного цикла в зависимости от времени суток, дня недели и времени года; получать результаты моделирования для различных видов транспортных средств; рассмотреть возможность выделения полосы для общественного транспорта; рассмотреть различные законы распределения времени поступления и обслуживания транспортных потоков.

Дальнейшим развитием системы может стать включение моделей других типов перекрестков, а также учет погодных условий и других факторов, существенных для обеспечения устойчивой городской мобильности.

## Литература

1. Аземша, С. А. Обеспечение безопасности дорожного движения и перевозок : учеб. пособие / С. А. Аземша, В. А. Марковцев, Д. В. Рожанский. – Гомель : БелГУТ, 2011. – 259 с.
2. Баротова, А.Ж. Имитационная модель перекрёстка с возможностью оптимизации светофорного регулирования / А.Ж. Баротова // Творческий потенциал – 2017. – Самара: СамГТУ, 2018. – С. 26-35
3. Бурдин, И.О. Имитационное компьютерное моделирование критических перекрестков на примере развязки улицы Цимлянкой и Восточного обхода в городе Перми / И.О. Бурдин, А.А. Минзуренко // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология.– Пермь, 2016.– № 3.– С. 32-49.
4. Воробьев, Э.И. Применение имитационного моделирования для повышения пропускной способности перекрестков с круговой организацией движения / Э.И. Воробьев, Б.Н. Тишуков // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн: материалы II междунар. науч.-практ. конф.– Тамбов: ТГТУ, 2016. – С. 284-287.
5. Глимшина, К.А. Имитационное моделирование перекрестка улиц имени Города Галле и Рихарда Зорге города Уфы / К.А. Глимшина, Д.Р. Богданова, Д.Е. Яковлева // Информационные технологии и системы: материалы VI междунар. науч. конф.– Челябинск: ЧелГУ, 2017.– С. 80-83.
6. Губанов, Н.Г. Имитационная модель перекрестка с возможностью регулирования движения / Н.Г. Губанов, В.В. Козлов, А.Ж.Баротова // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре.– Самара: СГАСУ, 2017.– С. 576-580
7. Исмагилов, Т.Р. Разработка компьютерной имитационной модели автомобильного движения через серию перекрёстков / Т.Р. Исмагилов, И.Н. Бояршинова, И.А. Потапова // Фундаментальные исследования. – Пенза, 2016.– № 10-2.– С. 291-295.
8. Мочалин, А.А. Метод оптимизации длительности фаз светофора на перекрестке в программе AnyLogic [Электронный ресурс] / А.А. Мочалин, А.А. Зарипова, И.Т.Шевченко, А.Р.Абдуллин // Теория. Практика. Инновации: электр. научн.-техн. журнал.– Режим доступа: <http://www.tpinauka.ru/2017/02/Mochalin.pdf>.– Загл. с экрана
9. Рассказова, М.Н. Разработка имитационной модели участка дорожной сети г. Симферополя / М.Н. Рассказова, А.С. Данилова, Д.В. Суховой // Ученые Омска – региону: материалы II регионал. науч.-техн. конф.– Омск: ОмГТУ, 2017.– С. 37-40
10. Светофорный цикл. Расчет светофорного цикла.– [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.arterylite.ru/resources/svetoforniy-tsikl-chto-eto-takoe>
11. Шевченко, Д.Н. Имитационное моделирование на GPSS: учебно-метод. пособие для студентов технических специальностей / Д.Н. Шевченко, И.Н. Кравченя.– Гомель: БелГУТ, 2007.– 97 с.
12. AnyLogic. Многоподходное имитационное моделирование.– [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.anylogic.ru>

