

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Журнал заснований у 1918 році

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Серія: Технічні науки

Том 30 (69) № 2 2019

Частина 2

**Київ
2019**

Головний редактор:

Кисельов Володимир Борисович – доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту муніципального управління та міського господарства Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського.

Члени редакційної колегії:

Медведєв Микола Георгійович (відповідальний секретар) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Домніч Володимир Іванович – кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Дубко Валерій Олексійович – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Єремєєв Ігор Семенович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Лисенко Олександр Іванович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Кузьменко Борис Володимирович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Огородник Станіслав Станіславович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Чумаченко Сергій Миколайович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Цомко Олена – доктор філософії по спеціальності «Безпека і управління інформацією», відділення комп'ютерної інженерії, Інститут Міжнародної освіти, Університет Донгсо, Республіка Корея.

**Рекомендовано до друку та поширення через мережу Internet
Вченою радою Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського
(протокол № 9 від 28.05.2019 року)**

Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки» зареєстровано Міністерством юстиції України (Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого ЗМІ серія КВ № 22895-12795Р від 11.08.2017 року)

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук відповідно Наказу Міністерства освіти і науки України від 28.12.2017 № 1714 (додаток 7)

Журнал включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus International (Республіка Польща)

Сторінка журналу: www.tech.vernadskyjournals.in.ua

ISSN 2663-5941 (Print)
ISSN 2663-595X (Online)

© Таврійський національний університет ім. В.І. Вернадського, 2019

ЗМІСТ

ПРИЛАДИ

Богдан Г.А., Филиппова М.В. ЛАБОРАТОРНИЙ СТЕНД ДЛЯ ВИСОКОТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН.....	1
Черепанська І.Ю., Безвесільна О.М., Сазонов А.Ю. АЛГОРИТМІЧНА КОРЕКЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ ПРЕЦИЗІЙНОЇ ПРИЛАДОВОЇ ГОНІОМЕТРИЧНОЇ СИСТЕМИ.....	6

ЕНЕРГЕТИКА

Беднарська І.С., Риндюк Д.В. АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНКИ ТЕПЛООВОГО ТА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ ПАРОПРОВОДІВ АЕС.....	12
Зайков В.П., Мещеряков В.И., Журавлев Ю.И. ДИНАМИКА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОДНОКАСКАДНОГО ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАЖДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА.....	17
Михайленко О.Ю., Карабут Н.О., Щокін В.П., Мельник О.Є., Кузьменко А.С. СТРУКТУРНА ТА ПАРАМЕТРИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ СТАТИСТИЧНОЇ МОДЕЛІ РОЗПОДІЛУ ШВИДКОСТІ ВІТРУ В МІСЬКОМУ СЕРЕДОВИЩІ.....	31
Руденко Д.В., Васюченко П.В. МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ РОБОТИ СОНЯЧНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ БАТАРЕЙ.....	42
Шелешей Т.В. РОЗРОБКА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ СТОСОВНО ПОНИЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ДИМОВИХ ГАЗІВ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ВПЛИВУ НА НИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ І РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ.....	48

РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

Слободянюк В.К. АНАЛІЗ І ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ ПЕРЕВАНТАЖУВАЛЬНИХ ПУНКТІВ АВТОМОБІЛЬНО-ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ.....	54
Тверда О.Я., Репін М.В., Ткачук К.К., Радецька О.Й. ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ ЗАРЯДУ ДЛЯ ВИБУХОВОГО РУЙНУВАННЯ СКЕЛЬНИХ ПОРІД.....	64

МЕТАЛУРГІЯ

Тарасов В.К., Румянцев В.Р., Мосейко Ю.В., Панова В.О., Макушина Т.В. ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ЗНИЖЕННЯ ПОЛОМОК ГРАФІТОВИХ ЕЛЕКТРОДІВ ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ.....	68
--	----

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Авіна С.І., Гринь Г.І., Дейнека Д.М. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СКЛАДУ ГАЗОВОЇ СУМІШІ НА СИНТЕЗ ЦІАНІСТОГО ВОДНЮ	74
Гамада В.Р., Колб Ю.І., Конечна Р.Т., Парацин Ж.Д., Новіков В.П. ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ <i>IN SILICO</i> У ДОСЛІДЖЕННЯХ <i>ADONIS VERNALIS</i>	79
Гомеля М.Д., Радовенчик Я.В., Побережний М.В. ІНТЕНСИФІКАЦІЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВИПАРЮВАННЯ РІДИН.....	86

Гомеля М.Д., Трус І.М., Глушко О.В. ОЧИСТКА ВОДИ ВІД ІОНІВ МІДІ ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ МАГНЕТИТУ.....	92
Іванченко А.В., Пасс О.В. ВИКОРИСТАННЯ ДОДАТКОВОГО ЕЖЕКТОРА В СИСТЕМІ ВАКУУМНОЇ КОНДЕНСАЦІЇ КОМПРЕСОРА СИНТЕЗ-ГАЗУ НА АГРЕГАТІ СИНТЕЗУ АМОНІАКУ.....	98
Ларичева Л.П., Черненко Я.М., Зима Ю.С. ПЕРЕРОВКА НИЗЬКОЯКІСНИХ ФОСФОРИТІВ У ЗАЛІЗОАМОНІЙФОСФАТНЕ ДОБРИВО.....	103
Михайлова Є.О., Мороз М.О., Маркова Н.Б., Багорова І.В. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ХІМІЧНО ОСАДЖЕНОГО КАРБОНАТУ КАЛЬЦІУ.....	108
Николаева В.Г., Пушкарев Ю.Н. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕНДЕНЦИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПИЩЕВЫХ МАСЕЛ И ЖИРОВ.....	113
Похмурська А.В., Грищенко О.М., Баран Н.М., Волошкевич П.П. ОСОБЛИВОСТІ СИНТЕЗУ ТА СТРУКТУРА Ag(0)/пГЕМА-пр-ПВП НАНОКОМПОЗИТИВ, ОДЕРЖАНИХ ПОЛІМЕРИЗАЦІЄЮ З ОСАДЖЕННЯМ МЕТАЛУ.....	118
Соболев В.О. АЛЬТЕРНАТИВНА ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТА І БЕЗПЕЧНА ЖИТТЄДІЯЛЬНІСТЬ ЗАДЛЯ ЗАХИСТУ ТА ЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИРОДНИХ РЕСУРСІВ.....	125
Штефан В.В., Єпіфанова А.С., Метеньканич М.М., Школьнікова Т.В. СТРУКТУРНО-ФАЗОВИЙ СКЛАД КОМПОЗИЦІЙНОГО СПЛАВУ Co–Mo–TiO ₂	131
Shtefan V.V., Kanunnikova N.A., Leshchenko S.A., Balamut N.S. ANODIC DISSOLUTION OF STAINLESS STEEL IN ACID SOLUTIONS.....	136
ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ	
Антоненко А.В., Земліна Ю.В., Грищенко І.М., Приходько К.О., Гусаченко Я.С., Мандригель О.В. СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗАМОРОЖЕНИХ ДЕСЕРТИВ НА ОСНОВІ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ.....	142
Гончаров Д.С., Ткаченко Н.А. ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ФІТОСТЕРОЛІВ У ВИРОБНИЦТВІ ПРОДУКТІВ ДЛЯ ЗДОРОВОГО ХАРЧУВАННЯ.....	150
Kondratjuk N.V., Ruvovarov Ye.P., Stepanova T.M., Chernushenko O.O. THEORETICAL REASONING OF THE HYDROGELS DEVELOPMENT BASED ON URONATE POLYSACCHARIDES.....	158
Луговська О.А. ДОСЛІДЖЕННЯ СТУПЕНЯ ГІДРОЛІЗУ ІНУЛІНУ ТА ОЛІГОФРУКТОЗИ В НАПОЯХ.....	162
Петраченко Д.О., Коропченко С.П. ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ МЕХАНІЗМУ ДЛЯ ОБРУШУВАННЯ НАСІННЯ ПРОМИСЛОВИХ КОНОПЕЛЬ.....	167
Семешко О.Я. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНЦЕНТРАЦІЇ АКТИВНИХ БАРВНИКІВ НА СВІТЛОСТІЙКІСТЬ ЗАБАРВЛЕНЬ БАВОВНЯНОГО ТРИКОТАЖНОГО ПОЛОТНА.....	172
Скрипніченко Д.М., Котляр Є.О., Галкіна Д.В., Панфілов М.О., Куделько С.Ю. ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБІВ ОТРИМАННЯ ТА СУШІННЯ ХАРЧОВОГО КАЗЕЇНУ.....	176

ТРАНСПОРТ

Завальнюк І.П., Нестеренко В.Б., Завальнюк О.П.

АНАЛІЗ ВИКОРИСТОВУВАНИХ МЕТОДІВ НАБЛИЖЕНИХ РОЗРАХУНКІВ ПІД ЧАС
ФОРМУВАННЯ СФЕРИ КОМПЕТЕНТНОСТІ СУДНОВОДІЯ.....182

Тирон-Вороб'єва Н.Б., Романовская О.Р., Данилян А.Г.

БАЛЛАСТНЫЕ ВОДЫ: БЕЗОПАСНОСТЬ ИЛИ УГРОЗА МОРСКИХ СУДОВ.....188

БУДІВНИЦТВО

Азізов Т.Н., Миза О.С., Орлова О.М., Нагайчук О.В.

ГРАНИЦІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДИК НЕЛІНІЙНОГО РОЗРАХУНКУ КОМБІНОВАНИХ
БАЛОК І ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ВИКОРИСТАННЯ ТАКИХ БАЛОК У БУДІВНИЦТВІ.....193

ГЕОДЕЗІЯ

Міхно П.Б.

АПРІОРНЕ РАНЖУВАННЯ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ПОРУШЕНИХ ЗЕМЕЛЬ199

Поморцева О.Є.

ТРІВИМІРНИЙ КАДАСТР НЕРУХОМОСТІ: ПРОБЛЕМИ ТА РІШЕННЯ.....206

Ряпухін В.М., Фоменко Г.Р., Арсеньєва Н.О., Синовець О.С.

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
ПІД ЧАС ПАСПОРТИЗАЦІЇ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ.....211

Фоменко Г.Р., Арсеньєва Н.О., Саркісян Г.С., Ємець В.А.

НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКЕ СТАЖУВАННЯ З ГЕОДЕЗІЇ ТА ЗЕМЛЕУСТРОЮ –
ВАЖЛИВА СКЛАДОВА ЧАСТИНА ПІДГОТОВКИ СУЧАСНИХ МАГІСТРІВ.....216

ЕЛЕКТРОНІКА

Копитько Ю.С.

ОГЛЯД МОЖЛИВИХ ЗАСТОСУВАНЬ АКУСТИЧНИХ МЕТАМАТЕРІАЛІВ.....221

CONTENTS

EQUIPMENT

Bohdan H.A., Filippova M.V.

THE LABORATORY BENCH FOR HIGH-PRECISION
MEASUREMENTS OF ULTRASONIC WAVES PROPAGATION VELOCITY1

Cherepanska I.Yu., Bezvesilna O.M., Sazonov A.Yu.

ALGORITHMIC CORRECTION OF MEASURING RESULTS
OF THE PRECISE INSTRUMENT GONIOMETRIC SYSTEM6

POWER ENGINEERING

Bednarska I.S., Rindyuk D.V.

ANALYSIS OF APPROACHES TO THE EVALUATION OF THERMAL
AND STRESS-DEFORMED STATE OF STEAM PIPELINES ELEMENTS OF NPP12

Zaykov V.P., Mescheryakov V.I., Zhuravlov Yu.I.

FUNCTIONING DYNAMICS OF A SINGLE-STAGE THERMOELECTRIC COOLING DEVICE17

Mykhailenko O.Yu., Karabut N.O., Shchokin V.P., Melnyk O.Ye., Kuzmenko A.S.

STRUCTURAL AND PARAMETRIC IDENTIFICATION
OF THE WIND SPEED DISTRIBUTION STATISTICAL MODEL IN URBAN AREAS31

Rudenko D.V., Vasyuchenko P.V.

MODELING OF PHYSICAL PROCESSES OF THE SOLAR PHOTOVOLTAIC42

Sheleshey T.V.

DEVELOPMENT OF TECHNICAL SOLUTIONS ON THE REDUCTION
OF THE DEMOGRAPHIC GAS TEMPERATURE ON INVESTIGATION
ON THEIR OPERATIONAL AND REGULATORY PARAMETERS48

RESOURCE DEVELOPMENT

Slobodyanyuk V.K.

ANALYSIS AND IMPROVEMENT OF DESIGNS OF RELOADING POINTS
FOR THE ROAD AND RAIL TRANSPORT54

Tverda O.Ya., Repin M.V., Tkachuk K.K., Radetska O.Yo.

ECOLOGICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF THE RESOURCE-SAVING CHARGE
FOR EXPLOSIVE DESTRUCTION OF ROCK64

METALLURGY

Tarasov V.K., Rumianzev V.R., Moseiko Yu.V. Panova V.O., Makushina T.V.

IMPROVEMENT OF SYSTEM TO DECREASE BREAKAGES
OF THE GRAPHITE ELECTRODES OF ARC STEEL-SMELTING FURNACES68

CHEMICAL TECHNOLOGY

Avina S.I., Gryn G.I., Deineka D.M.

RESEARCHES OF INFLUENCE OF COMPOSITION OF THE GAS MIXTURE
ON THE SYNTHESIS OF CYANIDE HYDROGEN74

Hamada V.R., Kolb Yu.I., Konechna R.T., Parashchyn Z.D., Novikov V.P.

IN SILICO METHODS IN RESEARCH OF ADONIS VERNALIS79

Gomelya M.D., Radovenchyk Ia.V., Poberezhnyi M.V.

INTENSIFICATION OF LOW TEMPERATURE LIQUID EVAPORATION86

Gomelya M.D., Trus I.M., Hlushko O.V. WATER PURIFICATION FROM COPPER IONS USING MAGNETITE	92
Ivanchenko A.V., Pass O.V. THE USING OF THE SUPPORTING EJECTOR IN THE VACUUM CONDENSATION SYSTEM OF SYNTHESIS-GAS COMPRESSOR IN THE AMMONIA SYNTHESIS	98
Larycheva L.P., Chernenko Ya.M., Zyma Yu.C. PROCESSING OF LOW-QUALITY PHOSPHORITES IN IRON-AMMONIUM PHOSPHATE FERTILIZER.....	103
Mykhailova E.O., Moroz M.O., Markova N.B., Bagrova I.V. RESEARCH AND MODELING OF PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF CHEMICAL PRECIPITATED CALCIUM CARBONATE	108
Nikolaieva V.H., Pushkarev Yu.N. ANALYSIS OF CURRENT TRENDS IN THE PRODUCTION OF EDIBLE OILS AND FATS.....	113
Pokhmurska A.V., Grytsenko O.M., Baran N.M., Voloshkevych P.P. SYNTHESIS FEATURES AND STRUCTURE OF Ag(0)/pHEMA-gr-PVP NANOCOMPOSITES OBTAINED BY POLYMERIZATION WITH METAL DEPOSITION	118
Sobolev W.A. ALTERNATIVE ECOLOGICALLY PURE AND SAFE ACTIVITY FOR PROTECTION AND CONSERVATION OF NATURAL RESOURCES.....	125
Shtefan V.V., Yepifanova A.S., Metenkanych M.N., Shkolnikova T.V. STRUCTURAL-PHASE COMPONENTS OF COMPOSITE ALLOY Co–Mo–TiO ₂	131
Shtefan V.V., Kanunnikova N.A., Leshchenko S.A., Balamut N.S. ANODIC DISSOLUTION OF STAINLESS STEEL IN ACID SOLUTIONS	136
TECHNOLOGY OF FOOD PROCESSING AND CONSUMER GOODS INDUSTRY	
Antonenko A.V., Zemlina U.V., Grischenko I.M., Prikhodko K.O., Gusachenko Ya.S., Mandrigel O.V. MODERN TECHNOLOGIES OF FROZEN DESSERTS ON THE BASIS OF PLANT RAW MATERIAL.....	142
Honcharov D.S., Tkachenko N.A. PERSPECTIVES FOR USE OF PHYTOSTEROLS IN MANUFACTURING OF FOOD PRODUCTS FOR HEALTHY NUTRITION.....	150
Kondratjuk N.V., Pyvovarov Ye.P., Stepanova T.M., Chernushenko O.O. THEORETICAL REASONING OF THE HYDROGELS DEVELOPMENT BASED ON URONATE POLYSACCHARIDES	158
Lugovska O.A. INVESTIGATION OF STABILITY OF INULIN AND OLIGOFRUCTOSE IN DRINKS.....	162
Petrachenko D.O., Koropchenko S.P. RESEARCH OF THE CONSTRUCTION OF MECHANISM FOR SHELLING OF INDUSTRIAL HEMP SEEDS	167
Semeshko O.Ya. STUDY OF THE CONCENTRATION EFFECT OF REACTIVE DYES ON THE LIGHTFASTNESS OF COLOURS COTTON KNITTED FABRICS	172
Skrypnichenko D.M., Kotliar E.O., Galkina D.V., Panfilov M.O., Kudelko S.U. RESEARCH OF METHODS OF OBTAINING AND DRYING FOOD CASEIN	176

TRANSPORT

Zavalniuk I.P., Nesterenko V.B., Zavalniuk O.P.

THE APPLICABLE METHODS OF APPROXIMATE CALCULATIONS ANALYSIS
FOR THE SPHERE NAVIGATOR COMPETENCE FORMATION182

Tiron-Vorobiova N.B., Romanovska O.R., Danilyan A.H.

BALLAST WATER: SAFETY OR THREAT OF SEA VESSELS188

CONSTRUCTION

Azizov T.N., Myza O.S., Orlova O.M., Nagaichuk O.V.

THE BOUNDS OF NON-LINEAR CALCULATION OF THE COMBINED BEAMS
TECHNIQUES APPLICATION AND PROPOSALS OF THEIR USAGE IN ENGINEERING193

GEODESY

Mikhno P.B.

APRIORI RANKING FOR ASSESSMENT OF DISTURBED LANDS199

Pomortseva O.E.

3D CADASTRE REAL ESTATE: PROBLEMS AND SOLUTIONS206

Ryapuhin V.M., Fomenko G.R., Arsenieva N.O., Synovets O.S.

FEATURES OF APPLICATION OF GEOINFORMATION TECHNOLOGIES
AT CERTIFICATION OF ROADS.....211

Fomenko G.R., Arsenieva N.O., Sarkisyan G.S., Emets V.A.

SCIENTIFIC RESEARCH TRAINING ON GEODESY AND LAND MANAGEMENT –
AN IMPORTANT COMPONENT OF TRAINING OF MODERN MASTERS216

ELECTRONICS

Kopytko Yu.S.

THE REVIEW OF POSSIBLE APPLICATIONS OF ACOUSTIC METAMATERIALS.....221

ПРИЛАДИ

УДК 620.179

Богдан Г.А.

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Филиппова М.В.

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН

В статье рассмотрены вопросы создания лабораторного стенда для высокоточных измерений скорости распространения ультразвуковых волн для определения физико-механических характеристик порошковых материалов. Особенное внимание уделено способам уменьшения суммарной погрешности измерения за счет автоматизации процесса, использования методов статистической обработки данных и совокупности структурно-параметрических решений.

Ключевые слова: ультразвук, неразрушающий контроль, скорость распространения, точность, погрешность.

Постановка проблемы. Сегодня широкое распространение получили методы неразрушающего контроля (НК) для определения как дефектов, так и физико-механических характеристик различных порошковых материалов, особенно на стадии их изготовления [1].

Анализ последних исследований и публикаций. В работах [2; 3] рассмотрены достоинства и недостатки различных методов, и показано, что для лабораторных измерений характеристик порошковых материалов наиболее рационально использовать ультразвуковые методы НК.

Из [4–6] известно, что ультразвуковые методы НК относятся к косвенным и позволяют оценить искомую величину по существующим корреляционным или аналитическим зависимостям скорости распространения ультразвуковой волны в исследуемом материале. При этом информативным параметром диагностики является скорость ультразвуковых колебаний прохождения сигналов в контролируемом объекте. Особенности отработки технологии изготовления порошковых конструкционных материалов (ПКМ) требуют обеспечения погрешности измерения информационного параметра УЗВ не более чем 1% [4], что является актуальной задачей. Примеры установок комплексного измерения акустических параметров волны приведены в [8; 9].

Однако наличие методических и случайных погрешностей в результатах измерения не позволяет обеспечить погрешность измерений 1% при контроле порошковых материалов. Поставленную задачу можно решить с помощью лабораторного стенда для измерения скорости распространения ультразвуковой волны (УЗВ) в объекте контроля, что позволит снизить погрешность определения ФМХ порошковых материалов.

Для обеспечения требуемой точности определения ФМХ порошковых материалов также необходимо провести анализ суммарной погрешности измерения скорости распространения УЗВ в порошковых материалах, выделить области, которые обуславливают возникновение максимальных погрешностей результатов измерения, и минимизировать их влияние на итоговый результат [4; 6; 10].

Постановка задания. Цель статьи – разработка лабораторного стенда, который позволит обеспечить погрешность измерения скорости распространения ультразвуковой волны в ПКМ не более 1%.

Изложение основного материала исследования. Как известно, измерение скорости относится к непрямым методам измерения [4; 6], при которых искомый информационный параметр находят из известных арифметических зависимостей

на основе измерения других величин. При реализации метода прохождения скорость распространения УЗВ рассчитывается по формуле:

$$C = \frac{h}{t - t_0}, \quad (1)$$

где h – геометрическая база объекта контроля в точке измерения, t – время прохождения УЗВ вдоль базы измерения, t_0 – систематическая временная поправка, вызванная прохождением ультразвукового импульса в проводах.

Анализ ультразвуковых методов прохождения УЗВ показал, что на формирование скорости распространения УЗВ в ПКМ влияют две группы факторов: технологические и измерительные (рис. 1).

Для обеспечения объективности полученных результатов измерения необходимо, чтобы влияние измерительных факторов на результирующее значение скорости распространения УЗВ в ПКМ было существенно меньше влияния технологических факторов. Таким образом, необходимо провести комплексный анализ погрешностей, возникающих в процессе измерений скорости ультразвука в ПКМ, для повышения точности измерений, производимых на лабораторном стенде.

Рассмотрим составляющие суммарной неопределенности измерения скорости ультразвука. Согласно формуле (1), суммарная неопределенность, обусловленная неточностью измерения скорости распространения упругой волны в объекте контроля, имеет вид:

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{\partial c}{\partial h}\right)^2 \cdot u_h^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial t}\right)^2 \cdot u_t^2}, \quad (2)$$

где u_h – неопределенность измерения геометрических параметров объекта контроля; u_t – неопределенность измерения времени распространения упругой волны в объекте контроля.

Уменьшение общей погрешности измерения скорости УЗВ должно решаться комплексно, с одновременным уменьшением погрешности измерения, толщины контролируемого материала и временного интервала прохождения УЗВ в нем. Для этого необходимо теоретически или экспериментально оценить и просуммировать все составляющие погрешности и суммировать с учетом законов их распределения.

К факторам, оказывающим наибольшее влияние на формирование суммарной погрешности при измерении скорости распространения УЗВ в ПКМ, относятся: квалификация оператора, сила прижатия блока ультразвуковых преобразователей к объекту контроля (ОК), несоосность установки датчиков на поверхности ОК, неплоскопараллельность поверхности исследуемого объекта, несовпадение акустической и геометрической базы измерения [4; 6]. Суммарная погрешность перечисленных факторов при измерении скорости прохождения УЗВ может составлять до 10%, что существенно превышает разброс информативного параметра, вызванный влиянием технологических факторов на процесс измерения.

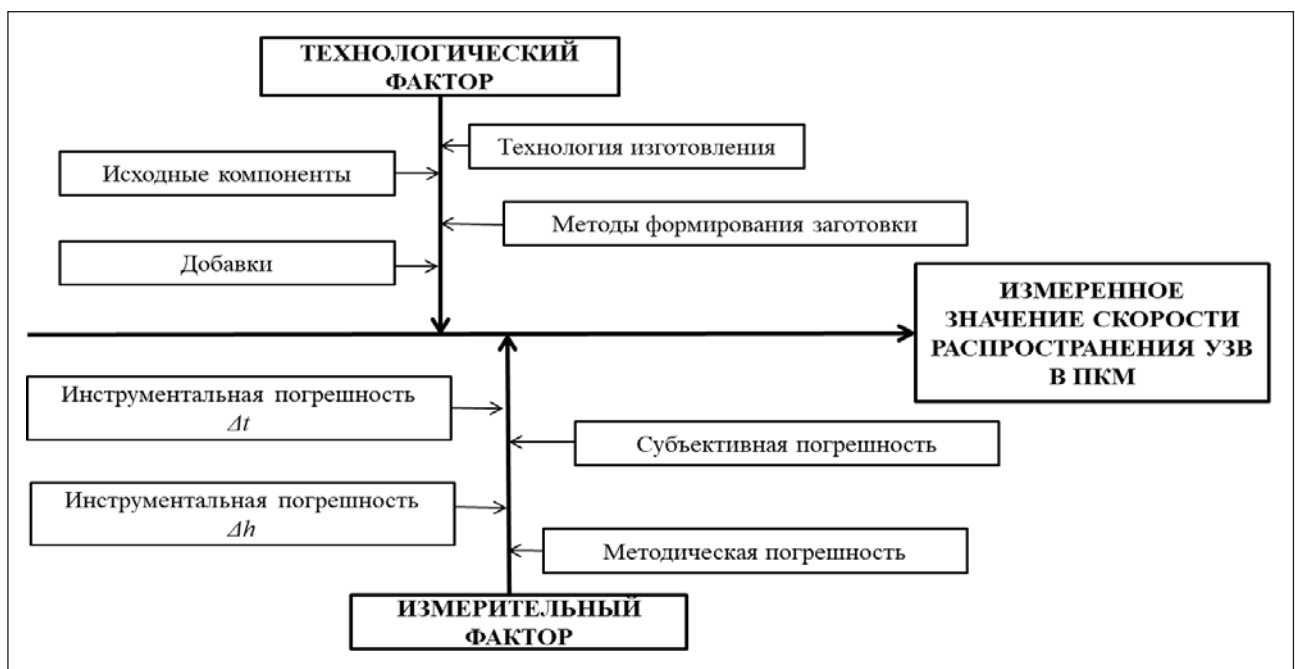


Рис. 1. Факторы, влияющие на результат измерения скорости распространения ультразвуковой волны в порошковых конструкционных материалах

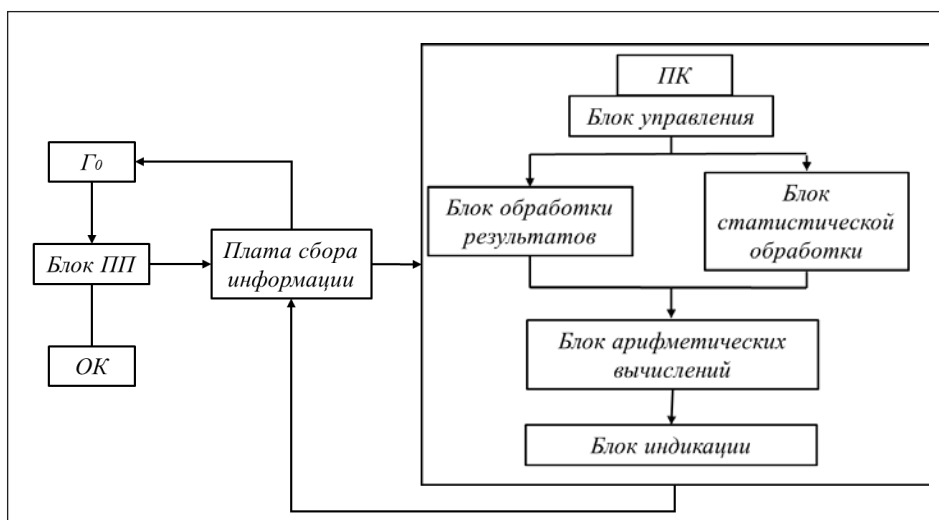


Рис. 2. Структурная схема лабораторного стенда для измерения скорости распространения УЗВ в ПКМ

G_0 – высокостабильный генератор сигналов частоты дискретизации;
 ПП – блок фиксации ультразвуковых преобразователей на поверхности ОК;
 ПК – персональный компьютер

Для уменьшения погрешности и повышения точности результатов измерения разработан лабораторный стенд, структурная схема которого представлена на рис. 2.

Рассмотрим более подробно назначение отдельных блоков лабораторного стенда.

Блок ПП предназначен для жесткой фиксации ОК- и УЗ-пьезопреобразователей друг относительно друга, обеспечения соответствия геометрической и акустической осей друг другу, стабильности и повторяемости силы прижатия УЗ-преобразователей к поверхности ОК и соосности УЗ-датчиков. Это позволяет уменьшить методическую и субъективную составляющую суммарной погрешности измерения скорости распространения УЗВ в ОК. Блок ПП (рис. 3.) состоит из неподвижной нижней платформы, в которой закрепляется принимающий УЗ-датчик (в случае реализации УЗ-метода прохождения), подвижной верхней платформы с закрепленным на ней излучающим датчиком и винта, по которому происходит перемещение верхней платформы. Такая конструкция блока ПП позволяет производить контроль объектов различных геометрических размеров.

За счет использования динамометрического механизма в винтовой конструкции разработанного блока выполняется обеспечение постоянной силы прижатия датчиков к поверхности ОК. Использование специальных сменных вкладышей позволяет производить измерения с различными ультразвуковыми датчиками.



Рис. 3. Внешний вид блока фиксации ультразвуковых преобразователей на поверхности ОК

Данная конструкция лабораторного стенда позволяет реализовать два ультразвуковых метода измерения скорости прохождения упругой волны: метод прохождения и эхо-метод. В случае реализации эхо-метода используется другой алгоритм расчета скорости распространения УЗВ.

Для уменьшения субъективной погрешности измерения расчет геометрических размеров базы прозвучивания производится автоматически с использованием электронного штангенциркуля [11].

На базе платы сбора информации реализовано устройство, позволяющее одновременно производить измерения времени прохождения ультразвуковой волны в ОК и геометрических параметров ОК. Данное устройство реализует как амплитудный метод измерения времени задержки, так и фазовый, обеспечивая при этом работу в широком частотном диапазоне. Также плата сбора информации осуществляет формирование зондирующего импульса и сбор измерительной информации.

Основные технические характеристики платы сбора информации:

1. Частота зондирующих импульсов изменяется в пределах от 2,5 МГц до 10 (выбирается в зависимости от материала ОК).
2. Динамический диапазон усиления приемного тракта – 48 дБ.
3. Частота дискретизации – 100 МГц.
4. Разрядность АЦП – 14 бит.

В ПК реализованы функции: управления и синхронизации работы всей системы, обработки результатов измерений, статистической обработки данных, вычисления времени прохождения УЗВ в ОК и индикации результатов измерения и математического вычисления.

Информационное и программное обеспечение для выполнения совместной работы разработанной платы сбора информации и компьютера, реализации алгоритмов статистической и математической обработки полученных результатов измерений реализовано в среде разработки и платформы для выполнения программ, созданной на графическом языке программирования LabView (National Instruments, USA). По сигналу с ПК осуществляется работа всего лабораторного стенда, то есть измерения толщины ОК, времени задержки, обработка полученных массивов данных, расчет искомых характеристик ПКМ и вывода полученных результатов на экран монитора. В настройках стенда есть возможность задания количества необходимых измерений.

Для проведения исследований были использованы образцы в форме прямоугольной призмы с размером стороны 3 мм из многофазного материала (композитный материал типа LaB6-TiB2) и однофазного материала (органическое стекло). Измерения проводились по одной плоскости.

Использовался ультразвуковой метод прохождения на частоте 2,5 МГц. Скорость распространения ультразвуковой волны в ОК при использовании метода прохождения рассчитывается по формуле (1).

Для каждой точки прозвучивание измерения информационных параметров проводилось 100 раз с последующим усреднением полученных результатов. В табл. 1 приведены основные статистические характеристики выборок измеренных значений скорости УЗХ в образцах.

Анализ приведенных в табл. 1 данных показал, что полученные результаты измеренных значений скорости распространения УЗВ имеют незначительный разброс данных как в однофазном материале, так и в многофазном. Использование разработанного лабораторного стенда позволяет обеспечить погрешность измерения скорости распространения УЗВ для однофазных материалов на уровне 0,4%, для многофазных – 1%.

Выводы. Лабораторный стенд позволяет реализовать различные ультразвуковые методы неразрушающего контроля, проводить диагностику физико-механических характеристик порошковых конструкционных материалов. Использование разработанной системы для оценки физико-механических характеристик порошковых конструкционных материалов позволяет обеспечить измерение скорости распространения ультразвуковой волны с погрешностью менее 1%. Уменьшение погрешности достигается за счет комплексного применения автоматизации процесса получения измерительной информации, методов статистической обработки данных и совокупности структурно-параметрических решений.

Таблица 1

Статистические характеристики измеренных значений скорости распространения УЗВ в исследуемых образцах по выборкам объема N = 100

Материал ОК	Скорость распространения УЗВ, (м/с)				
	min	max	Размах	Математическое ожидание	Среднее квадратическое отклонение
Орг. стекло	2659	2683	24	2672,72	6,076
LaB6-TiB2	8356	8645	259	8514	10,81

Список литературы:

1. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник / под ред. В.В. Клюева. Москва : Машиностроение, 2003. 656 с.
2. Барынин В.А., Будадин О.Н., Кульков А.А. Современные технологии неразрушающего контроля конструкций из полимерных композиционных материалов. Москва : Спектр, 2013. 242 с.
3. Щербинский В.Г. Ультразвуковая дефектоскопия: вчера, сегодня, завтра. *В мире неразрушающего контроля*. 2002. № 4(18). С. 6–9.
4. Богдан Г.А., Галаган Р.М. Анализ погрешностей измерения скорости распространения ультразвуковой волны в многофазных порошковых материалах. Часть 1: Влияние субъективной погрешности. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Приладобудування»*. 2015. Вип. 49. С. 53–60.
5. Panakkal J.P. Ultrasonic velocity as a predictor of Young's modulus in porous materials. *Materials Evaluation*. 1997. V.55. № 12. P. 1367–1371.
6. Богдан Г.А., Галаган Р.М. Анализ погрешностей измерения скорости распространения ультразвуковой волны в многофазных порошковых материалах. Часть 2: Влияние инструментальной и методической погрешностей. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Приладобудування»*. 2016. Вип. 51(1). С. 52–57.
7. Балдев Р., Раджендран В., Паланичами П. Применение ультразвука. Москва : Техносфера, 2006. 576 с.
8. Кондратьев А.И. Прецизионные методы и средства измерения акустических величин твердых сред. Хабаровск : ДВГУПС, 2006. 152 с.
9. Базылев П.В., Кондратьев А.И., Луговой В.А. Эталонная установка для комплексного измерения акустических параметров в конденсированных средах. *III Российская научно-техническая конференция «Разрушение, контроль и диагностика материалов и конструкций»*. Хабаровск, 2007. С. 229–233.
10. Demchenko M., Tymchik G., Filippova M. Analysis of acoustic diagnostics errors of stress state for shaped profiles of metal structures. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2016. № 5(6). P. 50–57.
11. Галаган Р. М., Кащич М.В. Ультразвуковой штангенциркуль. *Методи та прилади контролю якості*. 2008. № 20. С. 18–20.

ЛАБОРАТОРНИЙ СТЕНД ДЛЯ ТОЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ ШВИДКОСТІ ПОШИРЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ

У статті розглянуто питання створення лабораторного стенду високоточних вимірювань швидкості поширення ультразвукових хвиль для визначення фізико-механічних характеристик порошкових матеріалів. Особливу увагу приділено способам зменшення сумарної похибки вимірювання за рахунок автоматизації процесу, використання методів статистичної обробки даних та сукупності структурно-параметричних рішень.

Ключові слова: *ультразвук, неруйнівний контроль, швидкість поширення, точність, похибка.*

THE LABORATORY BENCH FOR HIGH-PRECISION MEASUREMENTS OF ULTRASONIC WAVES PROPAGATION VELOCITY

The article deals with the laboratory test bench creation for high-precision measurements of the ultrasonic wave velocity propagation to determine the powder materials physic mechanical characteristics. Particular attention is paid to ways to reduce the total measurement error by automating the process, using statistical data processing methods, and a set of structural and parametric solutions.

Key words: *ultrasound, non-destructive control, rate of distribution, accuracy, error.*

УДК 004.89

Черепанська І.Ю.

Житомирський державний технологічний університет

Безвесільна О.М.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сазонов А.Ю.

Житомирський державний технологічний університет

АЛГОРИТМІЧНА КОРЕКЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ ПРЕЦИЗІЙНОЇ ПРИЛАДОВОЇ ГОНІОМЕТРИЧНОЇ СИСТЕМИ

У статті наводиться алгоритмічний метод корекції результатів вимірювання величин плоских кутів прецизійною приладовою гоніометричною системою. Основою методу є повна математична модель випадкових та систематичних складових похибок вимірювання, яка враховує несприятливі фактори, що виникають у нестационарних виробничих умовах, наприклад, автоматизованих приладових та машиновиробничств, попередньої виставки навігаційних чутливих елементів тощо, що супроводжуються виникненням низки завад, які додаються до вихідного вимірювального сигналу чутливого елемента. Алгоритмічна корекція результатів вимірювання може проводитись без застосування спеціалізованого лабораторного обладнання безпосередньо в процесі експлуатації прецизійної приладової гоніометричної системи при проведенні експерименту.

Ключові слова: гоніометрична система, алгоритмічна корекція, похибки вимірювання, систематична похибка, випадкова похибка.

Постановка проблеми. У процесі розробки сучасних високоточних гоніометричних систем, що використовуються для проведення різноманітних вимірювань величин плоских кутів у багатьох галузях науки і техніки, особлива увага приділяється підвищенню їх точності. Одним із перспективних і актуальних шляхів підвищення точності різних гоніометричних систем, у тому числі відомої прецизійної приладової гоніометричної системи (ППГС) [1], нині є застосування алгоритмічних методів обробки сигналів та компенсації похибок. Застосування вказаного дає змогу здійснювати корекцію результатів вимірювання, без застосування спеціалізованого лабораторного обладнання, безпосередньо під час проведення експерименту в процесі експлуатації ППГС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відома низка наукових праць [2–7], в яких описано теоретичні основи і досліджено алгоритми корекції та фільтрації вимірювальних сигналів. Так, у роботі «Алгоритмічні методи високоточного визначення лінійних прискорень» [2] розглядаються алгоритмічні методи високоточного визначення лінійних прискорень у реальному часі. Основою цих методів є ідентифікація вектору стану чутливого елемента у вимірювачах прискорень, які використовую-

ються в інерціальних та гравіметричних системах. В роботі «Алгоритмы компенсации погрешностей выходного сигнала лазерного гороскопа» [3] розглядаються алгоритми компенсації похибок вихідного сигналу лазерного гіроскопа. В роботі [4] приводиться математична модель інструментальних похибок інклінометра на основі блоку триосового акселерометричного перетворювача для інклінометричних систем контролю, застосування якої при корекції результатів вимірювання дозволяє підвищити точність при вимірюванні. В роботі [5] описано нейромережевий алгоритм підвищення точності гоніометричних вимірювань та корекції вихідного сигналу. В роботі [6] розглядаються методи підвищення точності вимірювань на основі зворотних математичних моделей вимірювального каналу. В роботі [7] розглядаються основні методи підвищення точності навігаційного комплексу в режимі корекції. Встановлено, що найбільш актуальним є структурно-алгоритмічні методи підвищення точності в режимі корекції. Вказується, що розробка та вдосконалення алгоритмічного забезпечення дають змогу більш гнучко та ефективно використовувати нові і відомі системи та датчики вимірювальних систем. Необхідно вказати, що у певних роботах [2–4; 6; 7] не висвітлюються

питання корекції результатів гоніометричних вимірювань, а в роботі «Development of artificial neural network for determining the components of errors when measuring angles using a goniometric software-hardware complex» [5] не враховуються завади у випадку роботи ППГС у несприятливих та нестаціонарних умовах.

Гоніометричні вимірювання ППГС проводяться у несприятливих та нестаціонарних умовах, наприклад, автоматизованих приладо- та машиновиробництв, попередньої виставки навігаційних чутливих елементів тощо, що супроводжуються виникненням низки завод, які додаються до вихідного вимірювального сигналу чутливого елементу (ЧЕ) ППГС. Тому необхідно враховувати ці особливості, розробляючи математичні моделі похибок, що є основою алгоритмів корекції результатів вимірювання.

Постановка завдання. Метою статті є розробка алгоритмічного методу корекції вихідного сигналу ЧЕ ППГС, що забезпечить підвищення точності вимірювань величин плоских кутів у несприятливих та нестаціонарних умовах та дасть змогу здійснювати корекцію результатів вимірювання, без застосування спеціалізованого лабораторного обладнання, безпосередньо в процесі експлуатації ППГС.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для ППСВК властиві всі види похибок, що визначаються загальноприйнятою класифікацією. Зокрема, похибка вимірювання має систематичну та випадкову складові частини, зміна яких в часі являє собою нестаціонарний випадковий процес при проведенні багаторазових вимірювань.

Повна математична модель похибки вимірювання кутів ППСВК описується з врахуванням причин, що призводять до відмінності результатів вимірювань при проведенні багаторазових експериментів. Причинами є: *інструментальна* $\Delta\phi_I$, *методична* $\Delta\phi_M$ та *суб'єктивна* $\Delta\phi_S$ похибки, які проявляються в результатах вимірювання у вигляді систематичних та випадкових складових частин похибки вимірювання.

Повна математична модель похибки вимірювання кутів представлена виразом:

$$\Delta\phi = f(\Delta\phi_I; \Delta\phi_M; \Delta\phi_S) = \left(2\pi \int_{t_1}^{t_2} \left[K(t)\omega_{LG}(t)\cos\alpha(t) + \frac{K_1(t)}{\omega_{LG}(t)\cos\alpha(t)} + f_0(t) \right] dt + N_{q1} \right) + \Delta\phi_{\omega} + \Delta\phi_{BT} - \phi, \quad (1)$$

де $\Delta\phi$ – похибка вимірювання кутів ППСВК; $\Delta\phi_I$ – інструментальна похибка; $\Delta\phi_M$ – методична похибка перевірки гоніометра; $\Delta\phi_S$ – суб'єктивна похибка оператора; $t_1, t_\phi, t_{2\pi}$ – моменти часу початку вимірювання, повороту на вимірюваний кут ϕ та

кут 2π відповідно, що зафіксовані автоколіматором; $K(t)$ – масштабний коефіцієнт ЧЕ; ω_α – кутова швидкість, що впливає на гоніометр; $\alpha(t)$ – кут між віссю обертання обертового пристрою і віссю чутливості гоніометра; $K_{-1}(t), f_0(t)$ – нелінійність і зсув нуля вихідної характеристики ЧЕ відповідно; N_{q1}, N_{q2} – шум і дискретність квантування сигналу гоніометра; $\Delta\phi_{cal}$ – похибка обчислень значень вимірюваного кута в ЕОМ; $\Delta\phi_{BT}$ – виробничо-технологічна похибка, зумовлена відхиленням параметрів виробничих процесів виготовлення складників ППГС від заданих; ϕ – дійсне значення вимірюваного кута.

Вираз (1) може розв'язуватися чисельними методами. Проте оцінка похибки вимірювання кута $\Delta\phi$ за виразом (1) у загальному вигляді є досить складною математичною задачею. Тому при вирішенні практичних задач використовуємо вираз (2):

$$\Delta\phi = \phi - \phi_0, \quad (2)$$

де ϕ – виміряне значення кута за виразом (1), ϕ_0 – істинне значення.

Домінуючою щодо інших складових частин похибок ППГС є *інструментальна похибка* $\Delta\phi_I$, яка зумовлюється недосконалістю технологічного процесу виготовлення, експлуатаційною зміною параметрів та характеристик конструкційних матеріалів і складових елементів системи, впливом зовнішніх та внутрішніх збурень (наприклад, кутової швидкості різної природи, електромагнітних полів, температури, вологи, нестабільністю напруги живлення тощо), що призводить до періодичної зміни параметрів системи загалом і впливає на її функцію перетворення $Y(t) = f(X(t))$. Складниками інструментальної похибки $\Delta\phi_I$ ППГС можуть бути виробничо-технологічні відхилення, шуми та завади різної природи, зовнішні та внутрішні збурення. В результаті інструментальна похибка може бути представлена таким виразом:

$$\Delta\phi_I = \Delta\phi_{BT} + \Delta\phi_{\text{ш}} + \Delta\phi_{F,F'}, \quad (3)$$

де $\Delta\phi_I$ – інструментальна похибка; $\Delta\phi_{BT}$ – виробничо-технологічна похибка; $\Delta\phi_{\text{ш}}$ – похибка шуму; $\Delta\phi_{F,F'}$ – похибка збурення, обумовлена виникненням зовнішніх $F(t)$ та внутрішніх $F'(t)$ збурень відповідно.

Зовнішні $F(t)$ та *внутрішні* $F'(t)$ збурення зумовлюють виникнення так званої похибки збурення $\Delta\phi_{F,F'}$. До зовнішніх збурень $F(t)$, що діють на гоніометр, можна зарахувати зовнішні динамічні впливи, що викликають кутові коливання основи гоніометра та визначають тенденцію зміни кута положення основи гоніометра. Так, як вимірювальний перетворювач у ППГС використовується

високоточний лазерний гоніометр, що може бути реалізований, наприклад, лазерним гіроскопом (кільцевим лазером). Останній є вимірювальним перетворювачем кутової швидкості в інерційному просторі. У зв'язку з цим прилад загалом буде підлягати впливу різних кутових швидкостей, зокрема кутової швидкості обертання платформи поворотного пристрою ($\bar{\omega}(t)$), обертання Землі ($\bar{\omega}_e$), обертання основи платформи поворотного пристрою щодо Землі ($\bar{\omega}_{bas}(t)$). Сумарний вплив кутових швидкостей різного роду на прилад може бути записаний таким виразом:

$$\bar{\omega}_\Sigma(t) = \bar{\omega}(t) + \bar{\omega}_e + \bar{\omega}_{bas}(t), \quad (4)$$

де $\bar{\omega}_\Sigma(t)$ – сумарна кутова швидкість від кутових швидкостей різного роду, що впливає на точність вимірювання ППГС; $\bar{\omega}(t)$ – кутова швидкість обертання платформи поворотного пристрою ППГС, що може бути описана виразом (7); $\bar{\omega}_e$ – кутова швидкість обертання Землі; $\bar{\omega}_{bas}(t)$ – обертання основи платформи поворотного пристрою ППГС щодо Землі ($\bar{\omega}_{bas}(t)$).

Кутова швидкість обертання платформи поворотного пристрою ППГС може бути описана таким виразом:

$$\bar{\omega}(t) = \bar{c} [\omega_0 + \omega_1 t + \omega_{det}(t) + \omega_\xi(t) + \omega_\zeta], \quad (5)$$

де \bar{c} – одиничний вектор; ω_0 – постійна складова частина кутової швидкості; ω_1 – коефіцієнт лінійного дрейфу; $\omega_{det}(t)$ – детермінована складова частина кутової швидкості (наприклад, синусоїдальні коливання); $\omega_\xi(t)$ – випадкова складова частина кутової швидкості (випадковий процес); ω_ζ – зміщення величини кутової швидкості між вмиканнями приладу, що є випадковим процесом.

Зміна кута положення основи гоніометра, зокрема величина кута між віссю обертання поворотного пристрою і віссю чутливості лазерного гіроскопа, може бути представлена таким виразом:

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_\xi(t), \quad (6)$$

де α_0 – постійне відхилення; $\alpha_\xi(t)$ – стаціонарний Гаусовський процес із математичним очікуванням $M[\alpha_\xi(t)] = 0$ і дисперсією $D[\alpha_\xi(t)] = \sigma_\alpha^2$.

Виробничо-технологічна похибка $\Delta\phi_{BT}$ виникає внаслідок виробничо-технологічних відхилень метрологічних параметрів Аі приладу від номінальних значень, що з'являються внаслідок похибок виготовлення деталей, конструкцій, вузлів гоніометра і зумовлюється частковими похибками окремих складових елементів $\Delta_j = f(\Delta_j | j = \overline{1, J})$, де j – складові елементи ППГС як складної багаторівневої вимірювальної системи, що містить первинні перетворювачі, пристрої перетворення та обробки інформації, пристрої зв'язку та передачі

інформації, пристрої зберігання та відображення інформації.

Реальна функція перетворення відрізняється від номінальної через виробничо-технологічну похибку $\Delta\phi_{BT}$, яка може бути визначена за виразом таким чином:

$$\Delta\phi_{BT} = \sum_{k=1}^K \left(\frac{d\phi_{BT}}{d\phi_{k_{BT}}} \right) \Delta\phi_{k_{BT}} = \sum_{k=1}^K B_k \Delta\phi_{k_{BT}}, \quad (7)$$

де $\Delta\phi_{BT}$ – похибка, що виникає внаслідок виробничо-технологічних відхилень процесу виробництва; $B_k = \left(\frac{d\phi_{BT}}{d\phi_{k_{BT}}} \right)$ – коефіцієнти впливу, що обчислюються при номінальних значеннях q_k -го виробничо-технологічного параметру приладу; $\Delta\phi_{k_{BT}}$ – первинна похибка параметру q_k , $\Delta\phi_{k_{BT}} = (\phi_k - \phi_{k0})$.

Шуми та завади різної природи призводять до появи похибок інформаційних сигналів ППГС. Внаслідок цього виникає так звана похибка шуму $\Delta\phi_{ш}$, що може бути представлена за таким виразом:

$$\Delta\phi_{ш} = \sum \Delta\phi(N_{q1}) + \Delta\phi(N_{q2}), \quad (8)$$

де $\Delta\phi_{ш}$ – похибка шуму; $\Delta\phi(N_{q1}); \Delta\phi(N_{q2})$ – складники похибки шуму, викликані дискретністю і квантуванням сигналу відповідно.

Похибки шуму виникають через наявність додаткових блоків у конструкції ППГС, які необхідні для дискретизації та квантування аналогових сигналів отримуваних від оптичних та електронних пристроїв ППГС (автоколіматора, CMOS-матриці) з їх подальшою обробкою у ЕОМ.

Методична похибка $\Delta\phi_M$ у загальному випадку є складовою частиною систематичної похибки вимірювань, і в цьому разі може бути зумовлена похибкою використовуваного методу атестації, повірки та градування, дрейфом вихідної характеристики, похибкою обчислень значень вимірюваного кута в ЕОМ.

Похибка використовуваного методу атестації, повірки та градування гоніометра при застосуванні зразкових засобів вимірювання, наприклад, багатогранних призм або кутових мір, які використовуються для регулювання і настройки кутомірних приладів і безпосереднього вимірювання кутів промислових виробів відповідно до ГОСТ 2875-88.

Похибка, зумовлена відхиленнями геометричної форми та розмірів багатогранної призми, може бути представлена таким чином:

$$\Delta\phi_i^k = f[\eta_{iz,k}; S_i; l_{ix,y}; \alpha_{iz,k}], \quad (9)$$

де $\eta_{iz,k}$ – відхилення від площинності кожної з i -ї грані призми по двох осях $z, k, z, k, \in \{x, y, z\}$; S_i – відхилення від прямолінійності кожної з i -ї грані призми по двох осях; $l_{ix,y}$ – відхилення від паралельності поверхонь; $\alpha_{iz,k}$ – відхилення кута.

Дрейф вихідної характеристики. Дослідження параметрів дрейфу вихідної характеристики КЛ показали, що у разі застосування гоніометрів у специфічних умовах (наприклад, при малому часі вимірювання, застосуванні методу самокалібрування, відсутності зовнішніх впливів з різкою зміною параметрів і т.д.) масштабний коефіцієнт може бути описаний виразом:

$$K(t) = K_0 + K_2 t + K_\xi(t), \quad (10)$$

де K_0 – постійна складова частина масштабного коефіцієнта; K_2 – Гаусовська випадкова величина; $K_\xi(t)$ – стаціонарний Гаусовський процес із математичним очікуванням $M[K_\xi(t)] = 0$ і дисперсією $D[K_\xi(t)] = \sigma_K^2$.

Параметри $K_{-1}(t)$ і $f_0(t)$ вихідної характеристики гоніометра, що визначають нелінійність і зсув нуля відповідно під час вимірювання, можуть бути прийняті постійними величинами:

$$K_{-1}(t) = K_{-1}; \quad f_0(t) = f_0, \quad (11)$$

Похибка обчислень значень вимірюваного кута в ЕОМ $\Delta\phi_{cat}$. Виміряні кути ϕ_i при відліку кутів, наприклад, від базової грані призми обчислюються ЕОМ за формулою:

$$\phi_i = 2\pi \frac{N_{i-1} + N_i}{N_{n-1} + N_n} = 2\pi \frac{N_\phi}{N_{2\pi}}, \quad (12)$$

$$N_{i-1} = 0 \quad \text{при } i=1,$$

де i – номер вимірюваного кута; N, N_i, N_{i-2} – множина чисел, що отримується за один повний оберт обертового пристрою ППСВК:

$$N = \{N_i, | i = 1, n \};$$

$$N_i = N_{i-2} + \int_{t_i}^{t_{i+1}} f_{Gout}(t) dt, \quad (13)$$

де i – порядковий номер числа, що відповідає порядковому номеру грані призми; n – кількість граней призми; t_i – час надходження імпульсів автоколіматора від i -ої грані призми, $t_1, t_2, t_3, \dots, t_{n+1}$ – час надходження імпульсів автоколіматора від 1, 2, 3, $n+1$ грані призми відповідно; f_{Gout} – частота сигналу від гоніометра.

Таким чином,

$$N_1 = \int_{t_1}^{t_2} f_{out}(t) dt, \quad N_2 = \int_{t_2}^{t_3} f_{out}(t) dt,$$

$$N_3 = N_1 + \int_{t_3}^{t_4} f_{out}(t) dt, \quad N_4 = N_2 + \int_{t_4}^{t_5} f_{out}(t) dt,$$

$$N_{n-1} = N_{n-3} + \int_{t_{n-1}}^{t_n} f_{out}(t) dt,$$

$$N_n = N_{n-2} + \int_{t_n}^{t_{n+1}} f_{out}(t) dt.$$

Час t початку або закінчення відліку кутів при вимірюванні може бути записаний у вигляді випадкової величини:

$$t = t_0 + t_{del} + t_\xi, \quad (14)$$

де t_0 – точний час формування імпульсів керування лічильником; t_{del}, t_ξ – детермінована і випадкова складові частини похибки часу відповідно.

Суб'єктивна похибка $D\phi_S$, або похибка оператора, залежить від ретельності роботи та кваліфікації особи, що проводить вимірювання, та може бути зумовлена:

1) неточністю або похибкою базування $\Delta\phi_S^\delta$ контрольованого об'єкта вимірювання, наприклад, багатогранної призми на предметному столі приладу;

2) похибкою наведення $\Delta\phi_S^n$;

3) похибкою часу відліку кутів. Так, час t початку або закінчення відліку кутів при вимірюванні може бути записаний у вигляді випадкової величини за виразом (14).

При багаторазових вимірюваннях отримані значення кутів можуть бути представлені у вигляді виразу:

$$\phi_{ij} = \phi_{0ij} + \Delta_{ij} + \sigma_{ij}, \quad (15)$$

де ϕ_{0ij} – істинне значення вимірюваного кута; Δ_{ij} – систематична складова похибки вимірювання i -го кута у j -их положеннях багатогранної призми, де $i \in [1; m], j \in [1; n]$; σ_{ij} – випадкова складова частина похибки вимірювання i -го кута у j -их положеннях багатогранної призми, де $i \in [1; m], j \in [1; n]$.

Виміряне та обчислене в ЕОМ значення кута $\phi_{i,j}$, отримане від гоніометра, може бути представлено виразом:

$$\phi = 2\pi \frac{N_\phi}{N_{2\pi}}, \quad (16)$$

$$\text{де } \phi = \int_{t_1}^{t_\phi} \omega_0 dt; \quad 2\pi = \int_{t_0}^{t_{2\pi}} \omega_0 dt;$$

$$N_{2\pi} = K \int_{t_0+t_{2\pi,1}}^{t_{2\pi}+t_{2\pi,2}} \omega_0 dt; \quad t_{\phi,1}, t_{\phi,2}, t_{2\pi,1}, t_{2\pi,2} -$$

незалежні Гаусовські випадкові величини з параметрами:

$$Mt_{\phi,1} = Mt_{\phi,2} = Mt_{2\pi,1} = Mt_{2\pi,2} = 0$$

$$Dt_{\phi,1} = \sigma_{\phi,1}^2, \quad Dt_{\phi,2} = \sigma_{\phi,2}^2, \quad Dt_{2\pi,1} = \sigma_{2\pi,1}^2, \quad Dt_{2\pi,2} = \sigma_{2\pi,2}^2$$

Випадкова $\sigma_{i,j}$ складова частина похибки вимірювання кутів ϕ_{ij} може бути представлена як різниця між виміряним значенням ϕ_{ij} за виразом (16) та істинним ϕ_{0ij} таким чином:

$$\Delta\phi = \phi - \phi_0 = 2\pi \frac{N_\phi}{N_{2\pi}} - 2\pi \frac{K\phi + K\omega_0(t_{\phi,2} - t_{\phi,1})}{K2\pi + K\omega_0(t_{2\pi,2} - t_{2\pi,1})}, \quad (17)$$

$$= \frac{\phi\omega_0(t_{2\pi,2} - t_{2\pi,1}) - 2\pi\omega_0(t_{\phi,2} - t_{\phi,1})}{2\pi + \omega_0(t_{2\pi,2} - t_{2\pi,1})} = \frac{\theta}{\eta},$$

де θ – Гаусовська випадкова величина $M\theta = 0$, що визначається за виразом (29); η – Гаусовська випадкова величина $M\eta = 2\pi$, що визначається за виразом (30); (θ, η) – Гаусовський вектор, що описується виразом (21) і який можна представити у вигляді лінійного перетворення гаусовського вектора з незалежними компонентами та описати виразами (21), (22) якщо $t_{2\pi,2} - t_{2\pi,1} = \xi_1$, $t_{\phi,2} - t_{\phi,1} = \xi_2$.

$$\theta = \phi \cdot \omega_0 \cdot (t_{2\pi,2} - t_{2\pi,1}) - 2 \cdot \pi \cdot \omega_0 (t_{\phi,2} - t_{\phi,1}); \quad (18)$$

$$D\theta = \phi^2 \cdot \omega_0^2 \cdot (\sigma_{2\pi,1}^2 + \sigma_{2\pi,2}^2) + 4 \cdot \pi^2 \cdot \omega_0^2 (\sigma_{\phi,1}^2 + \sigma_{\phi,2}^2) = \sigma_\theta^2$$

$$D\eta = M(\eta - 2\pi)^2 = \omega_0^2 (\sigma_{2\pi,1}^2 + \sigma_{2\pi,2}^2) = \sigma_\eta^2, \quad (19)$$

$$\text{cov}(\theta, \eta) = M\theta(\eta - 2\pi) = \phi^2 \omega_0^2 (\sigma_{2\pi,2}^2 + \sigma_{2\pi,1}^2), \quad (20)$$

$$\rho = \frac{\text{cov}(\theta, \eta)}{\sqrt{\sigma_\theta^2 \sigma_\eta^2}} = \frac{\phi^2 (\sigma_{2\pi,1}^2 + \sigma_{2\pi,2}^2)}{\sqrt{\phi^2 (\sigma_{2\pi,1}^2 + \sigma_{2\pi,2}^2) + 4\pi^2 (\sigma_{\phi,1}^2 + \sigma_{\phi,2}^2)}}, \quad (21)$$

$$\begin{pmatrix} \theta \\ \eta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi\omega_0 & -2\pi\omega_0 \\ \omega_0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 2\pi \end{pmatrix}, \quad (22)$$

Сумісна густина випадкових величин θ, η задається формулою:

$$P_{\theta, \eta}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_\theta\sigma_\eta\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left[\frac{x^2}{\sigma_\theta^2} - 2\rho\frac{xy - 2\pi x}{\sigma_\theta\sigma_\eta} + \frac{(y-2\pi)^2}{\sigma_\eta^2}\right]\right\}, \quad (23)$$

Варто вказати, що для

$$\sigma_{2\pi,1} = \sigma_{2\pi,2} = \sigma_{\phi,1} = \sigma_{\phi,2} = \sigma,$$

середнє квадратичне відхилення для θ становить $\sigma_\theta^2 = \sigma^2 2\omega_0^2 [\phi^2 + 2\pi^2]$, а для η дорівнює

$$\sigma_\eta^2 = 2\omega_0^2\sigma^2, \quad \rho = \frac{\phi^2}{\sqrt{\phi^2 + 4\pi^2}}.$$

Оскільки складові частини похибок вимірювання ППГС є випадковими величинами, похибки підпорядковуються нормальному закону розподілу, для якого функція густини розподілу імовірності має вигляд:

$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (24)$$

де μ – математичне очікування випадкової величини (похибки); σ – середнє квадратичне відхилення випадкової величини (похибки).

Знайдемо густину $\rho_{\Delta\phi}(z)$ розподілу випадкової складової частини похибки вимірювання кутів $\Delta\phi$ ППГС за формулою для густини відношення двох випадкових величин:

$$P_{\Delta\phi}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} |y| \rho_{\theta, \eta}(zy, y) dy = \frac{1}{2\pi\sigma_\theta\sigma_\eta\sqrt{1-\rho^2}} \int_{-\infty}^{\infty} |y| \exp\left\{-\frac{1}{2(1-\rho^2)} Q(z, y)\right\} dy,$$

$$Q(z, y) = \frac{z^2 y^2}{\sigma_\theta^2} - 2\rho \frac{zy(y-2\pi)}{\sigma_\theta\sigma_\eta} + \frac{(y-2\pi)^2}{\sigma_\eta^2} = A^2 \left(y + \frac{B}{A^2}\right)^2 - \left(\frac{B^2}{A^2} - C\right),$$

де

$$A^2 = \frac{z^2\sigma_\eta^2 - 2\sigma_\theta\sigma_\eta z\rho + \sigma_\theta^2}{\sigma_\eta^2\sigma_\theta^2}, \quad B = \frac{2\pi(\sigma_\eta\rho z - \sigma_\theta)}{\sigma_\theta\sigma_\eta^2}, \quad C = \frac{(2\pi)^2}{\sigma_\eta^2}$$

Відповідно до наведеного густина $\rho_{\Delta\phi}(z)$ розподілу імовірності випадкової складової частини похибки $\Delta\phi$ вимірювання кутів ППГС може бути визначена за таким виразом:

$$\rho_{\Delta\phi}(z) = \frac{1}{2\pi\sigma_\theta\sigma_\eta\sqrt{1-\rho^2}} \int_{-\infty}^{\infty} dy \exp\left\{-\frac{\left(C - \frac{B^2}{A^2}\right)}{2(1-\rho^2)}\right\} |y| \exp\left\{-\frac{A^2}{2(1-\rho^2)}\left(y + \frac{B}{A^2}\right)^2\right\}, \quad (25)$$

де

$$\left(C - \frac{B^2}{A^2}\right) \frac{1}{2(1-\rho^2)} = \frac{2\pi^2 z^2}{(z^2\sigma_\eta^2 - 2\sigma_\theta\sigma_\eta z\rho + \sigma_\theta^2)}.$$

Ймовірність $P\Delta\phi(z)$ можна обчислювати, використовуючи наближені методи для обчислення інтервалів:

$$P\{\Delta\phi \in x\} = \int_x^\infty \rho\Delta\phi(z) dz + \int_{-\infty}^{-x} \rho\Delta\phi(z) dz.$$

Особливістю випадкових похибок є неможливість їх виключення із результатів вимірювання, шляхом введення відповідних поправок. Проте випадкові похибки можна суттєво зменшити збільшенням кількості спостережень, що визначаються за відомою методикою, яка спрямована на визначення оптимальної (необхідної та достатньої) кількості вимірювань для досягнення заданої високої точності та достовірності результатів вимірювання, з огляду на часові та економічні аспекти витрат [8].

Практична реалізація алгоритмічної компенсації похибок вимірювання здійснюється в ЕОМ на основі розробленої раніше штучної нейронної мережі [9; 10]. Кінцевим результатом застосування запропонованих математичних моделей складових елементів похибок вимірювання є підвищення точності вимірювання величин плоского кута ППГС.

Висновки.

1. У статті наводяться повні математичні моделі складових елементів похибок вимірювання величин плоских кутів ППГС, які враховують несприятливі фактори, що виникають у виробничих умовах приладо- та машинобудування.

2. Математичні моделі складових елементів похибок вимірювання є основою алгоритмічної корекції результатів вимірювання величин плоских кутів ППГС, яка може здійснюватись в ЕОМ безпосередньо в процесі експлуатації ППГС.

3. Корекція результатів вимірювання може проводитись без застосування спеціалізованого лабораторного обладнання під час вимірювання кутів у несприятливих та нестаціонарних виробничих умовах та дасть змогу підвищити точність вимірювання.

Список літератури:

1. Черепанська І.Ю., Безвесільна О.М., Сазонов А.Ю. Патент України на корисну модель 127373. Інтелектуальна система вимірювання кутів. МПК: G 01 B 21/22 (2006.01). Надр. 25.07.2018, Бюл. № 14.
2. Безвесільна О.М. Алгоритмічні методи високоточного визначення лінійних прискорень. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2018. № 5(265). С. 100–105.
3. Суханов С.В. Алгоритмы компенсации погрешностей выходного сигнала лазерного гироскопа. *Вестник Нижегородского университета им. И.Н. Лобачевского*. 2011. № 3(2). С. 134–140. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algorithmy-kompensatsii-pogreshnostey-vyhodnogo-signalazernogo-giroskop> (дата звернення: 10.01.2019).
4. Ковшов Г.Н., Живцова Л.И. Математическая модель трехосевого микромеханического акселерометра для инклинометрической системы контроля и ориентации скважин. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2014. № 6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/matematicheskaya-model-trehosevogo-mikromehaniceskogo-akselerometra-dlya-inklinometricheskoy-sistemy-kontrolya-i-orientatsii> (дата звернення: 10.01.2019).
5. Cherepanska I., Bezvesilna E., Sazonov A., Nechai S., Pidtychenko O. Development of artificial neural network for determining the components of errors when measuring angles using a goniometric software-hardware complex. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. № 9 (95). P. 43–51.
6. Купер В.Я., Рубцов М.Г. Алгоритмические методы повышения точности измерений на основе обратных интерполяционных моделей. *Вестник самарского государственного технического университета*. 2010. № 3(28). С. 67–72.
7. Дорожкин А.Д., Джусь О.А. Анализ методов повышения точности и надежности данных о параметрах движения аэродинамического летательного аппарата. *Современные проблемы науки и образования*. 2014. № 3. URL: www.science-education.ru/ru/article/view?id=13610 (дата звернення: 10.01.2019).
8. Cherepanska I., Bezvesilna E., Sazonov A., Nechai S., Khylychenko T. The procedure for determining the number of measurements in the normalization of random error of an information-measuring system with elements of artificial intelligence. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2017. № 5/9 (89). P. 58–67.
9. Черепанська І.Ю., Безвесільна О.М., Сазонов А.Ю. Штучні нейронні мережі при вирішенні задач технологічної підготовки гнучкого виробництва : монографія з грифом КПІ. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 92 с.
10. Черепанська І.Ю., Безвесільна О.М., Сазонов А.Ю. Патент України на корисну модель 124155. Спосіб вимірювання кутів. МПК: G 01 B 21/22 (2006.01). Надр. 26.03.2018, Бюл. № 6.

АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ПРЕЦИЗИОННОЙ ПРИБОРНОЙ ГОНИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В статье приводится алгоритмический метод коррекции результатов измерения величин плоских углов прецизионной приборной гониометрической системой. Основой метода является полная математическая модель случайных и систематических составляющих погрешностей измерения, которая учитывает неблагоприятные факторы, возникающие в нестационарных производственных условиях, например, автоматизированных приборо- и машинопроизводствах, при предварительной выставке навигационных чувствительных элементов и т.д., сопровождающиеся возникновением ряда помех, которые добавляются к исходному измерительному сигналу чувствительного элемента. Алгоритмическая коррекция результатов измерения может проводиться без применения специализированного лабораторного оборудования непосредственно в процессе эксплуатации прецизионной приборной гониометрической системы при проведении экспериментов.

Ключевые слова: гониометрическая система, алгоритмическая коррекция, погрешности измерения, систематическая погрешность, случайная погрешность.

ALGORITHMIC CORRECTION OF MEASURING RESULTS OF THE PRECISE INSTRUMENT GONIOMETRIC SYSTEM

The article presents algorithmic method for correcting the results of measuring plane angles of the precise instrument goniometric system. It is based on the complete mathematical model of random and systematic components of measuring errors, which takes into account adverse factors arising in non-stationary production conditions, i.e. automated instrument and machine making, during a preinstallation of navigation sensors, etc., which has been accompanied by the noise. The last one is added to the original signal of the sensing element. Algorithmic correction of measuring results can be carried out without specialized laboratory equipment, directly during the precise instrument goniometric system work.

Key words: goniometric system, algorithmic correction, measuring errors, systematic error, random error.

ЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.165.62-192

Беднарська І.С.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Риндюк Д.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНКИ ТЕПЛООВОГО ТА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ ПАРОПРОВОДІВ АЕС

Подовження строку експлуатації енергетичного обладнання атомних станцій є важливим завданням для енергетики України. У статті проведено порівняння методів визначення теплового та напружено-деформованого стану елементів паророзподільної системи АЕС. Відзначено доцільність використання сучасних програмних комплексів, заснованих на методі скінченних елементів, та їх переваги над класичними методами.

Ключові слова: атомна енергетика, клапан, граничні умови, напружено-деформований стан.

Постановка проблеми. Атомна енергетика є альтернативним рішенням порівняно з використанням нафти, вугілля і газу у сфері отримання електроенергії [1]. Атомні електростанції порівняно з тепловими мають низку переваг, особливо з погляду екології. Нині багато промислово розвинутих країн інвестують значні кошти в розвиток атомної енергетики. Україна посідає сьоме місце у світі за показником встановленої потужності АЕС. Сьогодні частка виробітку електроенергії на атомних електростанціях України становить понад 50% від спільного виробітку з тепловими електростанціями. Проте значну частину енергоблоків ТЕС уведено в експлуатацію в 70-х роках ХХ ст., і більшість із них уже вичерпала свій ресурс, фізично й морально застаріла та неминуче буде виводитися з експлуатації попри всі заходи щодо подовження строку їх роботи. Водночас деякі блоки АЕС також близькі, а деякі вже й перевищили свій проектний строк. Окрім того, у зв'язку зі збільшенням частки вироблення електроенергії на АЕС великі енергоблоки потужністю 1000 МВт змушені працювати не в розрахунковому базовому, а на змінних режимах. Це веде за собою збільшення кількості пусків і зупинок, що є додатковим навантаженням на обладнання і кількість яких за весь термін служби обмежена нормативними документами. Робота на змінних режимах може призвести до необхідності розгляду питання

про передчасне виведення деяких атомних енергетичних блоків з експлуатації. Така ситуація вимагає термінового проведення комплексу робіт з аналізу стану обладнання станції, а також розроблення рішень щодо продовження його строку експлуатації.

Одним з елементів обладнання електростанції, що потребує докладної уваги, є система паророзподілення парової турбіни, яка регулює і запобігає подачі пари в проточну область. Конструктивно вона складається з низки клапанів, з'єднаних паропроводами. Особливу увагу варто звернути на стопорний клапан (СК), що виконує повне перекриття подачі пари в турбіну, та регулюючі клапани (РК).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розглянемо низку робіт, присвячених вищевказаній проблематиці, серед яких варто звернути увагу на [2–9]. У роботі [3] запропонована розрахункова оцінка індивідуального ресурсу турбіни К-200-130 з визначенням теплового стану (ТС), напружено-деформованого стану (НДС) та малоциклової втомлюваності корпусів, роторів, стопорних клапанів циліндра високого тиску (ЦВТ) та циліндра середнього тиску (ЦСТ) за характерних режимів роботи енергоблоку. Для визначення індивідуального ресурсу турбіни К-200-130 виконана попередня оцінка теплового стану (ТС) АСК ЦВТ і АСК ЦСТ за характерних режимів роботи.

У роботі [2] предметом дослідження є пошкоджуваність і залишковий ресурс автоматичних захисних клапанів ЦСТ парової турбіни К-200-130. Отримано дані щодо теплового і напружено-деформованого стану корпусів клапанів для різних режимів пуску. Визначено сумарна пошкоджуваність і індивідуальний залишковий ресурс. Для АСК ЦСТ розраховувалися граничні умови теплообміну в контрольних точках, що показані на розрахунковій геометричній моделі рис. 1, в яких визначалися розмахи інтенсивності напружень за всі періоди пусків із різних теплових станів.

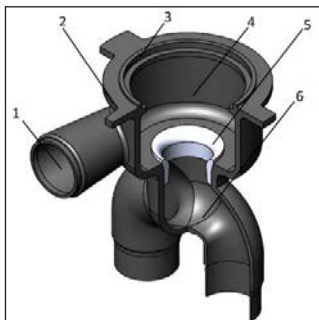


Рис. 1. Розрахункова геометрична модель для АСК ЦСТ [3] (1–6 – контрольні точки)

Технологічні особливості режимів роботи враховували завданням теплових граничних умов III роду й об'ємних відцентрових зусиль у розрахункових елементах. Коефіцієнти тепловіддачі а вираховували за рекомендаціями [4].

Крайова задача нестационарної теплопровідності елементів парових турбін вирішувалася за допомогою рівняння виду [4]:

$$\operatorname{div} \left[\lambda(T) \operatorname{grad} T \right] = c(T) \gamma(T) \frac{\partial T}{\partial \tau},$$

де λ, c, γ , – функції температури і координат за початкової умови $T_0 = T(x, y, z, 0) = f_0(x, y, z)$ та граничних умовах I, II, III або IV роду.

За граничних умов III роду задавали температуру зовнішнього середовища, що оточує тіло, і закон теплообміну між середовищем і поверхнею тіла. Граничні умови третього роду є найбільш загальними і часто використовуваними в практиці розрахунків граничних умов. Як закон теплообміну між навколишнім середовищем і поверхнею тіла найбільш часто в інженерних розрахунках використовують закон тепловіддачі – закон Ньютона:

$$q|_w = \alpha \cdot (T_f - T_w),$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі (згадаємо, що в загальному випадку тепловіддача відбувається конвекцією і випромінюванням); T_f – температура флюїду; T_w – температура поверхні тіла.

З урахуванням закону Фур'є ГУ III роду визначалися в такий спосіб:

$$\pm \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_w = \alpha \cdot (T_f - T_w),$$

закон Фур'є

де знак + або – у законі Фур'є залежить від вибору початку системи координат.

У розрахунках теплопровідності використовували безрозмірну форму записи граничних умов третього роду:

$$\pm \frac{\partial \Theta}{\partial X} \Big|_w = Bi \cdot \Theta_w,$$

де $\Theta = \frac{T_f - T}{T_f - T_0}$ – безрозмірна температура;

$X = \frac{x}{R}$ – безрозмірна координата, що перпендикулярна поверхні теплообміну;

R – характерний або визначальний розмір тіла;

$Bi = \alpha R / \lambda_w$ – критерій Біо (Biot);

λ_w – коефіцієнт теплопровідності твердого тіла.

Критерій Біо – визначальний критерій у завданнях теплопровідності, тобто від його величини залежить інтенсивність процесу теплопровідності.

Такий класичний підхід до розрахунків включає у себе людський чинник [2–8] та потребує значних затрат часу на розрахунки граничних умов. Також неможливо з достатньою точністю визначити граничні умови для об'єктів складної геометричної форми. За класичного підходу здебільшого складно, а іноді й неможливо повною мірою врахувати конструктивні зміни в елементах енергетичного обладнання, які виникли на протязі всього терміну експлуатації.

Постановка завдання. Детально проаналізувавши даний метод, зроблено висновок щодо його значної трудомісткості під час розрахунків граничних умов та за недостатньої точності розрахунку для об'єктів складної геометричної форми.

Метою роботи є наукове обґрунтування і розроблення комплексного підходу до теплового та напружено-деформованого стану високотемпературних елементів енергетичного обладнання. А саме зроблено спробу розроблення методу, який базується на створенні математичної моделі, що дає змогу, задавши тільки початкові та граничні умови пари на вході й теплопередачу (віддачу) через стінки в клапані, отримати необхідні для розрахунку залишкового ресурсу розподілу температур, їх градієнтів та напружено-деформованого стану об'єкта. Запропонований метод дає змогу значно зекономити час та врахувати газодинаміку поведінки пари в клапані у більш повному обсязі, ніж за класичного підходу, що, своєю чергою, призведе до підвищення точності розрахунку.

Виклад основного матеріалу дослідження. Як приклад для наочності обґрунтування запропонованого підходу вибрано програмний пакет CAE ANSYS. Згідно зі створеним комплексним підходом до проведення перевірного розрахунку теплового, напружено-деформованого стану та пошкоджуваності високотемпературних елементів парових турбін, першим етапом є створення просторових аналогів у тривимірній постановці.

Далі для автоматизації вирішення задачі напружено-деформованого стану і тим самим для скорочення ресурсів на її вирішення 3D-модель клапана імпортується в програмний пакет ANSYS. Моделювання, розрахунок і аналіз напружено-деформованого стану клапана виконується з використанням методу скінченних елементів.

CAE ANSYS дає можливість аналізувати напружено-деформований стан складних деталей під час їх роботи та робити висновки про їх надійність. Це дає змогу скоротити час, що затрачується на розрахунок граничних умов теплообміну. Особливою перевагою моделювання є отримання наочного результату, що дає змогу спростити його аналіз та оцінювати результати навіть не професіоналам у сфері аналізу конструкцій.

Стандартний алгоритм проведення розрахунків такий:

1. Задаються початкові та граничні умови теплообміну (перепад тисків, швидкість, температура і т. д.).

2. Створюється кінцево-елементна сітка для геометричної моделі (для першого приближення можна використовувати сітку, яка будується в автоматичному режимі).

Даний етап, як і всі інші, дуже важливий, і помилки, допущені на цій стадії моделювання, можуть поставити під сумнів коректність усього розрахунку.

Логіка будь-якого чисельного моделювання передбачає розбиття розрахункової області на дискрети (елементи). Саме у вузлах сітки визначаються значення шуканих змінних (переважно швидкість і тиск) і накладаються граничні умови задачі.

Розбиття можна проводити різними методами. Meshing та TurboGrid є основними програмними модулями, що відповідають за генерацію сітки. За допомогою Meshing можна досить швидко розбити розрахункову область (проточну частину) на тетраедричні елементи. Це так звана неструктурована сітка. Даний сітковий генератор відрізняється дуже високою продуктивністю. Він дає змогу генерувати розрахункові сітки для різних типів аналізу

(в нашому разі – гідрогазодинаміка). Такий спосіб простий і зручний, проте похибка виконуваних розрахунків на такій сітці приблизно на 5% вище, ніж у розрахунків, побудованих на структурованих сітках. При цьому Meshing дає змогу розбити на сітку геометрію практично будь-якої складності в автоматичному режимі, що істотно заощаджує час розробника. Крім того, ANSYS Meshing містить набір інструментів для виправлення неякісної геометрії. А TurboGrid адаптована для роботи з проточними частинами просторових каналів. При цьому проточна частина автоматично розбивається на гексаедричну структуровану сітку, що дає змогу в подальшому прискорити процес розрахунку і підвищити його збіжність (точність) і стійкість. Варто зазначити, що TurboGrid має досить серйозні інструменти і можливості для більш тонкого налаштування розрахункової сітки та приведення її в задовільний стан.

3. Призначаються властивості матеріалів.

4. Налаштовується solver (без урахування стискуваності середовища або з урахуванням, стаціонарний чи перехідний процес, задається число ітерацій, відбувається налаштування збіжності, визначаються вихідні величини) і запускається розрахунок.

Особливу увагу під час розрахунку газодинаміки клапана необхідно звернути на вибір базової моделі турбулентності. ANSYS Fluent і ANSYS CFX містять у собі широкий спектр різноманітних моделей турбулентності: це RANS-моделі (осереднені по Рейнольдсу) та методи великих і від'єднаних вихорів LES і DES відповідно, а також гібридні моделі, що поєднують переваги RANS- і LES-моделювання. Найбільш популярною однопараметричною моделлю турбулентності, яка широко використовується в задачах зовнішньої аеродинаміки під час розрахунку безвідривних течій, є модель Спаларта-Алмараса. У цій моделі вихрова в'язкість визначається з одного диференціального рівняння переносу турбулентної кінетичної енергії. З уведенням поправок на кривизну, обертання і шорсткість сфера застосування цієї моделі істотно розширилася.

Але для розрахунку безвідривних течій або течій з обмеженими відривними зонами можна також використовувати і двопараметричні моделі типу $k-\epsilon$ і $k-\omega$. У першому випадку розраховується рівняння для турбулентної дисипації ϵ , у другому – для питомої швидкості дисипації турбулентної енергії ω . Для тонкого прикордонного шару модель $k-\omega$ більш точно передбачає положення точки відриву, ніж модель $k-\epsilon$. Однак під

час розрахунку внутрішніх течій модель $k-\omega$, як правило, працює гірше, ніж $k-\epsilon$. Також під час використання моделі турбулентності $k-\omega$ варто пам'ятати, що вона дуже чутлива до граничних умов у зовнішньому потоці. Якщо необхідно розрахувати анізотропну турбулентність, тобто турбулентність, що залежить від напрямку, або досліджуються нерівноважні ефекти, використовується модель Рейнольдсових напруг (Reynolds-Stress Model). Ця модель дає найбільш точні результати для складних течій із вторинними потоками, однак вимагає значно більше обчислювальних ресурсів, аніж стандартні двопараметричні моделі.

Проте, крім напівемпіричних моделей, що базуються на використанні RANS, проводяться розрахунки на основі LES (метод великих вихорів) і DES (метод відокремлених вихорів) методів. Основна ідея методу LES полягає у локальному осередненні характеристик турбулентної течії по областях із розмірами порядку фільтра: дрібномасштабна частина спектра «моделюється», а вихрові структури з розмірами, що перевищують розміри фільтра, вирішуються «точно».

Метод від'єднаних вихорів DES можна умовно назвати гібридним методом LES/RANS. Під час його використання в прикордонному шарі використовуються нестационарні рівняння Рейнольдса, тоді як метод LES застосовується у відривних зонах. LES-зони, як правило, розташовані в області турбулентних течій, де домінують великомасштабні турбулентні структури. У пристінковій області використовуються відповідні RANS-моделі. Метод DES застосовується переважно для моделювання високореінольдсових потоків; під час моделювання внутрішніх течій точність цього методу істотно знижується. Обчислювальні витрати під час використання методу DES менші, ніж у процесі використання LES, але більші, ніж під час використання методу RANS.

Під час моделювання яскраво вираженої нестационарної течії доцільно застосовувати модель турбулентності SAS (Scale-Adaptive Simulation), яка є вдосконаленим варіантом нестационарного методу RANS (URANS) і дає змогу отримувати достовірні результати для пульсаційного складника потоку. На відміну від традиційних URANS-моделей, які дають змогу отримати тільки великомасштабні турбулентні структури, модель SAS динамічно адаптується до вирішених методом

URANS масштабів і дає змогу відстежити розвиток турбулентних структур в окремих областях течії. Таким чином, у нестационарних областях потоку SAS-модель працює подібно методу LES, а в стаціонарних областях – аналогічно RANS-методу. Завдяки постійному збільшенню продуктивності комп'ютерів і зменшенню їх вартості моделі LES і більш економічні моделі DES стали надзвичайно популярні для вирішення промислових завдань.

Підвищити точність розрахунку можна шляхом накладання більш жорстких вимог по рівнях середньоквадратичних нев'язок (Residual Target). Чим нижче значення нев'язок, тим точніше отриманий результат. Упевнене і швидке досягнення низьких рівнів нев'язок свідчить про хорошу збіжність розрахунку й якісної проточної частини.

На етапі визначення результатів розрахунку отриманий масив даних за розрахунковими даними полів температур і теплових потоків осереднено. Він дає високоточні результати і дуже інформативні та показові картини течії. Це дає змогу найбільш глибоко вивчити характер перебігу і оперативно виявити негативні явища, якщо такі мають місце. Завдяки інтеграції з розрахунковою платформою ANSYS Workbench передаються температурні поля і теплові граничні умови в ANSYS Mechanical для подальшого проведення теплових розрахунків або розрахунків напружено-деформованого стану. Підсумковим етапом чисельного моделювання в ANSYS є отримання й аналіз результатів розрахунку в CFD-Post. Проаналізувавши напружено-деформований стан, отримуємо дані для подальших розрахунків, пов'язаних із ресурсними показниками

Висновки. Отже, під час аналізу класичної методики визначення температурного та напружено-деформованого стану високотемпературних об'єктів енергетики на прикладі елементів системи паророзподілення АЕС доведено ефективність підходу, який заснований на методі скінченних елементів, що реалізовано в сучасних програмних комплексах ANSYS та SolidWorks Simulation та ін. У подальшому будуть проведені комплекси числових експериментів, спрямованих на більш докладне вивчення газодинаміки елементів паропроводів АЕС та її впливу на напружено-деформований стан, а отже, і на ресурсні показники подібного класу обладнання.

Список літератури:

1. Контроль металу і продовження терміну експлуатації основних елементів котлів, турбін і трубопроводів теплових електростанцій: СОУ-Н МПЕ 40.17.401:2004 : Нормативний документ Мінпаливенерго України. Офіц. вид. – Київ : ГРІФРЕ : М-во палива та енергетики України, 2005. 76 с.

2. Оценка индивидуального ресурса литых корпусов автоматических защитных клапанов энергоблоков мощностью 200 МВт / О.Ю. Черноусенко. *Вестник НТУ «ХПИ». Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование*. 2018. № 13. С. 26–32.

3. Черноусенко О.Ю. Расчетное исследование индивидуального ресурса корпусов ЦВД, ЦСД, корпусов стопорных клапанов и роторов К–200-130 блока 200 МВт. *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ». Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование*. 2007. № 2. С. 64–70.

4. РТМ 24.020.16-73. Турбины паровые стационарные. Расчет температурных полей роторов и цилиндров паровых турбин методом электро моделирования. Москва, 1973. № ВК-002/3209. 104 с.

5. РД 10-577-03. Типовая инструкция по контролю металла и продлению срока службы основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций. Москва, 2003.

6. РТМ 108.021.103. Детали паровых стационарных турбин. Расчет на малоцикловую усталость. Москва, 1985. № АЗ-002/7382. 49 с.

7. Черноусенко О.Ю. Обобщение и анализ результатов расчетного исследования индивидуального ресурса корпусов и роторов ЦВД и ЦСД турбины К–200-130 блока 200 МВт. *Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование*. 2008. № 6. С. 107–111.

8. Расчетное определение малоциклового усталости высокотемпературных элементов паровой турбины мощностью 200 МВт с применением программного комплекса ANSYS И COSMOSWorks / Е.Н. Письменный и др. *Вестник НТУУ «КПИ». Машиностроение*. 2008. С. 188-195.

9. Антикайн П.А. Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов. Москва : Энергоатомиздат, 1990. 368 с.

10. Дубов А.А. Проблемы оценки остаточного ресурса стареющего оборудования. *Теплоэнергетика*. 2003. № 11. С. 54–57.

АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ ТЕПЛООВОГО И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПАРОВОДОВ АЭС

Продление срока эксплуатации энергетического оборудования атомных станций является важной задачей для энергетики Украины. В статье проведено сравнение методов определения теплового и напряженно-деформированного состояния элементов парораспределительной системы АЭС. Отмечена целесообразность использования современных программных комплексов, основанных на методе конечных элементов, и их преимущества над традиционными методами.

Ключевые слова: атомная энергетика, клапан, граничные условия, напряженно-деформированное состояние.

ANALYSIS OF APPROACHES TO THE EVALUATION OF THERMAL AND STRESS-DEFORMED STATE OF STEAM PIPELINES ELEMENTS OF NPP

Extension of the period of operation of power equipment of nuclear power plants is an urgent need for the energy sector of Ukraine. The article deals with comparison of the methods for determining the thermal and stress-strain state of elements of the distribution system of the nuclear power plant is made. The expediency of using modern software complexes based on the method of finite elements and their advantages over classical methods is noted.

Key words: nuclear energy, valve, boundary conditions, stress-strain state.

УДК 621.362.192

Зайков В.П.

Научно-исследовательский институт «ШТОРМ»

Мещеряков В.И.

Одесский государственный экологический университет

Журавлев Ю.И.

Национальный университет «Одесская морская академия»

ДИНАМИКА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОДНОКАСКАДНОГО ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАЖДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Рассмотрено влияние конструктивных и технологических элементов на основные параметры, показатели надежности и динамику функционирования термоэлектрических охлаждающих устройств в характерных токовых режимах в диапазоне рабочих перепадов температуры и тепловой нагрузки при заданной геометрии ветвей термоэлементов. Проведена оценка времени выхода на стационарный режим охладителя во взаимосвязи с основными параметрами и показателями надежности.

Ключевые слова: термоэлектрический охладитель, время выхода на стационарный режим, геометрия ветвей термоэлементов.

Постановка проблемы. Передаточные характеристики и показатели надежности полупроводниковых элементов существенно зависят от температурных условий их функционирования. Повышение температуры на 10°C практически удваивает интенсивность отказов. Теплонагруженные элементы современной радиоэлектронной аппаратуры (полупроводниковые лазеры, приемники интенсивного инфракрасного излучения, процессоры, выходные каскады силовых приборов и т.п.) работают в условиях, предполагающих необходимость отвода от них избыточной тепловой энергии. К системам обеспечения их тепловых режимов теплонагруженных элементов предъявляются требования по отводу необходимой энергии на заданном временном интервале, а также показателям надежности, поскольку при выходе из строя системы обеспечения теплового режима автоматически выходит из строя и сам теплонагруженный элемент. Если же речь идет о критической системе (бортовой информационной системе летательного аппарата, управляющей системе транспортного средства и т.п.), то нарушение ее нормального функционирования может привести к значительным не только материальным затратам, не соизмеримым со стоимостью теплонагруженного элемента. Проблема состоит в том, что условия эксплуатации таких элементов постоянно ужесточаются в направлении быстрого действия и плотности мощности поглощения или выделения, что приводит к снижению их надежности, а требования к повышению надежности аппаратуры, в состав которой входят эти элементы, постоянно возрастают.

Анализ последних достижений и публикаций.

Термоэлектрические охладители (ТЭУ) относятся к перспективным устройствам обеспечения тепловых режимов теплонагруженных элементов радиоэлектронной аппаратуры [1]. Этот выбор обусловлен малыми габаритами и массой, отсутствием подвижных частей [2], приводит к повышенным динамическим характеристикам [3] и показателям надежности [4] по сравнению с компрессионными системами. Вместе с тем повышение требований к надежности и быстродействию бортовых информационных систем, работающих в экстремальных режимах, требует повышения этих показателей и у систем обеспечения тепловых режимов теплонагруженных элементов, являющихся их необходимой составляющей [5]. Работы в этом направлении идут по пути учета влияния на показатели надежности конструктивных и технологических показателей [6], тепловой нагрузки [7], материала термоэлементов [8], технологии изготовления термоэлектрических охладителей [9].

В ряде случаев проектирования ТЭУ одним из основных требований является обеспечение заданного времени выхода на стационарный режим работы и возможность его сокращения без учета массы m_0 и теплоемкости C_0 объекта охлаждения. Для этого рассмотрим динамическую составляющую ТЭУ для случая, когда учитывается только масса и теплоемкость конструктивных и технологических элементов (КТЭ) на теплопоглощающем спае ТЭУ.

Формулирование целей статьи. Целью работы является определение динамических

параметров ТЭУ и возможность их минимизации для различных перепадов температуры, тепловой нагрузки и токовых режимов работы при заданной геометрии ветвей термоэлементов.

Изложение основного материала. В работе [10] получены соотношения для определения времени выхода на стационарный режим работы τ , где достаточно полно описаны КТЭ и их методы расчета для геометрии ветвей термоэлементов $l/S = 10 \text{ см}^{-1}$. Поэтому не вызывает затруднений оценить массу и теплоемкость КТЭ при $l/S = 40 \text{ см}^{-1}$

Кроме того, воспользуемся соотношением для определения времени выхода на стационарный режим работы τ во взаимосвязи с относительным рабочим током B и суммарной величиной произведения теплоемкости и массы составляющих КТЭ при заданной геометрии ветвей термоэлементов $l/S = 40 \text{ см}^{-1}$

$$\tau = \frac{\sum_i m_i C_i}{K_K \left(1 + 2B_K \frac{\Delta T_{\max}}{T_0}\right)} \ln \frac{\gamma B_H (2 - B_H)}{2B_K - B_K^2 - \Theta}, \quad (1)$$

где $\gamma = \frac{I_{\max H}^2 R_H}{I_{\max K}^2 R_K}$,

• $m_i C_i = 36,1 \cdot 10^{-4}$ Дж/К – суммарная величина произведения теплоемкости и массы составляющих КТЭ при заданной геометрии ветвей термоэлементов $l/S = 40 \text{ см}^{-1}$;

$I_{\max H}$, R_H – соответственно, максимальный рабочий ток, А, и электрическое сопротивление ветви термоэлемента, Ом, в начале процесса охлаждения при $\tau = 0$;

$I_{\max K}$, R_K – соответственно, максимальный рабочий ток, А, и электрическое сопротивление ветви термоэлемента, Ом, в конце процесса охлаждения τ ;

$B_H = I/I_{\max H}$ – относительный рабочий ток при $\tau = 0$;

$B_K = I/I_{\max K}$ – относительный рабочий ток при τ ;

I – величина рабочего тока, А;

$I_{\max H} = e_H T/R_H$ – максимальный рабочий ток, А, при $\tau = 0$;

$I_{\max K} = e_K T_0/R_K$ – максимальный рабочий ток, А, при τ ;

e_H, e_K – соответственно, коэффициент термоЭДС ветви термоэлемента в начале и в конце процесса охлаждения, В/К;

T_0 – температура теплопоглощающего спая в конце процесса охлаждения, К;

T – температура теплопоглощающего спая в начале процесса охлаждения, К;

$\Theta = \Delta T/T_{\max}$ – относительный перепад температуры;

$\Delta T = T - T_0$ – перепад температуры ТЭУ, К;

$\Delta T_{\max} = 0,5 \bar{z} T_0^2$ – максимальный перепад температуры, К;

\bar{z} – усредненное значение эффективности термоэлектрического материала в модуле, 1/К;

$K_K = \bar{\alpha}_K / (l/S)$ – коэффициент теплопередачи, Вт/К;

$\bar{\alpha}_K$ – усредненный коэффициент теплопроводности, Вт/(см·К).

Количество термоэлементов n можно определить из соотношения

$$n = \frac{Q_0}{I_{\max K}^2 R_K (2B_K - B_K^2 - \Theta)}, \quad (2)$$

где Q_0 – величина тепловой нагрузки, Вт.

Мощность потребления W_K ТЭУ можно определить из выражения:

$$W_K = 2n I_{\max K}^2 R_K B_K \left(B_K + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta \right). \quad (3)$$

Падение напряжения

$$U_K = W_K / I. \quad (4)$$

Холодильный коэффициент E можно вычислить по формуле

$$E = Q_0 / W_K. \quad (5)$$

Относительную величину интенсивности отказов λ/λ_0 можно определить по формуле [11]

$$\lambda/\lambda_0 = n B_K^2 (\Theta + C_K) \frac{\left(B_K + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta \right)^2}{\left(1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta \right)^2} K_{T_1}; \quad (6)$$

где $C_K = \frac{Q_0}{n I_{\max K}^2 R_K}$ – относительная тепловая нагрузка;

K_{T_1} – значимый коэффициент пониженной температуры [11].