## References

1. Azemsha S. A., Markovtsev V.A., Rozhansky D.V. (2011) Obespecheniye bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya i perevozok [Ensuring road safety and traffic]. Gomel: BelSUT [in Belarus].
2. Barotova, A.Zh. (2018) Imitatsionnaya model perekrestka s vozmozhnostyu optimizatsii svetoformogo regulirovaniya [Simulation model of the intersection with the ability to optimize traffic light regulation]. Tvorcheskiy potentsial [Creative potential]. Samara: SamGTU [in Russian].
3. Burdin I.O., Minzurenko A.A. (2016) Imitatsionnoye kompyuternoye modelirovaniye kriticheskikh perekrestkov na primere razvyazki ulitsy Tsimlyanskoj i Vostochnogo obkhoda v gorode Permi [Simulation of critical crossroads on the example transport interchange of Tsimlyanskaya street and Eastern bypass of Perm city] Transport. Transportnyye sooruzheniya. Ekologiya [Transportation. Transport facilities. Ecology]. Perm, issue 3, p.p. 32-49 [in Russian].
4. Vorobyev E.I., Tishukov B.N. (2016) Primeneniye imitatsionnogo modelirovaniya dlya povysheniya propusknoy sposobnosti perekrestkov s krugovoy organizatsiyey dvizheniya [Simulation modeling usage to increase the throughput of intersections with a circular organization of movement] Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Virtualnoye modelirovaniye, prototipirovaniye i promyshlennyy dizayn» [Mat. of the 2 Int. Scientific and Practical Conf. «Virtual modeling, prototyping and industrial design»]. Tambov, p.p. 284-287 [in Russian].
5. Glimshina K.A., Bogdanova D.R., Yakovleva D.E. (2017) Imitatsionnoye modelirovaniye perekrestka ulits imeni Goroda Galle i Rikharda Zorge goroda Ufy [Simulation crossroads mr. Halle and Richard Zorge in the city of Ufa] Materialy 6 Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Informatsionnyye tekhnologii i sistemy» [Mat. of the 6 Int. Scientific Conf. «Information Technologies and Systems»]. Chelyabinsk: ChelGU, p.p. 80-83 [in Russian].
6. Gubanov N.G., Kozlov V.V., Barotova A.G. (2017) Imitatsionnaya model perekrestka s vozmozhnostyu regulirovaniya dvizheniya [Simulation model of the intersection with the possibility of traffic control] Traditsii i innovatsii v stroitelstve i arkhitekture [Traditions and innovations in construction and architecture]. Samara: SGASU [in Russian].
7. Ismagilov T.R., Boyarshinova I.N., Potapova I.A. (2016) Razrabotka kompyuternoy imitatsionnoy modeli avtomobilnogo dvizheniya cherez seriyu perekrestkov [Developing a computer imitational model of vehicular traffic through a series of intersections] Fundamentalnyye issledovaniya [Basic research] Penza, № 10-2 [in Russian].
8. Mochalin A.A., Zaripova A.A., Shevchenko A.A., Abdullin A.R. Metod optimizatsii dlitelnosti faz svetofora na perekrestke v programme AnyLogic [The method of optimizing the duration of the phases of a traffic light at the intersection in the program AnyLogic] Teoriya. Praktika. Innovatsii [Theory. Practice. Innovation] <http://www.tpinauka.ru/2017/02/Mochalin.pdf> (Accessed 15 January 2019)
9. Rasskazova M.N., Danilova A.S., Sukhovoy D.V. (2017) Razrabotka imitatsionnoy modeli uchastka dorozhnoy seti g. Simferopolya [Development of a simulation model of the road network of the city of Simferopol] Materialy II Regionalnoy nauchno-

- tekhnicheskoy konferentsii «Uchenyye Omska» [Mat. of the 2 Region Scientific and Technical Conf. « Scientists of Omsk»]. Omsk: OmSTU, p.p. 37-40 [in Russian].
10. Svetofornyy tsikl. Raschet svetoformogo tsikla [Traffic light cycle. Calculation of the traffic light cycle] <http://www.arterylite.ru/resources/svetofornyyiy-tsikl-chto-eto-takoe> (Accessed 15 January 2019)
  11. Shevchenko D.N., Kravchenya I.N. (2009) Imitatsionnoye modelirovaniye na GPSS [GPSS simulation: a learning method] Gomel: BelGUT [in Belarus].
  12. AnyLogic. Mnogopodkhodnoye imitatsionnoye modelirovaniye [AnyLogic. Multi-Approach Simulation] <http://www.anylogic.ru> (Accessed 15 January 2019)

**Кравченя І.М. Застосування імітаційного моделювання для оптимізації параметрів циклу світлофорного регулювання перехрестя**

*У статті запропоновано підхід до імітаційного моделювання в GPSS перехрестя і оптимізації циклів світлофорного регулювання.*

*Об'єкт дослідження – цикл світлофорного регулювання перехрестя м. Гомеля вул. Радянська – вул. Рогачевська – вул. Тельмана.*