Условия равенства токов можно записать в виде

$$I = B_H I_{\max H} = B_K I_{\max K}. \quad (7)$$

Вероятность безотказной работы P ТЭУ можно определить из выражения

$$P = \exp(-\lambda t). \quad (8)$$

Режим $Q_{0\max}$. Результаты расчетов основных параметров, показателей надежности и времени выхода на стационарный режим работы для различных перепадов температуры ΔT в диапазоне от 5 до 60 К и тепловой нагрузки Q_0 от 5 до 20 Вт для случая, когда $m_0 C_0 \rightarrow 0$, приведены в табл. 1, где

$$\beta = \frac{(\lambda/\lambda_0)_K}{(\lambda/\lambda_0)_H}.$$

Анализ результатов расчетов, приведенных в табл. 1, показал, что с ростом перепада температуры ΔT при $m_0 C_0 \rightarrow 0$:

– увеличивается время выхода на стационарный режим τ (рис. 1, п. 1) и не зависит от тепловой нагрузки Q_0 ;

– уменьшается рабочий ток I (рис. 2, п. 1) и не зависит от тепловой нагрузки Q_0 ;

Таблица 1

$T = 300 \text{ K}$, $l/S = 40 \text{ см}^{-1}$, режим $Q_{0\text{max}}$, $m_0 C_0 \rightarrow 0$, $\bullet m_i C_i = 36,1 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/К}$

Q_0 , Вт	n , шт.	W , Вт	U , В	E	I , А	β	$(\lambda/\lambda_0)_H$	γ , отн.ед.	τ , с	$(\lambda/\lambda_0)_K$	$\lambda_K \cdot 10^4$, 1/ч	P
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\Delta T = 5 \text{ K}$; $\Delta T_{\text{max}} = 104,4 \text{ K}$; $\Theta = 0,048$; $R_K = 44,0 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$; $R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$; $I_{\text{maxK}} = 1,34 \text{ A}$; $I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ A}$; $B_K = 1,0$; $B_H = 0,9926$												
0,5	6,6	1,045	0,79	0,478	1,34	1,06	6,0	1,024	0,39	6,35	19	0,99810
1,0	13,2	2,10	1,58				12,0			12,7	38,1	0,99620
2,0	26,4	4,20	3,16				24,0			25,4	76,2	0,9924
5,0	66,0	10,5	7,90				60,0			63,5	191	0,9811
7,0	92,4	14,7	11,1				84,0			88,9	266,7	0,9737
10,0	132	21,0	15,8				120,0			127	381	0,9626
20,0	264	42,0	31,6				240			254	726	0,9266
$\Delta T = 10 \text{ K}$; $\Delta T_{\text{max}} = 100,5 \text{ K}$; $\Theta = 0,10$; $R_K = 43,48 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$; $R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$; $I_{\text{maxK}} = 1,33 \text{ A}$; $I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ A}$; $B_K = 1,0$; $B_H = 0,985$												
0,5	7,2	1,113	0,85	0,450	1,33	1,17	5,8	1,052	0,85	6,78	20,4	0,9980
1,0	14,4	2,23	1,70				11,6			13,6	40,7	0,9960
2,0	28,8	4,46	3,40				23,2			27,2	81,6	0,9919
5,0	72,0	11,15	8,50				58,0			68,0	204,0	0,97980
7,0	101	15,6	11,9				81,2			95,2	286	0,9718
10,0	144	22,3	17,0				116			136	408	0,9600
20,0	288	44,6	34,0				232			272	816	0,9216
$\Delta T = 20 \text{ K}$, $\Delta T_{\text{max}} = 93,7 \text{ K}$; $\Theta = 0,213$; $R_K = 42,55 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$; $R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$; $I_{\text{maxK}} = 1,31 \text{ A}$; $I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ A}$; $B_K = 1,0$; $B_H = 0,970$												
0,5	8,70	1,28	1,0	0,390	1,31	1,41	5,53	1,11	1,91	7,82	23,46	0,99766
1,0	17,4	2,56	2,0				11,06			15,6	46,8	0,99533
2,0	34,8	5,10	4,0				22,1			31,2	93,6	0,9907
5,0	87,0	12,8	10,0				55,3			78,0	234	0,9769
7,0	122	17,9	14,0				77,4			109	328	0,9678
10,0	174	25,6	20,0				110,6			156	468	0,9543
20,0	348	51,2	40,0				221,2			312	936	0,9106
$\Delta T = 30 \text{ K}$, $\Delta T_{\text{max}} = 86,8 \text{ K}$; $\Theta = 0,346$; $R_K = 40,82 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$; $R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$; $I_{\text{maxK}} = 1,30 \text{ A}$; $I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ A}$; $B_K = 1,0$; $B_H = 0,960$												
0,5	11,1	1,57	1,27	0,320	1,30	1,81	5,34	1,18	3,28	9,66	29,0	0,9971
1,0	22,2	3,14	2,54				10,7			19,3	58,0	0,9942
2,0	44,4	6,28	5,08				21,4			38,6	116	0,9885
5,0	111,0	15,7	12,7				53,5			96,5	290	0,9714
7,0	155,0	22,0	17,8				74,9			135	405	0,9603
10,0	222,0	31,4	25,4				107			193	579	0,9437
20,0	444,0	62,8	50,8				214			386	1158	0,8907
$\Delta T = 40 \text{ K}$; $\Delta T_{\text{max}} = 78,9 \text{ K}$; $\Theta = 0,50$; $R_K = 40,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$; $R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$; $I_{\text{maxK}} = 1,25 \text{ A}$; $I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ A}$; $B_K = 1,0$; $B_H = 0,926$												
0,5	16,0	2,0	1,74	0,250	1,25	2,6	4,64	1,28	5,20	12,2	36,7	0,9963
1,0	32,0	4,0	3,50				9,28			24,4	73,2	0,9927
2,0	64,0	8,0	7,0				18,6			48,8	146	0,9855
5,0	160	20,0	17,5				46,4			122,0	366	0,9640
7,0	224	28,0	24,5				65,0			171	512	0,9500
10,0	320	40,0	35,0				92,8			244	732	0,9294
20,0	640	80,0	70,0				185,6			488	1464	0,8638
$\Delta T = 50 \text{ K}$; $\Delta T_{\text{max}} = 73,4 \text{ K}$; $\Theta = 0,68$; $R_K = 39,2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$; $R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$; $I_{\text{maxK}} = 1,22 \text{ A}$; $I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ A}$; $B_K = 1,0$; $B_H = 0,904$												

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0,5	27,5	3,19	2,90	0,157	1,22	4,5	4,25	1,39	8,30	19,3	57,9	0,9942
1,0	55,0	6,38	5,80				8,5			38,6	116	0,9884
2,0	110	12,76	11,6				17,0			77,2	232	0,9771
5,0	275	31,9	29,0				42,5			193	579	0,9437
7,0	385	44,7	40,6				59,5			270	811	0,9221
10,0	550	63,8	58,0				85,0			386	1158	0,8907
20,0	1100	127,6	116	170,0	772	2316	0,7933					
$\Delta T = 60 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 66,8 \text{ K}; \Theta = 0,90; R_K = 38,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\max K} = 1,184 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 1,0; B_H = 0,8770$												
0,5	109,9	11,6	11,2	0,043	1,184	18,3	3,80	1,50	15,30	69,5	208,5	0,9794
1,0	218	23,2	22,4				7,6			139,0	417,0	0,9592
2,0	436	46,4	44,8				15,2			278,0	834	0,9200
5,0	1090	116	112				38,0			695	2085	0,8118
7,0	1526	162	157,0				53,2			973	2919	0,7468
10,0	2180	232	224				76,0			1390	4170	0,6590
20,0	4360	464	448	152	2780	8340	0,4343					

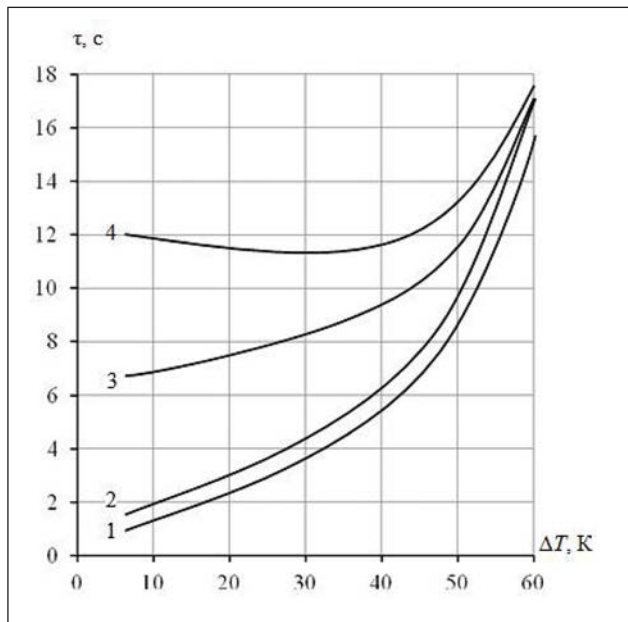


Рис. 1. Зависимость времени выхода τ на стационарный режим работы однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300 \text{ K}, l/S = 40 \text{ см}^{-1}$; ● $m_i C_i = 36,1 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/К}$ для различных режимов работы: 1 – $Q_{0\max}$; 2 – $(Q_0/I)_{\max}$; 3 – $(Q_0/P)_{\max}$; 4 – λ_{\min}

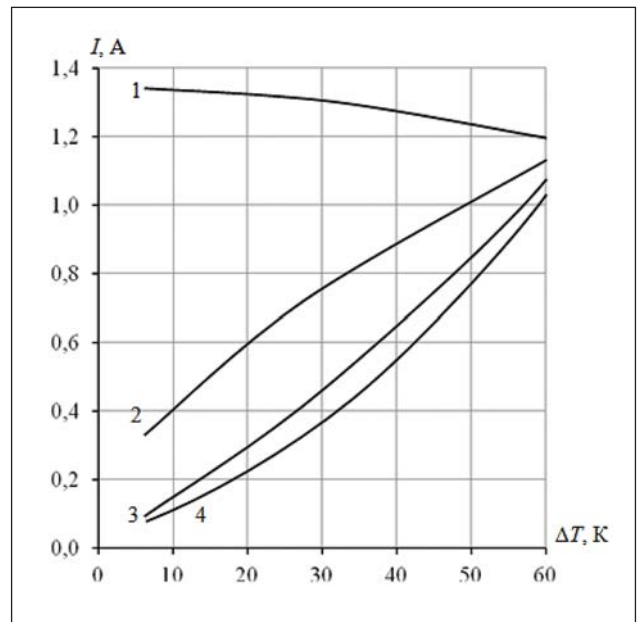


Рис. 2. Зависимость величины рабочего тока I однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300 \text{ K}, l/S = 40 \text{ см}^{-1}$ для различных режимов работы: 1 – $Q_{0\max}$; 2 – $(Q_0/I)_{\max}$; 3 – $(Q_0/P)_{\max}$; 4 – λ_{\min}

– уменьшается холодильный коэффициент E (рис. 3, п. 1) и не зависит от тепловой нагрузки Q_0 ;

– увеличивается количество термоэлементов n для различной тепловой нагрузки Q_0 (рис. 4); с ростом тепловой нагрузки количество термоэлементов увеличивается;

– увеличивается падение напряжения U для различной тепловой нагрузки Q_0 ; с ростом тепловой нагрузки падение напряжение увеличивается;

– увеличивается относительная величина интенсивности отказов λ/λ_0 для различной тепловой нагрузки Q_0 (рис. 5); с ростом тепловой нагрузки интенсивность отказов увеличивается;

– уменьшается вероятность безотказной работы P (рис. 6) для различной тепловой нагрузки Q_0 ; с ростом тепловой нагрузки вероятность безотказной работы уменьшается;

– увеличивается отношение $\beta = \lambda_K/\lambda_H$ интенсивности отказов в начале λ_H и в конце λ_K процесса

Таблица 2

$T = 300 \text{ K}; l/S = 40 \text{ см}^{-1}; \text{режим } (Q_0/I)_{\max}; m_0 C_0 \rightarrow 0, \sum m_i C_i = 36,1 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/К}$

Q_0 , Вт	n , шт.	W , Вт	U , В	E	I , А	β	$(\lambda/\lambda_0)_H$	γ , отн.ед.	i , с	$(\lambda/\lambda_0)_K$	$\lambda_K \cdot 10^4$, 1/ч	P
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\Delta T = 5 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 104,4 \text{ K}; \Theta = 0,048; R_K = 44,0 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\max K} = 1,34 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 0,219; B_H = 0,217$												
0,5	18,7	0,15	0,52	3,33	0,29	1,31	0,0137	1,024	1,18	0,018	0,054	0,9999946
1,0	37,4	0,30	1,04				0,0274			0,036	0,109	0,999989
2,0	74,8	0,60	2,08				0,0548			0,072	0,217	0,999978
5,0	187	1,50	5,20				0,137			0,181	0,543	0,999946
7,0	262	2,10	7,30				0,1918			0,253	0,760	0,999924
10,0	374	3,0	10,4				0,274			0,362	1,09	0,99989
20,0	748	6,0	20,8				0,480			0,724	2,17	0,99978
$\Delta T = 10 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 100,5 \text{ K}; \Theta = 0,10; R_K = 43,48 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\max K} = 1,33 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 0,316; B_H = 0,311$												
0,5	15,3	0,253	0,61	2,00	0,42	1,52	0,0573	1,052	1,86	0,087	0,261	0,999974
1,0	30,6	0,506	1,22				0,1146			0,174	0,522	0,999948
2,0	61,2	1,10	2,44				0,229			0,348	1,04	0,999896
5,0	153	2,53	6,10				0,573			0,87	2,61	0,99974
7,0	214	3,54	8,54				0,802			1,22	3,65	0,99963
10,0	306	5,06	12,2				1,146			1,74	5,22	0,99948
20,0	612	10,1	24,4				2,292			3,48	7,0	0,99930
$\Delta T = 20 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 93,7 \text{ K}; \Theta = 0,213; R_K = 42,55 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\max K} = 1,31 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 0,462; B_H = 0,448$												
0,5	14,2	0,482	0,82	1,04	0,60	1,88	0,2488	1,11	3,10	0,469	1,41	0,99986
1,0	28,4	0,954	1,64				0,4976			0,938	2,81	0,99972
2,0	56,8	1,93	3,28				0,9952			1,88	5,63	0,99944
5,0	142	4,82	8,20				2,488			4,70	14,1	0,9986
7,0	199	6,75	11,5				3,483			6,57	19,7	0,9980
10,0	284	9,64	16,4				4,976			9,38	28,1	0,9972
20,0	568	19,3	32,8				9,952			18,8	56,3	0,9944
$\Delta T = 30 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 86,8 \text{ K}; \Theta = 0,346; R_K = 40,82 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\max K} = 1,30 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 0,588; B_H = 0,565$												
0,5	15,6	0,822	1,12	0,61	0,76	2,40	0,636	1,18	4,50	1,52	4,56	0,99954
1,0	31,2	1,64	2,24				1,272			3,0	9,0	0,99910
2,0	62,4	3,28	4,48				2,544			6,0	18,0	0,9982
5,0	156	8,2	11,2				6,36			15,0	45,0	0,9955
7,0	218	11,5	15,7				8,904			21,0	63,0	0,9937
10,0	312	16,4	22,4				12,72			30,0	90,0	0,9910
20,0	624	32,8	44,8				25,44			60,0	180,0	0,9822
$\Delta T = 40 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 78,9 \text{ K}; \Theta = 0,50; R_K = 40,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\max K} = 1,25 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 0,707; B_H = 0,655$												
0,5	20,8	1,39	1,70	0,36	0,88	3,36	1,174	1,28	6,30	3,95	11,8	0,99882
1,0	41,6	2,78	3,40				2,348			7,9	23,7	0,9976
2,0	83,2	5,60	6,80				4,70			15,8	47,4	0,9954
5,0	208	13,9	17,0				11,74			39,5	118,5	0,9882
7,0	291	19,5	23,8				16,44			55,3	166	0,935
10,0	416	27,8	34,0				23,48			79,0	237	0,9766
20,0	832	55,6	68,0				47,0			158	474	0,9537
$\Delta T = 50 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 73,4 \text{ K}; \Theta = 0,68; R_K = 39,2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\max K} = 1,22 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 0,825; B_H = 0,746$												

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0,5	33,5	2,75	3,0	0,18	1,0	5,66	1,96	1,39	9,20	11,1	33,3	0,9967
1,0	67,0	5,50	6,0				3,92			22,2	66,7	0,9934
2,0	134	11,0	12,0				7,84			44,4	133	0,9868
5,0	335	27,5	30,0				19,6			111,0	333	0,9672
7,0	469	38,5	42,0				27,44			155	466	0,9545
10,0	670	55,0	60,0				39,2			222	667	0,9355
20,0	1340	110,0	120,0	78,4	444	1332	0,8753					
$\Delta T = 60 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 66,8 \text{ K}; \Theta = 0,90; R_K = 38,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\max K} = 1,184 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 0,949; B_H = 0,832$												
0,5	129	12,56	12,75	0,040	1,12	21,9	3,07	1,50	15,7	67,3	202	0,980
1,0	258	25,1	25,5				6,14			135	404	0,9604
2,0	516	50,2	51,0				12,28			270	810	0,9222
5,0	1290	125,5	127,5				30,7			675	2025	0,8167
7,0	1806	176	179				43,0			945	2835	0,7531
10,0	2580	251	255				61,4			1350	4050	0,6670
20,0	5160	502	510	122,8	2700	8100	0,4450					

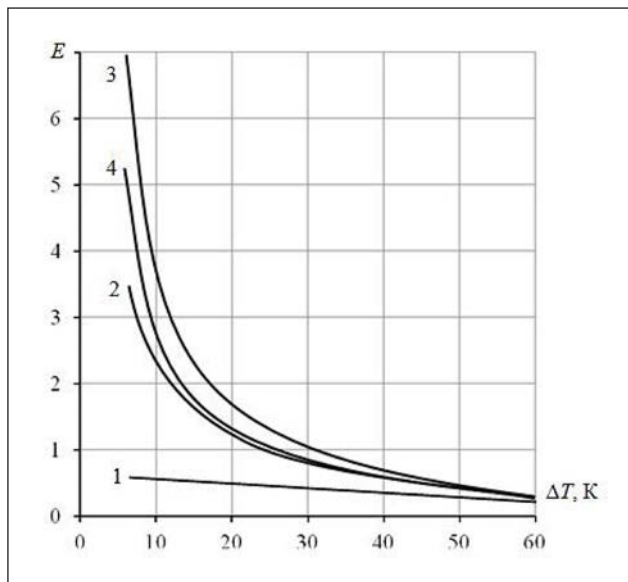


Рис. 3. Зависимость холодильного коэффициента E однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300 \text{ K}$, $l/S = 40 \text{ см}^{-1}$ для различных режимов работы: 1 – $Q_{0\max}$; 2 – $(Q_0/I)_{\max}$; 3 – $(Q_0/I^2)_{\max}$; 4 – λ_{\min}

охлаждения (рис. 7, п. 1) и не зависит от тепловой нагрузки Q_0 .

Анализ результатов расчетов, приведенных в табл. 1, показал, что с ростом перепада температуры ΔT при $m_0 C_0 \rightarrow 0$:

- увеличивается время выхода на стационарный режим τ (рис. 1, п. 2) и не зависит от тепловой нагрузки Q_0 ;

- увеличивается величина рабочего тока I (рис. 2, п. 2) и не зависит от тепловой нагрузки Q_0 ;

- уменьшается холодильный коэффициент E (рис. 3, п. 2) и не зависит от тепловой нагрузки Q_0 ;

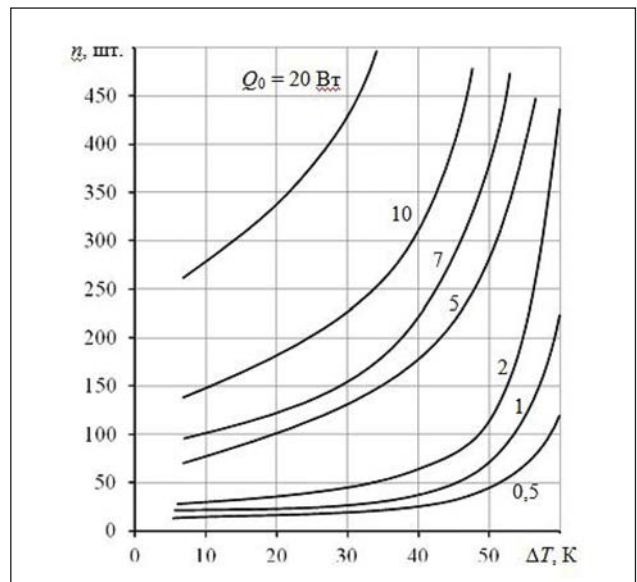


Рис. 4. Зависимость количества термоэлементов n однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300 \text{ K}$, $l/S = 40 \text{ см}^{-1}$ для различной тепловой нагрузки Q_0 в режиме $Q_{0\max}$

- функциональная зависимость количества термоэлементов $n = f(\Delta T)$ имеет минимум при $\Delta T = 20 \text{ K}$ (рис. 8); с ростом тепловой нагрузки Q_0 количество термоэлементов n увеличивается;

- увеличивается падение напряжения U для различной тепловой нагрузки Q_0 ; с ростом тепловой нагрузки падение напряжение увеличивается;

- увеличивается относительная величина интенсивности отказов λ/λ_0 (рис. 9); с ростом тепловой нагрузки Q_0 интенсивность отказов увеличивается;

- уменьшается вероятность безотказной работы P для различной тепловой нагрузки Q_0

Таблица 3

$T = 300 \text{ K}; l/S = 40 \text{ см}^{-1}; \text{режим } (Q_0/P^2)_{\text{max}}; m_0 C_0 \rightarrow 0, \sum_i m_i C_i = 36,1 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/К}$

$Q_0, \text{ Вт}$	$n, \text{ шт.}$	$W, \text{ Вт}$	$U, \text{ В}$	E	$I, \text{ А}$	β	$(\lambda/\lambda_0)_H$	$\gamma, \text{ отн.ед.}$	$\tau, \text{ с}$	$(\lambda/\lambda_0)_K$	$\lambda_K \cdot 10^4, \text{ 1/ч}$	P
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\Delta T = 5 \text{ K}; \Delta T_{\text{max}} = 104,4 \text{ K}; \Theta = 0,048; R_K = 44,0 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\text{maxK}} = 1,34 \text{ А}; I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ А}; B_K = 0,048; B_H = 0,0476$												
0,5	141	0,0683	1,07	7,32	0,064	3,79	0,0000317	1,024	6,6	0,00012	0,00036	→1,0
1,0	282	0,137	2,10				0,000063			0,00024	0,00072	→1,0
2,0	564	0,274	4,28				0,000127			0,00048	0,00144	0,9999986
5,0	1410	0,685	10,5				0,000315			0,0012	0,0036	0,9999964
7,0	1974	0,959	14,7				0,000441			0,00168	0,0050	0,9999950
10,0	2820	1,37	21,0				0,00063			0,0024	0,0072	0,9999928
20,0	5640	2,74	42,0				0,00126			0,0048	0,0144	0,9999986
$\Delta T = 10 \text{ K}; \Delta T_{\text{max}} = 100,5 \text{ K}; \Theta = 0,10; R_K = 43,48 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\text{maxK}} = 1,33 \text{ А}; I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ А}; B_K = 0,10; B_H = 0,0985$												
0,5	74,5	0,151	1,15	3,31	0,133	3,87	0,000581	1,052	6,8	0,00225	0,00675	0,9999933
1,0	149	0,30	2,30				0,001162			0,0045	0,0135	0,9999987
2,0	298	0,60	4,60				0,00232			0,0090	0,027	0,9999973
5,0	745	1,50	11,5				0,00581			0,0225	0,0675	0,9999933
7,0	1043	2,10	16,1				0,00813			0,0315	0,0945	0,9999906
10,0	1490	3,0	23,0				0,01162			0,045	0,135	0,9999987
20,0	2980	6,0	46,0				0,02324			0,090	0,270	0,9999973
$\Delta T = 20 \text{ K}; \Delta T_{\text{max}} = 93,7 \text{ K}; \Theta = 0,213; R_K = 42,55 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\text{maxK}} = 1,31 \text{ А}; I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ А}; B_K = 0,213; B_H = 0,207$												
0,5	43,3	0,363	1,34	1,38	0,28	4,10	0,0115	1,11	7,3	0,047	0,14	0,9999986
1,0	86,6	0,726	2,68				0,023			0,094	0,281	0,9999972
2,0	173	1,45	5,40				0,046			0,187	0,562	0,9999944
5,0	433	3,63	13,4				0,115			0,468	1,40	0,999986
7,0	606	5,0	18,8				0,161			0,648	1,94	0,999981
10,0	866	7,26	26,8				0,23			0,936	2,81	0,999972
20,0	1732	14,5	53,6				0,46			1,87	5,62	0,999944
$\Delta T = 30 \text{ K}; \Delta T_{\text{max}} = 86,8 \text{ K}; \Theta = 0,346; R_K = 40,82 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\text{maxK}} = 1,30 \text{ А}; I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ А}; B_K = 0,346; B_H = 0,333$												
0,5	34,7	0,707	1,63	0,71	0,45	4,53	0,0772	1,18	7,9	0,35	1,05	0,9999895
1,0	69,4	1,414	3,26				0,1544			0,70	2,10	0,999979
2,0	139	2,82	6,50				0,3088			1,40	4,20	0,999958
5,0	347	7,07	16,3				0,772			3,50	10,5	0,999895
7,0	486	9,87	22,8				1,081			4,9	14,7	0,99985
10,0	694	14,1	32,6				1,544			7,0	21,0	0,99979
20,0	1388	28,2	65,2				3,088			14,0	42,0	0,99958
$\Delta T = 40 \text{ K}; \Delta T_{\text{max}} = 78,9 \text{ K}; \Theta = 0,50; R_K = 40,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\text{maxK}} = 1,25 \text{ А}; I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ А}; B_K = 0,50; B_H = 0,463$												
0,5	37,4	1,35	2,33	0,37	0,63	4,86	0,29	1,28	8,9	1,41	4,24	0,999958
1,0	74,8	2,70	4,66				0,58			2,82	8,46	0,999915
2,0	150	5,40	9,32				1,16			5,64	16,9	0,999831
5,0	374	13,5	23,3				2,90			14,1	42,3	0,99958
7,0	524	18,9	32,6				4,06			19,7	59,2	0,99941
10,0	748	27,0	46,6				5,80			28,2	84,6	0,99916
20,0	1496	54,0	93,2				11,6			56,4	169	0,9832
$\Delta T = 50 \text{ K}; \Delta T_{\text{max}} = 73,4 \text{ K}; \Theta = 0,68; R_K = 39,2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\text{maxK}} = 1,22 \text{ А}; I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ А}; B_K = 0,68; B_H = 0,615$												

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0,5	49,8	2,90	3,87	0,17	0,83	8,35	0,908	1,39	10,9	7,58	22,7	0,9977
1,0	99,6	5,80	7,70				1,816			15,2	45,5	0,99546
2,0	199	11,6	15,4				3,63			30,4	60,8	0,9939
5,0	498	29,0	38,5				9,08			76,0	228	0,9775
7,0	697	40,6	53,9				12,71			106	319	0,9686
10,0	996	58,0	77,0				18,16			152	456	0,9554
20,0	1992	116	154				36,3			304	912	0,9128
$\Delta T = 60 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 66,8 \text{ K}; \Theta = 0,90; R_K = 38,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\max K} = 1,184 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 0,90; B_H = 0,789$												
0,5	168	14,9	16,0	0,034	1,07	28,9	2,48	1,50	16,4	71,7	215	0,9787
1,0	337	30,0	32,0				4,96			143	430	0,9579
2,0	674	60,0	64,0				9,92			287	860	0,9176
5,0	1685	150	160				24,8			717	2151	0,8065
7,0	2359	210	224				34,7			1004	3011	0,7400
10,0	3370	300	320				49,6			1434	4302	0,6504
20,0	7640	600	640				99,2			2868	8604	0,4230

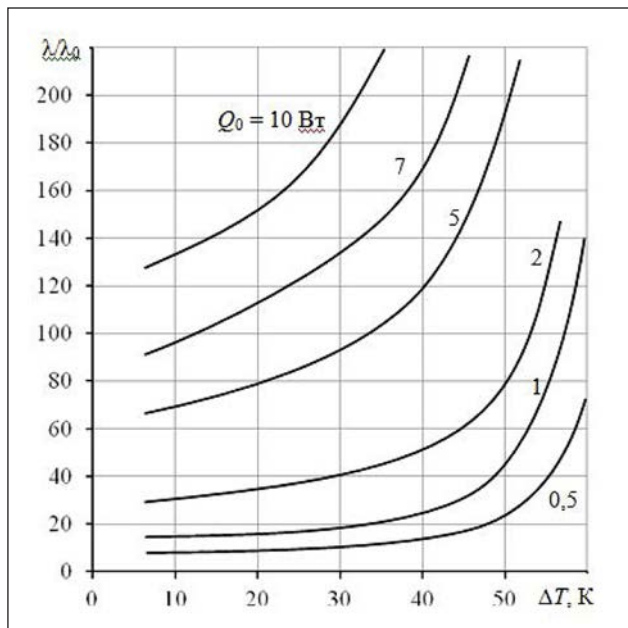


Рис. 5. Зависимость относительной величины интенсивности отказов λ/λ_0 однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300 \text{ K}, l/S = 40 \text{ см}^{-1}, \lambda_0 = 3 \text{ Ч}$

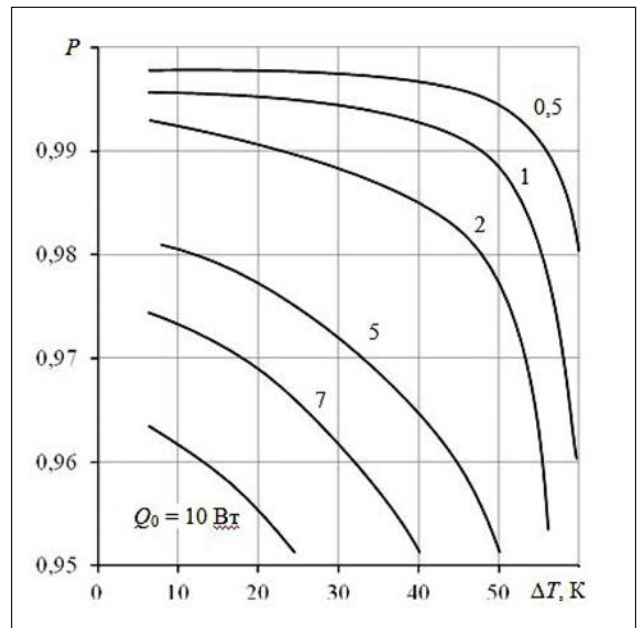


Рис. 6. Зависимость вероятности безотказной работы P однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300 \text{ K}, l/S = 40 \text{ см}^{-1}, t = 10^4 \text{ ч}$ для различной тепловой нагрузки Q_0 в режиме $Q_{0\max}$

(рис. 10); с ростом тепловой нагрузки Q_0 вероятность безотказной работы P уменьшается;

– увеличивается отношение $\beta = \lambda_k/\lambda_n$ интенсивности отказов в начале λ_n и в конце λ_k процесса охлаждения (рис. 7, п. 2) и не зависит от тепловой нагрузки Q_0 .

Режим $(Q_0/I^2)_{\max}$ ($B = \Theta$). Результаты расчетов основных параметров, показателей надежности и времени выхода на стационарный режим работы для различных перепадов температуры ΔT в диапа-

зоне от 5 до 60 К и тепловой нагрузки Q_0 от 5 до 20 Вт для случая, когда $m_0 C_0 \rightarrow 0$, приведены в табл. 3.

Анализ результатов расчетов, приведенных в табл. 3, показал, что с ростом перепада температуры ΔT при $m_0 C_0 \rightarrow 0$:

– увеличивается время выхода на стационарный режим τ (рис. 1, п. 3) и не зависит от тепловой нагрузки Q_0 ;

– увеличивается величина рабочего тока I (рис. 2, п. 3) и не зависит от тепловой нагрузки Q_0 ;

Таблица 4

$T = 300 \text{ K}; l/S = 40 \text{ см}^{-1}; \text{режим } \lambda_{\min} (B = \eta\Theta); m_0 C_0 \rightarrow 0, \sum_i m_i C_i = 36,1 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/К}$

$Q_0, \text{ Вт}$	$n, \text{ шт.}$	$W, \text{ Вт}$	$U, \text{ В}$	E	$I, \text{ А}$	β	$(\lambda/\lambda_0)_H$	$\gamma, \text{ отн.ед.}$	$\tau, \text{ с}$	$(\lambda/\lambda_0)_K$	$\lambda_K \cdot 10^4, \text{ 1/ч}$	P
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\Delta T = 5 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 104,4 \text{ K}; \Theta = 0,048; R_K = 44,0 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\max K} = 1,34 \text{ А}; I_{\max H} = 1,35 \text{ А}; B_K = 0,0336; B_H = 0,03335$												
0,5	360	0,095	2,13	5,26	0,045	8,36	0,0000766	1,024	11,9	0,000064	0,00019	→1,0
1,0	720	0,19	4,26				0,000153			0,000127	0,00038	→1,0
2,0	1440	0,38	8,52				0,000306			0,00025	0,00076	→1,0
5,0	3600	0,95	21,3				0,000765			0,00064	0,0019	0,9999981
7,0	5040	1,33	29,8				0,00107			0,00089	0,0027	0,9999973
10,0	7200	1,90	42,6				0,00153			0,00127	0,0038	0,9999962
20,0	14400	3,80	85,2				0,00031			0,0025	0,0076	0,9999924
$\Delta T = 10 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 100,5 \text{ K}; \Theta = 0,10; R_K = 43,48 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\max K} = 1,33 \text{ А}; I_{\max H} = 1,35 \text{ А}; B_K = 0,072; B_H = 0,071$												
0,5	176	0,20	2,15	2,46	0,096	8,10	0,000157	1,052	11,5	0,00127	0,0038	0,9999962
1,0	351	0,40	4,30				0,000314			0,0025	0,0076	0,9999924
2,0	700	0,80	8,60				0,00063			0,0051	0,0152	0,9999985
5,0	1755	2,0	21,5				0,00157			0,0127	0,0381	0,9999962
7,0	2457	2,80	30,1				0,0022			0,0178	0,0533	0,9999947
10,0	3510	4,0	43,0				0,00314			0,0254	0,0762	0,9999924
20,0	7020	8,0	86,0				0,0063			0,0508	0,152	0,999985
$\Delta T = 20 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 93,7 \text{ K}; \Theta = 0,213; R_K = 42,55 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\max K} = 1,31 \text{ А}; I_{\max H} = 1,35 \text{ А}; B_K = 0,16; B_H = 0,155$												
0,5	93,8	0,478	2,39	1,05	0,210	6,65	0,00361	1,11	11,4	0,024	0,072	0,9999928
1,0	188	0,956	4,78				0,0072			0,048	0,144	0,9999856
2,0	375	1,91	9,56				0,0144			0,096	0,288	0,999971
5,0	938	4,78	23,9				0,036			0,24	0,72	0,999928
7,0	1313	6,69	33,5				0,0504			0,34	1,0	0,999900
10,0	1876	9,56	47,8				0,072			0,48	1,44	0,999856
20,0	3752	19,1	95,6				0,144			0,96	2,88	0,99971
$\Delta T = 30 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 86,8 \text{ K}; \Theta = 0,346; R_K = 40,82 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\max K} = 1,30 \text{ А}; I_{\max H} = 1,35 \text{ А}; B_K = 0,277; B_H = 0,267$												
0,5	62,1	0,864	2,49	0,58	0,360	7,62	0,0319	1,18	11,0	0,243	0,730	0,999927
1,0	124	1,73	5,0				0,0638			0,486	1,46	0,99985
2,0	248	3,46	10,0				0,1276			0,972	2,92	0,99971
5,0	621	8,65	25,0				0,319			2,43	7,29	0,99927
7,0	869	12,1	35,0				0,4466			3,40	10,2	0,99898
10,0	1242	17,3	50,0				0,638			4,86	14,6	0,9985
20,0	2484	34,6	100,0				1,276			9,72	29,2	0,9971
$\Delta T = 40 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 78,9 \text{ K}; \Theta = 0,50; R_K = 40,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\max K} = 1,25 \text{ А}; I_{\max H} = 1,35 \text{ А}; B_K = 0,425; B_H = 0,394$												
0,5	59,6	1,63	3,32	0,31	0,530	8,87	0,1522	1,28	11,2	1,35	4,05	0,99960
1,0	119	3,26	6,64				0,3044			2,70	8,10	0,99920
2,0	238	6,52	13,3				0,609			5,40	16,2	0,9984
5,0	595	16,3	33,2				1,522			13,5	40,5	0,9960
7,0	833	22,8	46,5				2,131			18,9	56,7	0,9943
10,0	1190	32,6	66,4				3,044			27,0	81,0	0,9919
20,0	2380	65,2	133				6,088			54,0	162	0,9839
$\Delta T = 50 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 73,4 \text{ K}; \Theta = 0,68; R_K = 39,2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\max K} = 1,22 \text{ А}; I_{\max H} = 1,35 \text{ А}; B_K = 0,612; B_H = 0,553$												

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0,5	71,4	3,46	5,12	0,145	0,750	11,8	0,594	1,39	12,6	7,0	21,0	0,9979
1,0	143	6,91	10,2				1,188			14,0	42,0	0,9958
2,0	286	13,8	20,4				2,376			28,0	84,0	0,9916
5,0	714	34,6	51,0				5,94			70,0	210	0,9792
7,0	1000	48,4	71,4				8,32			98,0	294	0,9710
10,0	1428	69,1	102,0				11,88			140	420	0,9589
20,0	2856	138	204,0				23,76			280	840	0,9194
$\Delta T = 60 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 66,8 \text{ K}; \Theta = 0,90; R_K = 38,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\max K} = 1,184 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 0,873; B_H = 0,766$												
0,5	215	18,1	20	0,028	1,00	36,7	2,2	1,50	17,0	80,8	242	0,9760
1,0	431	36,2	40				4,4			162	485	0,9527
2,0	862	72,4	80				8,8			323	969	0,9076
5,0	2155	181	200				22,0			808	2424	0,7847
7,0	3017	253	280				30,8			1131	3394	0,7122
10,0	4310	362	400				44,0			1616	4848	0,6158
20,0	8620	724	800				88,0			3232	9696	0,3792

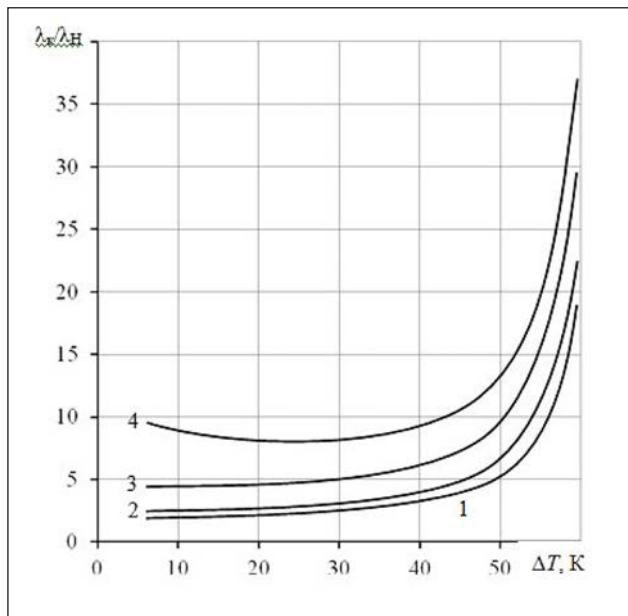


Рис. 7. Зависимость отношения λ_k/λ_n однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300 \text{ K}, Q_0 = 0,5 \text{ Вт}, l/S = 40 \text{ см}^{-1}$; $\sum m_i C_i = 36,1 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/К}$ для различных режимов работы: 1 – $Q_{0\max}$; 2 – $(Q_0/I)_{\max}$; 3 – $(Q_0/P)_{\max}$; 4 – λ_{\min}

- уменьшается холодильный коэффициент E (рис. 3, п. 3) и не зависит от тепловой нагрузки Q_0 ;
- функциональная зависимость количества термоэлементов $n = f(\Delta T)$ имеет минимум при $\Delta T = 30 \text{ K}$ (рис. 11); с ростом тепловой нагрузки количество термоэлементов увеличивается;
- увеличивается падение напряжения U для различной тепловой нагрузки Q_0 ; с ростом тепловой нагрузки падение напряжение увеличивается;
- увеличивается относительная величина

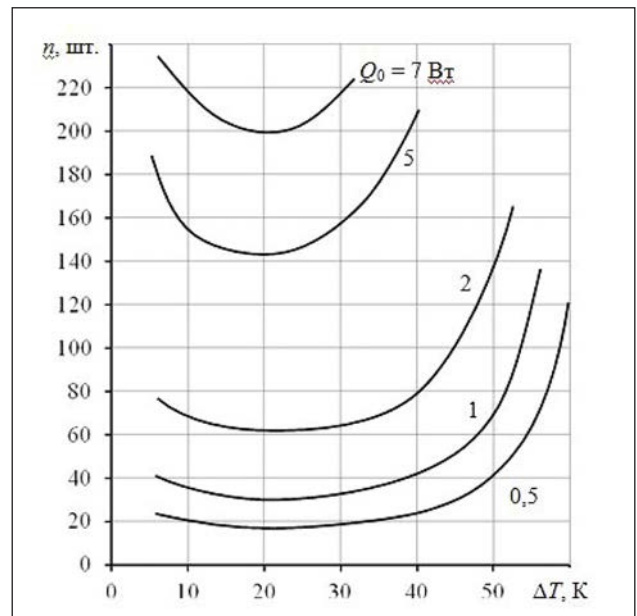


Рис. 8. Зависимость количества термоэлементов n однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300 \text{ K}, l/S = 40 \text{ см}^{-1}$ для различной тепловой нагрузки Q_0 в режиме $(Q_0/I)_{\max}$

- интенсивности отказов λ/λ_0 (рис. 12) для различной тепловой нагрузки Q_0 ; с ростом тепловой нагрузки интенсивность отказов увеличивается;
- уменьшается вероятность безотказной работы P для различной тепловой нагрузки Q_0 (рис. 13); с ростом тепловой нагрузки вероятность безотказной работы уменьшается;
- увеличивается отношение $\beta = \lambda_k/\lambda_n$ интенсивности отказов в начале λ_n и в конце λ_k процесса охлаждения (рис. 7, п. 3).

Таблица 5

Режим работы	B_K	B_H	τ, c	I, A	$n, шт.$	U, B	$W, Вт$	E	λ / λ_0	$\lambda \cdot 10^8, 1/ч$	P
Q_{0max}	1,0	0,93	5,4	1,2	32,0	3,50	4,0	0,25	24,4	73,2	0,9927
$(Q_0/I)_{max}$	0,707	0,655	6,4	0,82	41,6	3,40	2,80	0,36	7,9	23,7	0,9976
$(Q_0/P)_{max}$	0,50	0,46	9,0	0,58	74,8	4,7	2,70	0,37	2,80	8,50	0,99915
λ_{min}	0,425	0,39	11,4	0,49	120	6,60	3,30	0,31	2,70	8,10	0,99920

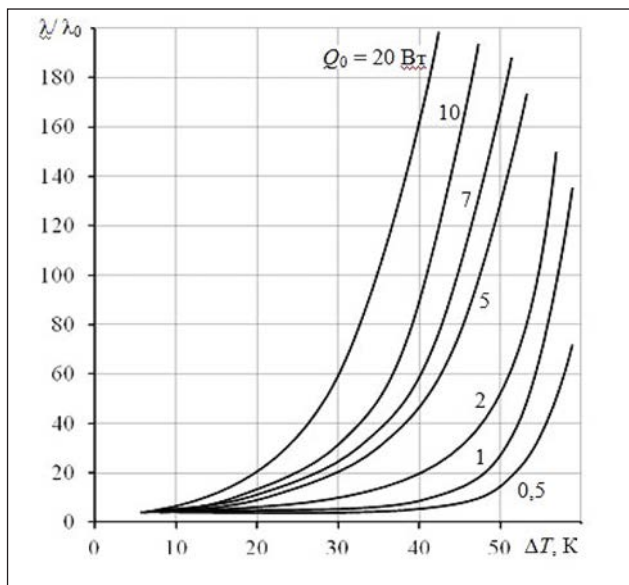


Рис. 9. Зависимость относительной величины интенсивности отказов λ/λ_0 однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300 K, l/S = 40 \text{ см}^{-1}, \lambda_0 = 3Ч$

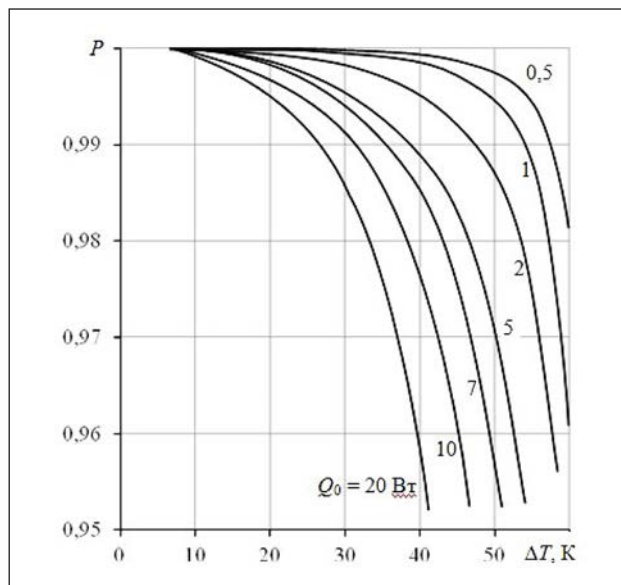


Рис. 10. Зависимость вероятности безотказной работы P однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300 K, l/S = 40 \text{ см}^{-1}, t = 10^4 \text{ ч}$ для различной тепловой нагрузки Q_0 в режиме $(Q_0/I)_{max}$

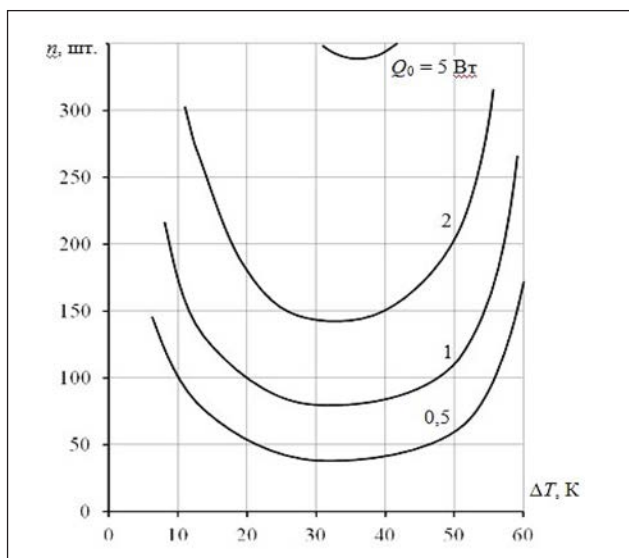


Рис. 11. Зависимость количества термоэлементов n однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300 K, l/S = 40 \text{ см}^{-1}$ для различной тепловой нагрузки Q_0 в режиме $(Q_0/P)_{max}$

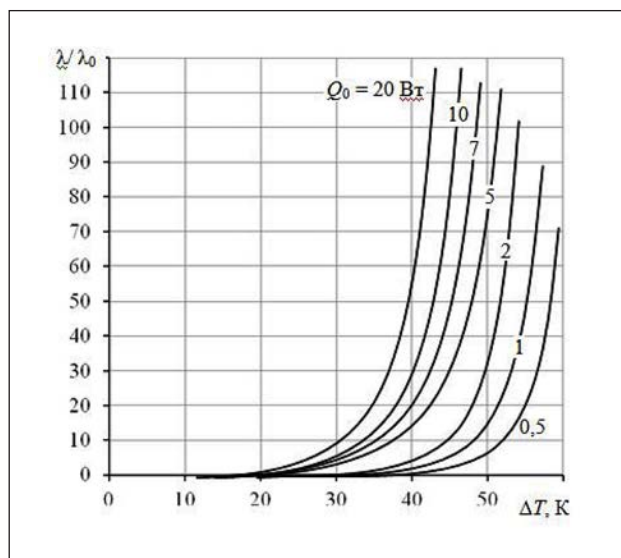


Рис. 12. Зависимость относительной величины интенсивности отказов λ/λ_0 однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300 K, l/S = 40 \text{ см}^{-1}, \lambda_0 = 3Ч$

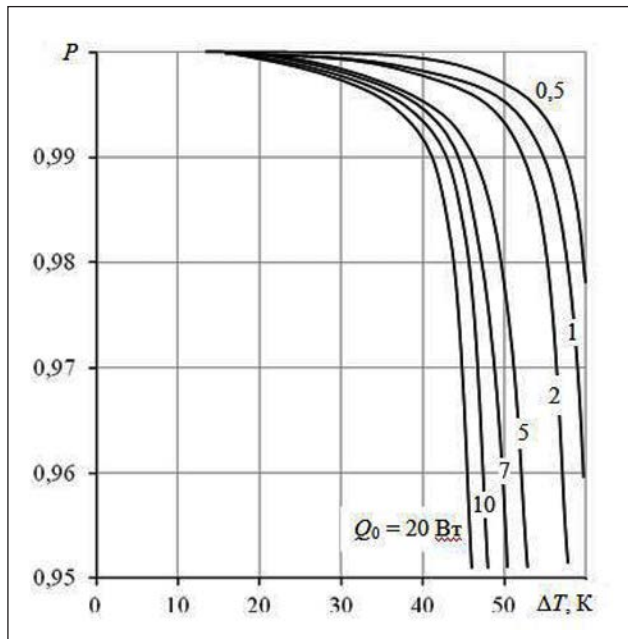


Рис. 13. Зависимость вероятности безотказной работы P однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300$ К, $l/S = 40$ см $^{-1}$, $t = 10^4$ ч для различной тепловой нагрузки Q_0 в режиме $(Q_0/P)_{\max}$

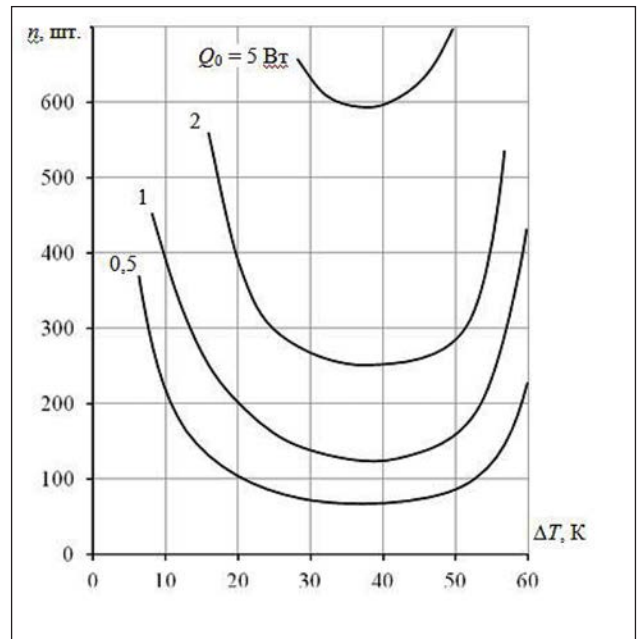


Рис. 14. Зависимость количества термоэлементов n однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300$ К, $l/S = 40$ см $^{-1}$ для различной тепловой нагрузки Q_0 в режиме λ_{\min}

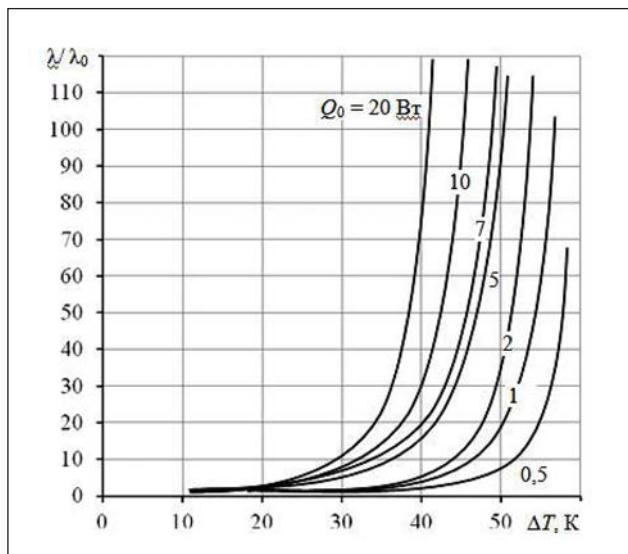


Рис. 15. Зависимость относительной величины отказов λ/λ_0 однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300$ К, $l/S = 40$ см $^{-1}$, $\lambda_0 = 3$ Ч

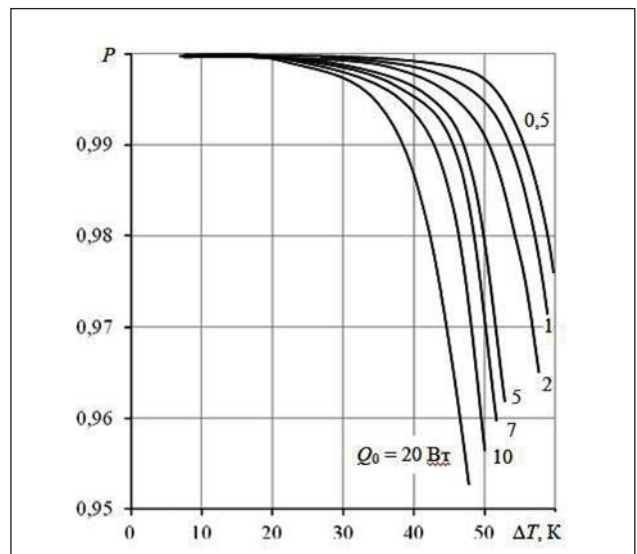


Рис. 16. Зависимость вероятности безотказной работы P однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300$ К, $l/S = 40$ см $^{-1}$, $t = 10^4$ ч для различной тепловой нагрузки Q_0 в режиме λ_{\min}

Анализ результатов расчетов, приведенных в табл. 4, показывает, что с ростом перепада температуры ΔT при $m_0 C_0 \rightarrow 0$:

- увеличивается время выхода на стационарный режим работы τ (рис. 1, п. 4) и не зависит от тепловой нагрузки Q_0 ;

- увеличивается величина рабочего тока I (рис. 2, п. 4) и не зависит от тепловой нагрузки Q_0 ;

- уменьшается холодильный коэффициент E (рис. 3, п. 4) и не зависит от тепловой нагрузки Q_0 ;

- функциональная зависимость количества термоэлементов $n = f(\Delta T)$ имеет минимум при $\Delta T = 40$ К (рис. 14); с ростом тепловой нагрузки количество термоэлементов n увеличивается;

- увеличивается падение напряжения U для различной тепловой нагрузки Q_0 ; с ростом тепловой нагрузки падение напряжения увеличивается;

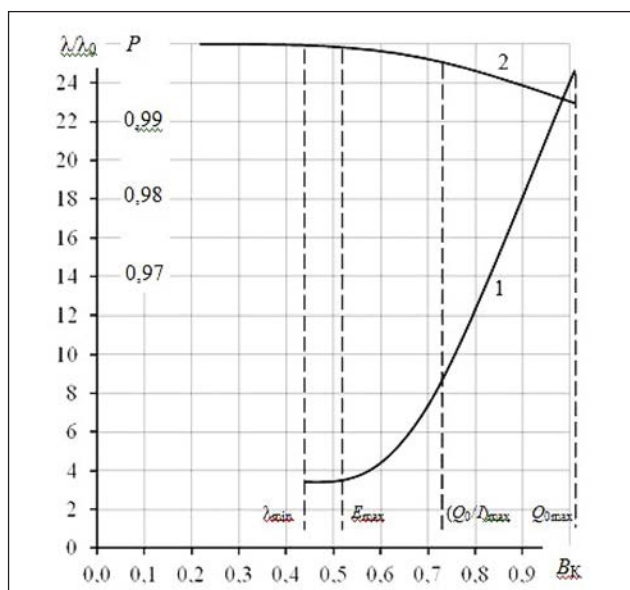


Рис. 17. Зависимость времени выхода на стационарный режим работы τ , количества термоэлементов n , величины рабочего тока I и холодильного коэффициента E однокаскадного ТЭУ от относительного рабочего тока B_K при $T = 300$ К, $\Delta T = 40$ К; $Q_0 = 1$ Вт; $l/S = 40$ см⁻¹: 1 – $\tau = f(B_K)$; 2 – $n = f(B_K)$; 3 – $I = f(B_K)$; 4 – $E = f(B_K)$

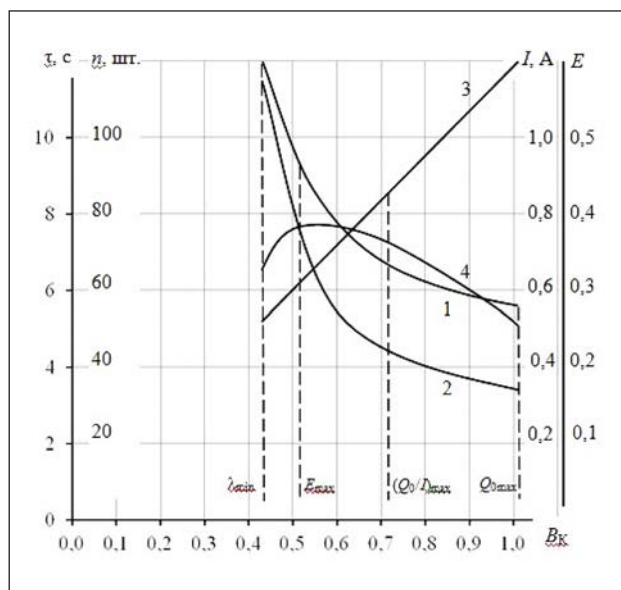


Рис. 18. Зависимость относительной величины отказов λ/λ_0 и вероятности безотказной работы P однокаскадного ТЭУ от относительного рабочего тока B_K при $T = 300$ К, $\Delta T = 40$ К; $Q_0 = 1$ Вт; $l/S = 40$ см⁻¹; $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч; $t = 10^4$ ч: 1 – $\lambda/\lambda_0 = f(B_K)$; 2 – $P = f(B_K)$

- увеличивается относительная величина интенсивности отказов λ/λ_0 (рис. 15); с ростом тепловой нагрузки интенсивность отказов увеличивается;
- уменьшается вероятность безотказной работы P (рис. 16); с ростом тепловой нагрузки вероятность безотказной работы уменьшается;
- функциональная зависимость $\beta = f(\Delta T)$ имеет минимум при $\Delta T = 20$ К (рис. 7, п. 4).

Для сравнительного анализа основных параметров, показателей надежности и времени выхода на стационарный режим работы для различных характерных токовых режимов воспользуемся данными расчетов, приведенных в табл. 5 при перепаде температуры $\Delta T = 40$ К, тепловой нагрузке $Q_0 = 1,0$ Вт и геометрии ветвей термоэлементов $l/S = 40$ см⁻¹.

Анализ результатов расчетов показывает, что с ростом относительного рабочего тока B_K :

- уменьшается время выхода на стационарный режим от $\tau = 11,4$ с в режиме λ_{min} до $\tau = 5,4$ с в режиме Q_{0max} (рис. 17, п. 1);
- уменьшается количество термоэлементов n от $n = 120$ шт. в режиме λ_{min} до $n = 32$ шт. в режиме Q_{0max} (рис. 17, п. 2);
- увеличивается величина рабочего тока I от $I = 0,49$ А в режиме λ_{min} до $I = 1,2$ А в режиме Q_{0max} (рис. 17, п. 3);
- функциональная зависимость холодильного коэффициента $E = f(B)$ имеет максимум при $B = 0,5$ (рис. 17, п. 4);

- уменьшается падение напряжения U от $U = 6,6$ В в режиме λ_{min} до $U = 3,5$ В в режиме Q_{0max} ;
- увеличивается относительная величина интенсивности отказов λ/λ_0 от $\lambda/\lambda_0 = 2,7$ в режиме λ_{min} до $\lambda/\lambda_0 = 24,4$ в режиме Q_{0max} (рис. 18);
- уменьшается вероятность безотказной работы P от $P = 0,99920$ в режиме λ_{min} до $P = 0,9927$ в режиме Q_{0max} (рис. 18).

Выводы

1. Время выхода на стационарный режим работы собственно однокаскадного ТЭУ для различных токовых режимов работы и различной тепловой нагрузки Q_0 увеличивается с ростом температуры ΔT при заданной геометрии ветвей термоэлементов $l/S = 40$ см⁻¹ и составляет:

- от $\tau = 0,4$ с при $\Delta T = 5$ К до $\tau = 15,3$ с при $\Delta T = 60$ К в режиме Q_{0max} ;
- от $\tau = 1,2$ с при $\Delta T = 5$ К до $\tau = 15,7$ с при $\Delta T = 60$ К в режиме $(Q_0/I)_{max}$;
- от $\tau = 6,6$ с при $\Delta T = 5$ К до $\tau = 16,4$ с при $\Delta T = 60$ К в режиме $(Q_0/P)_{max}$;
- от $\tau = 11,9$ с при $\Delta T = 5$ К до $\tau = 17,0$ с при $\Delta T = 60$ К в режиме λ_{min} .

2. Время выхода на стационарный режим работы не зависит от количества термоэлементов в ТЭУ при заданной геометрии ветвей термоэлементов.

3. Минимальное время выхода на стационарный режим работы обеспечивается при токе режима Q_{0max} в заданном диапазоне перепадов температуры.

4. При перепаде температуры, близком к максимальному ($\Delta T \rightarrow \Delta T_{\max}$), время выхода на стационарный режим работы отличается незначительно для всех режимов работы.
5. Сравнительный анализ основных параметров, показателей надежности и динамических характеристик дает возможность выбора компромиссных решений при проектировании ТЭУ с учетом весомости каждого из ограничительных факторов.

Список литературы:

1. Zebajadi M., Esfarjani K., Dresselhaus M. S., Ren Z. F., Chen G. Perspectives on thermoelectrics: from fundamentals to device Applications. *Energy & Environmental Science*. 2012. Vol. 5. № 1. P. 5147–5162.
2. Kajikawa T. Successes in the field of thermoelectric technology of electricity generation in Japan. *Thermoelectricity*. 2011. № 3. P. 5–19.
3. Ordin S.V, Experimental and Theoretical Expansion of the Phenomenology of Thermoelectricity. *Global Journal of Science Frontier Research- Physics & Space Science (GJSFR-A)*. 2018. Volume 18, Issue 1. P. 1–8.
4. Hyoung–Seuk Choi. Prediction of reliability on thermoelectric module through accelerated life test and Physics –of –failure. *Electronic Materials Letter*. 2011. № 7. P. 271.
5. Ping Yang. Approach on thermoelectricity reliability of board –level backplane based on the orthogonal experiment design. *International Journal of Materials and Structural Integrity*. 2010. 4(2–4). P. 170–185.
6. Jurgensmeyer A. L. High Efficiency Thermoelectric Devices Fabricated Using Quantum Well Confinement Techniques. *Colorado State University*. 2011. 54.
7. Singh, R. Experimental Characterization of Thin Film Thermoelectric Materials and Film Deposition VIA Molecular Beam Epitaxy. *University of California*. 2008. 54.
8. Нестеров С.Б., Холопкин А.И. Оценка возможности увеличения термоэлектрической добротности наноструктурированных полупроводниковых материалов для холодильной техники. *Холодильная техника*. № 5. 2014. С. 40–43.
9. Громов Г. Объемные или тонкопленочные термоэлектрические модули. *Компоненты и технологии*. № 9. 2014. С. 38.
10. Зайков В.П., Мещеряков В.И., Журавлев Ю.И. Определение времени выхода на стационарный режим работы с учетом теплоемкости и массы конструктивных и технологических элементов однокаскадного ТЭУ. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2018. № 1. С. 12–24.
11. Зайков В.П., Киншова Л.А., Моисеев В.Ф. Прогнозирование показателей надежности, термоэлектрических охлаждающих устройств. Книга 1. Однокаскадные устройства. Одесса : Политехприодика. 2009. 120 с.

ДИНАМІКА ФУНКЦІОНУВАННЯ ОДНОКАСКАДНОГО ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ОХОЛОДЖУЮЧОГО ПРИБОРУ

Розглянуто вплив конструктивних і технологічних елементів на основні параметри, показники надійності і динаміку функціонування термоелектричних охолоджуючих пристроїв у характерних струмових режимах у діапазоні робочих перепадів температури і теплового навантаження при заданій геометрії гілок термоелементів. Проведено оцінку часу виходу на стаціонарний режим охолоджувача у взаємозв'язку з основними параметрами і показниками надійності.

Ключові слова: термоелектричний охолоджувач, час виходу на стаціонарний режим, геометрія гілок термоелементів.

FUNCTIONING DYNAMICS OF A SINGLE-STAGE THERMOELECTRIC COOLING DEVICE

It was considered the influence of structural and technological elements on the basic parameters, indicators of reliability and on the functioning dynamics of thermoelectric cooling devices in the characteristic current modes in the range of operating temperature differences and thermal load in a given geometry of thermoelement branches. The estimation of the time to reach the stationary mode of the cooler in relation to the main parameters and reliability indicators has been made.

Key words: thermoelectric cooler, time to reach stationary mode, geometry of thermoelement branches.

УДК 621.311.24

Михайленко О.Ю.

Криворізький національний університет

Карабут Н.О.

Криворізький національний університет

Щокін В.П.

Криворізький національний університет

Мельник О.Є.

Криворізький національний університет

Кузьменко А.С.

Криворізький національний університет

СТРУКТУРНА ТА ПАРАМЕТРИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ СТАТИСТИЧНОЇ МОДЕЛІ РОЗПОДІЛУ ШВИДКОСТІ ВІТРУ В МІСЬКОМУ СЕРЕДОВИЩІ

У статті розглянуто питання побудови статистичних моделей вітрових умов мікрорайону Індустріальний м. Кривого Рогу за результатами вимірювань. Отриманий математичний опис може бути застосований для визначення очікуваного рівня вироблення електроенергії під час розміщення локальної вітроелектростанції поруч з житловим масивом. Для проведення порівняльного аналізу використовувалися широко апробовані розподіли Вейбулла, Релея, Райса, Накагамі, обернений розподіл Гаусса, нормальний, логнормальний та гамма-розподіли. Результати досліджень дали змогу встановити, що для більшості зон вимірювання найкращу точність має розподіл Вейбулла, найгіршу – розподіл Релея. Статистичні моделі на базі розподілів Райса, Накагамі та нормального розподілу також можуть бути застосовані для опису вітрових умов мікрорайону в задачах, що не вимагають високої точності.

Ключові слова: вітроенергетичний потенціал, швидкість вітру, статистична модель, щільність розподілу ймовірностей, апроксимація, ідентифікація.

Постановка проблеми. У сучасних умовах значної енергоємності процесів, що забезпечують функціонування промислових підприємств, об'єктів комунальної інфраструктури та побутового сектору, гостро постає проблема постійного зростання цін на електроенергію. Однією з основних причин такого підвищення є обмежений характер запасів видобувних паливно-енергетичних ресурсів. Їх подальше інтенсивне скорочення приводить лише до збільшення вартості електроенергії, яка вироблена з їх використанням. Впровадження альтернативних джерел енергії дасть змогу якщо не повністю замінити традиційні енергоресурси, то знизити обсяги їх видобутку.

Нині серед електростанцій, що використовують відновлювальні джерела енергії, велике поширення отримали геліо- та вітроелектростанції. Ефективність їх роботи суттєво залежить від метеорологічних та екологічних умов місцевості, у якій вони розташовуються. Так, рівень výro-

блення електроенергії фотоелектричними перетворювачами є низьким під час їх розміщення в областях з високим рівнем захмареності протягом року. Також суттєвим фактором, що впливає на ефективність, є значна запиленість, що характерна для промислових міст та мегаполісів. Вітроелектростанції більш придатні для застосування в місцевості, де спостерігаються високі швидкості вітру. Проте з огляду на наявність обертових частин та високий рівень ультразвуку, що створює вітрогенератор, вітроелектростанції розміщують за межами міст та селищ. Це приводить до необхідності побудови відповідної електричної мережі для інтеграції такої станції у структуру наявних систем електропостачання. Також за такого віддалення генеруючого обладнання виникають втрати під час передачі.

Для усунення зазначених недоліків доцільно застосувати вітроенергетичні установки (ВЕУ) потужністю до 20 кВт, які можна розміщувати по

системі глибокого вводу в безпосередній близькості до об'єкта електропостачання. Проте визначення ефективності впровадження локальної вітроелектростанції є можливим лише під час здійснення попереднього оцінювання вітрових умов місцевості. При цьому спиратись на дані окремих наявних метеостанцій недоцільно внаслідок їх розташування за межами міст, тому що характер забудови значно впливає на швидкість вітру навіть на незначних територіях [1].

Стаття присвячена дослідженню питання оцінювання вітрових умов місцевості, що придатна до розміщення локальної електростанції з вітроенергетичними установками низької потужності, призначеної для живлення побутових споживачів мікрорайону міста, шляхом вимірювання та визначення структури й параметрів статистичних моделей розподілу швидкостей вітру за ймовірністю виникнення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Традиційно для оцінювання вітрового потенціалу місцевості використовуються статистичні моделі розподілу ймовірностей виникнення швидкості вітру певного значення. Це обумовлюється можливістю їх побудови на базі упорядкованих даних про результати вимірювань метеорологічних умов.

Нині у вітроенергетиці для визначення очікуваного рівня вироблення електроенергії широко застосовується дво- [2–6] або трипараметричний [7; 8] розподіл Вейбулла, який демонструє високу точність апроксимації гістограм швидкостей вітру, отриманих експериментальним шляхом. При цьому достатня якість наближення досягається за використання розподілу з двома параметрами, а саме форми та масштабу [9], що значно спрощує процес ідентифікації моделі.

Незважаючи на загальноприйняте застосування розподілу Вейбулла, результати досліджень вітрових умов різної місцевості демонструють, що іноді можна застосовувати розподіли Релея [8; 10], Райса [8; 10], Релея-Райса [9; 10], нормальний [8], логнормальний [7; 8], гамма-розподіли [7; 8], а також їх модифіковані комбінації [11–13].

На якість побудованої моделі суттєво впливає метод визначення її параметрів. Більшість досліджень присвячена оцінюванню ефективності параметричної ідентифікації моделі Вейбулла [14–16]. У роботі [16] проведено порівняльний аналіз застосування основних емпіричних та обчислювальних методів визначення параметрів цього розподілу. Авторами використано критерії $MAPE$, $MABE$, $RMSE$ та R^2 для оцінювання точності апроксимації. В результаті встановлено, що

за недостатньої відповідності вимірних даних теоретичному розподілу, яка притаманна реальним умовам, вищу якість має модель, параметри якої визначені з використанням методу максимальної правдоподібності.

Постановка завдання. Мета статті полягає у визначенні структури та параметрів статистичної моделі, яка дає змогу з найкращою точністю апроксимувати емпіричний розподіл ймовірності виникнення швидкості вітру певного значення в умовах міських територій, на прикладі окремого мікрорайону м. Кривого Рогу. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1) проаналізувати географічне розташування мікрорайонів м. Кривого Рогу, визначити найбільш придатний до розміщення локальної вітроелектростанції;

2) визначити точки ймовірного встановлення ВЕУ на прилеглих до мікрорайону територіях, провести вимірювання швидкості вітру в термін і з періодичністю, яких достатньо для отримання репрезентативної вибірки;

3) визначити структури статистичних моделей на базі теоретичних розподілів ймовірності, які будуть використані для апроксимації емпіричних даних, встановити метод оцінювання їх параметрів, провести параметричну ідентифікацію моделей;

4) виконати порівняльний аналіз отриманих моделей, визначити найбільш придатні до практичного застосування для оцінювання вітроенергетичного потенціалу місцевості.

Виклад основного матеріалу дослідження. На початковому етапі досліджень необхідно було здійснити вибір об'єкта м. Кривого Рогу з найбільш перспективними умовами для розташування локальної вітроелектростанції.

Проведений аналіз картографічних даних, наведених на рис. 1, показав, що, незважаючи на віддаленість мікрорайонів один від одного, достатні для встановлення комплексу вітроенергетичних установок прилеглі території мають тільки мікрорайони Сонячний, Східний-2, 3 та Індустріальний. Для остаточного визначення об'єкта розраховано питому потужність споживачів мікрорайону на квадратний кілометр площі потенційного розміщення електростанції. Встановлено, що для Індустріального мікрорайону цей показник є найнижчим, складаючи $2,36 \text{ Вт/м}^2$, що зумовлене меншою кількістю споживачів житлового масиву та більшою площею прилеглих територій. Для мікрорайонів Східний-2, 3 та Сонячний питома потужність склала $25,27 \text{ Вт/м}^2$ та $88,29 \text{ Вт/м}^2$ відповідно.

Питомий рівень вироблення електроенергії ВЕУ залишається на обмеженому рівні, тому як об'єкт доцільно розглядати мікрорайон Індустріальний.

Прилеглу до мікрорайону територію було умовно розділено на три зони (рис. 2), такі як західний майданчик площею 1,84 км², східний майданчик площею 1,23 км² та схили відпрацьованого кар'єру площею 0,19 км². Західний та східний майданчики розділені лінією швидкісного трамваю та об'їзною дорогою. Більш вдале розташування має західний майданчик. На півночі він безпосередньо межує зі спорудами мікрорайону. Окрім цих багатоповерхових будинків, елементом захищеності є схили кар'єру в південно-західній частині майданчику.

Також слід відзначити, що західний майданчик має найбільшу площу. Особливостями території є увігнута форма рельєфу та наявність у її складі землі сільськогосподарського (с/г) призначення. За класифікацією Мілевського [1] розглянуте місце розташування має клас відкритості 6.

Східний майданчик менший за площею, ніж західний, та перебуває серед елементів захищеності. На півночі, сході та півдні від нього розташовані промислові споруди Криворізької вовнопрядильної фабрики та ТОВ «Криворізький ремонтно-механічний завод». Проте для цієї території характерна плоска форма рельєфу, тому за шкалою Мілевського вона має клас відкритості 5.

Найвищий клас відкритості 14 мають вершини вироблення кар'єру, що обумовлюється відсутністю на їх висоті елементів захищеності та випуклою формою рельєфу. Проте обмежена площа дає змогу розмістити на ній до 7 ВЕУ.

Для оцінювання вітроенергетичного потенціалу вибрано 18 точок ймовірного встановлення ВЕУ (рис. 3) залежно від рельєфу місцевості та віддалення завод. У них проведено серію вимірювань швидкості вітру. Вимірювання здійснювалися цифровими анемометрами, розміщеними на п'ятиметровій щоглі, протягом 2018 року від 4 до 6 разів на день. У результаті для кожної точки отримано вибірки з 1 856 елементів кожна для швидкості вітру. Загальний обсяг отриманих даних склав 33 408 значень.

Отримані дані було розділено на три частини за точками вимірювання швидкості вітру, що належать до східного та західного майданчиків. При цьому площа останнього розглядалася з урахуванням території с/г призначення та без неї. Окремо досліджувалась вибірка, що відповідає всій території можливого розміщення ВЕУ, яка об'єднує всі дані сукупності.

Підготовка до побудови статистичних моделей розподілу швидкостей вітру здійснювалася шляхом групування даних окремо в чотирьох наборах із застосуванням способу нормування, придатного до апроксимації теоретичною щільністю розподілу ймовірностей. Для забезпечення умови дотримання одиничної суми площ прямокутників,

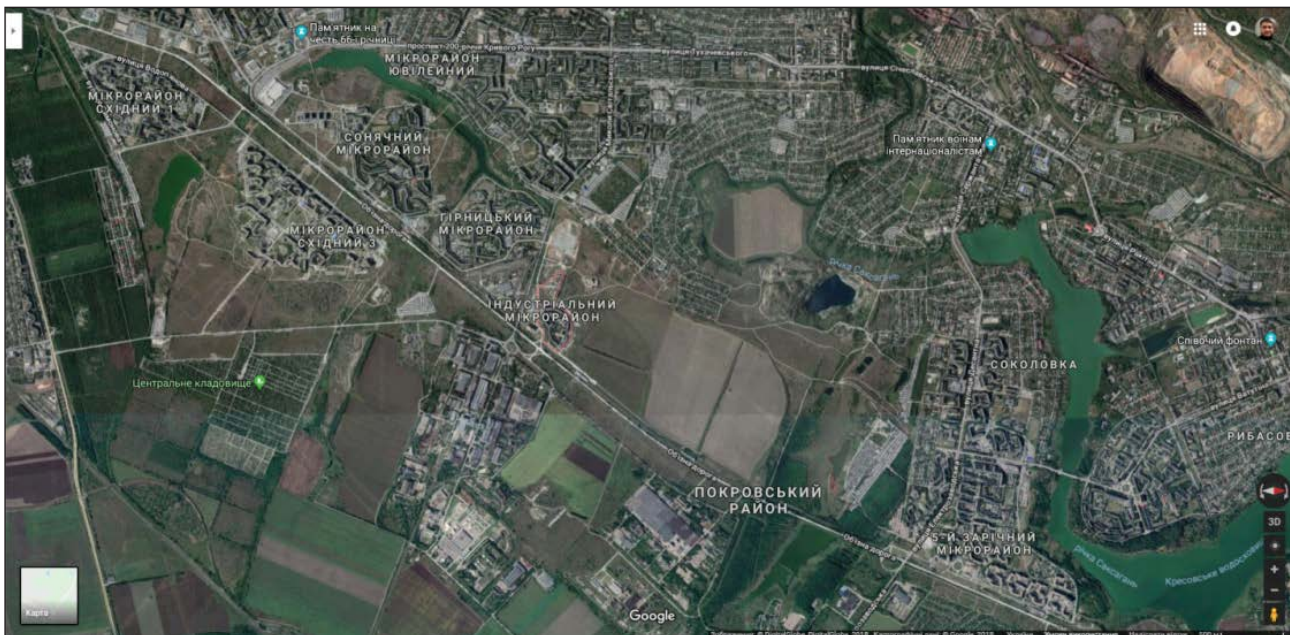


Рис. 1. Географічне розташування мікрорайонів міста Кривого Рогу з урахуванням забудови прилеглих територій [17]



Рис. 2. Придатні для розміщення локальної вітроелектростанції майданчики біля мікрорайону Індустріальний



Рис. 3. Точки проведення вимірювань швидкості та напрямку вітру

у які згруповані дані емпіричної гістограми розподілу швидкостей вітру за ймовірністю вимкнення, використано вираз:

$$p_i = \frac{1}{N} \cdot \frac{n_{vi}}{b_i}, \quad (1)$$

де p_i – ймовірність виникнення швидкості вітру в межах інтервалу групування; n_{vi} – кількість елементів вибірки, що потрапили в межі інтервалу групування; b_i – ширина інтервалу групування; N – загальне число елементів у вибірці.

Для дослідження можливості апроксимації емпіричних розподілів теоретичними було запропоновано розглянути розподіли Вейбулла, Релея, Райса, Накагамі, нормальний, логнормальний, гамма-розподіл та обернений Гауссів. Розподіл Релея є однопараметричним, усі інші – двопараметричними. Параметрична ідентифікація відповідних статистичних моделей здійснювалась методом максимальної правдоподібності.

Адекватність отриманих моделей встановлювалась спочатку із застосуванням критерію узгодження Пірсона (критерій χ^2), який дає змогу перевірити статистичну гіпотезу відповідності швидкості вітру як випадкової величини теоретичному закону розподілу ймовірностей. Для цього здійснювався розрахунок виразу критерію:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(p_i - \hat{p}_i)^2}{\hat{p}_i}, \quad (2)$$

де p_i – значення ймовірності емпіричного розподілу; \hat{p}_i – значення ймовірності теоретичного розподілу.

Обчислення проводилися для точок, що відповідають точкам початку інтервалів групування емпіричного розподілу. Оцінювання здійснювалось для рівнів значущості $p = 0,05$ і $p = 0,01$.

З огляду на критику методів перевірки статистичних гіпотез, що використовують p -значення, додатково перевірка ступеня точності опису результатів вимірювання статистичними моделями здійснювалась шляхом розрахунку коефіцієнта детермінації R^2 та коефіцієнта варіації середньоквадратичної похибки $CV(RMSE)$. Останній показник використовується замість більш вживаної квадратичної похибки $RMSE$, тому дає змогу оцінити ступінь відхилення емпіричних даних від модельних у відсотковому співвідношенні. Вирази для розрахунків вищезгаданих показників такі:

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^k (p_i - \hat{p}_i)^2}{\sum_{i=1}^k (p_i - \bar{p})^2} \right), \quad (3)$$

де \bar{p} – середнє значення ймовірності вітру обчислене за даними емпіричного розподілу;

$$CV(RMSE) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (p_i - \hat{p}_i)^2}{\bar{p}}}. \quad (4)$$

Обчислювальні експерименти проводилися для таких трьох інтервалів групування емпіричних даних про швидкість вітру: 0,3 м/с (26 інтервалів); 0,6 м/с (14 інтервалів); 0,9 м/с (9 інтервалів).

Графічне представлення емпіричних розподілів за різних інтервалів групування та статистичні

моделі, що апроксимують їх, з параметрами, що забезпечують максимізацію функції правдоподібності, наведені на рис. 4–6.

Результати обчислення критерія Пірсона для чотирьох різних майданчиків та трьох інтервалів групування швидкостей зведені у табл. 1–3.

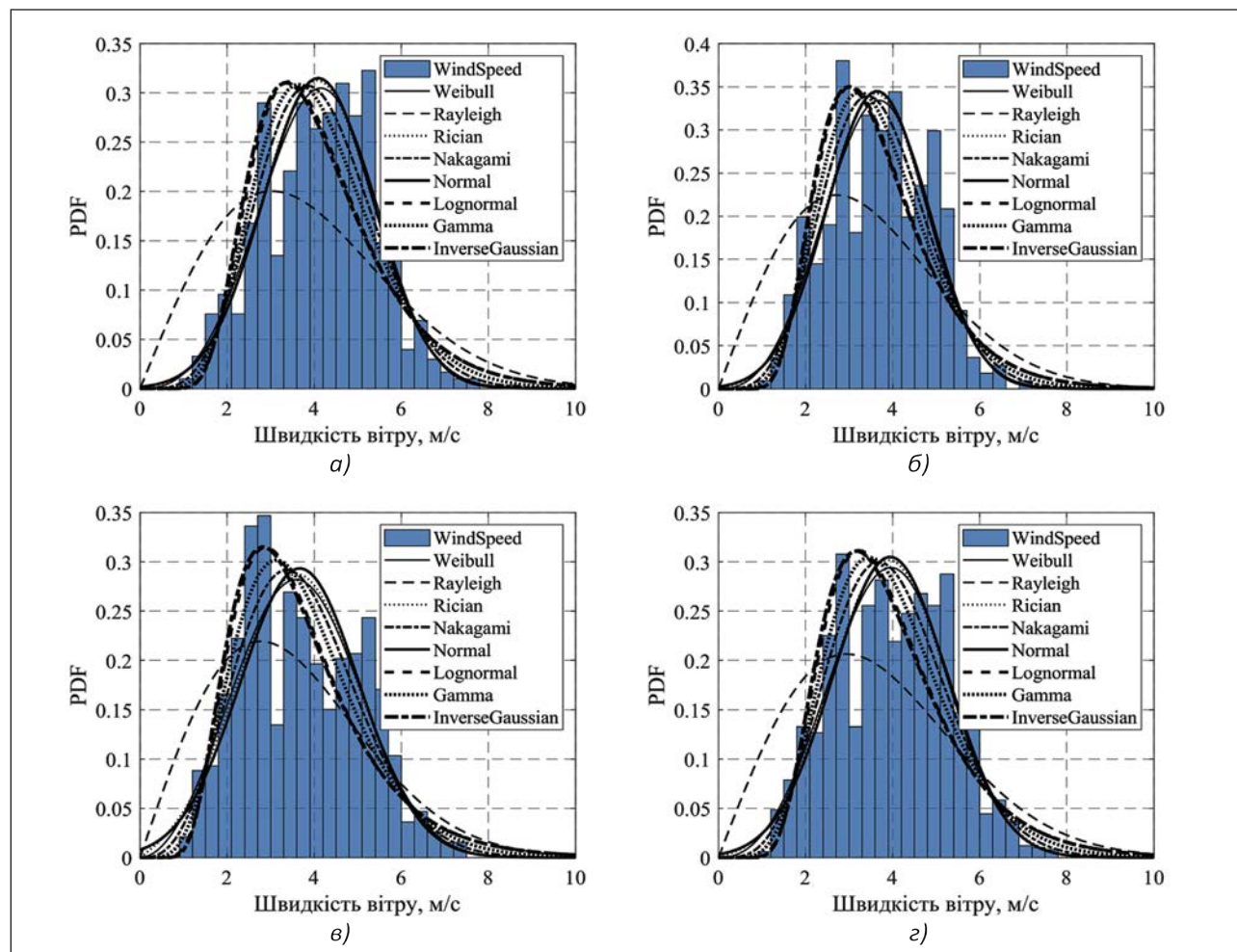


Рис. 4. Графіки емпіричного та теоретичних щільностей розподілу ймовірностей виникнення швидкостей вітру для інтервалу групування 0,3 м/с: а) західний майданчик з територією с/г; б) західний майданчик без території с/г; в) східний майданчик; г) загальна площа

Таблиця 1

Результати перевірки відповідності емпіричного розподілу теоретичному із застосуванням критерія Пірсона при інтервалі групування 0,3 м/с

Вид розподілу	Західний майданчик з територією с/г	Західний майданчик без території с/г	Східний майданчик	Загальна площа
Вейбулл	1,81	3,05	5,34	2,88
Релей	92,13	75,56	47,1	72,91
Райс	2,46	3,64	6,68	3,7
Накагамі	4,08	3,03	3,56	2,94
Нормальний	2,58	3,99	7,88	4,23
Логнормальний	17,29	7,96	5,1	9,52
Гамма	8,37	4,49	3,11	4,82
Обернений Гаусса	20,77	9,07	6,09	11,06

При інтервалі 0,3 м/с (табл. 1) та $p = 0,01$ нульові гіпотези про відповідність теоретичного розподілу емпіричному були відхилені для розподілу Релея за всіма чотирма майданчиками. Також

перевірку критерієм не пройшли статистичні моделі логнормального розподілу та оберненого розподілу Гаусса. Аналогічні результати отримані під час застосування рівня значущості 0,05.

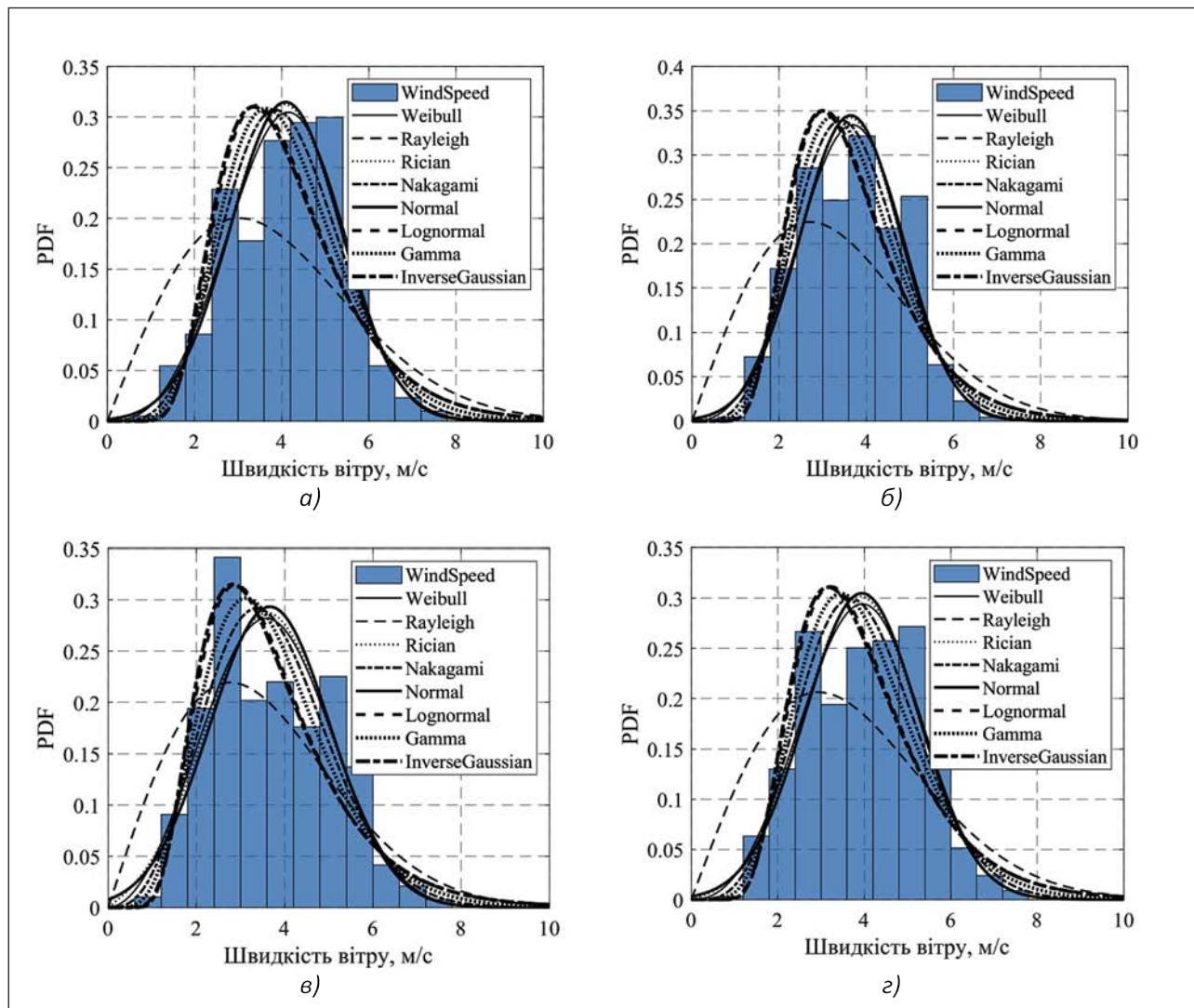


Рис. 5. Графіки емпіричного та теоретичних щільностей розподілу ймовірностей виникнення швидкостей вітру для інтервалу групування 0,6 м/с: а) західний майданчик з територією с/г; б) західний майданчик без території с/г; в) східний майданчик; г) загальна площа

Таблиця 2

Результати перевірки відповідності емпіричного розподілу теоретичному із застосуванням критерія Пірсона при інтервалі групування 0,6 м/с

Вид розподілу	Західний майданчик з територією с/г	Західний майданчик без території с/г	Східний майданчик	Загальна площа
Вейбулл	1,67	1,62	3,6	2,04
Релей	47,17	38,65	25,6	38,09
Райс	1,55	1,92	4,46	2,54
Накагамі	2,16	1,16	2,31	1,76
Нормальний	1,67	2,19	5,24	2,91
Логнормальний	8,92	3,16	2,2	4,32
Гамма	4,26	1,6	1,64	2,4
Обернений Гаусса	10,98	3,73	2,63	4,96

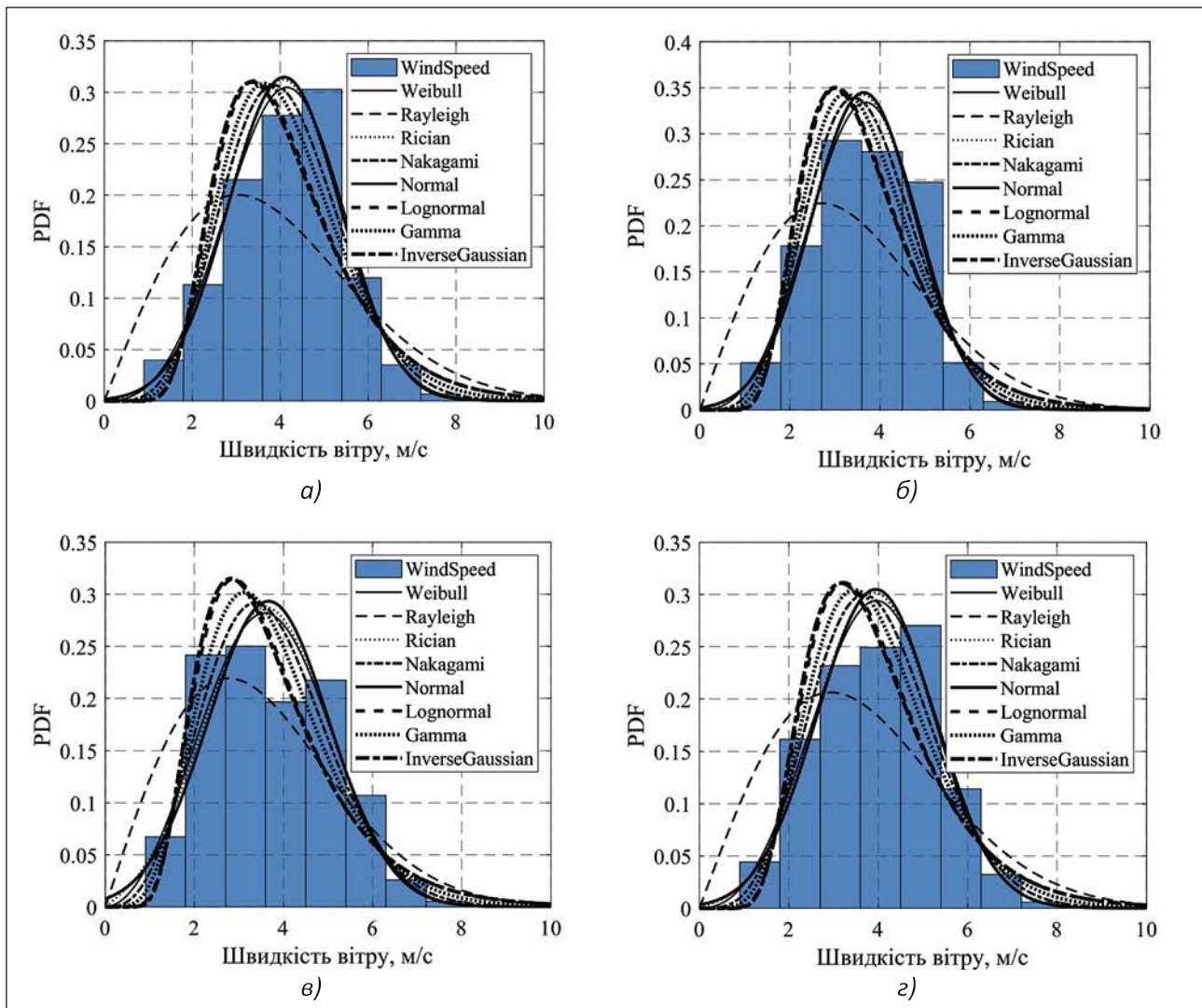


Рис. 6. Графіки емпіричного та теоретичних щільностей розподілу ймовірностей виникнення швидкостей вітру для інтервалу групування 0,9 м/с: а) західний майданчик з територією с/г; б) західний майданчик без території с/г; в) східний майданчик; г) загальна площа

При інтервалі 0,6 м/с (табл. 2) та $p = 0,05$ тест Пірсона виключив ідентичні шість моделей, які наведені для попередньої серії. Використання рівня значущості 0,01 привело до відхилення моделей гамма-розподілу для західного майданчику з територією с/г призначення, розподілу Райса та нормального розподілу для східного майданчику, логнормального розподілу та оберненого розподілу Гауса для загальної площі.

При інтервалі 0,9 м/с (табл. 3) та $p = 0,05$ перевірку критерієм не пройшли модель розподілу Релея для всіх чотирьох майданчиків, моделі логнормального розподілу та оберненого розподілу Гауса для західного майданчику в обох випадках та загальної площі, а також модель гамма-розподілу для західного майданчику із с/г територією. Застосування рівня значущості 0,01 привело до відхилення моделі гамма-розподілу для західного

майданчику без с/г територій та загальної площі, а для східного майданчику – моделей нормального розподілу та оберненого розподілу Гауса.

Отже, найгірші показники під час проходження тесту Пірсона продемонстрував розподіл Релея. Найнижчі значення критерія має розподіл Вейбулла незалежно від величини інтервалу та від досліджуваного майданчику. Окрім нього, для апроксимації емпіричного розподілу можуть бути застосовані розподіли Накагамі та Райса, а також нормальний розподіл. Особливо слід відзначити стабільність розподілу Накагамі. З огляду на те, що обчислені значення критерія для нього здебільшого перевищують значення, визначені для розподілу Райса та нормального розподілу на відповідних майданчиках, вони жодного разу не перевищили граничні значення та не привели до відхилення моделі. Аналогічну стійкість продемонстрував розподіл Вейбулла.

Таблиця 3

Результати перевірки відповідності емпіричного розподілу теоретичному із застосуванням критерію Пірсона при інтервалі групування 0,9 м/с

Вид розподілу	Західний майданчик з територією с/г	Західний майданчик без території с/г	Східний майданчик	Загальна площа
Вейбулл	0,39	0,47	13,31	0,47
Релей	29,66	24,32	13,24	22,56
Райс	0,51	0,54	1,58	0,62
Накагамі	1,61	0,84	0,98	0,79
Нормальний	0,44	0,54	1,86	0,67
Логнормальний	6,4	3,15	1,54	3,35
Гамма	3,4	1,66	0,98	1,66
Обернений Гаусса	7,15	3,56	1,76	3,8

Таблиця 4

Показники якості апроксимації емпіричного розподілу теоретичними при інтервалі групування 0,3 м/с

Вид розподілу	Західний майданчик з територією с/г		Західний майданчик без території с/г		Східний майданчик		Загальна площа	
	CV RMSE	R ²	CV RMSE	R ²	CV RMSE	R ²	CV RMSE	R ²
Вейбулл	6,97	0,8404	8,12	0,7604	8,16	0,6641	6,89	0,8247
Релей	13,37	0,412	13,31	0,3557	10,23	0,4729	11,59	0,5038
Райс	7,47	0,8162	8,47	0,7391	8,39	0,6455	11,59	0,5038
Накагамі	8,4	0,7681	8,95	0,7086	8,13	0,6671	7,26	0,8054
Нормальний	7,39	0,8208	8,46	0,7398	8,65	0,6229	7,27	0,8046
Логнормальний	10,91	0,6085	10,98	0,5617	8,82	0,6084	9,79	0,6462
Гамма	9,54	0,7004	9,82	0,6492	8,27	0,6555	8,64	0,7242
Обернений Гаусса	11,22	0,5862	11,18	0,5452	8,97	0,5944	10	0,6305

Таблиця 5

Показники якості апроксимації емпіричного розподілу теоретичними при інтервалі групування 0,6 м/с

Вид розподілу	Західний майданчик з територією с/г		Західний майданчик без території с/г		Східний майданчик		Загальна площа	
	CV RMSE	R ²	CV RMSE	R ²	CV RMSE	R ²	CV RMSE	R ²
Вейбулл	10,29	0,8337	10,46	0,791	10,86	0,7338	9,87	0,829
Релей	19,65	0,3931	18,87	0,3195	15,36	0,467	17,27	0,4766
Райс	11,19	0,8032	10,99	0,7693	11,09	0,7226	10,46	0,808
Накагамі	12,65	0,7485	11,76	0,7359	10,86	0,7337	11,31	0,7756
Нормальний	11,05	0,8082	10,95	0,7707	11,31	0,7112	10,44	0,8089
Логнормальний	16,32	0,5814	14,83	0,5796	12,44	0,6507	14,36	0,6382
Гамма	14,36	0,676	13,08	0,6732	11,29	0,7124	12,66	0,7187
Обернений Гаусса	16,77	0,5583	15,19	0,5591	12,81	0,6294	14,71	0,6205

Таблиця 6

Показники якості апроксимації емпіричного розподілу теоретичними при інтервалі групування 0,9 м/с

Вид розподілу	Західний майданчик з територією с/г		Західний майданчик без території с/г		Східний майданчик		Загальна площа	
	CV RMSE	R ²	CV RMSE	R ²	CV RMSE	R ²	CV RMSE	R ²
Вейбулл	14,06	0,7772	15,07	0,6763	11,85	0,7497	12,73	0,7881
Релей	24,19	0,3314	23,78	0,194	16,71	0,5018	20,82	0,4327
Райс	15,15	0,7378	15,82	0,6433	11,99	0,7434	13,4	0,7649
Накагамі	17,31	0,6575	17,59	0,559	12,72	0,7116	15,09	0,7021
Нормальний	14,19	0,746	15,63	0,6519	12,12	0,7381	13,24	0,7704
Логнормальний	22,27	0,4337	22,23	0,296	16,29	0,5265	19,59	0,4977
Гамма	19,63	0,56	19,72	0,446	14,17	0,642	17,16	0,6146
Обернений Гаусса	22,88	0,402	22,71	0,2651	16,87	0,4924	20,09	0,4719

На наступному етапі досліджень виконано оцінювання якості отриманих моделей з використанням коефіцієнта варіації середньоквадратичної похибки та коефіцієнта детермінації (табл. 4–6). Встановлено, що найгіршу точність під час моделювання емпіричних даних швидкості вітру має розподіл Релея. Кращі показники продемонстрували обернений розподіл Гаусса, логнормальний та гамма-розподіли, а також розподіл Накагамі.

Найбільш придатними до практичного застосування є розподіли Вейбулла й Райса, а також нормальний розподіл. При цьому слід відзначити, що два останніх показали приблизно однакову точність. Проте аналіз даних дав змогу визначити особливість, що під час збільшення інтервалу групування якість опису експериментальних даних нормальним розподілом підвищується. Так, для західного майданчику без с/г території при інтервалі 0,3 м/с варіація похибки та коефіцієнт детермінації були приблизно однаковими: $CV(RMSE) = 8,46\%$, $R^2 = 0,7398$ для нормального розподілу та $CV(RMSE) = 8,47\%$, $R^2 = 0,7391$ для розподілу Райса. Під час зміни інтервалу до значення 0,9 м/с показники якості отримали такі значення: $CV(RMSE) = 15,63\%$, $R^2 = 0,6519$ та $CV(RMSE) = 15,82\%$, $R^2 = 0,6433$ відповідно, тобто якість апроксимації даних нормальним розподілом підвищилась. У результаті лише під час моделювання вітрових умов східного майданчику кращу точність має розподіл Райса на всіх трьох досліджених інтервалах групування.

Здебільшого найвищу якість має модель на базі розподілу Вейбулла. Лише для східного майданчику при інтервалах 0,3 м/с та 0,6 м/с вищі показники точності продемонстрував розподіл Накагамі. Причому для інтервалу 0,6 м/с при рівних значеннях $CV(RMSE)$ і R^2 цей факт можна встановити шляхом порівняння величини критерія Пірсона для зазначених теоретичних розподілів.

Результати обчислювальних експериментів також дали змогу встановити особливість, що іноді застосування критерія Пірсона демонструє більшу узгодженість теоретичного розподілу з емпіричним для моделі, яка має гірші показники якості апроксимації порівняно з іншими. Так, під час математичного опису розподілу ймовірностей виникнення швидкостей вітру на західному майданчику без с/г території з використанням моделі Райса критерій Пірсона склав $\chi^2=2,46$ при значеннях $CV(RMSE) = 7,47\%$, $R^2 = 0,8162$, а під час застосування нормального розподілу – $\chi^2=2,58$ при значеннях $CV(RMSE) = 7,39\%$, $R^2 = 0,8202$.

Аналіз впливу інтервалу групування швидкостей вітру на якість отриманих статистичних моделей показав, що під час збільшення значення інтервалу точність апроксимації знижується. Також зазначимо, що розподіл моделей за якістю на трьох розглянутих інтервалах групування має відмінності для окремих майданчиків.

Висновки. У статті проведено дослідження ефективності застосування статистичних моделей на базі теоретичних розподілів під час апроксимації емпіричного розподілу ймовірності виникнення швидкості вітру певного значення в умовах мікрорайону Індустріальний м. Кривого Рогу. Дані про вітрові умови отримані шляхом вимірювання в місцях потенційного розміщення вітроенергетичних установок, на майданчиках з різним класом відкритості, що розташовані у безпосередній близькості до житлового масиву. Таке розміщення локальної вітроелектростанції дасть змогу реалізувати переваги глибокого вводу.

Отримані результати демонструють, що кращу точність апроксимації має розподіл Вейбулла. Нижчу якість показали розподіли Райса, Накагамі та нормальний розподіл, проте їх похибка (особливо при маленьких інтервалах групування) суттєво не відрізняється від розподілу Вейбулла. В одному випадку при інтервалі групування 0,3 м/с найвищу якість продемонстрував розподіл Накагамі. Придатними до застосування у задачах, що не вимагають високої точності, є логнормальний та гамма-розподіли, а також обернений розподіл Гаусса. Найгіршою виявилась модель на базі однопараметричного розподілу Релея, яка має найвищу варіацію похибки, найнижчий коефіцієнт детермінації, а також була відхилена під час перевірки критерієм Пірсона в усіх досліджених випадках.

Для оцінювання якості моделі доцільно виконувати розрахунок одного з двох критеріїв: або коефіцієнта варіації середньоквадратичної похибки, або коефіцієнта детермінації, тому що розрахунок обох одночасно є надлишковим, оскільки вони показують однаковий результат, а також проводити перевірку відповідності теоретичних розподілів емпіричному за допомогою критерія Пірсона. Це дасть змогу знизити обчислювальне навантаження під час вибору придатної до моделювання структури розподілу.

Подальші дослідження спрямовані на оцінювання ефективності застосування вітроенергетичних установок низької потужності у розглянутих вітрових умовах під час покриття потреб побутових споживачів.

Список літератури:

1. Харитонов В.П. Автономные ветроэнергетические установки. Москва : ГНУ ВИЭСХ, 2006. 280 с.
2. Modelling the variability of the wind energy resource on monthly and seasonal timescales / B. Alonzo, H.-K. Ringkjøb, B. Jourdir, P. Drobinski, R. Plougonven, P. Tankov. *Renewable Energy*. 2017. Vol. 113. P. 1434–1446.
3. Weibull Wind-Speed Distribution Parameters Derived from a Combination of Wind-Lidar and Tall-Mast Measurements Over Land, Coastal and Marine Sites. S.-E. Gryning, R.R. Floors, A. Pena, E. Batchvarova, B. Brummer. *Boundary-Layer Meteorology*. 2016. Vol. 159. P. 329–348.
4. Kidmo D.K., Danwe R., Doka S.Y., Djongyang N. Statistical analysis of wind speed distribution based on six Weibull Methods for wind power evaluation in Garoua, Cameroon. *Revue des Energies Renouvelables*. 2015. Vol. 18. No. 1. P. 105–125.
5. Sedghi M., Hannani S.K., Boroushaki M. Estimation of Weibull parameters for wind energy application in Iran's cities. *Wind and Structures*. 2015. Vol. 21. No. 2. P. 203–221.
6. Parajuli A. A Statistical Analysis of Wind Speed and Power Density Based on Weibull and Rayleigh Models of Jumla, Nepal. *Energy and Power Engineering*. 2016. Vol. 8. P. 271–282.
7. Pobocikova I., Sedliackova Z., Michalkova M. Application of four probability distributions for wind speed modeling. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 192. P. 713–718. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.123>.
8. Morgan E.C., Lackner M., Vogel R.M., Baise L.G. Probability distributions for offshore wind speeds. *Energy Conversion and Management*. 2011. Vol. 52. No 1. P. 15–26.
9. Drobinski P., Coulais C., Jourdir D. Surface Wind-Speed Statistics Modelling: Alternatives to the Weibull Distribution and Performance Evaluation. *Boundary-Layer Meteorology*. 2015. Vol. 157. No 1. P. 97–123.
10. Drobinski P., Coulais C. Is the Weibull distribution really suited for wind statistics modeling and wind power evaluation? URL: <https://arxiv.org/abs/1211.3853>.
11. Monahan A.H. Idealized models of the joint probability distribution of wind speeds. *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2018. Vol. 25. P. 335–353.
12. Kantar Y.M., Usta I., Yenilmez I., Arik I. A Study on Estimation of Wind Speed Distribution by Using the Modified Weibull Distribution. *International Journal of Informatics Technologies*. 2016. Vol. 9. No 2. P. 63–70.
13. Cakmakyapan S., Ozel G. The Poisson Gamma distribution for wind speed data. *AIP Conference Proceedings*. 2016. Vol. 1726.
14. Azad A.K., Rasul M.G., Yusaf T. Statistical Diagnosis of the Best Weibull Methods for Wind Power Assessment for Agricultural Applications. *Energies*. 2014. Vol. 7. P. 3056–3085.
15. Kang D., Ko K., Huh J. Comparative Study of Different Methods for Estimating Weibull Parameters: A Case Study on Jeju Island, South Korea. *Energies*. 2018. Vol. 11. P. 356.
16. Teyabeen A.A., Akkari F.R., Jwaid A.E. Comparison of Seven Numerical Methods For Estimating Weibull Parameters For Wind Energy Applications. *2017 UKSim-AMSS 19th International Conference on Computer Modelling & Simulation (UKSim)*. 2017. P. 173–178.
17. Мікспорайони м. Кривого Рогу / Google Maps. URL: <https://goo.gl/maps/4uCqGMAS782>.

СТРУКТУРНАЯ И ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ВЕТРА В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ

В статье рассмотрены вопросы построения статистических моделей ветровых условий микрорайона Индустриальный г. Кривого Рога по результатам измерений. Полученное математическое описание может быть применено для определения ожидаемого уровня выработки электроэнергии при размещении локальной ветроэлектростанции рядом с жилым массивом. Для проведения сравнительного анализа использовались широко апробированные распределения Вейбулла, Рэлея, Райса, Накагами, обратное распределение Гаусса, нормальное, логнормальное и гамма-распределения. Результаты исследований позволили установить, что для большинства зон измерения самую лучшую точность имеет распределение Вейбулла, самую худшую – распределение Рэлея. Статистические модели на базе распределений Райса, Накагами и нормального распределения также могут быть применены для описания ветровых условий микрорайона в задачах, не требующих высокой точности.