*Мета роботи – створення імітаційної моделі для дослідження і оптимізації параметрів світлофорного циклу на регульованому перехресті.*

*Метод дослідження – імітаційне моделювання систем масового обслуговування.*

*Досліджено існуючий цикл світлофорного регулювання на перехресті вулиць Радянська – Рогачевська – Тельмана. Створена імітаційна модель перехрестя в GPSS і розроблено алгоритм оптимізації світлофорного циклу. По розробленому алгоритму оптимізований цикл світлофорного регулювання в годину-пік на досліджуваному перехресті. Розраховані транспортні затримки на перехресті з існуючим циклом світлофорного регулювання і оптимізованим. Розроблена імітаційна модель регульованого перехрестя надає можливість: аналізувати роботу світлофорного циклу залежно від часу доби, дня тижня і пори року; досліджувати імітаційну модель для різних видів транспортних засобів; визначати оптимальні значення тривалості циклу і фаз при різній інтенсивності транспортного руху у різних напрямках; розглянути можливість виділення смуги для міського транспорту; розглянути різні закони розподілу часу надходження і обслуговування транспортних потоків. Це дозволить забезпечити безперебійний рух транспорту, відсутність заторів і зручність пішохідного переходу проїжджої частини.*

**Ключові слова:** *регульоване перехрестя, світлофорний цикл, імітаційне моделювання, системи масового обслуговування*

**Kravchenya I.N. Simulation modeling usage for optimizing the parameters of traffic signalization cycle at the crossroads.**

*The paper proposes approach to simulation modeling in GPSS of intersections and optimization of parameters of a traffic light cycle regulation.*

*The object of study is the traffic light cycle regulation of the intersection Sovetskaya St. – Rogachevskaya St. – Telman St. in Gomel.*

*The purpose of the work is creation a simulation model for the research and optimization of parameters of a traffic light cycle at the adjustable intersection.*

*Method of the study – simulation modelling of queuing systems.*

*The existing traffic light cycle regulation at the intersection Sovetskaya str. – Rogachevskaya str. – Telman str. has been studied. Simulation modeling of the intersection has been created in GPSS and traffic light cycle optimization algorithm has been developed. According to a worked out algorithm the traffic light cycle at research intersection during saturation flux has been improved. Transport delays both at the existing and optimized crossings have been estimated.*

*Simulation model of the adjustable intersection gives an opportunity: to analyze a traffic light cycle depending on time of day, a day of the week and season; to investigate simulation model for different types of vehicles; to define optimum values of duration of a cycle; to consider the possibility of allocation a traffic lane for city transport; to consider various distribution laws of the entering stream of vehicles. It allows to provide uninterrupted traffic, absence of traffic jams and convenience of pedestrians.*

**Keywords:** *adjustable crossroad, traffic light cycle, simulation modeling, queuing systems.*

**Кравченя Ірина Миколаївна** – кандидат технічних наук, доцент, Білоруський державний університет транспорту, доцент кафедри «Управління автомобільними перевезеннями і дорожнім рухом», e-mail: ira.kravchenya@gmail.com

Рецензент: д.т.н., проф., **Глікін М.А.**

Стаття подана 10.12.2018

**ВІСНИК  
СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ  
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ  
№ 7 (248) 2018**

**Науковий журнал**

Відповідальний за випуск

Кудрявцев С.О.

Оригінал-макет

Могильна О.В.

**Статті надруковано в авторській редакції**

Підписано до друку 20.01.2019 р.  
Формат 60 x 84 1/8. Папір офсетний. Гарнітура Times.  
Друк офсетний. Умов. друк. арк. 13,9. Обл.-вид. арк. 14,6.  
Наклад 300 прим. Вид. № 3212. Заказ № 8. Ціна вільна.

Видавництво  
Східноукраїнського національного університету  
імені Володимира Даля

Свідоцтво про реєстрацію: серія ДК № 1620 від 18.12.03 р.

**Адреса університета:** просп. Центральний 59-А  
м. Северодонецьк, 93400, Україна  
**E-mail:** [vidavnictvoSNU.ua@gmail.com](mailto:vidavnictvoSNU.ua@gmail.com)

Надруковано:  
Відділ технічного обслуговування СНУ ім. В. Даля  
Адреса: просп. Центральний, 59-а  
м. Северодонецьк, 93400