Ключевые слова: ветроэнергетический потенциал, скорость ветра, статистическая модель, плотность распределения вероятностей, аппроксимация, идентификация.

STRUCTURAL AND PARAMETRIC IDENTIFICATION OF THE WIND SPEED DISTRIBUTION STATISTICAL MODEL IN URBAN AREAS

The article presents the results of modeling the wind speed distribution in Industrial micro district area of Kryvyi Rih. Statistical models approximate measurement data. The resulting mathematical description can be used to determine the expected level of local wind power plant electricity generation. Weibull, Rayleigh, Rice,

Nakagami distributions, Gaussian inverse distribution, normal, lognormal and gamma distributions were used for comparative study. Probability density functions parameters were estimated using maximum likelihood method for three wind speed grouping intervals. Differences between empirical and theoretical distributions were determined by the Pearson's chi-squared test, the coefficient of variation of the mean square error CV(RMSE) and the coefficient of determination R^2 . The research results showed that the Weibull distribution has the best accuracy of wind speed data approximation. The worst one has the one-parameter Rayleigh distribution. Statistical models based on the Rice, Nakagami and normal distribution distributions can also be used to describe the wind speed distribution in tasks with low requirements.

Key words: *wind energy potential, wind speed, statistic model, probability density function, approximation, identification.*

Руденко Д.В.

Українська інженерно-педагогічна академія

Васюченко П.В.

Українська інженерно-педагогічна академія

МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ РОБОТИ СОНЯЧНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ БАТАРЕЙ

У статті досліджено метод моделювання та симуляції фотоелектричних сонячних батарей в середовищі моделювання MATLAB/Simulink/Simscape. Застосування методу дає змогу враховувати співвідношення характеристик в реальних панелях фотоелектричних перетворювачів та проводити визначення впливу різних значень сонячного випромінювання з урахуванням температурних режимів на продуктивність системи, визначення шляхів підвищення техніко-економічних показників функціонування сонячних електричних станцій. Запропоноване рішення може бути застосовано для побудови різних варіацій фотоелектричних панелей та визначення вихідних параметрів.

Ключові слова: сонячна енергетика, моделювання, техніко-економічні показники, фотовольтаніка, відновлювальні джерела електроенергії, фотовольтанічна електрична станція, MATLAB/SIMULINK.

Постановка проблеми. У світі потужність сонячних електричних станцій постійно збільшується. Перспективним напрямом збільшення енергетичної ефективності систем електропостачання, підвищення енергетичної незалежності є питання використання фотовольтанічної енергетики як в автономних системах електропостачання, так і під час роботи на системне навантаження. При цьому виробники та дистрибутори сонячних електричних станцій приводять загальні характеристики обладнання без урахування більш точного настроювання під конкретні потреби споживача. Широке застосування енергетичного обладнання відновлювальної енергетики викликає необхідність проведення широкого спектру наукових досліджень, моделювання процесів та комплексів електроенергетичних систем, що пов'язані з питанням оптимізації процесів за різними критеріями, регулювання режимів роботи обладнання, а також управління ними.

Як основний інструмент дослідження підібраних енергетичних систем, як правило, використовують методи математичного моделювання, в результаті якого виникає завдання створення математичної моделі, що враховує визначену кількість вихідних параметрів як у статистичних, так і в динамічних режимах роботи.

Основною проблемою, з якою стикаються науковці, розробники під час створення математичної моделі різних ступенів складності, потужності, є досить обмежений обсяг інформації, що надають виробники комплектуючих для сонячних електростанцій у специфікаціях на електроустаткування.

В наведеній роботі запропоновано метод моделювання об'єктів сонячної енергетики за рахунок використання середовища моделювання MATLAB/SIMULINK/SIMSCAPE, що дає змогу більш точно підійти до питання підбору обладнання з урахуванням особливостей поставленої задачі, зрештою, підвищити техніко-економічні показники функціонування сонячних електричних станцій ще на етапі проектування та підбору комплектуючих системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фотоелектричне перетворення сонячного випромінювання на цьому етапі розвитку техніки є однією з найбільш перспективних технологій виробництва електроенергії. Порівняно з іншими технологіями відновлювальної енергетики її конкурентними перевагами є доступність, досить великий термін експлуатації, відсутність механічних втрат, можливість створення генеруючих установок на широкий діапазон потужності з максимальним наближенням генеруючих потужностей до об'єктів споживання, екологічність, безшумність [1; 2].

Для визначення характеристик та проведення досліджень поведінки сонячних фотовольтанічних систем в різних режимах роботи пакет моделювання MATLAB/Simulink є потужним інструментом. Simscape, що є частиною середовища Simulink, має блок сонячних батарей, що спрощує процес побудови моделі та дає змогу вносити зміни в процес моделювання, з повною демонстрацією отриманих результатів [3; 4].

Середовище моделювання MATLAB/Simulink/Simscape пропонує опції готових блоків для імітації реальних фізичних процесів. Дослідники широко застосовують можливості Simscape для імітації та аналізу стабільності систем генерації електроенергії [4].

У роботі [5] автори стверджують, що визначальними технічними параметрами для оцінювання техніко-економічної ефективності сонячних панелей є номінальна потужність, розміри та термін служби. Такі технічні параметри, як напруга холостого ходу, струм короткого замикання, струм в точці максимальної потужності, слабо впливають на оцінювання економічної ефективності та є приблизно рівними для всіх типів сонячних панелей.

Моделювання на стадії проектування дає змогу враховувати параметри сонячних модулів та отримувати результати за вихідними параметрами вже на стадії проектування, проводити аналіз щодо визначення шляхів підвищення техніко-економічних показників роботи сонячних електричних станцій.

Постановка завдання. З огляду на актуальність запропонованого питання постало завдання розроблення моделі сонячної фотовольтаїчної батареї в середовищі MATLAB/SIMULINK/SIMSCAPE задля дослідження зв'язку електричних параметри фотоеlementів з рівнем освітленості, температурою середовища та геометричними розмірами поверхні, оцінювання техніко-економічних параметрів системи в різних режимах роботи та в заданому діапазоні потужностей з урахуванням теплових процесів.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Опис моделі фотоеlementу сонячної батареї.

Фотоеlement є основним елементом створення фотоелектричного модуля. Розширена бібліотека компонентів SimElectronics, що входить до складу бібліотеки Simscape середовища Matlab/Simulink,

містить блок Solar Cell (рис. 1), який моделює поведінку реального фотоеlementу.

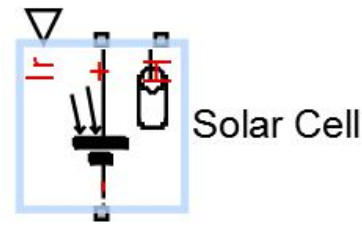


Рис. 1. Зображення блоку Solar Cell

Модель блоку Solar Cell подає фотоеlement як паралельну комбінацію джерела струму, двох експоненційних діодів та паралельного резистора R_p , які з'єднані послідовно з опором R_s (рис. 2).

Сила вихідного струму фотоеlementу I визначається за виразом:

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[e^{\frac{e(U+IR_s)}{N_1 k T}} - 1 \right] - I_{s2} \left[e^{\frac{e(U+IR_s)}{N_2 k T}} - 1 \right] - \frac{U + IR_s}{R_p}, \quad (1)$$

де $I_{ph} = I_{ph0} \cdot \frac{I_r}{I_{r0}}$ – сила фотоструму; I_r – освітленість (інтенсивність світла) фотоеlementу у Вт/м²; I_{ph0} – сила фотоструму, що генерується при освітленості I_{r0} ; I_{s1} , I_{s2} – струми насичення першого та другого діодів відповідно; k – стала Больцмана; T – температура фотоеlementу; e – елементарний заряд; N_1 , N_2 – коефіцієнти неідеальності вольт-амперних характеристик першого та другого діодів відповідно; U – напруга на фотоеlementі.

У блоці Solar Cell реалізовано можливість або врахування всіх параметрів виразу (1) (так звана 8-параметрична модель), або врахування тільки перших двох доданків виразу (1) (так звана 5-параметрична модель) за рахунок таких припущень:

- струм насичення другого діоду дорівнює нулю;

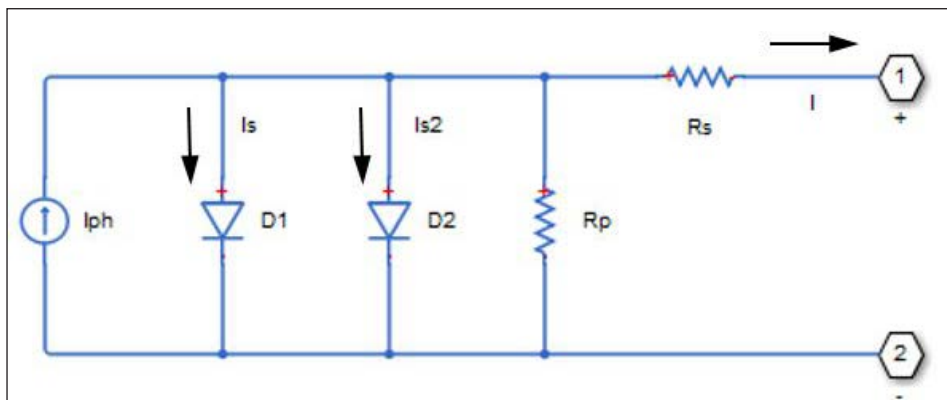


Рис. 2. Еквівалентна схема блоку Solar Cell

– опір паралельного резистора нескінченно великий.

В разі вибору 5-параметричної моделі можна або використовувати параметри рівняння (1) $\{I_{ph0}, I_{r0}, I_{s1}, N_1, R_s\}$, або задавати значення струму короткого замикання I_{sc} й напруги холостого ходу U_{oc} , які використовуються моделлю для розрахунку I_{ph0} та I_{s1} .

Сила фотоструму I_{ph} також визначається температурою фотоелементу. В моделі реалізовано таку залежність I_{ph} від T :

$$I_{ph}(T) = I_{ph} \cdot (1 + TIPH1 \cdot (T - T_{meas})), \quad (2)$$

де $TIPH1$ – температурний коефіцієнт першого порядку; T_{meas} – температура, за якої вимірювався I_{ph} .

В моделі реалізовано такі залежності між струмом насичення першого I_{s1} та другого I_{s2} діодів і температурою фотоелементу:

$$I_{s1}(T) = I_{s1} \cdot \left(\frac{T}{T_{meas}}\right)^{(TXIS1/N_1)} \cdot e^{\left(\frac{EG}{T_{meas}} - 1\right) \left(N_1 \cdot \frac{kT}{e}\right)}, \quad (3)$$

$$I_{s2}(T) = I_{s2} \cdot \left(\frac{T}{T_{meas}}\right)^{(TXIS2/N_2)} \cdot e^{\left(\frac{EG}{T_{meas}} - 1\right) \left(N_2 \cdot \frac{kT}{e}\right)}, \quad (4)$$

де $TXIS1$ – показник температури для I_{s1} ; $TXIS2$ – показник температури для I_{s2} .

Реалізовано також такі залежності опорів R_s і R_p від температури фотоелементу:

$$R_s(T) = R_s \cdot \left(\frac{T}{T_{meas}}\right)^{TRs1}; \quad (5)$$

$$R_p(T) = R_p \cdot \left(\frac{T}{T_{meas}}\right)^{TRp1}, \quad (6)$$

де $TRs1$ – показник температури для R_s ; $TRp1$ – показник температури для R_p .

Блок Solar Cell також має тепловий порт. Модель теплового порту, показана на рис. 3, є тільки термічною масою пристрою. Термічна маса безпосередньо пов'язана з компонентом теплового порту H . Внутрішній блок джерела ідеального теплового потоку забезпечує тепловий потік в порт і теплову масу. Цей тепловий потік є внутрішнім теплом. Внутрішнє тепловиділення у фотоелементі розраховується відповідно до еквівалентної принципової схеми, наведеної на рис. 2. Це є сумою втрат $i^2 \cdot R$ для кожного з резисторів, до якої додаються втрати в кожному з діодів.

З окремих фотоелементів можна будувати блоки, з'єднуючи їх послідовно, як зазначено на рис. 3, а з цих блоків можна будувати вже цілі панелі, як, наприклад, на рис. 4 показано будову панелі з 60 елементів.



Рис. 3. Модель теплового порту

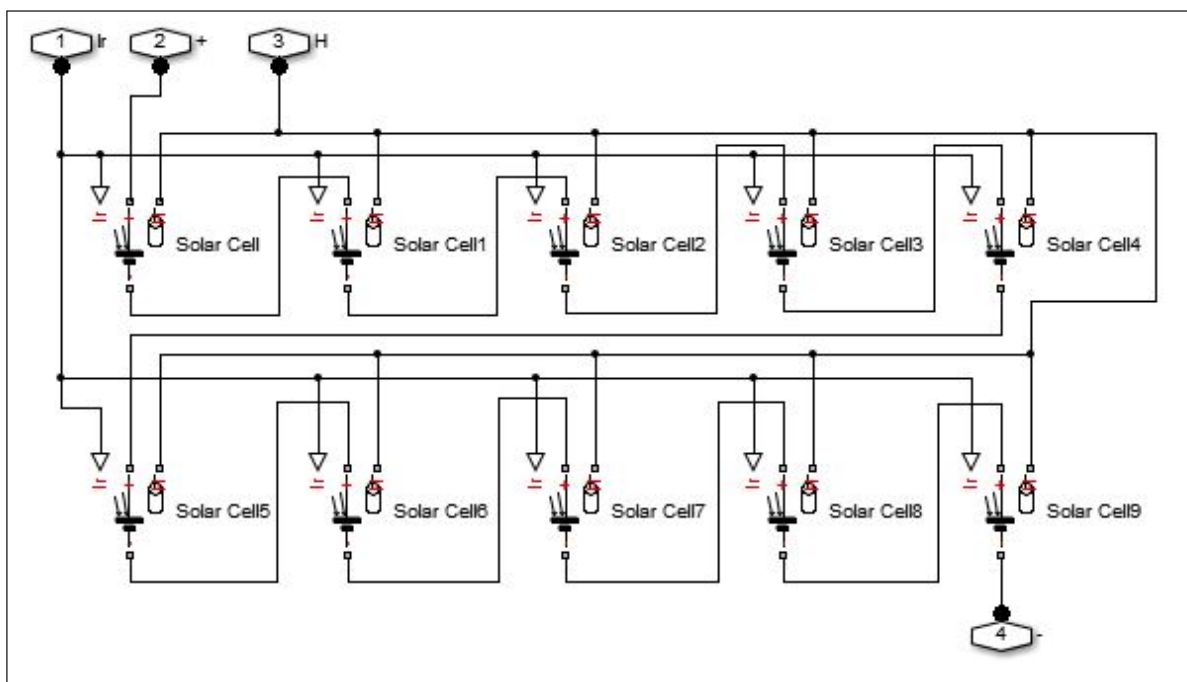


Рис. 4. Будова блоку Solar column з 10 елементів Solar Cell

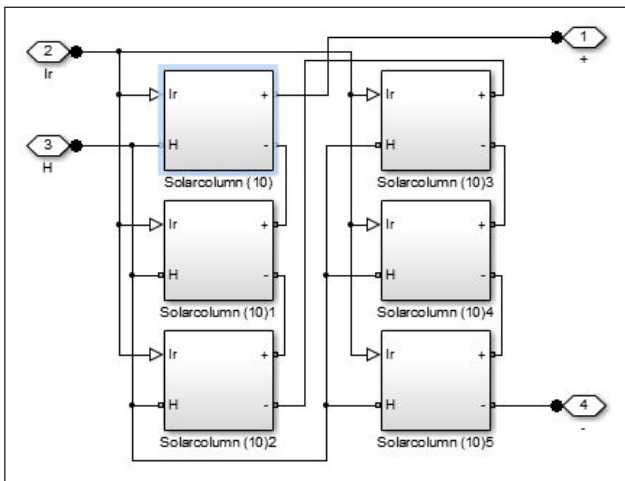


Рис. 5. Будова панелі Solar Panel з 6 блоків Solar column

Модель для побудови характеристик панелей сонячних елементів.

Для дослідження процесів в сонячній батареї та побудови її характеристик в середовищі Simscare створена модель (рис. 6).

Інтенсивність сонячного світла з блоку Irradiance подається на вхідний порт "Ir" блоку Solar panel, надходячи до кожного фотоелементу. Також вона поступає на вхід блоку Thermal model, де формується відповідний їй тепловий потік, що надходить на вхідний порт "H" блоку Solar panel.

Моделювання теплових процесів у фотоелементах відтворює блок Thermal model за схемою (рис. 7).

Інтенсивність сонячного світла послідовно помножується на площу панелі фотоелементів та на її альbedo. Таким чином розраховується тепло-

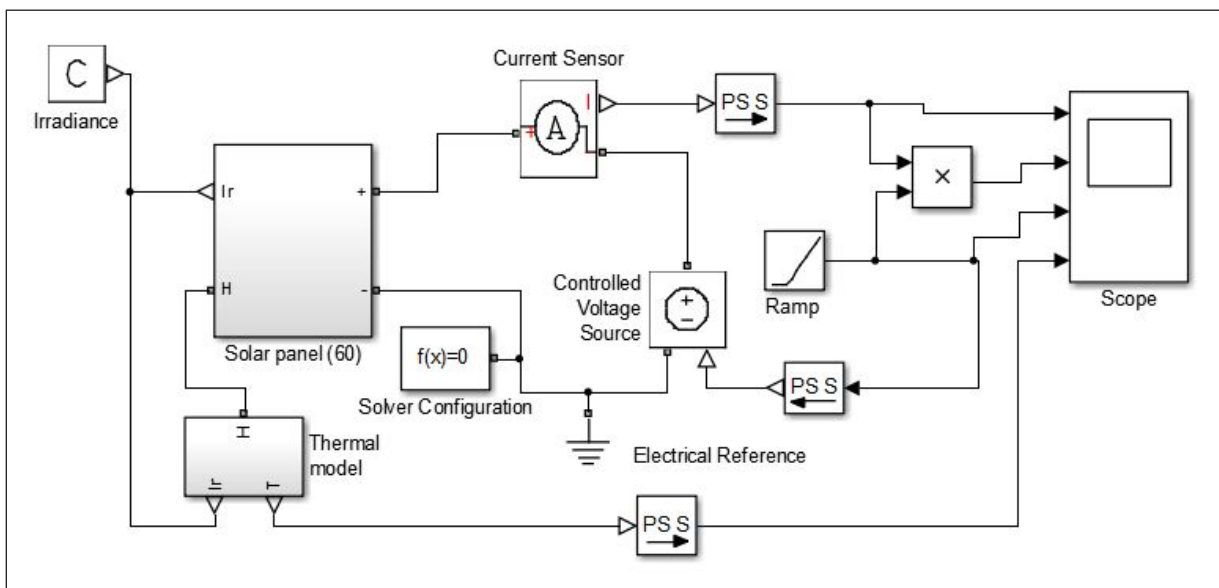


Рис. 6. Simscare-модель для дослідження панелі фотоелементів

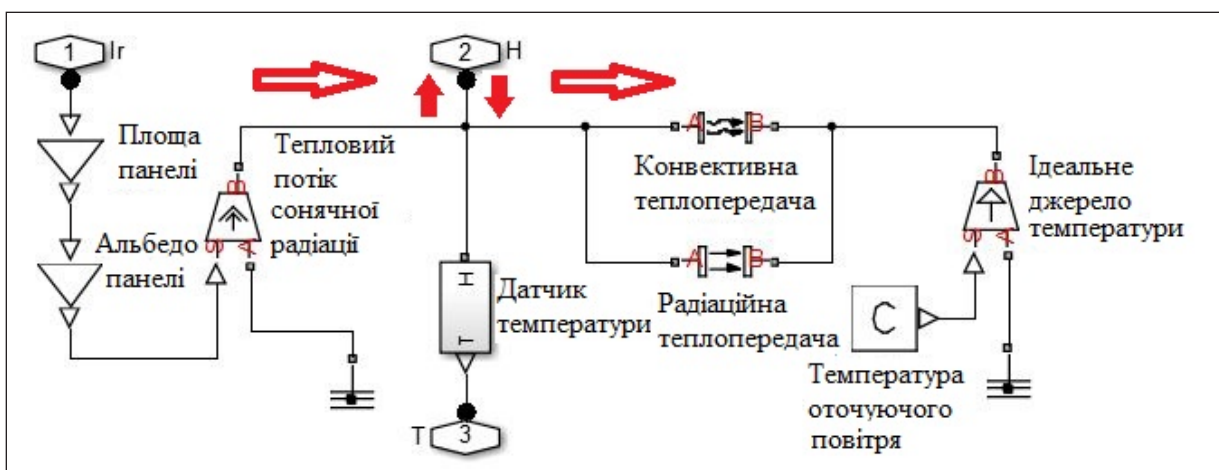


Рис. 7. Simscare-модель блоку Thermal model

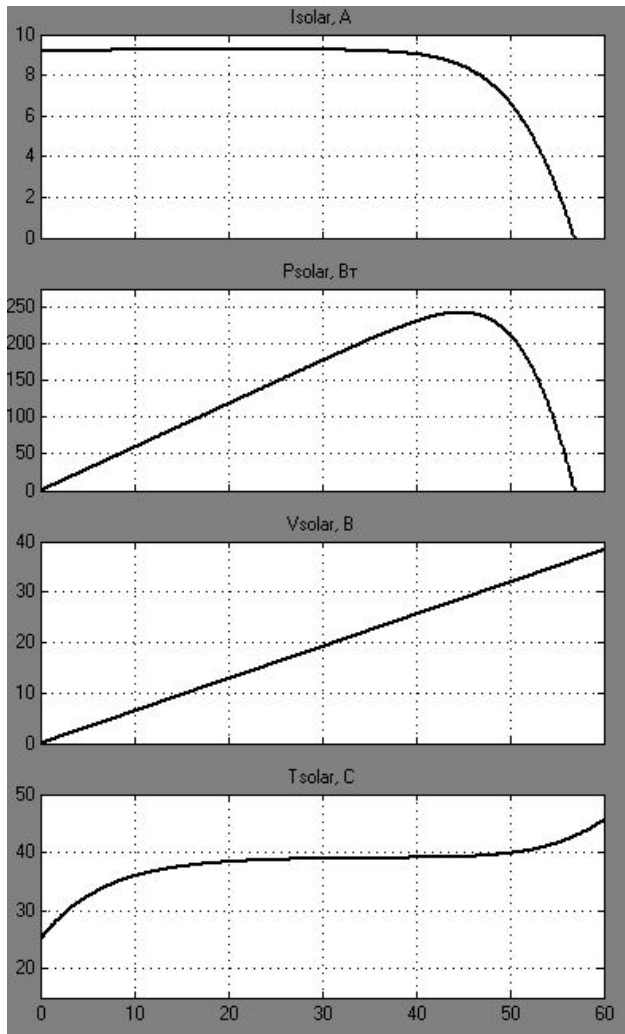


Рис. 8. Графіки результатів моделювання процесів роботи сонячних панелей в середовищі MATLAB/Simulink/Simscape

вий потік, що поступає на фотоелементи сонячної панелі й додається до внутрішнього тепла фотоелементів.

Температура фотоелементів вимірюється датчиком температури, показники якого подаються на вихідний порт "Т" блоку. Фотоелементи нагріваються й починають віддавати тепло навколишньому повітрю. Цей процес моделюється за рахунок блоків конвективної та радіаційної теплопередачі.

До електричних клем сонячної панелі підключене електричне коло, яке складається з амперметра Current Sensor та ідеального джерела напруги Controlled Voltage Source, керованого вхідним сигналом, що подається з блоку Ramp. Блок лінійної зміни сигналу Ramp формує сигнал у діапазоні від 0 до значення напруги холостого ходу сонячної панелі. Така схема дає змогу вимірювати вольт-амперні характеристики сонячної панелі та визна-

чати значення максимальної електричної потужності, генерованої панеллю.

Виміряне значення сили струму та сигнал з виходу блоку Ramp подаються на осцилограф Scope та блок множення сигналів, в якому розраховується значення електричної потужності сонячної панелі.

Перевірка роботи моделі відбувалася за відомими характеристиками полікристалічного фото модуля ABi-Solar P60270-D, які наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики фотомодуля ABi-Solar P60270-D

Тип комірки	Полікристал 156×156 мм
Кількість комірок	60 (6×10)
Розміри (Д×В×Ш)	1640×991×35 мм
Потужність MPPT (Pmax)	270 Вт
Струм короткого замикання (Isc)	9,15 А
Напруга холостого ходу (Voc)	38,3 В
Струм MPPT (Impp)	8,66 А
Напруга MPPT (Vmpp)	31,2 В

Результати моделювання показано на рис. 8 у вигляді графіків залежності струму, напруги, потужності, температури від інтервалу зміни часу.

З аналізу результатів моделювання можна зробити висновок, що використовувана Simscape-модель адекватно відтворює процеси, що відбуваються у фотоелектричних системах.

Широкі можливості з моделювання фізичних процесів, закладені в основу бібліотеки Simscape, дають змогу проводити всебічне дослідження ефективності роботи фотоелектричних систем.

Висновки. Розроблена фізична модель процесів роботи сонячних фотовольтагічних батарей у середовищі MATLAB/Simulink/Simscape дала змогу зв'язати електричні параметри фотоелементів з рівнем освітленості, температурою середовища та геометричними розмірами поверхні.

Впровадження результатів дослідження спрощує розрахунок параметрів на вході та виході фотоелектричних модулів для побудови сонячних станцій та оцінювання ефективності запропонованих рішень.

Результати моделювання дають змогу зробити висновок, що модель враховує основні фактори, що впливають на функціонування сонячної фотовольтагічної панелі та загалом адекватно відображає вихідні характеристики сонячного модуля.

Подальші дослідження необхідно спрямовувати на уточнення параметрів моделі задля наближення результатів моделювання до реальних експлуатаційних показників.

Список літератури:

1. Villalva M.G., Gazoli J.R., Filho E.R. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2009. Vol. 24. No. 5. May. P. 1198–1208.
2. Kumari J.S., Babu Ch.S. Mathematical Modelling and Simulation of Photovoltaic Cell Using MATLAB/Simulink Environment and PLECS Blockset. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2012. Vol. 2. No. 1. February. P. 26–34.
3. Salmi T., Bouzguenda M., Gastli A., Masmoudi A. MATLAB/Simulink Based Modelling of Solar Photovoltaic Cell. *International Journal Of Renewable Energy Research*. 2012. Vol. 2. No. 2. P. 213–218.
4. Дьяконов В.П. MATLAB R2006/2007/2008 + Simulink 5/6/7. Основы применения. 2-е изд., перераб. и доп. Библиотека профессионала. Москва : СОЛОН-Пресс, 2008. 800 с. ISBN 978-5-91359-042-8.
5. Мерганов А.М., Курбанов Ф.М. Математическая модель оценки экономической эффективности солнечных панелей. *Экономика и менеджмент инновационных технологий*. 2017. № 7. URL: <http://ekonomika.snauka.ru/2017/07/15167> (дата обращения: 08.02.2019).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РАБОТЫ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ БАТАРЕЙ

В статье исследован метод моделирования и симуляции фотоэлектрических солнечных батарей в среде моделирования MATLAB/Simulink/Simscape. Применение метода позволяет учитывать соотношение характеристик в реальных панелях фотоэлектрических преобразователей и проводить определение влияния различных значений солнечного излучения с учетом температурных режимов на производительность системы, определение путей повышения технико-экономических показателей функционирования солнечных электрических станций. Предложенное решение может быть применено для построения различных вариаций фотоэлектрических панелей и определения исходных параметров.

Ключевые слова: солнечная энергетика, моделирование, технико-экономические показатели, фотовольтаманика, возобновляемые источники электроэнергии, фотовольтаманическая электрическая станция, MATLAB/SIMULINK.

MODELING OF PHYSICAL PROCESSES OF THE SOLAR PHOTOVOLTAIC

The article investigates the method of modeling and simulation of photovoltaic solar cells in the simulation environment MATLAB/Simulink/Simscape. Application of the method allows to take into account the ratio of characteristics in the real panels of photovoltaic converters and to determine the effect of different values of solar radiation, taking into account the temperature conditions on the performance of the system, to determine ways to improve the technical and economic performance of solar power plants. The proposed solution can be used to construct different variations of photovoltaic panels and determine the initial parameters.

Key words: solar energy, simulation, technical and economic indicators, fotovoltaica, vanvalin energy sources, photovoltaics power plant, MATLAB/SIMULINK.

Шелешей Т.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

РОЗРОБКА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ СТОСОВНО ПОНИЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ДИМОВИХ ГАЗІВ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ВПЛИВУ НА НИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ І РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ

Нагальним є пошук шляхів підвищення надійності та економічності діючих ТЕЦ шляхом вдосконалення процесів спалювання газу, зниження теплових викидів у навколишнє середовище, витрат електроенергії на власні потреби. Встановлено, що одним з основних факторів, які впливають на оптимальну температуру димових газів, є температура живильної води. Найбільш адекватною до експлуатаційних умов є квадратична залежність. У процесі дослідження даних графіків встановлено, що температура відхідних газів зростає з ростом температури живильної води. Зниження температури відхідних газів і корисне використання їх тепла у циклі ТЕС дає змогу підвищити ККД котла і всієї станції загалом. Переваги з екологічної точки зору є такими: зниження температури відхідних газів призводить до зниження викидів оксидів азоту і оксидів вуглецю.

Ключові слова: котел, змінний режим експлуатації, температура відхідних газів, електрична потужність, теплове навантаження, температура та витрата живильної води.

Постановка проблеми. Електроенергетична галузь є одною із важливих складових частин паливно-енергетичного комплексу (ПЕК) України. Показником, що об'єктивно характеризує роботу галузі, є її здатність надійно і безперебійно забезпечувати електричною і тепловою енергією як населення, так і промисловість у необхідних об'ємах і відповідній якості [1]. Стан електроенергетики на сучасному його етапі є критичним. Нині в Україні особливо актуальною задачею є вирішення проблеми надійної та економічної роботи обладнання теплових електростанцій (ТЕС), яке фізично й морально застаріло та потребує модернізації, реконструкції чи повної заміни [2; 3]. У зв'язку з цим нагальним є пошук шляхів підвищення надійності та економічності наявних ТЕЦ шляхом вдосконалення процесів спалювання газу, зниження теплових викидів у довкілля, витрат електроенергії на власні потреби. Одним з ефективних методів маловитратної модернізації котлів та ТЕС загалом із метою підвищення їх економічності є зниження температури димових газів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Утилізація теплових вторинних енергоресурсів, до яких, передусім, варто зарахувати тепло димових газів котлів, є найбільш окупним технічним рішенням. До таких технологічних процесів зараховують глибоку утилізацію теплоти із застосування теплообмінних апаратів у системах регенерації ТЕС, використання парогазових установок тощо. Всі ці заходи дають змогу підвищити кое-

фіцієнт використання палива, зменшити шкідливі викиди, збільшення теплопродуктивності котла, підвищення ККД котла, зменшення перепадів температур газів і повітря, збільшення потужності турбіни на 5–8% [4]. Утилізація теплоти димових газів котлів шляхом установки теплообмінників у конвективній шахті для нагріву води на власні потреби та теплопостачання або підвищення електричної потужності енергоблоків за технологією «Блоки підвищеної ефективності» – БПЕ [5].

Технологія «БПЕ» реалізується встановленням у тракці димових газів котлів спеціальних теплообмінників (турбінного економайзера – ТуЕ), які включаються в байпаси системи регенерації турбін [6]. При цьому подача живильної води чи конденсату в котельний економайзер (ЕКО) здійснюється двома потоками: основним і байпасним, що відводиться з тракту живильної води перед регенеративними підігрівачами та поступає в турбінний економайзер. У ньому вода нагрівається завдяки відбору тепла від димових газів і подається в ЕКО в суміш з основним потоком (рис. 1).

Постановка завдання. Проведений аналіз літературних джерел спонукає сформулювати основні завдання статті: визначити залежності температури димових газів від температури блочного типу та з поперечними зв'язками; встановити регресійно-кореляційну залежність температури димових газів від параметрів живильної води, палива та навантажень блоку; обґрунтувати рекомендації щодо пониження температури димових газів.

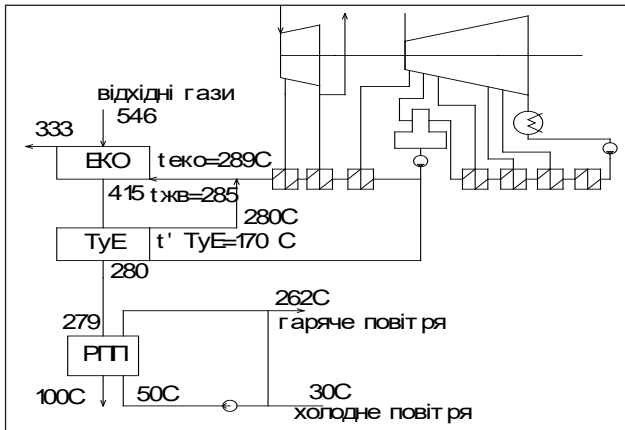


Рис. 1. Принципова схема включення турбінного економайзера в теплову схему турбіни [7]

Виклад основного матеріалу дослідження. У статті наведено низку досліджень щодо визначення оптимальних температур живильної води і відхідних газів у стаціонарних режимах, який показує, що цим питанням приділяється досить велика увага і їх варто вважати доволі актуальними. Але дані з визначення домінуючої складової частини впливу експлуатаційних та режимних параметрів роботи ТЕС при змінних навантаженнях на температуру відхідних газів газомазутних та пилувугільних котлів ТЕС відсутні. Дані для розрахунку були надані Київською ТЕЦ-5 за 2012–2013 рр. (енергоблок із турбіною Т-250-240 та котлом ТГМП-314А (станційний № 3, 4) та блок із турбіною Т-100-130 і котлоагрегатом ТГМ 96А (станційний № 1)), Трипільською ТЕС за 2016 р. (блок із турбіною К-300-240 і котлом ТПП-210А (станційний № 1-4)). Розрахунки проводились за допомогою математичного методу планування експерименту, що дає змогу отримувати математичну модель процесу [8].

У результаті проведених розрахунків отримано функціональні залежності режимів роботи (навантажень при виробітку електроенергії та теплоти, температури та витрати живильної води) та $t_{\text{відх}}$ для котлоагрегату ТГМП-314А:

$$\frac{t_{\text{відх}}}{t_{\text{відх}0}} = -985,61 - 0,005 \cdot \frac{D}{D_0} + 8,09 \cdot \frac{t_{\text{жив}}}{t_{\text{жив}0}} - 0,048 \cdot \frac{Q}{Q_{\text{ном}}} + 2,03 \cdot \frac{N_c}{N_{c\text{ном}}} - 6,42 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{D}{D_0}\right)^2 - 0,0174 \cdot \left(\frac{t_{\text{жив}}}{t_{\text{жив}0}}\right)^2 - 0,00025 \cdot \left(\frac{Q}{Q_{\text{ном}}}\right)^2 - 0,006 \cdot \left(\frac{N_c}{N_{c\text{ном}}}\right)^2 + 6,42 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{D}{D_0} \cdot \frac{t_{\text{жив}}}{t_{\text{жив}0}} \cdot \frac{Q}{Q_{\text{ном}}} \cdot \frac{N_c}{N_{c\text{ном}}}, \quad (1)$$

Аналіз показників котлів типу ТГМП-314А Київської ТЕЦ-5 дав змогу встановити ступінь впливу режимів роботи на $t_{\text{відх}}$. Перевірка адекватності отриманих рівнянь використаним даним – за критерієм R. Розрахункові значення критерію становить $R=0,956$.

У процесі встановлення залежностей експлуатаційних режимів роботи (навантажень при виробітку електроенергії та теплоти, температури та витрати живильної води) та $t_{\text{відх}}$ для котлоагрегату ТГМ-96А отримано таке рівняння:

бітку електроенергії та теплоти, температури та витрати живильної води) та $t_{\text{відх}}$ для котлоагрегату ТГМ-96А отримано таке рівняння:

$$\frac{t_{\text{відх}}}{t_{\text{відх}0}} = 200,92 - 0,028 \cdot \frac{D_{\text{жв}}}{D_{\text{жв}0}} + 1,0243 \cdot \frac{t_{\text{жив}}}{t_{\text{жив}0}} + 0,0607 \cdot \frac{Q}{Q_0} + 0,5049 \cdot \frac{N_c}{N_{c0}} + 9,63 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{D_{\text{жв}}}{D_{\text{жв}0}}\right)^2 + 0,00193 \cdot \left(\frac{t_{\text{жив}}}{t_{\text{жив}0}}\right)^2 + 0,00026 \cdot \left(\frac{Q}{Q_0}\right)^2 - 0,00103 \cdot \left(\frac{N_c}{N_{c0}}\right)^2 - 1,4 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{D_{\text{жв}}}{D_{\text{жв}0}} \cdot \frac{t_{\text{жив}}}{t_{\text{жив}0}} \cdot \frac{Q}{Q_0} \cdot \frac{N_c}{N_{c0}}, \quad (2)$$

Отримані результати розрахункового дослідження свідчать про те, що найбільший вплив на температуру відхідних газів має температура живильної води (в усьому інтервалі зміни режимних параметрів С при збільшенні температури живильної води на 10°C температура відхідних газів зростає в середньому на 5°C). Наступним чинником впливу на температуру відхідних газів є електричне навантаження. Найменший вплив дає витрата живильної води (температура відхідних газів зростає приблизно на 1,5°C при збільшенні витрати живильної води на 10 т/год), а також теплове навантаження блоку (при збільшенні теплового навантаження на 10 МВт температура відхідних газів зростає приблизно на 1°C).

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що найбільший вплив на температуру відхідних газів має температура живильної води. На рис. 2 наведено залежність (на основі добових відомостей режиму) температури відхідних газів від температури живильної води при значеннях електричної та теплової потужності для котлоагрегату ТГМП-314А.

Як видно з рис. 2, температура відхідних газів зростає на 6°C при зміні температури живильної води на 10°C у всьому діапазоні зміни електричної потужності.

У цій роботі проводився також порівняльний аналіз зміни температури відхідних газів при зміні параметрів живильної води для енергоблоку з турбіною Т-100-130 та котлом ТГМ-96А. Відповідні результати досліджень для температури та витрати живильної води наведено на рис. 3.

Одержані дані свідчать, що спостерігаються аналогічні тенденції в зростанні температури відхідних газів як для блоку з турбіною 250 МВт, так і для блоку 100 МВт. Це зростання становить 7°C для навантаження до «економічного» і 10°C для електричного навантаження від «економічного» до «номінального» при зростанні температури живильної води на 10°C.

Аналіз результатів залежності температури відхідних газів від різних факторів для котлів ТП-15 і ТП-170 Дарницької ТЕЦ свідчить, що температура відхідних газів зростає на 7,7°C на кожні 10°C зростання температури живильної води і на 2,28°C на кожні 10°C зростання витрати живильної води. Інші фактори впливу на температуру відхідних газів не мають.

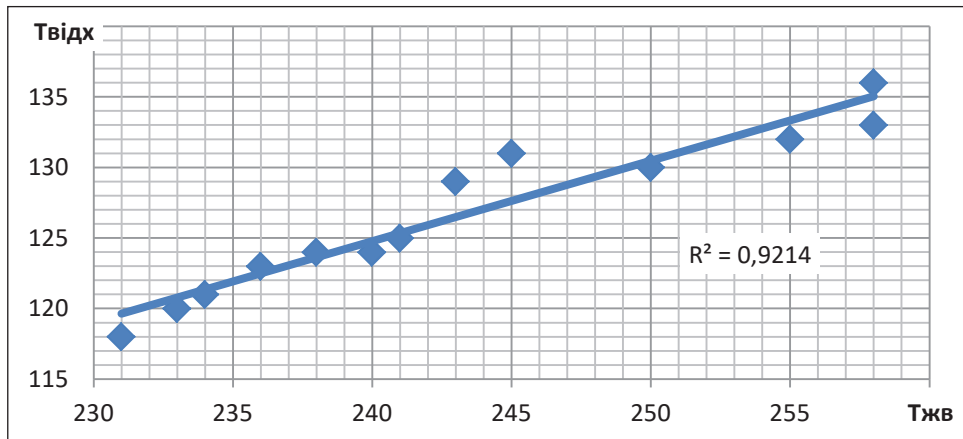


Рис. 2. Залежність температури відхідних газів від температури живильної води для значень електричної потужності $N_E=(165-250)$ МВт, $D_{жв}=(570-950)$ т/год, $Q_t=(140-376)$ МВт

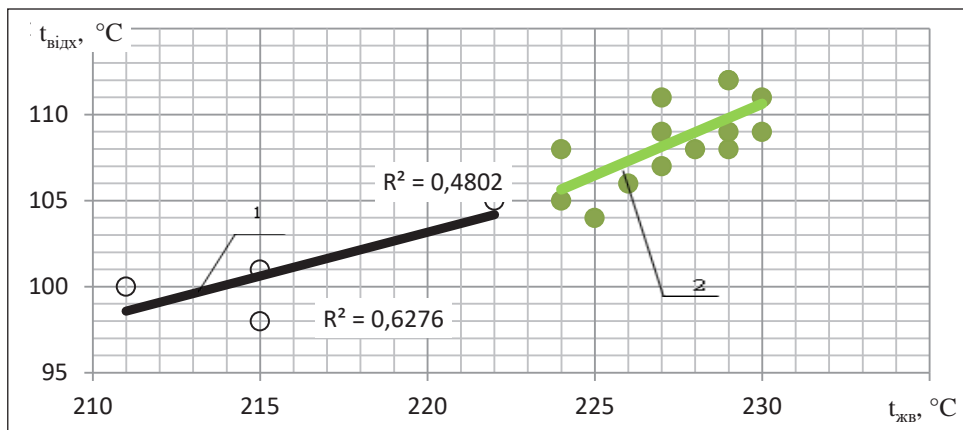


Рис. 3. Залежність температури відхідних газів від температури живильної води для значень електричної потужності: 1 – $N_E=(65-80)$ МВт, $D_{жв}=(290-294)$ т/год, $Q_t=(304-373)$ МВт 2 – $N_E=(80-100)$ МВт

Дослідження проводилися не тільки для тепло-електроцентралей, а й для станцій, призначених для виробництва електроенергії. На графіках 4 показані залежності температури відхідних газів від температури живильної води при постійних витратах живильної води, електричного і теплового навантаження (станційні номери № 1–4).

З рисунків 3.25–3.26 видно, що при $N_E=(100-240)$ МВт, $Q_t=(70-100)$ МВт температура відхідних газів постійно зростає в середньому на 2°C , коли температура живильної води зростає на 10°C і при $N_E=(240-300)$ МВт, $Q_t=(70-100)$ МВт температура відхідних газів є постійною і становить 159°C .

Зниження температури відхідних газів і корисне використання їх тепла у циклі ТЕС дає змогу підвищити ККД котла і всієї станції загалом [9; 10].

Розрахунковий ККД котельного агрегату зворотного теплового балансу визначається по наступній формулі:

$$\eta_{ка} = 100 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6, \% \quad (3)$$

де, q_2 – втрати тепла з відхідними газами, %; q_3 – втрати тепла з хімічним недопалом, %; q_4 – втрати тепла з механічним недопалом, %; q_5 – втрати тепла в навколишнє середовище, %; q_6 – втрати тепла з шлаком і летючої золою, %.

Втрати q_2 , %, визначаються, насамперед, температурою відхідних газів котла $t_{відх}$, $^\circ\text{C}$. Як вже встановлено, величина $t_{відх}$ залежить від багатьох чинників (виду палива, компонування поверхонь нагріву котла, ступінь їх забруднення тощо) та її вибір є техніко-економічним завданням. Розглянемо вплив $t_{відх}$ на ККД котла та екологічні показники для блоків Т-250-240, Т-100-130 при спалюванні природного газу і для К-300-240 при спалюванні кам'яного вугілля.

Підвищення ККД котла типу ТГМП-314А без зниження надійності поверхонь нагріву конвективної шахти при спалюванні природ-

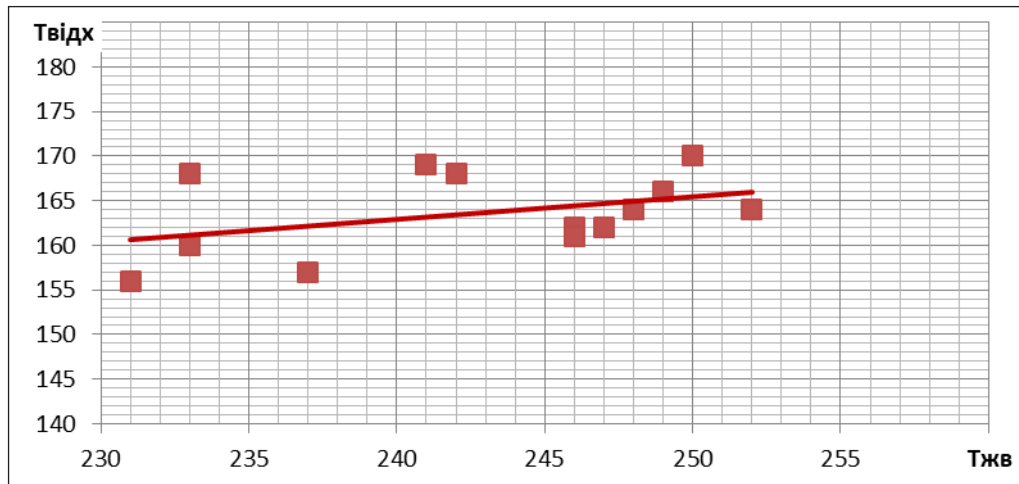


Рис. 4. Залежність температури відхідних газів від температури живильної води для котла ТПП-210А (ст. № 1) $N_e=(100-240)$ МВт, $Q_r=(3-15)$ МВт

ного газу може становити до 0,7%. При цьому питомі витрати умовного палива зменшаться на 1,61 г.у.п/кВт·год. Переваги з екологічної точки зору є такими: зниження температури відхідних газів призводить до зниження викидів оксидів азоту на 250 г/ГДж і зниження оксидів вуглецю на 52 г/ГДж. Щодо котла ТГМ-96А то зниження температури відхідних газів до безпечної для надійності газовідвідних трактів котла, це призведе до підвищення ККД котла на 0,14% (економія умовного палива 0,32 г.у.п/кВт·год). Зниження викидів оксидів азоту і вуглецю становить 40г/ГДж і 10г/ГДж відповідно. Приріст ККД для котла ТПП-210 А при спалюванні кам'яного вугілля без зниження надійності становить 0,6%. Зменшення емісій оксидів сірки, азоту і вуглецю становлять 720г/ГДж, 220г/ГДж і 110 г/ГДж відповідно.

В результаті математичних розрахунків встановлено, що температура відхідних газів – багатofакторна залежність режимних та експлуатаційних показників, а саме температури та витрати живильної води, електричне та теплове навантаження блоку. У зв'язку з цим проведено розрахунків енергоблоків Т-110-130 і Т-250-240 Київської ТЕЦ-5 і К-300-240 ТпТЕС за методикою, запропонованою Новосибірським державним технічним університетом [11]. Результати розрахунків енергоблоків на базі турбін Т-100-130, Т-250-240, К-300-240 зведені в таблиці 1.

При підвищенні ефективності теплофікаційного енергоблоку на базі турбіни Т-110/120-130 шляхом утилізації теплоти димових газів зі зниженням їх температури зі 110°C до 106°C можна знизити температуру живильної води до 218°C (замість 232°C), підвищити ККД котла

до -91,5% (замість 90%), знизити частку регенеративного відбору до -0,295 (замість 0,31), при цьому збільшити конденсаційну вироблення на -620 кВт і заощадити паливо в ЕС на -300 т/рік.

Висновки. Проведено дослідження впливу експлуатаційних (температура та витрата живильної води) і режимних (теплова та електрична потужність енергоблоку) на температуру димових газів для газомазутних блоків Київської ТЕЦ-5 (блоки Т-250/300-240 і Т-100/110-130). Температура відхідних газів зростає на 6°C при зміні температури живильної води на 10°C у всьому діапазоні зміни електричної потужності. Підвищення ККД котла типу ТГМП-314А без зниження надійності поверхонь нагріву конвективної шахти у процесі спалювання природного газу може становити до 0,7%. При цьому питомі витрати умовного палива зменшаться на 1,61 г.у.п/кВт·год. Переваги з екологічної точки зору є такими: зниження температури відхідних газів призводить до зниження викидів оксидів азоту на 250 г/ГДж і зниження оксидів вуглецю на 52 г/ГДж. Щодо котла ТГМ-96А то зниження температури відхідних газів до безпечної для надійності газовідвідних трактів котла, то це призведе до підвищення ККД котла на 0,14% (економія умовного палива 0,32 г.у.п/кВт·год). Зниження викидів оксидів азоту і вуглецю становить 40г/ГДж і 10г/ГДж відповідно. Приріст ККД для котла ТПП-210А під час спалювання кам'яного вугілля без зниження надійності (за таблицею 2.2) становить 0,6%. Зменшення емісій оксидів сірки, азоту і вуглецю становлять 720г/ГДж, 220г/ГДж і 110 г/ГДж відповідно.

Результати розрахунків енергоблоків на базі турбін Т-100-130, Т-250-240, К-300-240

№ п/п	Назва величини	Од. виміру	Величина		
			Т-100-130	Т-250-240	К-300-240
1. Розрахунок підвищення вироблення електроенергії					
1.	Частка пари, що відбирається на регенерацію базового енергоблоку		0,31	0,328	0,266
2.	Частка пара, що відбирається на регенерацію БПЕ		0,298	0,310	0,24
3.	Потужність на клеммах генератора базового енергоблоку	кВт	107557	249782	300000
4.	Потужність на клеммах генератора БПЕ	кВт	108028	253004,6	303356,47
5.	Додаткова потужність на клеммах генератора БПЕ	кВт	471	3222,6	3356,47
2. Зниження витрати палива при зниженні пропуску пара					
6.	ККД котла базового енергоблоку		0,914	0,92	0,86
7.	ККД котла БПЕ		0,921	0,93	0,873
8.	Економія палива при зниженні пропуску пара	кг/с	0,144	0,3	0,395
3. Оцінка ефекту від витіснення в енергосистемі пікової резервної потужності					
9.	Витрата теплоти турбіною	кВт	341145	634495	445095,5
10.	ККД турбогенераторної установки з виробництва електроенергії		0,427	0,458	0,44
4. Обмеження на підвищення ефективності по температурі димових газів					
11.	Температура димових газів БПЕ	°С	106	125	153

Список літератури:

- Інноваційні пріоритети паливно-енергетичного комплексу України / заг. ред. А.К. Шидловський. Київ : Українські енциклопедичні знання, 2005. 512 с.
- He J., Zhang W. Techno-economic evaluation of thermo-chemical biomaffi-io-ethanol. *Appl. Energy*. 2011. № 4 (88). P. 1224–1232.
- Вольчин І.А., Дунаєвська Н.І., Гапонич Л.С. та ін. Перспективи впровадження чистих вугільних технологій в енергетику України. Київ : ГНОЗІС. 2013. С. 28.
- Медведев В.А., Липец А.У., Пономарева Н.В. и др. Эффективность комплексной модернизации хвостовой части действующих пылеугольных котлов. *Теплоэнергетика*. 1999. № 8. С. 43–47.
- Андерсон К.Э., Бродов Ю.М., Плотников П.Н. и др. Анализ показателей надежности вспомогательного оборудования энергоблоков. *Теплоэнергетика*. 2011. № 8. С. 2–7.
- Овчар В.Г., Гордеев В.В., Сотников И.А., Липец А.У. Опыт заводских разработок энергоблоков повышенной эффективности. *Теплоэнергетика*. 1999. № 9. С. 2–5
- Коваленко П.Ю. Оптимизация энергоблоков повышенной эффективности на основе турбин Т-100-130. *Энергосистемы, электростанции и их агрегаты* : Сборник научных трудов НГТУ. Вып. 8. Новосибирск : Изд-во НГТУ. 2004. С. 62–79.
- Коваленко П.Ю., Шинников П.А. Повышение эффективности угольных энергоблоков ТЭЦ (методика оценки). *Теплоэнергетические агрегаты и системы*. Сборник научных трудов НГТУ. Выпуск 7, Новосибирск : Изд-во НГТУ 2003. С. 27–36.
- Шинников П.А., Коваленко П.Ю., Зыкова Н.Г. О повышении эффективности энергоблоков ТЭС. *Энергосистемы, электростанции и их агрегаты* : Сборник научных трудов. Выпуск 8. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2004. С. 28–35.
- Шинников П.А., Ноздренко Г.В., Ловцов А.А. Эффективность реконструкции пылеугольных паротурбинных ТЭЦ в парогазовые путем газотурбинной надстройки и исследование показателей их функционирования. Новосибирск : Наука, 2002. 97 с.
- Шинников П.А., Серант Ф.А., Коваленко П.Ю. и др. Повышение эффективности энергоблоков ТЭЦ. *Ползуновский вестник №1*. Барнаул : Изд-во АлтГТУ им. Ползунова, 2004. С. 210–215.
- Шелешей Т.В. Взаємозв'язок температури відхідних газів і техніко-економічних та екологічних показників ТЕЦ. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія : Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2018. № 11(1287). С. 32–35.

РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ПониЖЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ВЛИЯНИЯ НА НИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Актуальным является поиск путей повышения надежности и экономичности действующих ТЭЦ путем совершенствования процессов сжигания газа, снижение тепловых выбросов в окружающую среду, расходов электроэнергии на собственные нужды. Установлено, что одним из основных факторов, влияющих на оптимальную температуру дымовых газов, является температура питательной воды. Наиболее адекватным эксплуатационным условием является квадратичная зависимость. При исследовании данных графиков установлено, что температура отходящих газов возрастает с ростом температуры питательной воды. Снижение температуры уходящих газов и полезное использование их тепла в цикле ТЭС позволяет повысить КПД котла и всей станции в целом. Преимуществом, с экологической точки зрения, является то, что снижение температуры уходящих газов приводит к снижению выбросов оксидов азота и оксидов углерода.

Ключевые слова: котел, сменный режим эксплуатации, температура отходящих газов, электрическая мощность, тепловая нагрузка, температура и расход питательной воды.

DEVELOPMENT OF TECHNICAL SOLUTIONS ON THE REDUCTION OF THE DEMOGRAPHIC GAS TEMPERATURE ON INVESTIGATION ON THEIR OPERATIONAL AND REGULATORY PARAMETERS

The urgent task is to find ways to improve the reliability and efficiency of existing CHP plants by improving the combustion processes, reducing thermal emissions into the environment, and consuming electricity for own needs. It is established that one of the main factors influencing the optimum temperature of flue gases is the temperature of the feed water. Quadratic dependence is the most adequate to the operating conditions. In the study of these graphs it was found that the temperature of the waste gases increases with the increase in the temperature of the feed water. Reducing the temperature of the waste gases and the useful use of their heat in the cycle of TES, can increase the efficiency of the boiler and the entire station as a whole. Ecological advantages are as follows: lowering the temperature of the waste gases leads to a reduction in emissions of nitrogen oxides and carbon monoxide.

Key words: boiler, variable operating mode, temperature of exhaust gases, electric power, thermal load, temperature and consumption of feed water.

РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 622.271.324

Слободянюк В.К.

Криворізький національний університет

АНАЛІЗ І ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ ПЕРЕВАНТАЖУВАЛЬНИХ ПУНКТІВ АВТОМОБІЛЬНО-ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

У статті здійснено аналіз основних проблем комбінованого транспорту глибоких кар'єрів та конструкцій перевантажувальних пунктів. Застосування на перевантажувальних пунктах прямих механічних лопат ускладнює схему руху кар'єрних автосамоскидів, збільшує висоту підйому і дальність транспортування гірничої маси автосамоскидами. Метою статті є розроблення та обґрунтування конструкції екскаваторного перевантажувального пункту, що має більш високі експлуатаційні характеристики, ніж перевантажувальні пункти на базі кар'єрних механічних лопат. У статті розроблені та досліджені нові схеми внутрішньокар'єрних екскаваторних перевантажувальних пунктів. Принциповою відмінністю від існуючих схем перевантажувальних пунктів є те, що гірничі маса розміщується не в штабелях, а у приймальних траншеях нижче рівня стояння екскаватора. Виконано укрупнену техніко-економічну оцінку перевантажувального пункту з приймальною траншеєю.

Ключові слова: автомобільно-залізничний транспорт, екскаваторний перевантажувальний пункт, гідравлічний екскаватор.

Постановка проблеми. Перспективним напрямом підвищення ефективності роботи глибоких кар'єрів є подальше вдосконалення комбінованого транспорту. Процес перевантаження гірничої маси є важливою частиною технології гірничого виробництва. Його значимість зростає з подальшим поглибленням кар'єрів [1; 2]. Технологічною особливістю екскаваторних перевантажувальних пунктів автомобільно-залізничного транспорту є негативний вплив на розвиток гірничих робіт. По-перше, в робочій зоні кар'єру під перевантажувальними пунктами формуються цілики [3]. Вони чинять негативний вплив на динаміку гірничих робіт і можуть стати причиною зменшення продуктивності кар'єру по руді. По-друге, в кар'єрі створюються гірничотехнічні умови, в яких найменша відстань транспортування гірничої маси автосамоскидами можлива в разі перетину залізничних колій та автомобільних доріг [1]. Але у випадку допущення перетину автомобільних і залізничних доріг втрата продуктивності автосамоскидів відбудеться з іншої причини – через простої самоскидів на залізничних переїздах. Таким чином, усталеною практикою на кар'єрах є об'їзд самоскидами залізничних тупиків перевантажувальних пунктів. Для запобігання перетину транспортних комунікацій

автосамоскиди збільшують відстань транспортування гірничої маси. Тому на багатьох залізничних кар'єрах спостерігається тенденція до перенесення перевантажувальних пунктів на верхні горизонти кар'єрів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На багатьох вітчизняних і зарубіжних кар'єрах застосовуються комбіновані транспортні системи. При цьому кожен вид транспорту повинен працювати в найбільш зручних і вигідних для нього умовах, що є передумовою досягнення максимальної техніко-економічної ефективності транспортного процесу. У працях [4–7] досліджені закономірності зміни техніко-економічних показників транспортування гірничої маси за різних гірничотехнічних умов та вивчені особливості гірничих робіт при комбінованому транспорті.

Окремим напрямком у дослідженнях є оптимізація параметрів перевантажувальних пунктів і вивчення впливу їх конструкції на особливості взаємодії суміжних ланок комбінованого транспорту [4]. Негативною рисою комбінованого кар'єрного транспорту є необхідність будівництва перевантажувальних пунктів, що поєднують дві суміжні ланки кар'єрного транспорту. Перевантажувальні пункти ускладнюють технологічний процес і вимагають додаткових капіталовкладень.

Перевантажувальні пункти при автомобільно-залізничному транспорті можуть бути виконані у вигляді перевантажувальних естакад, екскаваторних складів [4] або у вигляді бункерних пристроїв різного принципу дії і конструкцій [8]. Перевантажувальні пункти у вигляді естакад, бункерів та інших споруд мають серйозні недоліки: високий рівень ризику пошкодження і швидке зношення думпкарів, бункерів від великих динамічних навантажень під час розвантаження гірничої маси; жорсткий взаємозв'язок роботи автомобільного і залізничного транспорту.

Найбільшого поширення на кар'єрах при автомобільно-залізничному транспорті отримали екскаваторні перевантажувальні пункти з використанням екскаваторів типу механічної лопати.

Незважаючи на оптимізацію експлуатаційних і капітальних витрат на транспортування гірничої маси, застосування на кар'єрах комбінованого транспорту ускладнюється створенням під транспортними комунікаціями і перевантажувальними пунктами ціликів, а також збільшенням відстані транспортування гірничої маси автосамоскидами з метою недопущення перетину із залізничними коліями (об'їзд залізничних тупиків).

У глибоких залізрудних кар'єрах комбінований транспорт збереже свою ефективність тільки за умови вирішення питання перенесення перевантажувальних пунктів слідом за пониженням гірничих робіт. Без вирішення цього завдання відстань перевезення автотранспортом продовжить зростання. У даний час при комбінованому автомобільно-залізничному транспорті найбільшого поширення набув екскаваторний спосіб перевантаження гірничої маси з автосамоскидів в думпкари. Устаткування перевантажувального пункту складається з одного або декількох екскаваторів і бульдозерів. За довжиною склад, як правило, ділять на дві частини: зону розвантаження автосамоскидів (заповнення) і зону роботи екскаватора (навантаження). Довжина цих частин залежить від кількості автосамоскидів, що одночасно розвантажуються, і повинна бути не менше 40 м.

Широке поширення екскаваторного способу перевантаження гірничої маси на кар'єрах пояснюється такими причинами [5]: можливість прийому і відвантаження значних обсягів гірничої маси, незалежність роботи транспортних засобів на доставці і відвантаженні гірничої маси, простота конструкції перевантажувального пункту, висока швидкість будівництва.

Однак існують певні недоліки екскаваторного перевантаження, що знижують ефективність

використання комбінованого автомобільно-залізничного транспорту і обмежують тим самим глибину його введення в кар'єр: значні розміри в плані, низька пропускна здатність, необхідність формування тимчасово неробочих ціликів.

Доцільна глибина застосування залізничного транспорту в кар'єрі становить 150-250 м. При цьому кількість перевантажувальних пунктів в межах кар'єрного поля може коливатися від 1-2 до 6-8. Перевантажувальні пункти часто розміщують на робочому борту кар'єра. Тривалість існування такого пункту перевантаження на одному місці становить від одного до трьох років [3]. Напівстаціонарний характер внутрішньокар'єрних перевантажувальних пунктів ускладнює виконання вимоги пропорційного ведення гірничих робіт на суміжних горизонтах із певною швидкістю в заданому напрямку.

Зважаючи на викладені несприятливі умови, виникає необхідність зменшення розмірів перевантажувальних пунктів, що розташовані в глибинній зоні кар'єру, що, у свою чергу, приведе до збільшення їх числа і зменшення кроку перенесення.

Постановка завдання. Метою роботи є розроблення та обґрунтування конструкції екскаваторного перевантажувального пункту, що має більш високі експлуатаційні характеристики, ніж перевантажувальні пункти на базі кар'єрних механічних лопат.

Основна ідея роботи полягає у використанні конструктивних особливостей виймально-навантажувального обладнання для обґрунтування раціональної конструкції перевантажувального пункту. В якості виймально-навантажувального обладнання на перевантажувальному пункті нової конструкції передбачено застосування гідравлічних екскаваторів типу ««зворотна лопата»». Під час виконання роботи вирішувалися такі завдання: аналіз тенденцій розвитку комбінованого кар'єрного транспорту та конструкцій перевантажувальних пунктів; розроблення схем перевантажувальних пунктів із використанням гідравлічних екскаваторів типу ««зворотна лопата»»; теоретичне обґрунтування параметрів і укрупнена техніко-економічна оцінка перевантажувальних пунктів.

Виклад основного матеріалу досліджень. Гідравлічні екскаватори типу ««зворотна лопата»» отримали широке поширення на зарубіжних гірничих підприємствах і все більше застосування знаходять на вітчизняних кар'єрах. На залізрудних кар'єрах Кривбасу експлуатуються гідравлічні

екскаватори «Hitachi». Головним чином вони застосовуються у складних гірничотехнічних умовах, під час ліквідації наслідків зсувів, завалів доріг розвалом гірничої маси, розкриття обводних ділянок родовищ, спорудження водозбірних зумпфів [9; 10]. У роботах [10–13] запропоновано застосувати зворотні гідравлічні екскаватори в якості основного обладнання екскаваторного перевантажувального пункту. Конструктивні особливості гідравлічних екскаваторів дозволяють створити перевантажувальний пункт, який чинить менший негативний вплив на динаміку гірничих робіт. Принциповою відмінністю від існуючих схем перевантажувальних пунктів є те, що гірнична маса розміщується не в штабелях, у в приймальних траншеях нижче рівня стояння екскаватора. Розміри приймальної траншеї визначаються технічними характеристиками перевантажувального екскаватора, схемою його розташування відносно траншеї та необхідною ємністю складу.

Доставлену автосамоскидами на перевантажувальний пункт гірничу масу розвантажують під укіс по довжині приймальної траншеї на ділянці заповнення [11; 12] (рис. 1а). Фронт відсипання просувається в напрямку від розвантажувального майданчику до залізничних колій. Одночасно із заповненням ділянки складу ведуть відвантаження гірничої маси. Для цього приймальну траншею попередньо поділяють на дві ділянки: заповнення і відвантаження. Відвантаження гірничої маси зі складу в транспортні засоби здійснюється екскаватором нижнім черпанням торцевим забоем на всю ширину приймальної траншеї. Таким чином, екскаватор у процесі навантаження думп-

карів переміщують по «подушці» з розвантаженої у приймальну траншею гірничої маси за напрямком від торця до центру [11].

За максимальним радіусом розвантаження екскаватора R_p , що забезпечує рівномірне заповнення думпкара, визначається вісь його руху упродовж приймальної траншеї, від якої відкладається значення максимального радіуса черпання на рівні стояння R_q . Глибина перевантажувальної траншеї визначається робочими параметрами гідравлічного екскаватора типу «зворотна лопата» та для більшості екскаваторів не перевищує 7-8 м [12].

Залізнична колія розташовується упродовж поздовжнього укосу вище розташованого уступу, між його нижньою бровкою і верхньою бровкою приймальної траншеї. Транспортну смугу залізничного транспорту і верхню бровку приймальної траншеї розділяє запобіжний цілик шириною $B_{ц}$.

Максимальна ширина приймальної траншеї визначається технічними характеристиками перевантажувального екскаватора (рис. 2а) [12]:

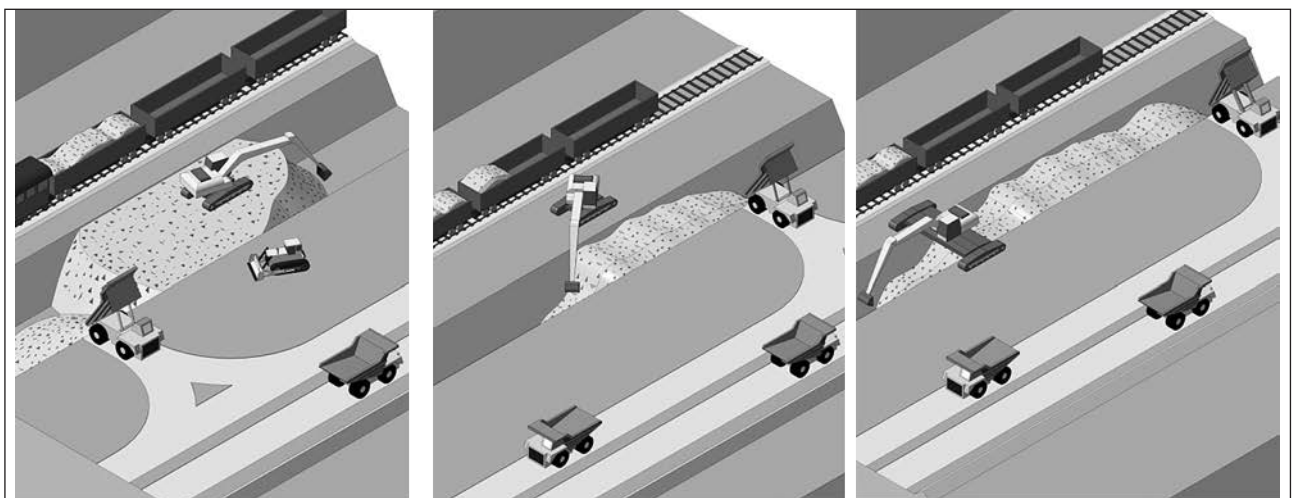
$$B_{mp} = R_q + R_p - B_{ц} - \frac{1}{2} b_m, \text{ м} \quad (1)$$

Мінімальна ширина площадки на ділянці горизонту розміщення перевантажувального пункту розраховується за формулою:

$$B_{nn} = b_m + B_{ц} + B_{mp} + B_m + b_e + b_{np}, \text{ м} \quad (2)$$

де b_{np} – ширина призми обвалення з боку вільної поверхні, м; b_e – ширина запобіжного валу, м.

Аналіз способу формування і експлуатації перевантажувального пункту із використанням зворотної гідравлічної лопати, яка розташована на гірничій масі, відсипаний в приймальній траншеї [12], дозволив



а) б) в)
Рис. 1. Схеми внутрішньокар'єрних екскаваторних перевантажувальних пунктів автомобільно-залізничного транспорту з використанням в якості перевантажувального обладнання гідравлічних екскаваторів типу «зворотна лопата»

встановити такі особливості цього способу. Порівнюючи даний спосіб із перевантажувальним майданчиком, який обладнано прямою механічною лопатою, слід зазначити, що загальною є необхідність для забезпечення безперервної роботи перевантажувального пункту його поділу по довжині на дві ділянки (ділянка розвантаження самоскидів, ділянку навантаження думпкарів). Це призводить до збільшення довжини перевантажувального пункту і обсягу заскладованої гірничої маси. Дана особливість є недоліком вказаного способу, ми не можемо відвантажувати гірничу масу до того моменту, поки перетин траншеї не буде заповнено гірничою масою.

У ході заповнення траншеї гірничою масою фронт розвантаження автосамоскидів швидко

переміщається (оскільки траншея має невелику глибину). Ця особливість зумовлює великий обсяг бульдозерних планувальних робіт, приблизно вдвічі більший, ніж на перевантажувальному пункті з прямою механічною лопатою. Цього недоліку позбавлено перевантажувальний пункт, в якому екскаватор не рухається по гірничій масі, відсипаній у контурі траншеї. Перевантажувальний екскаватор переміщається по майданчику, розташованому між верхньою бровкою приймальної траншеї і віссю залізничної колії (рис. 1б). Таке розташування екскаватора робить можливим відвантаження гірничої маси з приймальної траншеї без необхідності її повного заповнення. Поверхня розділу перевантажувального майданчику на зону

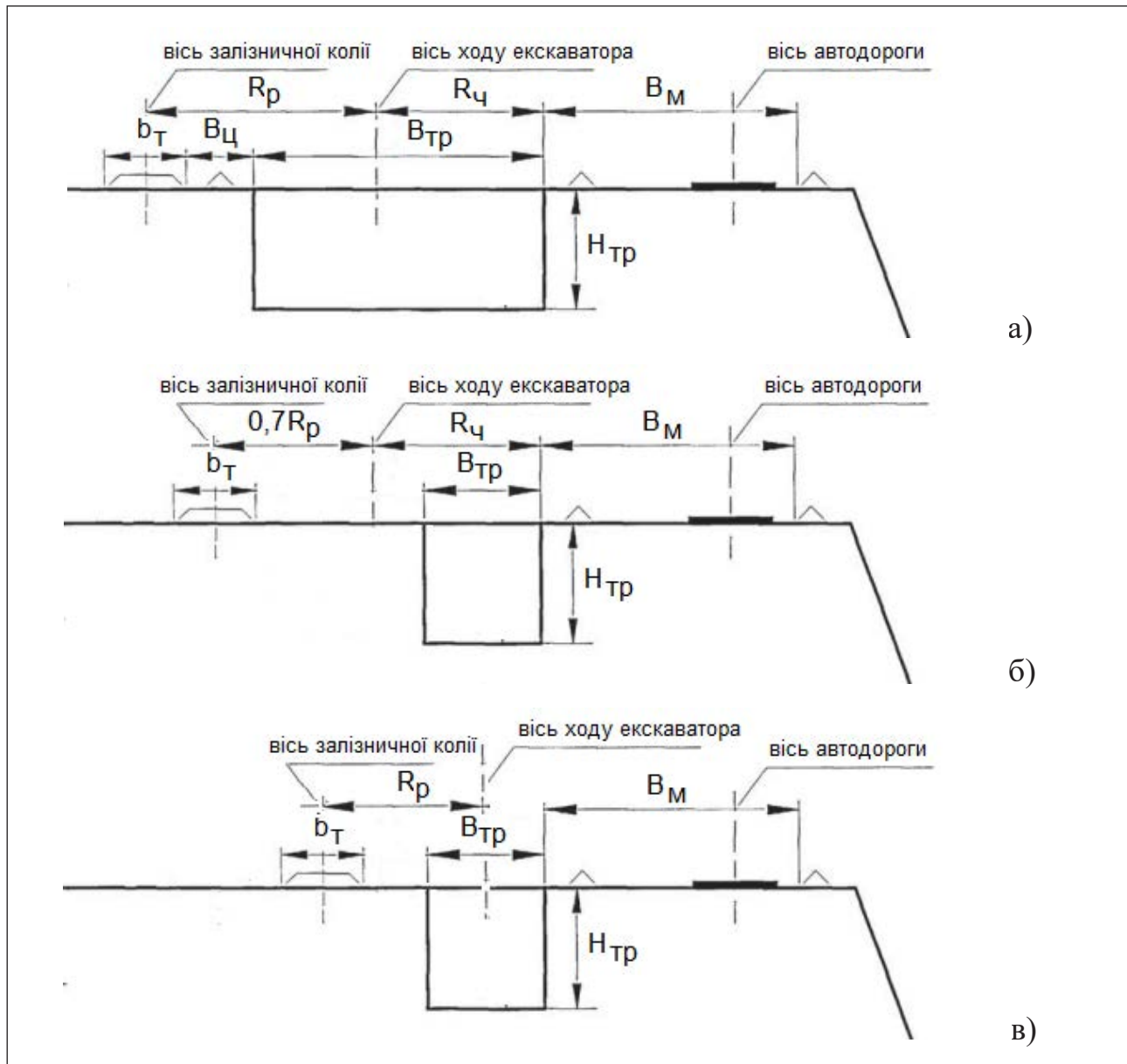


Рис. 2. Розрахункові схеми перевантажувальних пунктів

розвантаження самоскидів і зону відвантаження гірничої маси в думпкари розташована не перпендикулярно борту кар'єра (осі залізничних колій), а паралельно, співпадаючи з поздовжньою віссю приймальної траншеї. Така конструкція перевантажувального майданчику робить його дуже компактним, мобільним та здатним до відвантаження гірничої маси при мінімальному його заповненні гірничою масою.

Гірничі роботи за розробленою технологією виконуються нижчеописаним чином (рис. 2) [13]. Гідравлічним екскаватором типу ««обернена лопата»» (1) проходять приймальну траншею (2). Сформовану приймальну траншею (2) за шириною умовно поділяють на дві ділянки: розвантажувальний борт (3) і завантажувальний борт (4). Заповнення приймальної траншеї (2) гірничою масою здійснюють на розвантажувальному борту (3) автосамоскидами (5). У загальному випадку для недопущення перетину технологічних доріг розвантажувальним бортом (3) є борт приймальної траншеї (2), що розташований ближче до нижчележачих горизонтів кар'єра, завантажувальним бортом (4) – борт приймальної траншеї, що розташований ближче до вищележачих горизонтів кар'єра. Залізничну колію (7)кладають уздовж завантажувального борта (4) приймальної траншеї (2).

Перевантаження гірничої маси з приймальної траншеї (2) виконують гідравлічним екскаватором (1), який розташовують на завантажувальному борті (4) приймальної траншеї (2), в засоби залізничного транспорту (8), що розташовані на рівні установки гідравлічного екскаватора.

Перевантажувальний пункт (рис. 3) експлуатують протягом часу відпрацювання екскаваторної заходки (заходок) уступу. Що знаходиться вище (8). Після посування гірничих робіт на вищележачому уступі на майданчику, що звільнився, гідравлічним екскаватором типу ««обернена лопата»» (1) проходять приймальну траншею (2). Після вводу в експлуатацію переміщеного перевантажувального пункту виконують відпрацювання екскаваторної заходки (заходок) (9) нижчележачого уступу. Для підвищення продуктивності перевантажувального пункту на завантажувальному борту траншеї на безпечній відстані один від одного розташовують два і більше гідравлічних екскаваторів типу «обернена лопата». Використання перевантажувального пункту запропонованої конструкції забезпечує підвищення продуктивності гірничотранспортного обладнання та зменшує негативний вплив кар'єрного транспорту на динаміку гірничих робіт.

Ширина приймальної траншеї визначається наступним чином (рис. 2б). Для забезпечення рівномірного заповнення думпкара розташуємо вісь руху екскаватора від осі залізничної колії на відстані $0,65-0,7$ від максимального радіуса розвантаження екскаватора R_p , від якої відкладається значення максимального радіуса черпання на рівні стояння R_q . Максимальний радіус черпання на рівні стояння R_q визначає протилежний борт траншеї, з якого розвантажуються автосамоскиди.

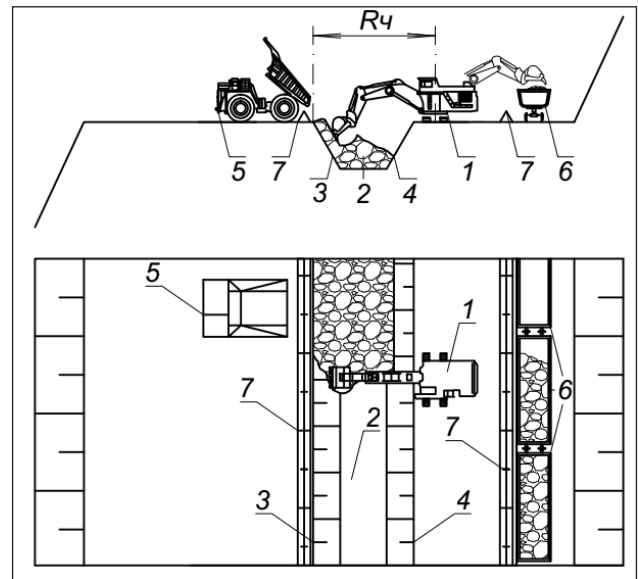


Рис. 2 Спосіб формування та експлуатації перевантажувального пункту [13]

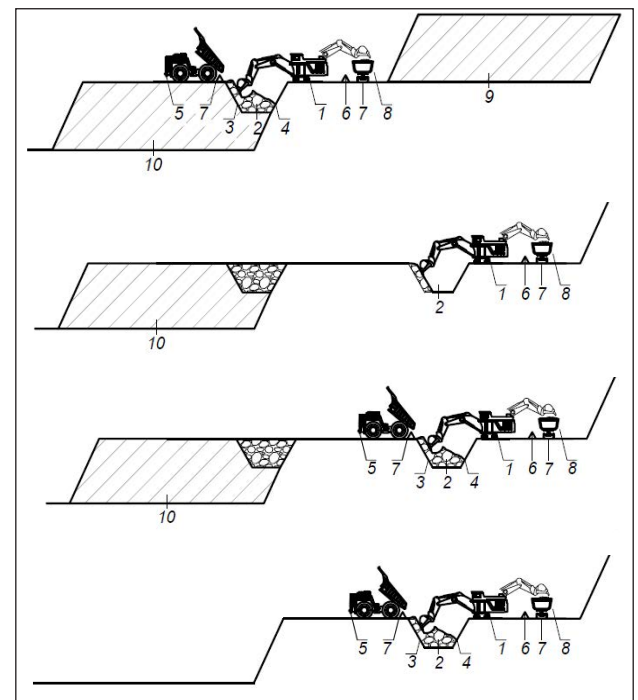


Рис. 3 Схема гірничих робіт під час переміщення перевантажувального пункту

Ширину траншеї визначаємо з урахуванням параметрів екскаватора і з урахуванням його безпечного розміщення на відвантажувальному борту траншеї:

$$B_{mp} = R_c - 0,5B_x - c, \text{ м} \quad (3)$$

де B_x – ширина ходової частини екскаватора, м; c – відстань від зовнішнього краю гусениці до бровки траншеї, м.

Мінімальна ширина майданчику на ділянці горизонту розміщення перевантажувального пункту розраховується за формулою (рис. 2б):

$$B_m = \frac{1}{2}b_m + 0,7R_p + R_c + B_m + b_e + b_{np}, \text{ м} \quad (4)$$

У таблицях 1 і 2 наведено порівняльний аналіз переваг і недоліків перевантажувальних пунктів з різними типами екскаваторів.

В якості альтернативного варіанту може бути розглянуто перевантажувальний пункт із розташуванням приймальної траншеї між гусеницями екскаватора (рис. 1в). Для забезпечення високої приймальності здатності траншеї необхідно виготовити екскаватор зі збільшеною шириною ходової частини (10-12 м). Перевантажувальний пункт такої конструкції має меншу ширину і зберігає переваги раніше розглянутих схем.

$$B_{mp} = B_x - 2(b_e + c), \text{ м} \quad (5)$$

Мінімальна ширина майданчику на ділянці горизонту розміщення перевантажувального пункту розраховується за формулою (рис. 2в):

$$B_m = \frac{1}{2}b_m + R_p + 0,5B_{mp} + B_m + b_e + b_{np}, \text{ м} \quad (6)$$

Основними параметрами перевантажувального пункту, що впливають на показники роботи кар'єра, є ширина, довжина, місткість та продуктивність перевантажувального екскаватора.

Дослідимо залежність місткості приймальної траншеї від схеми розташування екскаватора щодо приймальної траншеї і від робочих параметрів екскаватора. На рис. 4 наведені результати розрахунку місткості приймальної траншеї глибиною 7-8 м, довжиною 100 м під час використання екскаватора Hitachi EX 2500-6 ($R_c = 16,5\text{м}$, $R_p = 12\text{м}$), діапазон зміни робочих параметрів екскаватора 0,75-1 від максимальних значень, коефіцієнт розпушення породи 1,35.

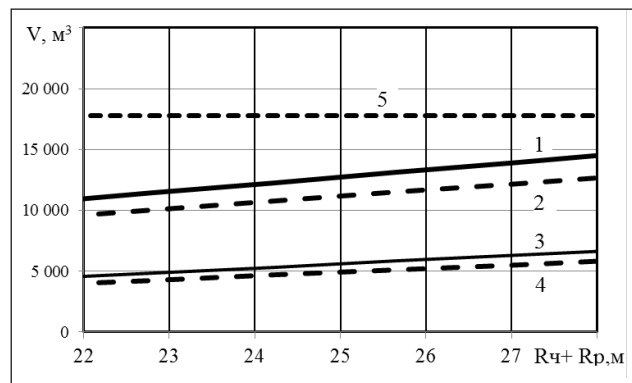


Рис. 4. Залежності місткості перевантажувального складу типу «приймальна траншея» від робочих параметрів перевантажувального екскаватора, довжина складу 100м (1, 2 – схема з переміщенням екскаватора по гірничій масі в контурі приймальної траншеї; 3, 4 – схема з переміщенням екскаватора по цілику уздовж приймальної траншеї; 5 – місткість складу гірничої маси при використанні прямої механічної лопати; 1, 3 – глибина траншеї 8 м; 2, 4 – глибина траншеї 7 м)

Таблиця 1

Порівняльний аналіз конструкцій екскаваторних перевантажувальних пунктів (переваги)

Схема з використанням екскаватора типу механічна лопата	Схема з розташуванням гідравлічного екскаватора на гірничій масі в приймальній траншеї	Схема з переміщенням гідравлічного екскаватора по цілику уздовж приймальної траншеї
1. Проста конструкція. 2. Використовується штатне виймально-навантажувальне обладнання.	1. Не створює значних перешкод розвитку гірничих робіт. 2. Проста конструкція. 3. Зменшення відстані транспортування автотранспортом: відсутній перепідйом гірничої маси; не потрібно об'їжджати залізничні тупики. 4. Можливість обслуговування одним перевантажувальним пунктом декількох екскаваторних вибоїв у разі використання на перевантажувальному пункті потужного гідравлічного екскаватора.	1. Не створює перешкод розвитку гірничих робіт. Нестационарний, ковзаючий перевантажувальний пункт. 2. Проста конструкція. 3. Невелика ширина, довжина і площа приймальної траншеї. 4. Зменшення відстані транспортування автотранспортом: відсутній перепідйом гірничої маси; не потрібно об'їжджати залізничні тупики. 5. Можливість обслуговування одним перевантажувальним пунктом декількох екскаваторних вибоїв у разі використання на перевантажувальному пункті потужного гідравлічного екскаватора. 6. Менша потреба в бульдозерах. 7. Можливість навантаження думпкарів без необхідності повного заповнення траншеї гірничою масою.

Місткість перевантажувального складу прибортового типу довжиною 100 м і висотою 12 м у перерахунку на цілик становить 17,8 тис.м³. Порівняємо місткість перевантажувальних складів типу «приймальна траншея» зі складом прибортового типу, прийнявши останній за 1. Під час збільшення ступеня використання робочих параметрів зворотної гідравлічної лопати від 0,75 до 1 відбувається збільшення порівняльної місткості перевантажувального складу від 0,52 до 0,60 для траншеї глибиною 7 м і від 0,73 до 0,83 для траншеї глибиною 8 м із розміщенням екскаватора на гірничій масі в контурі траншеї, і від 0,22 до 0,34 для траншеї глибиною 7 м і від 0,28 до 0,38 для траншеї глибиною 8 м з розміщенням екскаватору поза контуром траншеї.

Схема з розміщенням екскаватора на гірничій масі в контурі траншеї характеризується питомою меншою місткістю (0,83), але близькою до місткості складу прибортового типу. Однак у цій схемі збереглися недоліки, притаманні складам прибортового типу: необхідність поділу перевантажувального пункту на дві зони рівної довжини: зону розвантаження самоскидів і зону навантаження залізничних потягів, а також великий обсяг бульдозерних робіт. Фактично при двосекційних перевантажувальних пунктах розрахована місткість відноситься до всієї довжини перевантажуваль-

ного пункту і є постійною на всіх етапах нормальної експлуатації складу (одночасне відсипання і відвантаження гірничої маси з перевантажувального пункту). Якщо конструкція порівнюваних перевантажувальних пунктів матиме тільки один склад, то це буде означати, що одноразово перевантажувальний пункт може перебувати тільки в одному із двох станів (наповнення складу або відвантаження гірничої маси зі складу), що унеможливає одночасну і незалежну роботу суміжних ланок комбінованого транспорту.

Схема з розміщенням екскаватора поза контуром приймальної траншеї характеризується суттєво меншою питомою місткістю складу (0,34-0,38) при повному використанні радіусу черпання екскаватора. Зони розвантаження самоскидів і навантаження думпкарів розташовані на протилежних бортах траншеї і не перешкоджають незалежній і одночасній роботі суміжних ланок комбінованого транспорту. Особливого порядку розвантаження самоскидів необхідно дотримуватися тільки в зоні розташування екскаватора. При цьому маневри і розвантаження самоскидів у зоні роботи екскаватора повинні виконуватися за командами машиніста екскаватора (аналогічно з регламентом навантаження самоскидів в екскаваторних вибоях). Питома місткість перевантажувального пункту 5000 м³/100 п.м забезпечує протягом двох

Таблиця 2

Порівняльний аналіз конструкцій екскаваторних перевантажувальних пунктів (недоліки)

Схема з використанням екскаватора типу «механічна лопата»	Схема з розташуванням гідравлічного екскаватора на гірничій масі у приймальній траншеї	Схема з переміщенням гідравлічного екскаватора по цілику уздовж приймальної траншеї
1. Перевантажувальний пункт розташовується на двох суміжних майданчиках (на верхньому – зона руху і розвантаження самоскидів; на нижньому – розташований склад гірничої маси, екскаватор, залізнична колія). 2. Перевантажувальний пункт займає велику площу. За довжиною склад гірничої маси поділяється на дві ділянки, які по черзі використовуються для прийому і відвантаження гірничої маси. 3. Великий обсяг бульдозерних робіт. 4. Збільшення дальності транспортування автотранспортом через необхідність об'їзду залізничних тупиків і підйому гірничої маси на висоту перевантажувального пункту. 5. Створює перешкоди розвитку гірничих робіт (цілики). 6. Використання однакових екскаваторів у забоях і на перевантажувальних пунктах обмежує продуктивність перевантажувального пункту і збільшує їх потрібну кількість.	1. Перевантажувальний пункт займає велику площу. За довжиною склад гірничої маси поділяється на дві ділянки, які по черзі використовуються для прийому і відвантаження гірничої маси. 2. Невелика глибина і велика ширина приймальної траншеї зумовлює її швидке заповнення і великий обсяг бульдозерних робіт. 3. Перед початком завантаження думпкарів потрібно повністю заповнити гірничою масою відповідну частину траншеї. 4. Для спорудження приймальної траншеї застосовується контурне підривання.	1. Для спорудження приймальної траншеї застосовується контурне підривання. 2. Невелика місткість приймальної траншеї вимагає злагодженої роботи автомобільного і залізничного транспорту. Обсяг приймальної траншеї забезпечує запас гірничої маси на 2-6 змін.

змін незалежну роботу суміжних ланок комбінованого транспорту при продуктивності перевантажувального пункту 1,5 млн.м³/рік. При обмеженому просторі робочої зони кар'єру і при високій синхронізації роботи автомобільного і залізничного транспорту довжина приймальної траншеї може бути зменшена до 50м (3 R_{чmax}). При ємності залізничного складу 400 м³ (потяг з 10 думпкарів, вантажопідйомністю 105т) завантаження потягу забезпечує ділянка траншеї довжиною 8-10 метрів.

У табл. 3 представлені порівняльні характеристики основних параметрів екскаваторних перевантажувальних пунктів. Як перевантажувальне обладнання розглянуті екскаватори ЕКГ-10 з ємністю ковша 10 м³ і Hitachi EX 2500-6 з ємністю ковша 15 м³. У розрахунках приймаються постійними такі параметри: довжина перевантажувальних пунктів L = 200 м, глибина приймальної траншеї h = 8 м.

Місткість перевантажувальних пунктів забезпечує незалежну роботу автомобільного та залізничного транспорту. Але перевантажувальний пункт зі зворотною гідравлічною лопатою має меншу ширину і не перешкоджає гірничим роботам на верхніх уступах. Додатковий обсяг гірничої маси у випадку розміщення внутрішньокар'єрного перевантажувального пункту на глибині 150 м складе 1,9-3,6 млн.м³ в залежності від конструкції перевантажувального пункту.

Оцінка економічної доцільності застосування тієї чи іншої схеми перевантаження гірничої маси визначається шляхом порівняння капітальних і експлуатаційних витрат, які враховують гірничо-капітальні витрати на будівництво майданчика, капітальні витрати на виймально-навантажувальне устаткування для перевантажувального пункту і експлуатаційні витрати на перевантаження гірничої маси.

Вантажопотоки гірничої маси, спрямовані на перевантажувальний пункт при оцінці за тривалий період, тяжіють до центру тяжіння перевантажувального пункту. У разі перевантажувального пункту «приймальна траншея» вантажопотоки будуть тяжіти до середини траншеї за довжиною, в разі прибортового перевантажувального пункту – до середини прибортового складу гірничої маси.

Встановимо формулу, за якою можливо визначити різницю у відстані транспортування та в транспортній роботі між перевантажувальними пунктами з використанням прямих механічних та зворотних гідравлічних лопат.

Розглянемо робочий борт кар'єру, на якому розташований перевантажувальний пункт прибортового типу, який обладнано прямою механічною лопатою. У робочій зоні розташовані автомобільні екскаваторні вибої, гірнича маса з яких доставляється на екскаваторний перевантажувальний пункт (рис. 5).

Максимальне скорочення дальності транспортування гірничої маси (в плані) під час переходу від складу прибортового типу до складу типу «приймальна траншея» можна визначити за такою формулою:

$$\Delta S = 0,5L_{mn} + L_m + L_m + 0,5L_{mn} = 2L_m + L_{mn}, \text{ м,}$$

де L_{mn} – довжина перевантажувального пункту, м;

L_m – довжина залізничного тупика, м.

Скорочення транспортної роботи визначимо за формулою:

$$\Delta P = \Delta S \times Q_{mn}, \text{ ткм,}$$

де Q_{mn} – продуктивність перевантажувального пункту, т/рік.

Для вихідних даних (табл. 3), скорочення дальності транспортування становить

$$\Delta S = 2L_m + L_{mn} = 2 \times 200 + 150 = 550 \text{ м.}$$

Таблиця 3

Порівняльна характеристика внутрішньокар'єрних екскаваторних перевантажувальних пунктів

Тип складу, марка екскаватора	Бортовий, ЕКГ-10	Приймальна траншея (екскаватор розташовано на насипу), EX 2500-6	Приймальна траншея (екскаватор на борту траншеї), EX 2500-6
Ширина перевантажувального пункту, м	80-90	65-70	65-70
Довжина складу / тупику, м	200/200	200/200	100/200
Висота (глибина)/ширина складу, м	12/20	7-8/25	7-8/10,5
Об'єм складу, тис. м ³	18-20	14-16	6-7
Обсяг додаткового розкриття (при глибині розташування перевантажувального пункту 150 м), тис. м ³	3600	2850	1875
Витрати на створення майданчика для перевантажувального пункту, млн. грн	90	71,25	46,9

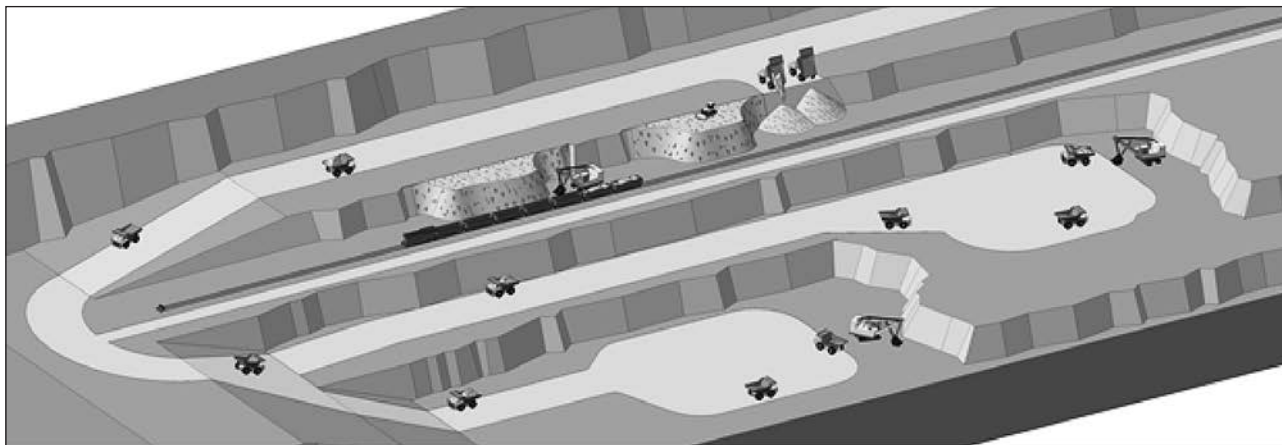


Рис. 5 Схема гірничих робіт з автомобільно-залізничним транспортом

Скорочення транспортної роботи при продуктивності перевантажувального пункту 1,5 млн. м³ (4,2 млн.т) визначимо за формулою:

$$\Delta P = \Delta S \times Q_m = 0,55 \times 4,2 = 2,31 \text{ млн. ткм.}$$

З урахуванням середньої вартості 1ткм на залізничних кар'єрах Кривбасу, рівної 0,2 USD / ткм (5,3 грн/ткм), економія на транспортній роботі складе $2,31 \times 5,3 = 12,2$ млн. грн.

Під час будівництва нового перевантажувального пункту при його розташуванні на глибині 150 м обсяг гірничо-капітальних робіт при перевантажувальному пункті типу «приймальна траншея» з розташуванням екскаватора в контурі траншеї на 750 тис.м³ менше, ніж при складі прибортового типу, а у випадку перевантажувального пункту типу «приймальна траншея» з розташуванням екскаватора поза контуром траншеї на 1725 тис.м³ менше, ніж при складі прибортового типу. Економія експлуатаційних витрат на розкривні роботи (без урахування витрат на кар'єрний транспорт) складе 18,75 млн. грн. і 43,12 млн. грн. відповідно. Виконані розрахунки дозволяють рекомендувати впровадження розробленої технологічної

схеми внутрішньокар'єрного перевантаження гірничої маси за допомогою гідравлічного екскаватора [13].

Висновки та напрямки подальших досліджень. У статті запропоновано рішення актуального науково-технічного завдання вдосконалення екскаваторних перевантажувальних пунктів комбінованого автомобільно-залізничного транспорту. Запропонований перевантажувальний пункт дозволяє уникнути утворення тимчасово неробочого борту кар'єру.

Результати досліджень можуть бути використані під час проектування внутрішньокар'єрних перевантажувальних пунктів на залізничних кар'єрах Кривбасу. Використання на перевантажувальних пунктах зворотних гідравлічних лопат дозволить розширити використання автомобільно-залізничного транспорту під час реконструкції транспортних схем залізничних кар'єрів Кривбасу. У подальшому буде поглиблено дослідження негативного впливу перевантажувальних пунктів із використанням прямих механічних екскаваторів на кар'єрний автотранспорт.

Список літератури:

1. Бызов В.Ф., Вилкул Ю.Г., Литвинов С.В., Завсегдашний В.А. Влияние пересечений автомобильных и железнодорожных грузопотоков на работу автотранспорта карьеров. Разработка рудных месторождений: респ. межвед. науч.-техн. сборник. Киев. 1989. Вып. 47. С. 69–74.
2. Vilkul Y., Slobodyanyuk V., Maximov I. Optimization of capacity and the number of crushing and transfer stations at the deep open pits. *Metallurgical and Mining Industry*. 2016. № 4. P. 116–120.
3. Линева В.П. Определение параметров рабочего борта карьера на участке размещения перегрузочных пунктов. *Сб. науч. тр. ИГД МЧМ СССР*. 1986. № 81. С. 71–79.
4. Васильев М.В. Внутрикарьерное складирование и перегрузка руд. Москва : Недра, 1968. 182 с.
5. Васильев М.В. Комбинированный транспорт на карьерах. Москва : Недра, 1975. 360 с.
6. Васильев М.В. Особенности устройства и параметры карьерных перегрузочных складов. *Горный журнал*. 1977. № 10. С. 34–38.
7. Яковлев В.Л. Теория и практика выбора транспорта глубоких карьеров. Новосибирск : Наука, 1989. 240 с.
8. Шакиров А.Ш. Перегрузочные устройства, используемые при комбинированном транспорте. *Черная металлургия, бюллетень научно-технической информации*. Москва : Черметинформация, 1982. Вып. 11(919). С. 24–30.

9. Слободянюк В.К., Письменный А.В. Разработка ресурсосберегающей экскаваторно-плужной технологии отвальных работ при железнодорожном транспорте. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2018. Т. 29(68). № 1(2). С. 133–137.

10. Slobodyanyuk V., Turchin Yu. Rational use of hydraulic excavators in iron ore pits. *JOURNAL OF MINING AND GEOLOGICAL SCIENCES*. University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”. 2017. № 60. P. 21–26.

11. Якубовский М.М., Холодняков Г.А. Совмещенный перегрузочный пункт при комбинированном автомобильно-железнодорожном транспорте. *Записки Горного института*. 2010. Том 186. С. 90–93.

12. Якубовский М.М. Обоснование параметров перегрузочных складов руды при открытой разработке апатит-нефелиновых месторождений Хибинского массива : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.00.21. Санкт-Петербург, 2011. 22 с.

13. Слободянюк В.К., Турчин Ю.Ю., Слободянюк Р.В. Позитивне рішення на корисну модель. Спосіб формування й експлуатації перевантажувального пункту при комбінованому автомобільно-залізничному транспорті. Заявка № u201809579.

АНАЛИЗ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ ПУНКТОВ АВТОМОБИЛЬНО-ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

В статье выполнен анализ основных проблем комбинированного транспорта глубоких карьеров и конструкций перегрузочных пунктов. Применение на перегрузочных пунктах прямых механических лопат усложняет схему движения карьерных автосамосвалов, увеличивает высоту подъема и дальность транспортирования горной массы автосамосвалами.

Целью статьи является разработка и обоснование конструкции экскаваторного перегрузочного пункта, который имеет более высокие эксплуатационные характеристики, чем перегрузочные пункты на основе карьерных механических лопат. В статье разработаны и исследованы новые схемы внутрикарьерных экскаваторных перегрузочных пунктов. Принципиальным отличием от существующих схем перегрузочных пунктов является то, что горная масса размещается не в штабелях, а в приемной траншее ниже уровня установки гидравлического экскаватора. Выполнена укрупненная технико-экономическая оценка перегрузочного пункта с приемной траншеей.

Ключевые слова: автомобильно-железнодорожный транспорт, перегрузочный пункт, гидравлический экскаватор.

ANALYSIS AND IMPROVEMENT OF DESIGNS OF RELOADING POINTS FOR THE ROAD AND RAIL TRANSPORT

The article analyzes the main problems of combined transport and designs of reloading points in the deep open pit mines. The use of face shovels at the reloading points complicates the truck traffic pattern, increases the lifting height and the range of rock mass transportation by dump trucks.

The purpose of the article is to develop and substantiate a design of the reloading point for the shovel with better operating performance than the reloading point based on the face hydraulic shovels. The new arrangements of in-pit reloading points for shovels were developed and studied in the article. The conceptual difference from the existing reloading points is that the rock mass is not piled, but loaded to the receiving trenches below the level of the shovel. The broad technical and economic assessment of the reloading point with the receiving trench was made.

Key words: road and rail transport, reloading points, hydraulic shovel.

УДК 504.3.054:504.062.2

Тверда О.Я.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Репін М.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ткачук К.К.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Радецька О.Й.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ ЗАРЯДУ ДЛЯ ВИБУХОВОГО РУЙНУВАННЯ СКЕЛЬНИХ ПОРІД

У статті обґрунтовано еколого-економічну ефективність застосування розробленої конструкції заряду та забійки свердловин. Ресурсозберігаюча конструкція заряду передбачає застосування радіального проміжку між зарядом та стінкою свердловини. Проміжок заповнюється інертною речовиною з високою акустичною жорсткістю. Розроблена конструкція забійки передбачає двостадійну очистку від шкідливих газів, утворених у процесі вибухового руйнування скельних порід. Очистка від газів, утворених під час вибуху, базується на хемосорбції газів негашеним вапном або відходами виробництва, які його включають, та фізико-хімічній сорбції цеолітами.

Ключові слова: конструкція заряду, забійка, свердловина, газу, пил, кар'єр, екологічний податок, викиди, еколого-економічний ефект.

Постановка проблеми. Розроблення родовищ скельних порід є видом економічної діяльності, який забруднює довкілля. Відкритий спосіб розроблення родовищ приводить до забруднення водного та повітряного басейнів забруднюючими речовинами, зміни, порушення структури та погіршення якості родючого шару ґрунту, а також значних ландшафтних порушень. Це викликає загибель або деградацію рослинного та тваринного світу. Також значні земельні ділянки займаються хвостосховищами та відвалами гірських порід [1].

Кожен технологічний процес під час видобутку корисних копалин здійснює негативний вплив на довкілля [2; 3]. Основними джерелами пилоутворення під час розроблення родовищ відкритим способом є буріння, підривання, первинне та вторинне подрібнення, виймально-навантажувальні роботи та операції, пов'язані з переміщенням гірської маси. Окрім того, на рівень забруднення атмосфери впливають процеси, безпосередньо пов'язані з веденням відкритих гірничих робіт (відвалоутворення) [3].

Під час проведення гірничих робіт у повітряне середовище надходить значна кількість шкідливих газів. У викидах шкідливих речовин містяться як хімічні речовини, що входять до складу гірських порід, так і речовини, які виділяються в процесі вибухового руйнування порід та під час роботи машин і механізмів, що застосовуються у технології виробництва щебню. Емісія цих шкідливих речовин приводить до поступової деградації насаджень, зниження їх продуктивності та втрати стійкості. Під впливом «чужорідних» для живих організмів речовин порушується ультрамікроскопічна структура клітин рослинних організмів, сповільнюється інтенсивність ростових та продуктивних реакцій, знижується тривалість життя організмів, прискорюються процеси старіння [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз досліджень впливу кар'єрів скельних порід на стан довкілля показав, що детально вивчено вплив різноманітних чинників на процес вибухового руйнування скельних порід, розроблено конструк-

ції зарядів та забійок, які дають змогу регулювати вплив на довкілля, розроблено методики розрахунку параметрів вибухових робіт, що враховують фізико-механічні властивості та структурно-текстурні особливості масивів гірських порід, впроваджено нові вибухові речовини, засоби ініціювання зарядів, розроблено способи пилоподавлення та нейтралізації шкідливих газів.

Однак, незважаючи на отримані результати щодо забезпечення високого рівня екологічної безпеки кар'єрів скельних порід, проблема підвищення екологічних показників технологічних процесів вимагає подальшого вирішення.

Під час вибухового руйнування скельних порід на кар'єрі є перевищення гранично допустимих концентрацій пилу та газів, які зазвичай спостерігаються також за межами санітарно-захисної зони, що зумовлює підвищення ризику захворювання як працівників, так і населення прилеглих територій.

Розроблені конструкції зарядів не знайшли широкого застосування через складність, трудомісткість та дороговизну. Розроблені конструкції забійок спрямовані на збільшення опору виштовхуванню, а проблемі фільтрації продуктів детонації через матеріал забійки уваги приділено недостатньо. Конструкції забійок, які розроблені задля зменшення викидів газів, утворених під час вибуху, є або дорогими, або трудомісткими.

Способи пилоподавлення та нейтралізації шкідливих газів є трудомісткими та потребують значних додаткових фінансових витрат. Окрім того, такі способи не вирішують проблему ресурсозбереження, яка для кар'єрів скельних порід є, на відміну від залізорудних, важливою.

Виходячи з проведеного аналізу наукових та практичних досягнень, автори розробили конструкцію заряду, що реалізується за рахунок застосування радіального проміжку між зарядом та стінкою свердловини, який заповнюється інертною речовиною з високою акустичною жорсткістю, а також конструкцію забійки, яка передбачає двостадійну очистку від шкідливих газів, утворених у процесі вибухового руйнування скельних порід, і базується на хемосорбції газів негашеним вапном або відходами виробництва, які його включають, та фізико-хімічній сорбції (адсорбції) цеолітами (рис. 1).

Результати досліджень показують, що зі збільшенням акустичної жорсткості розчину, який пропонується використовувати як заповнювач проміжку між зарядом та свердловиною, пік тиску у ближній до заряду зоні зменшується. Максимуму такого зменшення можна досягнути під час використання щільного розчину, наприклад водного розчину

Ферум (III) сульфату. Так, за умов його застосування максимальний тиск у ближній до заряду зоні, яка є основним джерелом пилоутворення, складає $8,1 \cdot 10^6$ Па. Водночас за умов застосування води, яка набула широкого практичного використання, такий тиск складає $10 \cdot 10^6$ Па, що майже на 20% більше.

Варто відзначити, що розчини з більшою акустичною жорсткістю дадуть змогу зменшити обсяг пилоутворення та підвищити однорідність фракційного складу гірської маси. Це можна зробити за рахунок зменшення амплітуди хвиль тиску на межі розподілу середовищ «заповнювач проміжку – гірська порода» та збільшення ширини амплітуди. Окрім того, такий підхід дає змогу підвищити рівень ресурсозбереження. Зокрема, він сприяє зменшенню втрат через переподібнені фракції, які є відходами гірничого виробництва й складаються у відвали, що здійснюють негативний вплив на довкілля через пилоутворення.

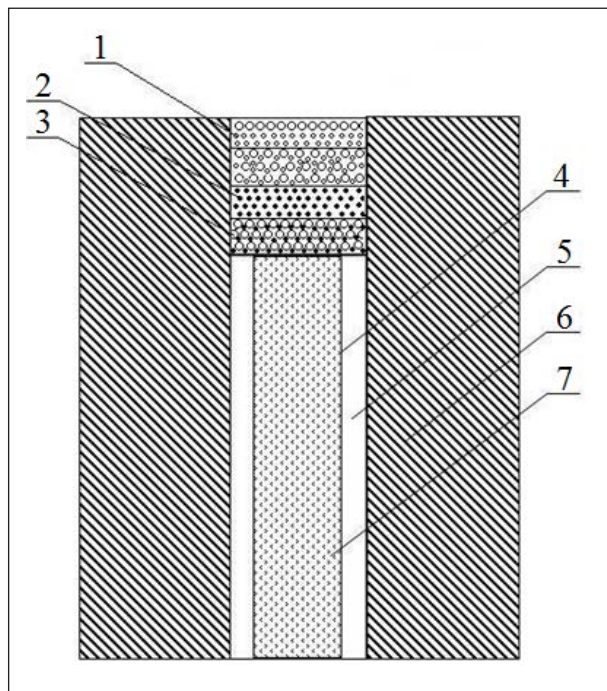


Рис. 1. Розроблена конструкція заряду із забійкою (1 – цеоліт; 2 – негашене вапно; 3 – щебінь фракції 5–25 мм; 4 – поліетиленовий рукав; 5 – проміжок між зарядом та стінкою свердловини; 6 – гірська порода; 7 – вибухова речовина)

Двостадійна очистка від шкідливих газів, яка базується на хемосорбції газів негашеним вапном та фізико-хімічній сорбції (адсорбції) цеолітами, може забезпечити повну хімічну нейтралізацію NO_2 і CO_2 , а також нейтралізацію CO цеолітами. Окрім того, таку забійку необхідно враховувати під час вибору раціонального типу вибухової речовини для проведення підричних робіт у конкретних гірничо-геологічних умовах.

Постановка завдання. Метою статті є обґрунтування еколого-економічної ефективності застосування розробленої конструкції заряду та забійки свердловин.

Виклад основного матеріалу дослідження. За рахунок впровадження у технологію вибухових робіт розробленої конструкції свердловинного заряду, включаючи забійку, можна досягнути зменшення зони переподрібнення, зниження викиду пилу та шкідливих газів, підвищити рівень ресурсозбереження та зменшити дію сейсмічного ефекту [5]. Однак водночас ймовірним є забруднення перетнутих водних горизонтів, що в подальшому зумовлює необхідність підготовки води залежно від цільового призначення [6; 7].

На прикладі Товкачівського ГЗК розраховано, яку кількість гірської маси за затверджених уже параметрів вибуху можна перенести з переподрібненої фракції у товарну. Обсяг підірваної гірської маси у середньому, згідно з даними підприємства, становить за рік 750 тис. т.

Таким чином, з урахуванням результатів експерименту обсяг переподрібненої фракції за умови застосування традиційної конструкції заряду становитиме близько 30 000 м³/рік, а за умови застосування запропонованої конструкції – близько 15 000 м³/рік. Додатковий дохід під час реалізації товарної продукції в такому обсязі складе:

$$15\,000\text{ м}^3/\text{рік} \cdot 2700\text{ кг/м}^3 \cdot 10^{-3} \cdot 100\text{ грн./т} = 4\,050\,000\text{ грн./рік.}$$

Водночас затрати, які понесе підприємство на закупку необхідних матеріалів, будуть включати:

- 1) вартість поліетиленового рукава (390 грн./500 м);
- 2) вартість Ферум III сульфату (1 100 грн./т).

Вартістю води можна знехтувати, оскільки значна кількість свердловин є обводненою, а забирати її можна не з комунального постачання. Необхідні витрати на закупку поліетиленових рукавів також можна зменшити у 2 рази, оскільки для обводнених свердловин підприємство змушене їх закуповувати без упровадження нової конструкції заряду.

З огляду на кількість свердловин на рік закупка поліетиленових рукавів необхідного діаметра обійдеться підприємству у близько 8 000 грн. з урахуванням середньої вартості на ринку. Сума на закупку Ферум III сульфату з урахуванням того, що на одну свердловину необхідно 175 кг, складе 121 275 грн./рік. Витрати на транспортування складуть близько 5 000 грн.

Таким чином, економічний ефект упровадження лише розробленої конструкції заряду зі стандартною забійкою складе:

$$E_{\text{зар}} = 4\,050\,000 - 8\,000 - 121\,275 - 5\,000 = 3\,915\,725\text{ грн.}$$

За умови впровадження запропонованої конструкції забійки з урахуванням [8] можна уникнути податку за викиди забруднюючих речовин або мінімізувати його. Так, під час традиційного підривання в атмосферу з 1 кг Гранеміту І30-У викидаються такі речовини: NO₂ (21 л); CO (27 л); CO₂ (78 л); N₂ (215 л). Орієнтовні витрати на виплату екологічного податку за такі викиди наведено в табл. 1. Обсяги викидів розраховано з урахуванням середньої кількості свердловин на рік та відповідної маси вибухової речовини, що в них заряджається (360 кг вибухової речовини на 1 свердловину в середньому).

Однак для реалізації конструкції свердловинної забійки підприємству необхідно включити у статті своїх витрат витрати на негашене вапно та цеоліти:

- 1) вартість негашеного вапна становить 900 грн./т;
- 2) вартість цеоліту становить 5 000 грн./т.

З огляду на кількість свердловин на рік та необхідну кількість негашеного вапна (в середньому 60 кг на одну свердловину) така закупка обійдеться підприємству у 34 000 грн. з урахуванням середньої вартості на ринку. Сума на закупку цеоліту з урахуванням того, що на одну свердловину необхідно в середньому 15 кг, складе 50 000 грн./рік. Витрати на транспортування складуть близько 10 000 грн.

Таким чином, економічний ефект від упровадження лише розробленої конструкції забійки з традиційною конструкцією заряду складе:

$$E_{\text{заб}} = 1\,528\,108 - 34\,000 - 50\,000 - 10\,000 = 1\,434\,108\text{ грн.}$$

Загальний еколого-економічний ефект запропонованих рішень складе:

$$E = 3\,915\,725 + 1\,434\,108 = 5\,349\,833\text{ грн./рік.}$$

В результаті запровадження розроблених рішень підприємства гірничої галузі зможуть отримати не лише еколого-економічний ефект, але й соціальний, пов'язаний з мінімізацією ризиків для здоров'я працівників та населення прилеглих територій.

Висновки. Розроблено конструкцію заряду, що реалізується через застосування радіального проміжку між зарядом та стінкою свердловини, який заповнюється інертною речовиною з високою акустичною жорсткістю. Розроблено конструкцію забійки, яка передбачає двостадійну очистку від шкідливих газів, утворених у процесі вибухового руйнування скельних порід, і базується на хемосорбції газів негашеним вапном або відходами виробництва, які його включають, та фізико-хімічній сорбції (адсорбції) цеолітами.

Орієнтовні суми екологічного податку, які сплачує підприємство за рік

Забруднююча речовина	Ставка податку, грн./т	Обсяг викиду, т/рік	Сума екологічного податку, грн./рік
Нітроген (IV) оксид	2 451,84	329	806 655
Карбон (II) оксид	92,37	7 655	707 092
Карбон (IV) оксид	0,41	3 5027	14 361
Сума			1 528 108

Визначено загальний еколого-економічний ефект запропонованих рішень, який склав 5 349 833 грн./рік. В результаті запровадження розроблених рішень підприємства гірничої галузі

зможуть отримати не лише еколого-економічний ефект, але й соціальний, пов'язаний з мінімізацією ризиків для здоров'я працівників та населення прилеглих територій.

Список літератури:

1. Гінзула М. Оцінка джерел забруднення повітряного басейну викидами промислового підприємства ТзОВ «Бурдяківський спецкар'єр». *Наукові записки*. 2011. № 2. С. 196–201.
2. Головин А. Оценка состояния окружающей среды Михайловского ГОКа. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2002. № 9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-sostoyaniya-okruzhayuschey-sredy-mihaylovskogo-go-ka> (дата звернення: 20.02.2017).
3. Шувалов Ю., Ильченкова С., Гаспарьян Н., Бульбашев А. Снижение пылеобразования и переноса пыли при разрушении горных пород. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2004. № 10. С. 75–78.
4. Гендлер С., Кузнецов В. Пространственное распределение экологического риска при работе железорудных карьеров. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2006. № 1. С. 196–200.
5. Крайчук С., Ремез Н., Тверда О., Дыняк С. Методика прогнозирования сейсмостойкости охраняемых объектов вблизи проведения взрывных работ. *Theoretical & Applied Science*. 2014. № 9 (17). С. 68–73.
6. Terentiev O., Tkachuk K., Tverda O., Kleshchov A. Electromagnetic focusing of impurities in water purification. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 4. № 10 (82). P. 10–15.
7. Terentiev O., Tkachuk K., Tverda O., Kleshchov A. Mathematical model of the reverse water postpurification at mining enterprises when using electromagnetic focusing of contaminants. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 1. № 10 (91). P. 10–16.
8. Воробьев В., Крючков А., Твердая О. Оценка скорости движения забойки при взрывах скважинных зарядов во взаимосвязи с результатами дробления горных пород. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*. 2014. Вип. 1 (13). С. 11–19.

ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ ЗАРЯДА ДЛЯ ВЗРЫВНОГО РАЗРУШЕНИЯ СКАЛЬНЫХ ПОРОД

В статье обоснована эколого-экономическая эффективность применения разработанной конструкции заряда и забойки скважин. Ресурсосберегающая конструкция заряда предусматривает применение радиального промежутка между зарядом и стенкой скважины. Промежуток заполняется инертным веществом с высокой акустической жесткостью. Разработанная конструкция забойки предусматривает двухстадийную очистку от вредных газов, образованных в процессе взрывного разрушения скальных пород. Очистка от газов, образованных при взрыве, базируется на хемосорбции газов негашеной известью или отходами производства, которые ее включают, и физико-химической сорбции цеолитами.

Ключевые слова: конструкция заряда, забойка, скважина, газы, пыль, карьер, экологический налог, выбросы, эколого-экономический эффект.

ECOLOGICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF THE RESOURCE-SAVING CHARGE FOR EXPLOSIVE DESTRUCTION OF ROCK

The ecological and economic efficiency of the using of the developed design of the charge and borehole drilling was justified in the article. The resource-saving charge design involves using a radial gap between the charge and the wall of the well. The gap is filled with an inert substance with high acoustic rigidity. The design of the stemming involves two-stage purification from harmful gases, formed during the explosive destruction of rocks. Purification from harmful gases is based on the chemisorption of gases by quicklime or production waste, which includes it, and physico-chemical sorption by zeolites.

Key words: charge design, stemming, well, gases, dust, quarry, environmental tax, emissions, environmental and economic effect.

МЕТАЛУРГІЯ

УДК 669.187

Тарасов В.К.

Інженерний інститут Запорізького національного університету

Румянцев В.Р.

Інженерний інститут Запорізького національного університету

Мосейко Ю.В.

Інженерний інститут Запорізького національного університету

Панова В.О.

Інженерний інститут Запорізького національного університету

Макушина Т.В.

Інженерний інститут Запорізького національного університету

ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ЗНИЖЕННЯ ПОЛОМОК ГРАФІТОВИХ ЕЛЕКТРОДІВ ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ

У статті розглянуто проблеми роботи діючих сталеплавильних електродугових печей, пов'язані з поломок графітових електродів. Проаналізовано відомі заходи та конструкції для зниження рівня вібрації електродотримачів. Вдосконалено компактний гаситель коливань динамічного типу. Проведено теоретичні дослідження гасителя на математичній та фізичній моделі електродотримача, вибрано раціональні параметри пристрою. Досягнуто зниження амплітуди коливань електродів до допустимих меж.

Ключові слова: дугова піч, електрод, поломки, гаситель, інерційна маса.

Постановка проблеми. Однією з основних проблем електросталеплавильного виробництва є недостатня стійкість графітових електродів. Внаслідок поломок та місцевих пошкоджень виходять з ладу 5–7% електродів. Їхня аварійна заміна й невиробничі простої печі негативно впливають на собівартість продукції, а також конкурентоспроможність підприємства на міжнародному ринку сталі.

Вивчення причин пошкоджень електродів на виробництві під час здійснення наукових досліджень показало, що на поломки впливає не стільки вигорання бічної поверхні електродів внаслідок високих температур у робочій зоні печі, що іноді відбувається через недостатню якість електродів, скільки їхня вібрація. Остання виникає внаслідок дії електромагнітних сил між електродами в горизонтальній площині та пружності елементів системи електродотримачів. Особливо сильно ці недоліки проявляються у зв'язку із сучасною тенденцією підвищення введеної енергії в піч, тобто під час використання надпотужних дугових печей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Для зменшення рівня вібрації електродів у горизонтальній площині застосовуються гасителі на основі інерційної маси [1–4].

Так, автори роботи [1] пропонують використовувати інерційну масу у вигляді катка, розташовану в полуму рукаві електродотримача в радіальній напрямній, яка жорстко закріплена на кінці рукава на боці головки електродотримача. В інерційній масі зроблені повздовжні пази, що створені вгнутими та з шорсткими поверхнями різних радіусів. Пази розташовані концентрично щодо один одного й заповнені в один шар кульками, що мають стійке положення в нижній частині пазів, причому пази розташовані у верхній частині маси.

Під час здійснення роботи дугової печі в разі виникнення коливань електродотримача маса під впливом інерційних сил звершує обкатку в радіальній напрямних. Кульки періодично зміщуються відносно вгнутих шорстких поверхонь.

В результаті періодичного складного руху інерційної маси виникає відцентрова реакція, яка передається системі електродотримача та врівноважує зовнішнє збудження. Власні коливання інерційної маси компенсуються силами тертя кульок між собою та зі вгнутими шорсткими поверхнями. При цьому витрачається енергія, зменшується амплітуда коливань усієї системи з електродом.

Використання пристрою розширює частотний діапазон демпфування коливань, однак докази ефективності гасіння коливань недостатньо підтверджені дослідженнями та теоретичними розрахунками, немає визначень ефективності впливу величини маси катка.

В роботі [2] запропоновано вдосконалення конструкції гасіння коливань. Виявлено недоліки інерційної маси циліндричної форми, що має різні швидкості кочення на повздовжніх краях маси. Це обумовлене різними радіусами руху катку відносно осі стояка, тобто центру коливань. Виникають гальмування та проковзування рухомого катку, що знижують ефективність процесу гасіння. У зв'язку з цим інерційна маса виконана у вигляді усіченого конуса з вершиною, розташованою на перетині осі рукава й стояка, а також сферичними торцями. Напрямна поверхня має конусоподібну форму та радіальні пази з кульками, розташованими в один шар, а також дугоподібними боковими гранями (рис. 1).

Під час виникнення горизонтальних коливань електрода 3 і, відповідно, рукава 1 розвиваються крутильні коливання щодо вертикального стояку 4. Інерційна маса 6 перекочується в протилежний бік по кулях 7, розташованих в пазах конусоподібної напрямної 8. Зміщення інерційної маси поздовжньою віссю рукава обмежується дугоподібними бічними упорами 9.

При цьому кінетична енергія інерційної маси компенсує енергію вимушених коливань рукава електродотримача. Амплітуда переміщень електрода суттєво знижується, а коливання електрода швидко загасають.

Впровадження такої конструкції стримувалося через істотні недоліки, а саме значні габарити й масу електродотримача, що збільшує витрати енергії на переміщення електрода й точність позиціонування електричної дуги, а також недостатні дослідження динаміки руху маси.

В роботі [3] представлена вдосконалена конструкція гасителя задля скорочення габаритів рукава та підвищення ефективності гасіння коливань (рис. 2). Пристрій містить рукав 1 з головкою

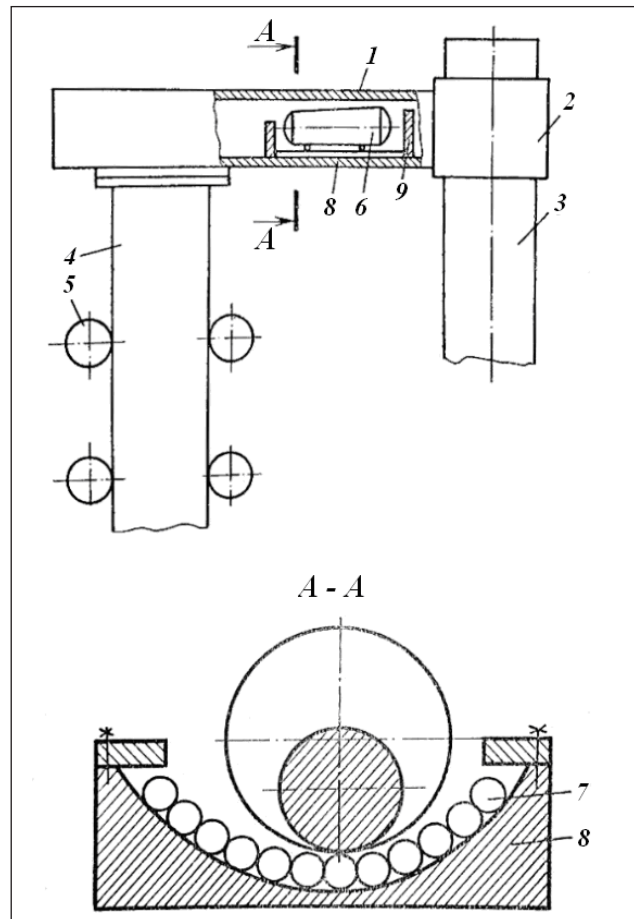


Рис. 1. Електродотримач зі вбудованим гасителем всередині рукава

електродотримача 2 та електродом 3. Рукав жорстко закріплений на стояку 4, що переміщується в напрямних опорних роликах 5. До головки 2 приварений корпус 6 виносного гасителя коливань. Усередині корпусу розташовані канавки, в які вставлені труби 7, вигнуті у вертикальній площині та заповнені кулями 8. На торцях труб зверху приварені накладки 9, до яких шарнірно підвішені кришки 10. Передбачено можливість зміни зазору для регулювання руху куль за допомогою спеціальних гвинтів 11. На нижньому кінці кришок встановлені виступи з пазами та кріпильними елементами 12, які шарнірно приєднані до накладок 13.

Під час виникнення коливань електрода рукав з гасителем повертається відносно стояка на деякий кут. Металеві кульки переміщуються до протилежного боку, різко вдаряючись об стінки кришок гасителя. Енергія удару, що виникає, суттєво зменшує енергію коливань електродотримача. Аналогічний процес відбувається під час повороту рукава в інший бік.

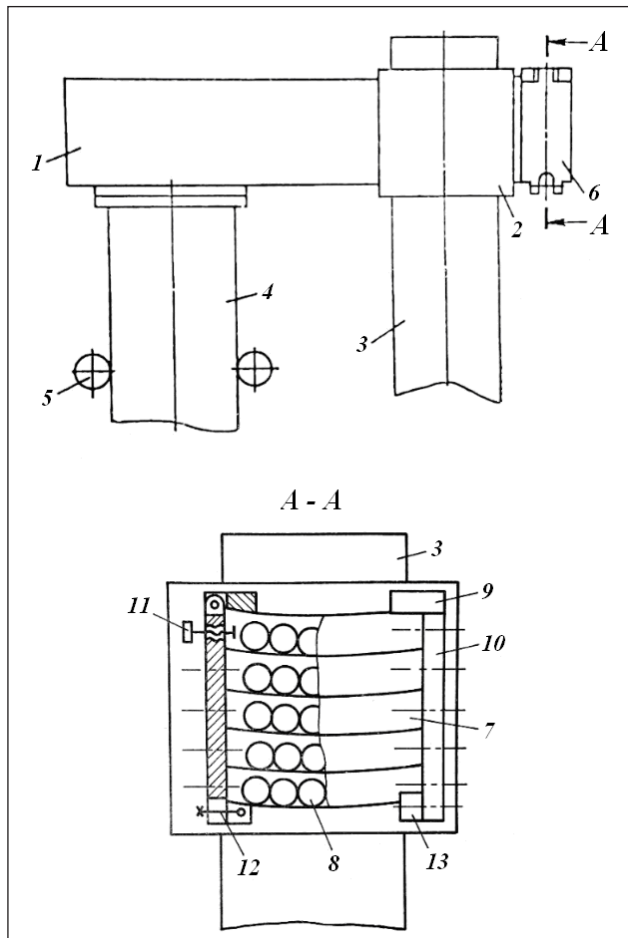


Рис. 2. Електродотримач з виносним гасителем ударної дії

Такий гаситель компактний, має меншу масу та є більш ефективним через його розташування на більшому радіусі за головою рукава. Проте необхідні подальші теоретичні та експериментальні дослідження для вдосконалення конструкції гасителя й визначення його раціональних параметрів.

В роботі [5] розглянуто динамічну систему балансірного електродотримача на основі подвійного фізичного маятника з пружно-дисипативними зв'язками. Визначено параметри динамічної моделі та електродинамічного збудження коливань. Складено диференціальні рівняння змущених коливань дисипативної системи із двома ступенями свободи. Виконано математичне моделювання змущених та вільних коливань електрода в горизонтальній площині. Доведено можливість зменшення амплітуд коливань електродів у системі балансірного електродотримача під час дії електродинамічного збудження та скидання навантаження. У статті представлені дослідження оригінальної конструкції електродотримача з балансірним закріпленням рукава. Отримано важливі результати, проте це не відміння про-

дження пошуку й дослідження альтернативних рішень з гасителями ударної дії.

Автори статті [6] приводять результати теоретичного дослідження впливу основних конструктивних та силових параметрів на швидкість переміщення електродів дугових сталеплавильних печей за допомогою гідроприводу поступальної дії. Дослідження проводилося з урахуванням основних параметрів гідроприводу, а саме діаметра поршня й робочого ходу, діаметра скалки розподільчого золотника, довжини трубопроводу та маси рухомих частин. Визначено, що на час нестійкого перехідного процесу впливає час згасання коливань. Отримані дані мають значення для оптимальної роботи автоматичних систем керування технологічним процесом. Для підвищення ефективності вводу електричної енергії до ванни печі доцільно продовжити пошук засобів зменшення амплітуди коливань електродів.

В роботі [7] проаналізовано стан напружень у з'єднанні графітових електродів, що зазвичай має конусоподібну форму з різьбою. За необхідної затяжки ніпеля секції величина напруги у з'єднанні перебуває в допустимих межах. Під час послаблення з'єднання зменшується несуча площа перерізу ніпелю, відповідно, підвищується напруга в контакті. Однією з основних причин виникнення такого стану є вібрація електродів внаслідок дії між ними взаємних електромагнітних сил, тобто також підтверджується необхідність проведення досліджень щодо зниження рівня коливань електродів у горизонтальній площині.

Постановка завдання. Метою статті є проведення теоретичного та експериментального дослідження розробки авторів, викладеної в роботі [3], на моделі та стенді з урахуванням жорсткості й динаміки системи «електрод – рукав – стояк», величини зазору в гасителі.

Виклад основного матеріалу дослідження. Лабораторні та теоретичні дослідження показали, що створення вказаної системи гасіння зводиться до розрахунку маси гасителя та величин симетричних зазорів між кулями й кришками корпусу гасителя. Параметри гасителя розраховували на основі розрахункової схеми з двох мас, а саме гасителя й системи «електрод – рукав – стояк», з'єднаних за допомогою пружних ланок. Структурна схема системи представлена на рис. 3 [8].

Рукав прийнятий у вигляді абсолютно твердого тіла, оскільки його жорсткість набагато більше жорсткості на стояку. Розрахункова схема системи електродотримача представлена такими рівняннями:

$$J_1\phi = M_F - C\phi - M_R;$$

$$J_2\phi_2 = M_R,$$

де M_F – момент електродинамічної сили $F(t)$.

Розв'язання диференціальних рівнянь дало змогу визначити необхідні параметри для вибору гасителя. Так, формула максимальної амплітуди повороту рукава ϕ_{\max} зі встановленим гасителем така:

$$\phi_{\max} = (M_F)_{\max} \sqrt{\frac{(C_r - J_2\omega^2)^2 + b_r^2\omega^2}{\beta_1^2 + \beta_2^2}};$$

де $(M_F)_{\max}$ – максимальне значення моменту від електродинамічної сили; β_1, β_2 – динамічні коефіцієнти:

$$\beta_1 = (C - J_1\omega^2)(C_r - J_2\omega^2) - C_r J_2\omega^2;$$

$$\beta_2 = b_r\omega(C - J_1\omega^2 - J_2\omega^2);$$

де ω – кутова швидкість; b_r – приведений коефіцієнт тертя дисипативної сили.

Обчислено раціональну масу гасителя m_g та необхідний зазор Δ :

$$m_r = \frac{4\Delta(1-r^2) - \pi^2\phi_{\max}}{\pi^2 l_{el}^2 \phi_{\max}} J_1;$$

$$\Delta = \frac{\pi^2(J_1 + m_g J_2^2)}{4(1-r^2)J_1} \phi_{\max},$$

де r – коефіцієнт відновлення швидкості під час удару.

Отримано залежності, які пов'язують між собою динамічні та конструктивні параметри системи електродотримача й гасителя. На підставі проведених розрахунків побудовано графіки амплітуди коливань відносно параметрів системи (рис. 4).

Як видно з рис. 4, величина максимальної амплітуди відхилень електрода суттєво залежить від маси гасителя й частоти вимушених коливань системи. Збільшення загальної маси гасителя від 100 кг до 400 кг знижує амплітуду коливань в 1,5–2,8 разів. Водночас при раціональній масі гасителя близько 200 кг досягається досить значне зниження амплітуди (на 46,9%) порівняно з електродотримачем без гасителя. За зменшення маси гасителя до 100 кг зниження амплітуди електрода складе 23,3%.

Для перевірки ефективності гасителя проводилась серія досліджень на лабораторному стенді у вигляді фізичної моделі, що імітує геометричні розміри електродотримача сталеплавильної печі ДСП-50Н2 в масштабі 1:10, а також основні динамічні параметри, такі як жорсткість та маса. Вимушені коливання системи електродотримача з електродом та гасителем задавались електромагнітним імпульсом. Контроль за коливаннями

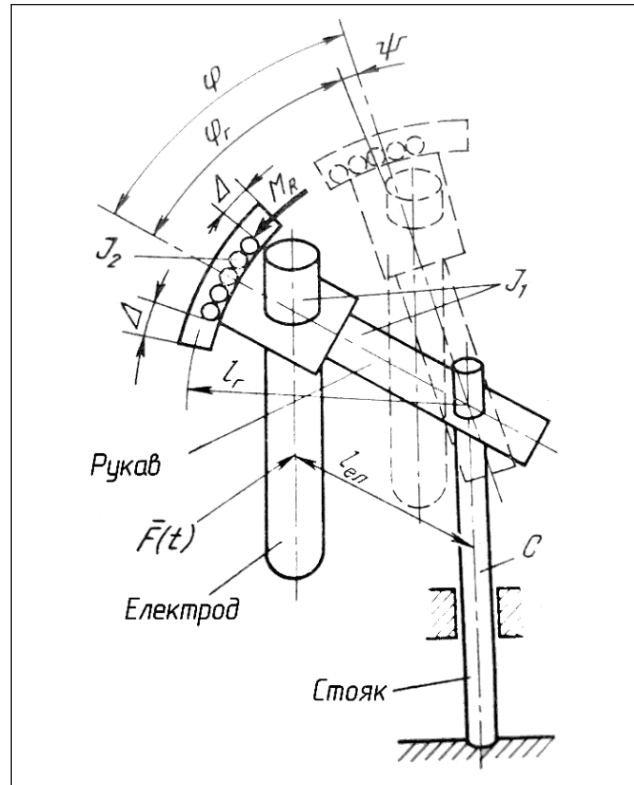


Рис. 3. Структурна схема електродотримача з гасителем ударної дії

(ϕ, ϕ_2 – узагальнені координати рухомої системи та маси гасителя, відповідно; Δ – зазор між кулями й торцевою заглушкою; ψ – кут повороту маси гасителя; l_r – відстань від осі гасителя до осі стояка; l_{el} – відстань від осі електрода до осі стояка; $F(t)$ – електродинамічна сила між електродами; M_R – реактивний момент сили взаємодії між рухомою масою куль та корпусом гасителя; J_1 – приведена розрахункова маса системи «електрод – рукав – стояк»; J_2 – момент інерції маси гасителя щодо осі стояка; C – приведена жорсткість системи електродотримача та її вузлів, а саме стояка та опорних роликів)

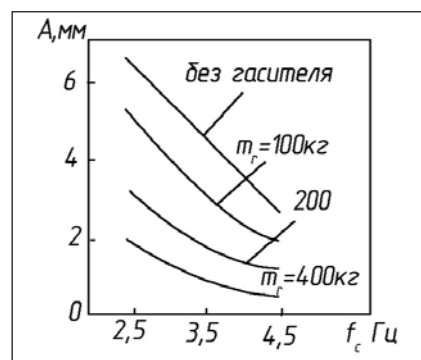


Рис. 4. Вплив параметрів гасителя на амплітуду коливань електрода

електрода й рукава проводився за допомогою тензодатчиків з одночасною фіксацією на осцилограмах. Використовувалися кулі різної фракції,

змінювалися ступінь заповнення гасителя й положення стояка та рукава щодо жорстких та пружних опорних роликів (рис. 5).

Отримано такі результати: без використання засобів захисту від коливань та жорсткого закріплення опорних роликів стояка електродотримача час затухання коливань $t_{зам}$ складає 4,9 с (рис. 5, а). За встановлення в рукаві електродотримача інерційного гасителя $t_{зам}$ зменшується, становлячи 3,15 (рис. 5,б) Найбільш ефективним є використання гасителя ударної дії. Встановлено, що за повного заповнення гасителя та наявності пружних опор час затухання коливань складає 1,2 с за початкової амплітуди 7,0 мм та частот 4–10 Гц (рис. 5,в).

Похибка розрахункових залежностей становить до 15–20%, що перебуває в межах, допустимих для інженерних розрахунків.

З урахуванням досліджень та розрахунків встановлена раціональна маса гасителя за умови, що момент інерції гасителя становить 0,1–0,2 частки

відповідного моменту маси рухомих елементів системи «електрод – рукав – стояк». Для підвищення ефективності гасителя необхідно забезпечити високу жорсткість торцевих упорів корпусу й кріплення до голівки рукава.

Висновки. Проведено теоретичні й експериментальні дослідження відомої розробки гасителя на моделі та стенді з урахуванням динамічних параметрів системи «електрод – рукав – стояк», а також величини внутрішнього зазору. Визначено допустимі маси рухомих елементів в діапазоні реальних частот вимушених коливань електродів.

З урахуванням результатів розрахунків та експериментів визначено доцільність вдосконалення конструкції гасителя. Результати досліджень використані під час модернізації сталеплавильних печей ДСП 80т і 100т. При цьому підвищена жорсткість гасителя, визначені параметри внутрішнього зазору гасителя для його оптимального налаштування.

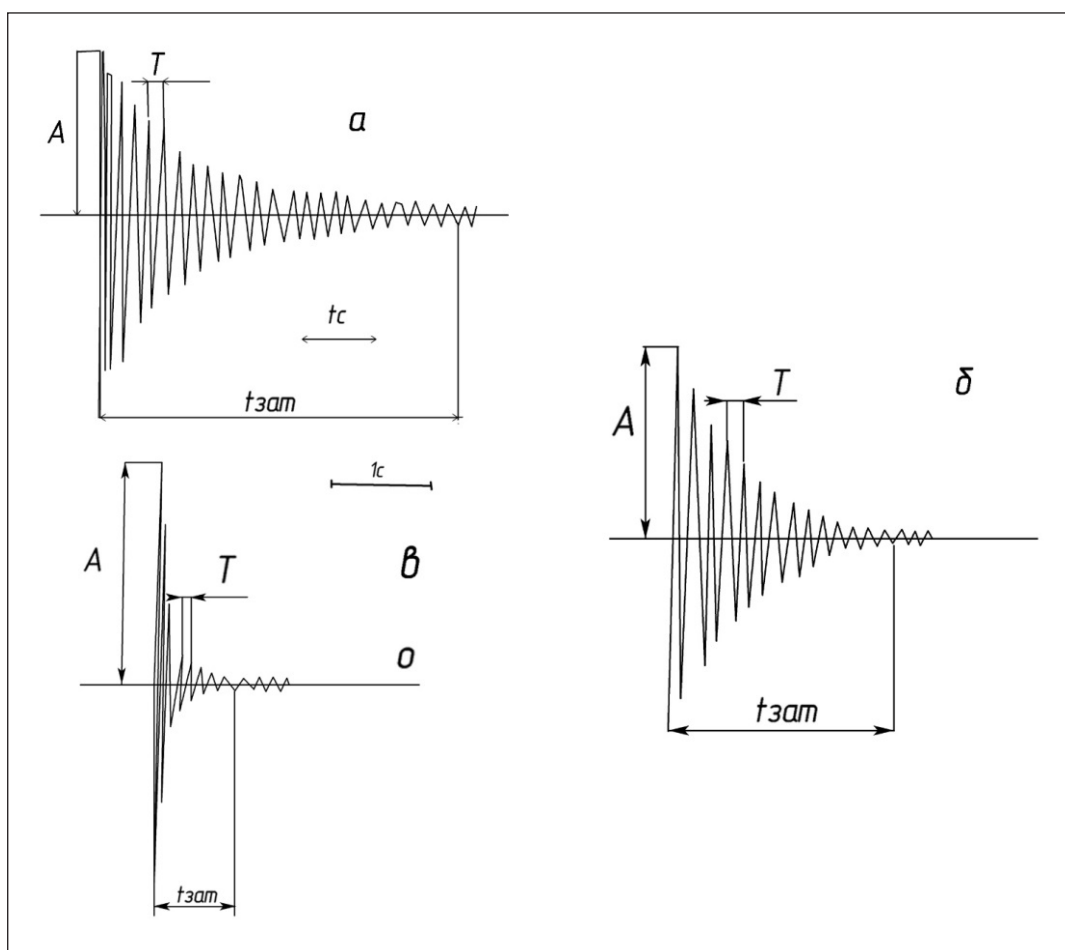


Рис. 5. Осцилограми досліджень коливань електродів різних конструкцій електродотримача (а – електродотримач із жорстким кріпленням опорних роликів; б – з інерційним гасителем; в – з гасителем ударної дії; А – максимальна амплітуда вимушених коливань, мм; Т – цикл коливань, с; $t_{зам}$ – час затухання коливань, с)

Список літератури:

1. Коваль Н.В., Абросимов В.Н., Сапко А.И. и др. А.с. SU №1346884 МКИ А1 Н05 В 7/10. Инерционная масса для гашения колебаний / заявл. 24.12.1985; опубл. 23.10.87, бюл. № 39.
2. Тарасов В.К., Резников О.Л., Лапиков И.А. А.с. SU №1758915 МКИ А1 Н05 В 7/10. Электрододержатель дуговой электропечи / заявл. 22.05.1991; опубл. 30.08.92, бюл. № 32.
3. Тарасов В.К., Резников О.Л., Жук А.Я. и др. А.с. SU №1769387 МКИ А1 Н05 В 7/10. Электрододержатель дуговой электропечи / заявл. 06.08.1992; опубл. 15.10.92, бюл. № 38.
4. Про підвищення надійності роботи електродів дугових сталеплавильних печей / М.В. Коваль, В.К. Тарасов, С.С. Пилипенко, Ю.П. Єгоров, А.О. Власов. *Металургія*. 2016. Вип. 35. С. 58–62.
5. Власов А.А., Зданевич С.В. Исследование динамической системы балансирующего электрододержателя дуговой сталеплавильной печи. *Системні технології*. 2018. Вип. 4 (117). С. 10–18.
6. Жук А.Я., Власов А.А., Буканова М.В., Туан Май Фьюк. Исследование влияния параметров механизмов перемещения электродов печей ДСП на их быстродействие. *Металургія*. 2010. Вип. 21. С. 171–176.
7. Piekio J., Maj M. Analysis of the state of stress in the connection of graphite electrodes. *Archives of foundry engineering*. 2015. Vol. 15. Special Is. 1. P. 85–88.
8. Тарасов В.К., Резников О.Л., Беленко В.Н., Жук А.Я. Расчет виброгасителя ударного действия для ДСП. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1992. № 5. С. 32–35.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ СНИЖЕНИЯ ПОЛОМОК ГРАФИТОВЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

В статье рассмотрены проблемы работы действующих сталеплавильных электродуговых печей, связанные с поломками графитовых электродов. Проанализированы известные меры и конструкции для снижения уровня вибрации электрододержателей. Усовершенствован компактный гаситель колебаний динамического типа. Проведены теоретические исследования гасителя на математической и физической модели электрододержателя, выбраны рациональные параметры устройства. Достигнуто снижение амплитуды колебаний электродов до допустимых границ.

Ключевые слова: дуговая печь, электрод, поломки, гаситель, инерционная масса.

IMPROVEMENT OF SYSTEM TO DECREASE BREAKAGES OF THE GRAPHITE ELECTRODES OF ARC STEEL-SMELTING FURNACES

In the article the problems of operating steel-smelting arc furnaces related to breakages of graphite electrodes are considered. The well-known facilities and constructions to decrease vibration of electrode holders are analyzed. The compact vibration damper of dynamic type was improved. Theoretical and experimental studies of the damper on a mathematical and physical model were conducted and the rational parameters of device were chosen. The decrease of electrode vibration amplitude to the acceptable level was achieved.

Key words: arc furnace, electrode, breakage, damper, inertia mass.

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 661.664.1:66.094.3.097:66.097.3

Авіна С.І.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Гринь Г.І.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Дейнека Д.М.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

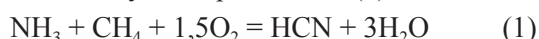
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СКЛАДУ ГАЗОВОЇ СУМІШІ НА СИНТЕЗ ЦІАНІСТОГО ВОДНЮ

У статті представлені основні результати досліджень щодо впливу складу вихідної газової суміші на утворення ціаністого водню окиснювальним амонізом метану. Встановлено, що за пониженого вмісту одного з реагентів у початковій газовій суміші після реактора синтезу ціаністого водню в контактному газі присутня значна кількість компонентів суміші, що не прореагували. Виявлено, що ступінь перетворення реагентів на ціаністий водень залежить не тільки від початкової концентрації, а також і від їх співвідношення у вихідній суміші. Доведено, що максимальний ступінь перетворення аміаку та метану досягається за співвідношення компонентів повітря / (аміак + метан) в реакційній суміші, що дорівнює 3,1-3,2. Представлені дані впливу одного із компонентів вихідної реакційної суміші, а саме водню на вихід цільового продукту. Встановлено, що оптимальне значення кількості водню у вихідній газовій суміші має бути не більше 3,5%. Отримані результати досліджень можна використовувати на сучасних хімічних підприємствах для оптимізації процесу отримання ціаністого водню.

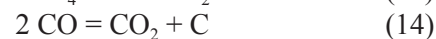
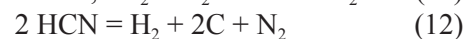
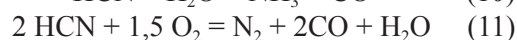
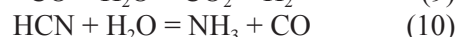
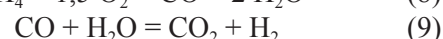
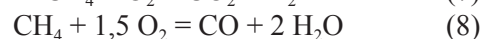
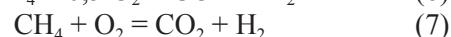
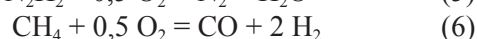
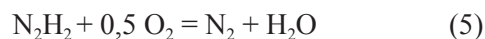
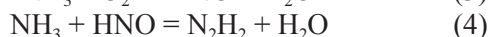
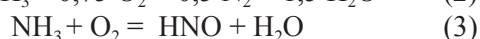
Ключові слова: ціаністий водень, синильна кислота, каталізатор, водень, синтез.

Постановка проблеми. Ціаністий водень є одним із найважливіших напівпродуктів, що використовуються для виробництва ряду хімічних речовин: акрилонітрилу, метіоніну, гліцину, хлорціану, ціаніду натрію, ціаніду калію та інших речовин [1, с. 1534 ; 2, с. 4; 3, с. 11; 4, с. 232; 5; 6].

Найпоширенішим промисловим способом отримання ціаністого водню є каталітичне окиснення аміаку, метану і кисню на платиновому каталізаторі під час проведення процесу синтезу за високих температур [1, с. 1524; 7, с. 104; 8, с. 334]. Реакція протікає без підведення тепла ззовні і описується наступним рівнянням (1):



Основна реакція синтезу ціаністого водню супроводжується рядом побічних реакцій (2–15), що приводить до зменшення виходу основного продукту та забруднення реакційного газу після реактора синтезу:



Внаслідок протікання побічних реакцій (2–15) збільшується витрата аміаку і метану, а також в контактних газах, крім ціаністого водню і вихідних газів, що не прореагували (метану, аміаку, кисню, азоту), містяться оксид вуглецю (II), оксид вуглецю (IV), дігідрид діазоту, пари води, вуглець і водень. Особливо не бажаним є вуглець, що утворюється в процесі розкладання нестійких в умовах синтезу вуглеводнів за реакціями (13–14) [9, с. 28].

Як видно із реакції отримання ціаністого водню (1), мольні співвідношення компонентів

початкової суміші повинні бути 1:1:1,5. Однак на практиці це відношення не дотримується і може коливатися в різних межах. Тому дослідження впливу початкової газової суміші на синтез ціаністого водню є важливим і актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільша кількість публікацій з отримання ціаністого водню (HCN) методом Андрусова припадає на 70–80 роки ХХ століття, коли HCN застосовувався для отримання акрилонітрилу. У наступні роки публікації з отримання ціаністого водню різко скоротилися. За останні 10–15 років з кінетики і механізму окиснювального амонілізу метану практично немає, а що стосується впливу водню на отримання ціаністого водню в літературних джерелах фактично відсутні.

У роботі вказується [10] на можливість досягнення виходу ціаністого водню під час співвідношення парціальних тисків метан/аміак як 1,6:2, з іншого боку автор вказує на неможливість досягнення 46% виходу ціаністого водню при метан/аміак = 1,5–2,0 моль/моль.

Авторами роботи [11, с. 2303] встановлено, що максимальний вихід ціаністого водню досягається за умови початкового складу, близького до стехіометричного (аміак – 10,92% об., метан – 10,92% об., решта – повітря), при цьому вихід продукту досягає 68%.

Якщо розглянути цільову реакцію отримання ціаністого водню за рівнянням (1), можна зробити висновок про відсутність будь-якого впливу водню на його вихід. Однак автори [12, с. 1766] зазначили, що водень негативно впливає на синтез HCN. Це зумовлено тим, що водень взаємодіє з платиною, що є основою каталізатора, утворюючи легкосублімовані гідриди, випаровування яких приводить до беззворотних втрат платини, а також зменшується механічна міцність платинових сіток внаслідок впливу гідродинамічних характеристик газового потоку.

Наявність оптимальної концентрації водню в контактному газі виробництва ціаністого водню описано в роботі [13]. Запропоновано проводити синтез за мольного співвідношення $H_2:CH_4 = 0,03-0,2$, причому оптимальний вихід HCN становить 69–72%. Максимальний вихід ціаністого водню може бути отримано за мольного співвідношення $H_2:CH_4 = 0,1$ внаслідок варіювання інших параметрів синтезу в широкому діапазоні.

Авторами в роботі [14, с. 15] встановлено, що під час додавання невеликих кількостей водню до початкової газової суміші за співвідношення $(CH_4+NH_3)/O_2=2$ збільшувалася ступінь пере-

творення аміаку до 82%, тоді як селективність за метаном майже не змінювалася. Однак збільшення виходу ціаністого водню з додаванням водню супроводжувалося зменшенням конверсії аміаку. Тому додавання надлишкової кількості водню в початкову газову суміш буде корисна тільки тоді, коли аміак відділяють від потоку цільового продукту і повертають назад до реактора.

Таким чином, аналіз літературних джерел показав, що сьогодні недостатньо вивчено процес отримання ціаністого водню окиснювальним амонізізом метану на платиноїдному каталізаторі, а саме вплив компонентів початкової газової суміші. Тому ці дослідження з підвищення виходу цільового продукту є важливим науково-технічним завданням.

Постановка завдання. Мета дослідження полягала у встановленні впливу співвідношення початкової газової суміші та концентрації водню на вихід ціаністого водню.

Для досягнення цієї мети було поставлено наступне завдання: встановити залежність впливу співвідношення компонентів газової суміші на вихід ціаністого водню; вивчити вплив водню під час додавання його у вихідну суміш на вихід ціаністого водню.

Виклад основного матеріалу дослідження. З практики роботи реального виробництва відомо, що відсутній будь-який один технологічний параметр, зміна якого визначає ефективність синтезу ціаністого водню в цілому. Це дозволяє припустити, що процес окиснювального амонілізу метану можна розглядати як складну систему, яка характеризується впливом всієї сукупності технологічних параметрів на вихід ціаністого водню.

Дослідження впливу складу початкової газової суміші на утворення ціаністого водню проводились в лабораторному проточному реакторі на 8 в'язаних платиноїдних сітках, наступного складу, % мас.: Pt–90, Rh–10. Температура процесу коливалась в межах 900–1000 °С.

Дослідження впливу співвідношення компонентів реакційної суміші (метан, аміак, повітря) на ступінь перетворення аміаку на ціаністий водень показано на рис. 1. Із аналізу даних видно, що за збільшення співвідношення повітря / (аміак+метан) до 3,15–3,25 відбувається підвищення ступеня перетворення аміаку на ціаністий водень до 68–72%.

Дослідження впливу співвідношення компонентів реакційної суміші на ступінь перетворення метану показано на рисунку 2.

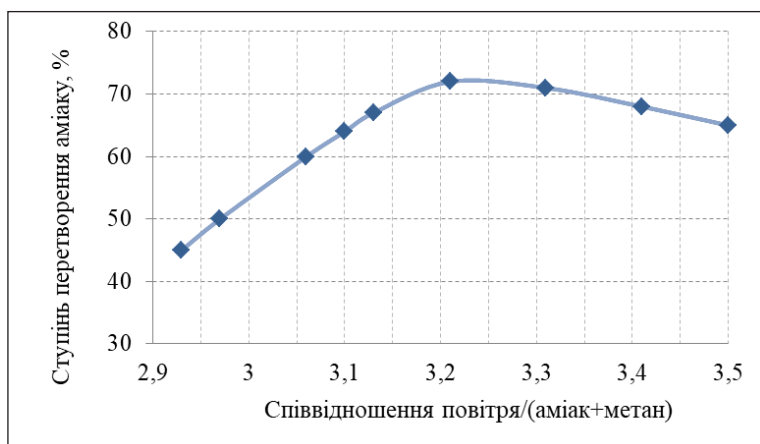


Рис. 1. Залежність ступеня перетворення аміаку від співвідношення повітря / (аміак+метан) в реакційній суміші

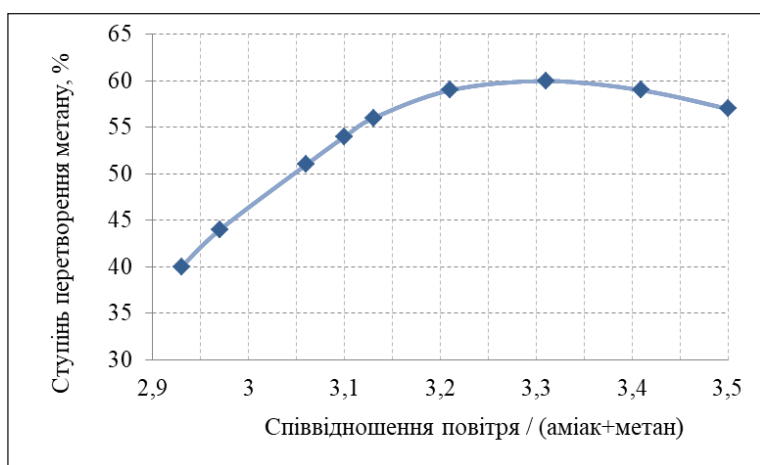


Рис. 2. Залежність ступеня перетворення метану від співвідношення повітря / (аміак+метан) в реакційній суміші

Графічний аналіз даних показує, що за співвідношення компонентів повітря / (аміак+метан) в реакційній суміші, що дорівнює 3,11, ступінь перетворення метану складає 54%, а за збільшення співвідношення до 3,15–3,25 ступінь перетворення метану максимальний та становить 60%.

Суттєве збільшення концентрації одного із реагентів початкової суміші є недоцільним, тому що починається проросок метану, який не прореагував, це приводить до утворення вуглецю (див. реакцію 13–14) на поверхні платиноїдного катализатора. У ході цього платинові сітки завуглецьовуються або блокуються вуглецем і тим самим падає їх селективність. Крім того, за зниженого вмісту одного із реагентів у початковій газовій суміші присутня більша кількість небажаних продуктів у отриманому газі. Таким чином, ступінь перетворення реагентів на ціаністий водень залежить не тільки від початкової концентрації, а також і від їхнього співвідношення.

Аналіз отриманих даних щодо ступеня перетворення початкових компонентів суміші на цільовий продукт вказує на те, що визначити кінетичні характеристики утворення ціаністого водню можна буде тільки в тому разі, якщо вдасться розділити участь одного і того ж компонента в декількох послідовних і паралельних реакціях.

Нами проведені дослідження щодо впливу додаткової кількості водню у початковій газовій суміші. Для виявлення впливу вмісту водню в реакційному газі на вихід HCN були проведені експерименти, в яких до початкової суміші додавали водень в кількості 2–5% об. Ці дані представлені на рисунку 3.

Аналіз даних (рис. 3) щодо впливу водню на ступінь утворення ціаністого водню показав, що максимальний вихід ціаністого водню (приблизно 83%) досягається за вмісту водню в початковій газовій суміші не більше 3,5% об. Зниження виходу ціаністого водню зі збільшенням концентрації водню можна пояснити високою швидкістю реакції останнього з киснем, внаслідок чого збільшується концентрація парів води в газовій суміші. Додавання водню збільшує селективність ціаністого водню за рахунок зниження окиснення аміаку і метану, що забезпечує

більш повне протікання реакції отримання ціаністого водню.

Проведені дослідження щодо впливу співвідношення водень / метан у реакційній суміші на вихід ціаністого водню. Отримані експериментальні дані впливу водню на вихід HCN наведено на рис. 4.

З рисунку 4 видно, що оптимальний вміст водню становить 0,25–0,3 моль на 1 моль метану в вихідній реакційній суміші. Однак зниження цього показника до 0,23 приводить до зменшення виходу ціаністого водню до 66%, а збільшення співвідношення до 0,37 приводить до зниження виходу ціаністого водню до 60%, що є недоцільно з точки зору економіки.

Позитивний вплив водню на кінетику утворення ціаністого водню, на нашу думку, пояснюється гальмуванням реакцій взаємодії метану з водою і метану з киснем, а також інших реакцій, за яких утворюється водень. Зміщення цих вза-

емодій вліво призводить до того, що велика частина метану бере участь в утворенні ціаністого водню. Однак забезпечення помітного надлишку водню можливо лише під час роботи на газі, збагаченому аміаком, оскільки водень істотно розширює зону вибухо-небезпечності метан-аміак-повітряної суміші.

Висновки. Таким чином, у результаті проведених досліджень було встановлено, що співвідношення компонентів повітря / (аміак+метан) повинно бути 3,1–3,2, при цьому вихід цільового продукту ціаністого водню може досягати 72%. Проведені дослідження впливу вмісту водню у вихідній газовій суміші на вихід ціаністого водню показали, що максимальний вихід ціаністого водню досягається 83% за умови концентрації водню 3,0% об. Установлено, що водень за механізмом не впливає на утворення ціаністого водню, але цей компонент дозволяє частково зменшити термоліз метану і тим самим збільшити його частку, що йде на утворення ціаністого водню. Це знижує ступінь заугльцювання поверхні платиноїдного каталізатора, що сприяє збільшенню терміну його роботи і підвищує вихід цільового продукту.

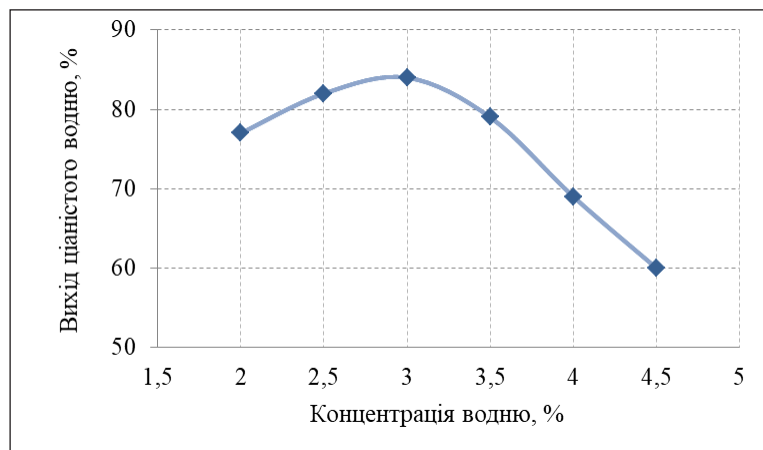


Рис. 3. Залежність виходу ціаністого водню від концентрації водню в реакційній суміші

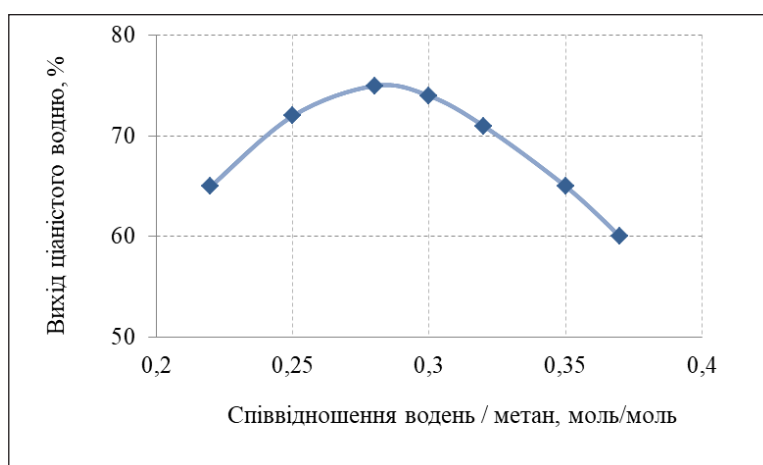


Рис. 4. Залежність виходу ціаністого водню від співвідношення водень / метан в реакційній суміші

Список літератури:

1. Позин М.Е. Технология минеральных солей (удобрений, пестицидов, промышленных солей, окислов и кислот). Ленинград, 1974. 768 с.
2. Латышова С.Е., Рудакова Т.П. Изучение процесса получения цианистого натрия как промежуточного продукта в синтезе метионина. *Молодой учёный*. 2016. № 23 (127). ч. 1. С. 4–6.
3. Обзор рынка цианида натрия в СНГ. Москва, 2017. 115 с.
4. Авина С.И. Пути повышения качества цианистого натрия. *Хімічні проблеми сьогодення (ХПС-2018)*: збірник тез доповідей I Міжнародної (XI Української) наукової конференції студентів, аспірантів і молодих учених (Вінниця 27–29 березня 2018 р.). Вінниця, 2018. С. 232.
5. Способ получения гранулированного цианида щелочного металла и полученный этим способом гранулят цианида щелочного металла: пат. 2201895 Россия. № 98101812/12, заявл. 10.01.2000; опубл. 10.04.2003, бюл. № 10.
6. Process for producing hydrocyanic: пат. US 8,574,530 B2. № 12/865,873; заявл. 20.03.2009; опубл. 05.11.2013.
7. Бобков С.С., Смирнов С.К. Синильная кислота. Москва, 1970. 176 с.
8. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л. Технологія зв'язаного азоту. / Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, О.Я. ЛОБОЙКО, Г.І. ГРИНЬ та ін.; под. ред. О.Я. Лобойко. Харьков, 2007. 536 с.
9. Авина С.І., Гринь Г.І., Школьнікова Т.В. Дослідження впливу складу вихідної газової суміші на утворення ціаністого водню. *Вісник НТУ «ХП»*, Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. Харків : НТУ «ХП». 2018. № 39 (1315). С. 27–30.
10. Получение синильной кислоты : пат. 296565 Япония : 15M31 заявл. 18.04.53; опубл. 15.10.54.

11. Гринь Г.И., Трусов Н.В. Влияние состава исходной газовой смеси и нагрузки по ней на выход цианистого водорода, образующегося при окислительном аммонолизе метана *Журнал прикладной химии*. 1992. Т. 65. № 10. С. 230–2305.
12. Ададунов И.Е. Замечание по поводу статьи Н.А. Фигуровского «К вопросу о причинах потерь платиновой сетки». *Журнал прикладной химии*. 1936. Т.9. №. 10. С. 1766–1769.
13. Получение синильной кислоты : пат. 4942799 Япония : С 01 В 3/02 заявл. 23.01.66; опубл. 20.03.67.
14. Bodke A.S., Olschki D.A., Schmidt L.D. Hydrogen addition to the Andrussow process for HCN synthesis. *Applied Catalysis A: General*. 2000. Vol. 201. P. 13–22

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ГАЗОВОЙ СМЕСИ НА СИНТЕЗ ЦИАНИСТОГО ВОДОРОДА

В статье представлены основные результаты исследований по влиянию состава исходной газовой смеси на образование цианистого водорода окислительным аммонолизом метана. Установлено, что при пониженном содержании одного из реагентов в начальной газовой смеси после реактора синтеза цианистого водорода в контактном газе присутствует значительное количество непрореагировавших компонентов смеси. Выявлено, что степень превращения реагентов в цианистый водород зависит не только от начальной концентрации, а также и от их соотношения в исходной смеси. Доказано, что максимальная степень превращения аммиака и метана достигается при соотношении компонентов воздух / (аммиак+метан) в реакционной смеси, равном 3,1–3,2. Представлены данные по влиянию одного из компонентов исходной реакционной смеси, а именно водорода на выход целевого продукта. Установлено, что оптимальное значение количества водорода в исходной газовой смеси должно быть не более 3,5%. Полученные результаты исследований можно использовать на современных химических предприятиях для оптимизации процесса получения цианистого водорода.

Ключевые слова: цианистый водород, синильная кислота, катализатор, водород, синтез.

RESEARCHES OF INFLUENCE OF COMPOSITION OF THE GAS MIXTURE ON THE SYNTHESIS OF CYANIDE HYDROGEN

In the article the basic results of researches are presented on influence of composition of initial gas mixture on formation of hydrogen cyanide by the oxidative ammonolysis of methane. It is established that at low content of one of the reactants in the initial gas mixture after the reactor for the synthesis of hydrogen cyanide in the contact gas has a significant number of unreacted components of the mixture. It was revealed that the degree of conversion of reagents into hydrogen cyanide depends not only on the initial concentration, but also on their ratio in the initial mixture. It is proved that the maximum degree of conversion of ammonia and methane is achieved when the ratio of air / (ammonia + methane) in the reaction mixture is 3.1-3.2. The data on the effect of one of the components of the original reaction mixture, namely of hydrogen on the yield of the target product. It is established that the optimal value of the amount of hydrogen in the source gas mixture should be not more than 3.5%. The results obtained can be used in modern chemical enterprises to optimize the process of obtaining hydrogen cyanide.

Key words: hydrogen cyanide, hydrocyanic acid, catalyst, hydrogen, synthesis.

УДК 615.1:547

Гамада В.Р.

Національний університет «Львівська політехніка»

Колб Ю.І.

Національний університет «Львівська політехніка»

Конечна Р.Т.

Національний університет «Львівська політехніка»

Паращин Ж.Д.

Національний університет «Львівська політехніка»

Новіков В.П.

Національний університет «Львівська політехніка»

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ *IN SILICO* У ДОСЛІДЖЕННЯХ *ADONIS VERNALIS*

Рослини – це цінне джерело біологічно активних речовин, проте ще недостатньо вивчене. Початковим етапом вивчення та пошуку біологічно активних речовин є використання методів in silico. У статті проаналізовано та досліджено окремі біологічно активні речовини, що входять до складу Adonis vernalis. За допомогою пакетів програм PASS та Molinspiration отримано дані щодо прогнозованої біологічної активності біологічно активних речовин Adonis vernalis, а також визначено можливі побічні ефекти. Встановлено, що Adonis vernalis є перспективною рослиною для подальших досліджень.

Ключові слова: Ranunculaceae, Adonis vernalis, біологічно активні речовини, лікоподібні характеристики, параметри Лінінського, in silico, комп'ютерний скринінг, PASS, Molinspiration.

Постановка проблеми. Лікарські рослини – це джерело біологічно активних речовин. Лікарську рослинну сировину застосовують у медичній, фармацевтичній, косметологічній та ветеринарній практиках. Лікарські рослини – джерело отримання лікувальних і профілактичних засобів. Активність їх зумовлена комплексом біологічно активних речовин. Лікарські властивості перевірені багатовіковим досвідом людей.

Переваги рослинних препаратів над синтетичними препаратами: фізіологічна близькість до організму; складові частини рослин за хімічною структурою подібні до фізіологічно активних речовин організму і виявляють більш природну дію, ніж синтетичні ліки; лікарські рослини нормалізують функцію окремих органів, позитивно впливають на обмін речовин в організмі, рідко викликають алергічні реакції на відміну від синтетичних препаратів; ліки рослинного походження дешевші за синтетичні, можуть замінити їх і знизити собівартість.

Сьогодні майже 1/3 лікарських препаратів отримують із лікарських рослин, а фітопрепарати посідають важливе місце у фармацевтичній та

медичній практиці. Можливості лікарських рослин не використовуються повною мірою. Основними проблемами впровадження лікарських рослин у практику є недостатній рівень вивчення біологічно активних речовин, їх екстракція та очищення від баластних речовин [3].

Протягом останніх десятиліть зростає попит на лікувально-профілактичні засоби природного походження. За даними Food Agricultural Organization (Всесвітньої продовольчої організації при ООН), на кінець минулого століття обсяг продажу лікарських рослин перевищив 1 млрд. дол. США. Сучасні тенденції розвитку вітчизняного ринку лікарських рослин свідчать про його перспективність [8].

Ranunculaceae – це велика родина квіткових рослин, що складається із 50–65 родів, за оцінками, близько 1500–2500 видів лікарських рослин [5].

Об'єктом наших досліджень є вид *Adonis vernalis*, представник родини *Ranunculaceae*. Рослина є лікарською та є джерелом цінних біологічно активних речовин.

Використання методів in silico є початковим та дуже інформативним етапом дослідження

лікарських рослин. У роботі використано пакети даних програм PASS [12] та Molinspiration Cheminformatics server [11].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. *Adonis vernalis* – багаторічна рослина родини *Ranunculaceae*. Як лікарська рослинна сировина використовується трава, що містить: серцеві глікозиди (адонітоксин, цимарин, К-строфантин-β, ацетиладонітоксин, адонітоксол та вернадигін); геніни (β-строфантиндин, строфадогенін, ацетилстрофадогенін та інші), флавоноїди (адоніверніт, вітексин, гомоадоніверніт, фітостерин, спирт адоніт тощо). Офіційна медицина використовує як сировину для галенових препаратів [4]. Проте багатовіковий досвід застосування етномедициною показує, що фармакологічні властивості ще вивчено недостатньо. Комплекс біологічно активних речовин *Adonis vernalis* має ширші можливості до застосування.

Спроби введення *Adonis vernalis* у культуру як лікарської сировини проводяться у Німеччині, Угорщині, Польщі, Болгарії та Україні [9].

О.М. Вінзар та ін. говорять, що *Adonis vernalis* – найцінніша лікарська рослина, що цікава в систематичному, біологічному та еволюційному сенсі [2].

В.В. Зажарський описує сприятливу дію етанольного екстракту рослини на мікроорганізми роду *Staphylococcus*, а також рекомендує рослинну настоянку для боротьби з полірезистентними штамами роду *Staphylococcus* [6].

В.В. Вівсяник та ін. вказують, що *Adonis vernalis* використовується у лікарському засобі «Кардіолін», що є комплексним рослинним препаратом, у якому до складу 1 мл крапель входять настойка з лікарської рослинної сировини (1:12,5), трави горицвіту весняного, плоди ялівцю звичайного, квіти арніки та листя м'яти [1].

Постановка завдання. Метою роботи є доекспериментальне дослідження потенціалу біологічно активних речовин *Adonis Vernalis*, використовуючи комп'ютерні програми PASS та Molinspiration Cheminformatics server з установленням перспектив подальших фітохімічних та фармакологічних досліджень.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для проведення віртуального скринінгу нами вибрано сполуки: вітексин, цимарин, адонітоксин, вернадигін, строфантиндин, строфідоенін, адоніверніт, фітостерин, орієнтин, ізоорієнтин.

Для оцінки сполук на ефективність на першому етапі досліджень використано пакет програми Molinspiration Cheminformatics server, яка

характеризує їх за правилами Ліпінського, або «лікоподібність» (рис. 1).



Рис. 1. Критерії Ліпінського («лікоподібність»)

Окрім основних п'яти критеріїв, сполуки-кандидати мають відповідати таким значенням:

- логарифм розчинності у воді (г/мл) при $pH=7,4$ ($\log Sw$, не менше -5);
- кількість ароматичних кілець (не більше 4);
- частка речовини, яка проникає з шлунково-кишкового тракту в кровообіг унаслідок пасивної дифузії і без врахування метаболічної градації (FA, не менше 75%) [7].

Завдяки таким критеріям уже на початку роботи зі сполуками-кандидатами можна відбракувати до 20% структур як не перспективні у розробленні ліків [10]. Такі критерії характеризують структуру сполуки, її властивості, наприклад токсичність, метаболізм, адсорбція, виділення та ін. [7]. Для проведення оцінки вибраних біологічно активних речовин було використано пакет програми Molinspiration Cheminformatics server [11].

Сполуки строфантиндин та строфідогенін відповідають усім правилам «лікоподібності», тому їх можна використовувати для розроблення складу нових ефективних лікарських препаратів. Інші досліджувані біологічно активні речовини не відповідають правилам «лікоподібності», але є актуальними для подальшого дослідження.

Наступним етапом роботи було дослідження сполук у програмі PASS (Prediction of Activity Spectra for Substances), що передбачає понад 3 500 видів біологічної активності, включаючи фармакологічні ефекти, механізми дії, токсичні та несприятливі ефекти, взаємодію з метаболічними ферментами та транспортними засобами, вплив на експресію генів та ін. Прогнозування базується на аналізі структурних зв'язків активності

Критерії Ліпінського досліджуваних біологічно активних речовин

№	Назва сполуки	Log P	Молекулярна полярна поверхня, Å ²	Кількість водневих атомів	Молекулярна маса	Кількість акцепторів водневого зв'язку (атоми O та N)	Кількість донорів водневого зв'язку (групи NH та OH)	Кількість зв'язків, що обертаються	Молекулярний б'єм, Å ³
1	Вітексин	0,52	181,04	31	432,38	10	7	3	355,20
2	Цимарин	1,42	131,76	39	548,67	9	3	5	508,10
3	Адонітоксин	0,14	162,98	39	550,64	10	5	4	498,96
4	Вернадигін	0,50	151,99	40	564,67	10	4	5	516,14
5	Строфантин	0,80	104,06	29	404,50	6	3	2	374,75
6	Строфідогенін	-0,35	124,29	29	406,48	7	4	2	366,56
7	Адоніверніт	-1,25	260,19	41	580,50	15	10	5	470,50
8	Фітостерин	8,74	20,23	31	428,75	1	1	6	472,75
9	Орієнтин	0,03	201,27	32	448,38	11	8	3	363,22
10	Ізоорієнтин	0,03	201,27	32	448,38	11	8	3	363,22

більше ніж 250 тис. біологічно активних речовин. Середня точність прогнозу, оцінена в процедурі крос-валідації, становить близько 95% [12].

Під час проведення оцінки відібрано активності перспективні у разі зовнішнього застосування з показником P_a більше ніж 0,7 (табл. 2).

Отже, у результаті проведеного віртуального скринінгу програмою PASS встановлено, що:

- вітексин, адоніверніт, орієнтин проявили високу здатність до поглинання вільних радикалів;
- вітексин, орієнтин, ізоорієнтин проявили здатність до кардіопротектування;
- вітексин, адоніверніт, орієнтин, ізоорієнтин проявили високу гепатопротекторну активність;
- цимарин, адонітоксин, вернадигін, строфантин, строфідогенін проявили високу кардіотонічну активність;
- ізоорієнтин, адоніверніт, вернадигін, адонітоксин, цимарин проявили високу хеміпрофілактичну здатність;
- фітостерин проявив високу активність як антагоніст холестерину;
- цимарин, адонітоксин проявили високу знеболіючу активність;
- цимарин, адонітоксин, вернадигін, адоніверніт проявили високу протипухлинну активність;

– фітостерин проявив високу антигіперхолестеринемічну активність.

Одержані результати досліджень за допомогою пакетних даних програм PASS (Prediction of Activity Spectra for Substances) та Molinspiration Cheminformatics server указують на доцільність подальшого дослідження біологічно активних речовин *Adonis vernalis* для створення на її основі нових лікарських засобів.

Висновки. Проведено віртуальний скринінг та отримано прогнози величин активності біологічно активних сполук *Adonis vernalis*.

Досліджувані біологічно активні речовини показали високу кардіопротекторну, гепатопротекторну, хеміпрофілактичну, кардіотонічну, протипухлинну та інші активності.

Розраховано набір молекулярних дескрипторів, у результаті виявлено сполуки строфантин та строфідогенін, які не мають жодних відхилень від «правил Ліпінського» та вимагають більш детальних досліджень.

Отримані результати досліджень вказують на доцільність подальшого фітохімічного та фармакологічного вивчення біологічно активних сполук *Adonis vernalis* із подальшою перспективою створення на їх основі нових безпечних лікарських засобів.

Результати прогнозу величин активності досліджуваних сполук

№ 1	Досліджувана сполука 2	P_n 3	Активність 4
1	Вітексин	0,950	Кардіопротектор
		0,948	Поглинач вільних радикалів
		0,920	Гепатопротектор
		0,869	Цитостатична
		0,866	Антиканцерогенний
		0,864	Хеміопрофілактичний
		0,852	Вазопротектор
		0,842	Радіопротектор
		0,826	Антигеморрагічний
		0,820	Антимутагенний
		0,815	Антиоксидант
		0,812	Лікування капілярної крихкості
		0,812	Лікування печінкових розладів
		0,798	Антигіперхолестеринемік
		0,781	Антидіабетичний
		0,753	Противірусний (герпес)
		0,740	Противірусний (грип)
		0,736	Агоніст апоптозу
0,723	Лікування поліферативних захворювань		
0,721	Протигрибковий		
0,718	Проносний		
2	Цимарин	0,968	Кардіотонічний
		0,922	Знеболюючий
		0,918	Протипухлинний
		0,910	Хеміопрофілактичний
		0,882	Лікування поліферативних захворювань
		0,815	Агоніст апоптозу
		0,785	Протипухлинна (рак легенів)
		0,780	Протипухлинна (рак молочної залози)
0,742	Імунодепресант		
3	Адонітоксин	0,959	Хеміопрофілактика
		0,937	Кардіотонічний
		0,918	Протипухлинна
		0,902	Знеболюючий
		0,900	Дихальний аналептик
		0,878	Лікування поліферативних захворювань
		0,844	Аналептик
		0,839	Протипухлинна (рак легенів)
		0,833	Агоніст апоптозу
		0,798	Протипухлинна (рак молочної залози)
		0,742	Лікування деменції
		0,730	Протипухлинний (колоректальний рак)
0,726	Протипухлинний (рак товстої кишки)		
0,702	Протигрибковий		
4	Вернадигін	0,973	Кардіотонічний
		0,919	Протипухлинна
		0,918	Хеміопрофілактика
		0,860	Лікування поліферативних захворювань
		0,839	Знеболюючий
		0,800	Протипухлинна (рак легенів)
		0,795	Протипухлинна (рак молочної залози)
		0,787	Агоніст апоптозу
0,715	Імунодепресант		
5	Строфантин	0,960	Кардіотонічний
		0,824	Знеболюючий
		0,818	Протипухлинна
		0,775	Протипухлинна (рак молочної залози)
		0,754	Протипухлинна (рак легенів)
		0,746	Агоніст апоптозу

1	2	3	4
6	Строфідогенін	0,956	Кардіотонічний
		0,810	Протипухлинний
		0,795	Агоніст апоптозу
		0,769	Протипухлинна (рак молочної залози)
		0,752	Протипухлинна (рак легенів)
7	Адоніверніт	0,981	Поглинач вільних радикалів
		0,973	Гепатопротектор
		0,956	Хемопротектор
		0,938	Антиканцерогенний
		0,890	Кардіопротектор
		0,886	Лікування поліферативних захворювань
		0,887	Цитостатика
		0,875	Антигіперхолестеринемік
		0,872	Вазопротектор
		0,851	Протипухлинна
		0,847	Антипротозойний (Leishmania)
		0,844	Антиоксидант
		0,819	Радіопротектор
		0,802	Протигрибковий
		0,801	Лікування поліферативних захворювань
		0,790	Лікування печінкових розладів
		0,777	Антидіабетичний
		0,774	Противірусний (герпес)
		0,742	Підсолонджувач
8	Фітостерин	0,977	Антигіперхолестеринемік
		0,957	Анагоніст холестерину
		0,933	Гіполінемічний
		0,881	Знеболюючий
		0,858	Лікування аденоматозного поліпозу
		0,852	Хемопротектор
		0,849	Дихальний аналептик
		0,815	Гепатопротектор
		0,804	Лікування поліферативних захворювань
		0,796	Протицеземний
		0,782	Антигіперліпопротеїнемічний
		0,762	Антиспушний
		0,762	Імунодепресант
		0,758	Дерматологічний
		0,717	Лікування кісткових захворювань
0,708	Лікування розладів простати		
0,704	Антиостеопоротичний		
9	Орієнтин	0,955	Поглинач вільних радикалів
		0,952	Кардіопротектор
		0,927	Гепатопротектор
		0,884	Вазопротектор
		0,881	Хемопротектор
		0,875	Цитостатика
		0,872	Антиканцерогенний
		0,842	Радіопротектор
		0,841	Протипухлинний
		0,835	Антимутагенний
		0,832	Антигеморрагічний
		0,826	Антиоксидант
		0,824	Лікування капілярної крихкості
		0,826	Антиоксидант
		0,812	Лікування печінкових розладів
		0,791	Антигіперхолестеринемік
		0,772	Антидіабетичний
		0,760	Агоніст апоптозу
		0,749	Противірусний (герпес)
		0,745	Противірусний (грип)
		0,731	Лікування поліферативних захворювань
		0,719	Проносний
		0,714	Протигрибковий
		0,709	Гемостатичний

1	2	3	4
10	Ізоорієнтин	0,963	Кардіопротектор
		0,913	Гепатопротектор
		0,903	Хемопротектор
		0,890	Цитостатика
		0,877	Вазопротектор
		0,871	Поглинач вільних радикалів
		0,863	Антиканцерогенний
		0,835	Радіопротектор
		0,821	Антигеморрагічний
		0,815	Антиоксидант
		0,813	Антимутагенний
		0,811	Лікування капілярних крихкості
		0,804	Протипухлинний
		0,801	Антидіабетичний
		0,781	Проносний
		0,758	Лікування печінкових розладів
		0,731	Агоніст апоптозу
		0,725	Противірусний (герпес)
0,709	Противірусний (грип)		
0,705	Антипротозойний (Leishmania)		

Список літератури:

- Деякі патогенетичні механізми ефективності застосування кардіоліну у хворих на ІХС із супутньою патологією ЦД / В.В. Вівсяник та ін. *Young*. 2017. № 43.3. URL: <http://molodyvcheny.in.ua/files/journal/2017/3/18.pdf> (дата звернення: 24.03.2019).
- Вінзар О.М., Романюк В.В. Популяційні особливості *Adonis vernalis* у Прут-Дністровському межиріччі чернівецької області. Організаційний комітет конференції. 2018, 35. (дата звернення: 23.03.2019).
- Гальчинська О.К., Вишневіська О.В. Фармакологія : електронний підручник. URL: [http://192.162.132.48:555/elektr%20pidr/veterynarnamed/Ел-Пос_ФАРМАКОЛОГІЯ%20\(1\)/ЕлПос_ФАРМАКОЛОГІЯ/4/4.htm#e41](http://192.162.132.48:555/elektr%20pidr/veterynarnamed/Ел-Пос_ФАРМАКОЛОГІЯ%20(1)/ЕлПос_ФАРМАКОЛОГІЯ/4/4.htm#e41) (дата звернення: 24.03.2019).
- Горицвіт весняний. *Вікіпедія: вільна енциклопедія*. URL: https://uk.wiki-pedia.org/wiki/Горицвіт_весняний (дата звернення: 25.03.2019).
- Жовтецеві (Ranunculaceae). *Вікіпедія: вільна енциклопедія*. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/жовтецеві> (дата звернення: 25.03.2019).
- Бактерицидні властивості етанольних екстрактів рослин на мікроорганізми роду *Staphylococcus* / В.В. Зажарський та ін. 2018. URL: <https://dspace.dsau.dp.ua/jspui/handle/123456789/441> (дата звернення: 25.03.2019).
- Колб Ю.І., Конечна Р.Т., Новіков В.П. Прогнозування біологічної активності та drug-like сполук родини ranunculaceae як пошук нових ефективних діючих речовин. *Вчені записки*. URL: http://www.tech.vernadskyjournal.in.ua/journals/2018/6_2018/part_2/6-2_2018.pdf#page=78 (дата звернення: 22.03.2019).
- Мірзоєва Т.В. Особливості вітчизняного ринку лікарських рослин в умовах сьогодення. *Інноваційна економіка*. 2013. № 6. URL: <https://pharmj.org.ua/in-dex.php/journal/article/download/48/45/> (дата звернення: 24.03.2019).
- Парубок М.І., Мамчур Т.В., Свистун О.В. Вирощування *Adonis vernalis* в культурі та його охорона. Організаційний комітет конференції. 2018. 1:153. (дата звернення: 23.03.2019).
- Ярмолюк С. Чи існує в Україні раціональний дизайн – новітня технологія розробки ліків? *Український науковий портал*. 2012. URL: <http://labprice.ua/statti/chi-isnuye-v-ukrayini-ratsionalniy-dizayn-novitnya-tehno-logiya-rozrobki-likiv/> (дата звернення: 20.03.2019).
- Molinspiration Cheminformatics. URL: <http://www.molinspiration.com/cgibin/pr-o-perties>.
- PASS (Prediction of Activity Spectra for Substances). URL: <http://www.way2drug.com/PASSOnline/info.php>.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ *IN SILICO* В ИССЛЕДОВАНИЯХ *ADONIS VERNALIS*

Растения – это ценный источник биологически активных веществ, однако еще недостаточно изученный. Начальным этапом изучения и поиска биологически активных веществ является использование методов in silico. В статье проанализированы и исследованы отдельные биологически активные вещества, входящие в состав Adonis vernalis. С помощью пакетов программ PASS и Molinspiration получены данные о прогнозируемой биологической активности биологически активных веществ Adonis vernalis, а также определены возможные побочные эффекты. Установлено, что Adonis vernalis является перспективным растением для дальнейших исследований.

Ключевые слова: *Ranunculaceae, Adonis vernalis, биологически активные вещества, лекарственноподобные характеристики, параметры Липинского, in silico, компьютерный скрининг, PASS, Molinspiration.*

IN SILICO METHODS IN RESEARCH OF ADONIS VERNALIS

Plants are a valuable source of biologically active substances however; currently, they are not sufficiently studied. The initial stage of the study and search for biologically active substances is the use of in silico methods. The article analyzes and investigates certain biologically active substances that are part of Adonis vernalis. Using the programs packages "PASS" and "Molinspiration" the data on the predicted biological activity of biologically active substances of Adonis vernalis have been obtained, as well as possible side effects have been identified. It has been established that Adonis vernalis is a promising plant for further research.

Key words: *Ranunculaceae, Adonis vernalis, biologically active substances, drugs-like characteristics, Lipinsky parameters, in silico, computer screening, PASS, Molinspiration.*

УДК 66.048.5.069.834

Гомеля М.Д.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Радовенчик Я.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Побережний М.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВИПАРЮВАННЯ РІДИН

У роботі наведено результати вивчення можливості інтенсифікації процесів випарювання рідин шляхом використання матеріалів із капілярними властивостями. Досліджено вплив різноманітних чинників на ефективність процесів випаровування. Визначено інтенсивність випаровування з поверхні тканини та можливість її регулювання. Запропоновано фізичну модель процесу випаровування. Встановлено, що використання матеріалів із капілярними властивостями дає змогу більше ніж на два порядки збільшити інтенсивність випаровування з поверхні водного середовища без використання додаткових енергетичних затрат та складного обладнання.

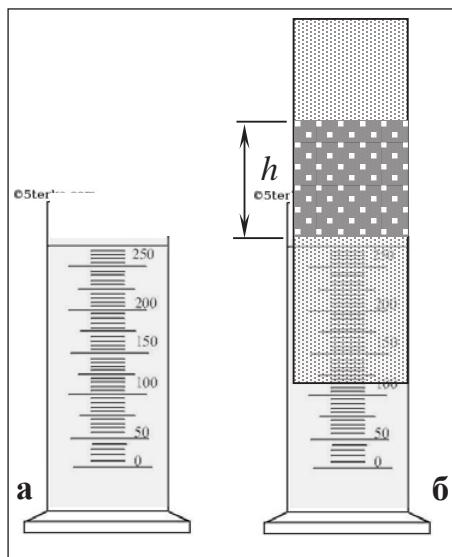
Ключові слова: капіляр, матеріали з капілярними властивостями, випарювання рідин, обробка рідких відходів.

Постановка проблеми. Сучасний стан гідросфери формується передусім антропогенною діяльністю людини. Сьогодні мінералізація поверхневих водойм є чи не найгострішою проблемою багатьох промислово розвинутих регіонів, особливо Півдня та Сходу України. Крім того, у промисловості щорічно утворюється мільйони кубічних метрів токсичних відходів у вигляді висококонцентрованих розчинів та суспензій різноманітного складу. Переважна їх більшість накопичується та зберігається в шламосховищах, наносячи непоправної шкоди довкіллю та живим організмам. Багато технологічних процесів у промисловості супроводжуються утворенням концентратів, які досить дорого зберігати через їхню токсичність чи корозійну агресивність, але ще дорожче переводити в зручний для захоронення та зберігання твердий стан. Найбільш поширеним методом знешкодження в промисловості таких розчинів є їх упарювання при високих температурах, що завжди пов'язано зі значними затратами енергії [1]. Неefективніші й хімічні методи, котрі потребують складних технологій та додаткових реагентів [2]. Тому проблеми знешкодження таких розчинів є сьогодні досить гострими і потребують термінового вирішення, а будь-які дослідження у цій галузі – актуальні та перспективні. Одним

із таких перспективних напрямів можна вважати використання в процесах випарювання волокнистих матеріалів із капілярними властивостями. Наявність останніх дає змогу створювати на основі таких матеріалів ефективні, автономні, дешеві та надзвичайно прості системи упарювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Чи не вперше використовувати матеріали з капілярними властивостями (волокнисті матеріали) для вирішення проблем токсичних рідин шламосховищ було запропоновано автором [3], однак ґрунтовних досліджень у цьому напрямі проведено не було, автор обмежився лише описом ідеї, оскільки тематика роботи мала дещо інше спрямування. Незважаючи на те що капілярні структури досить поширені в теплових насосах, апаратах перетворення фаз, в енергетичному обладнанні [4], у технологіях захисту довкілля, зазначена вище ідея подальшого розвитку не отримала. Фактично більше результатів схожих досліджень нам не вдалося знайти і в інших наукових джерелах. Разом із тим проведені нами дослідження у цій галузі показали, що використання в різноманітних технологічних процесах волокнистих матеріалів дає змогу досить легко та дешево розділяти рідку та тверду фази, видаляти з водного середовища

широку гаму різноманітних забруднювачів після відповідної обробки води, просто розділяти рідини, що не змішуються, і т. п. Основні закономірності цих процесів розглянуті нами в [5; 6]. Незважаючи на детальне вивчення процесів масо- і теплопереносу в капілярних структурах та випаровування із дзеркала водойм у природних умовах, питання транспортування рідин капілярними структурами з одночасним випаровуванням рідкої фази з їх поверхні лишилися поза увагою дослідників. Практично відсутні дані про інтенсивність та механізм випаровування в таких структурах. З іншого боку, використання різноманітних типів тканин як надзвичайно простих та ефективних випарювачів на промислових об'єктах різного призначення дасть змогу створювати дешеві автономні системи знешкодження стічних вод. Даний матеріал присвячений дослідженню особливостей переміщення рідин у матеріалах із капілярними властивостями в умовах можливості їх одночасного випаровування.



а – контрольний циліндр;
б – експериментальний циліндр

Рис. 1. Обладнання для вивчення інтенсифікації випаровування води з використанням волокнистих матеріалів

Постановка завдання. Метою роботи є вивчення можливості та ефективності використання волокнистих матеріалів у процесах інтенсифікації випаровування води в різних умовах та дослідження впливу різних чинників на процес і його характеристики.

Для вивчення процесів інтенсифікації випаровування застосовували два ідентичних градуйованих циліндри, один з яких виконував контрольну функцію, а інший слугував для створення відповідних

умов випаровування (рис. 1). В експериментальному циліндрі додатково розміщувалася смужка з тканини відповідного матеріалу (переважно бавовна, в окремому випадку – льон), що нараховувала від 1 до 21 шарів. Ширина смужки – 5 см. Довжина смужки – 50 см. Щільність бавовни – 100 г/м², льону – 171,1 г/м². Методика роботи полягала у визначенні висоти капілярного підняття рідкої фази по смужці тканини (h на рис. 1) та зменшення об'єму рідини, що випаровується за визначений час в обох циліндрах при встановлених температурах.

Виклад основного матеріалу дослідження. Згідно із сучасними уявленнями, у капілярі невеликого діаметру (менше 1 мм) із водонепроникними стінками під дією сил поверхневого натягу рідина піднімається на висоту h , котра описується залежністю [7]:

$$h = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{\rho \cdot g \cdot r}, \quad (1)$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу рідини, θ – крайовий кут змочування рідиною стінок капіляра, ρ – густина рідини, g – прискорення вільного падіння, r – радіус капіляра.

Як свідчить рівняння (1), найбільшою мірою для однакових матеріалів висота підняття рідкої фази залежить від радіусу капіляра. При цьому головною умовою є відсутність витрати рідини за межі капіляра за її переміщення вертикально. У таких умовах висота підняття рідини може сягати значних розмірів. Наприклад, у природних умовах для дрібнозернистих пісків та лисів цей показник інколи сягає 2 м і більше, а в живій природі рух водних розчинів по дрібних капілярах є основою забезпечення живих організмів поживними речовинами. Однак у цих випадках йдеться про відносно замкнуті системи. У разі ж волокнистих матеріалів ситуація дещо інша. Більшість тканин являє собою композицію із з'єднаних різними способами ниток, які, своєю чергу, формуються із джгута мікроскопічних волокон бавовни, шовку і т. п. Таким чином, тканина відповідного типу являє собою складну пористу структуру, сформовану із мікроскопічних волокон. Оскільки ці волокна мають переважно незначну довжину (наприклад, для волокон бавовни довжина коливається в межах 1–55 мм), то тканину можна представити у вигляді матеріалу з величезною кількістю мікроскопічних капілярів, які самі є такими, з'єднуються один з одним, формують капіляри із міжволоконного простору, тією чи іншою мірою контактують з атмосферою і т. д. Як впливає з викладеного вище, для волокнистих матеріалів,

що використовуються як випарювачі рідкої фази за описаних умов, одночасно характерні два процеси – транспортування рідини капілярами та випаровування її з поверхні тканини. Очевидно, що у вертикально розміщеній тканині загальний рівень, на який буде підніматися рідка фаза, визначатиметься балансом рідини, що транспортується до найвищої точки капілярами, та рідини, що випаровується з поверхні тканини шляхом транспортування. Для підтвердження цього факту сухі смужки бавовни та льону шириною 50 мм та довжиною 500 мм занурювали у воду одним кінцем та спостерігали протягом однієї години при різних температурах повітря за рухом рідини по порах тканини. За одну годину фіксували висоту змоченої зони. Результати дослідів представлені на рис. 2.

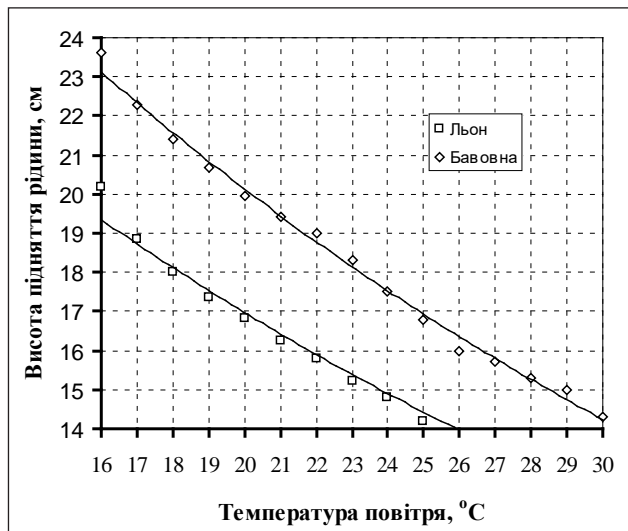


Рис. 2. Зміна висоти підняття рідини в порах різних тканин протягом 1 год. за різних температур повітря

Як видно з рис. 2, зі збільшенням температури рівень підняття рідини знижується, що цілком співпадає з викладеними вище міркуваннями. За підвищених температур інтенсивність випаровування зростає, і вся вода, що транспортується по порах тканини, випаровується значно швидше, що зумовлює зниження висоти підняття рідини. Для різних тканин таке зниження буде різним і визначається властивостями волокон тканини. За подовження дослідів довше однієї години загальна висота змоченої частини зростала несуттєво, тобто процес стабілізувався. Підтвердженням такого трактування процесів у смужці тканини є також той факт, що в досліді із цією ж бавовняною смужкою, але розміщеною між двома герметичними шарами поліетилену (тобто без можливості випаровування), рідина піднімається протягом

семи діб на висоту 84 см. Очевидно, що для збільшення висоти підняття рідини в смужках тканини необхідно підвищити кількість рідкої фази, що транспортується порами тканини. Нами для цього запропоновано використовувати смужки, складені з різної кількості шарів тканини. Із викладених вище міркувань випливає, що для підвищення ефективності випаровування необхідно забезпечити транспортування рідини порами тканини на максимально можливу висоту. Якщо смужка тканини буде складатися з трьох чи більше шарів, то середній шар буде виконувати скоріше функцію транспортування рідкої фази, аніж її випаровування. За збільшення кількості шарів тканини шар, що транспортує рідку фазу, буде товстішати, і кількість рідини, що доставляється до найвищої точки полотнища, буде також зростати, збільшуючи загальну висоту підняття рідини і, відповідно, площу випаровування. Результати дослідів із такими смужками представлені на рис. 3.

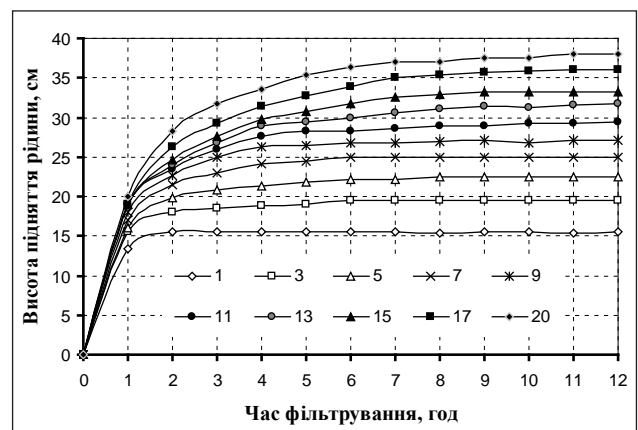


Рис. 3. Зміна висоти підняття рідини в порах смужки із бавовни за різної кількості шарів тканини

Як видно з рис. 3, за різної кількості шарів змінюється і висота підняття рідини. Однак варто зауважити, що найбільш помітно цей показник зростає за невеликої кількості шарів – 3, 5, 7. Далі приріст висоти підняття рідини знижується, і можна прогнозувати, що за подальшого збільшення кількості шарів тканини такий приріст узагалі припиниться, оскільки для кожного пористого середовища залежно від його характеристик існує максимальна висота підняття рідини, вище якої переміщення рідкої фази взагалі не фіксується. Причому в усіх випадках рівень сягає свого максимуму протягом доби і в подальшому суттєво змінюється лише залежно від температури повітря.

Очевидно, що загальний рівень підняття рідини у вертикально розміщеній смужці тканини

буде визначатися балансом рідини, що транспортується капілярами, та рідини, що випаровується з поверхні тканини (рис. 4):

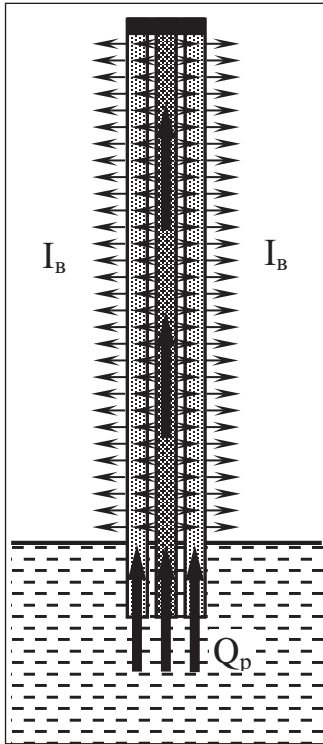


Рис. 4. Модель роботи низькотемпературного випарювача

$$Q_p = I_e \cdot 2S = 2I_e \cdot y \cdot b,$$

де Q_p – об'єм води, що забирається капілярами з ємкості, м³/год; I_e – інтенсивність випаровування з поверхні тканини, м³/м²·год; S – площа випаровування, м²; y – висота підняття рідкої фази в тканині, м; b – ширина полотнища тканини, м.

$$\text{Тоді: } I_b = \frac{Q_p}{2 \cdot y \cdot b}.$$

У даному рівнянні витрату води легко фіксувати з допомогою мірного циліндра. Ширина полотнища тканини – величина постійна для кожної серії дослідів. Змінною є також висота підняття рідини в порах тканини, котру також легко зафіксувати в кожному конкретному випадку. Таким чином, для характеристики основних параметрів під час використання процесів випаровування із застосуванням матеріалів із капілярними властивостями достатньо фіксувати рівень підняття рідкої фази в порах тканини та об'єм рідкої фази, що транспортується з ємкості в процесі випаровування. Приведену інтенсивність випаровування з поверхні полотнища легко порахувати за приведеною формулою.

Надзвичайно велике значення має визначення ефективності випаровування з використанням волокнистих матеріалів порівняно з природним випаровуванням чи випаровуванням у штучних умовах із дзеркала води. Тому на наступному етапі нами досліджено продуктивність низькотемпературного випарювання з допомогою матеріалів із капілярними властивостями. Проведені при температурі повітря і рідкої фази 20°C досліді показали, що ефективність таких інтенсифікаторів випаровування досить висока (рис. 5). Під час використання смужок бавовни шириною 5,0 см навіть застосування однієї смужки тканини дає змогу отримати суттєвий ефект. Якщо в контрольному зразку за 48 годин при даній температурі випарувалося близько 2 см³ води, то вже за встановлення полотнища з одного шару бавовни ця цифра становила 37 см³. За збільшення кількості шарів тканини об'єм випаровування також зростає: за трьох – до 61 см³, за п'яти – до 72 см³, за

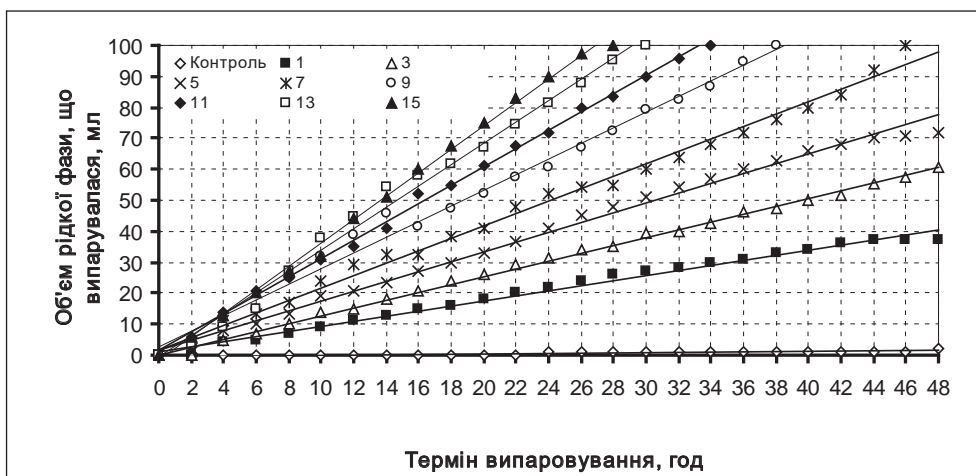


Рис. 5. Зміна об'єму випарованої рідини з поверхні смужки з бавовни за різної кількості шарів тканини ($T = 20^\circ\text{C}$)

**Питома інтенсивність випаровування при температурі 20°C
з поверхні полотнища з бавовни за різної кількості смужок**

Питома інтенсивність випаровування за різної кількості шарів, см ³ /м ² -год										
Контроль	1	3	5	7	9	11	13	15	17	20
20	58	92	119	150	180	200	230	249	252	254

семи – понад 100 см³. За 15-ми шарів 100 см³ води випаровується протягом 28 годин, тоді як у контрольному зразку об'єм рідкої фази, що випарувався за цей час, становив лише 1 см³.

Цікавою є інформація про зміну продуктивності такого способу випарювання рідкої фази в приведених одиницях. Для дзеркала води при 20°C інтенсивність випаровування в умовах відсутності руху повітря становить 20 см³/м²-год. У разі використання як випарювача шару бавовни шириною 5,0 см та довжиною 15,0 см загальна площа випарювання становитиме 1,5 дм², що більше ніж у сім разів перевищує площу дзеркала води в контрольній ємності. При цьому загальна інтенсивність випаровування становить 58 см³/м²-год. Товщина шару тканини становить лише 0,15 мм. Очевидно, що такого тонкого шару пористого середовища недостатньо для забезпечення рідкою фазою всієї площі випаровування. Підтвердженням цього є той факт, що зі збільшенням кількості шарів тканини інтенсивність випаровування також зростає і для трьох шарів становить уже 92 см³/м²-год (табл. 1). Однак порівняння збільшення площі випаровування в обох випадках показує, що інтенсивність випаровування на тканині нижча інтенсивності випаровування з поверхні дзеркала води, оскільки площа випаровування зросла більше ніж у сім разів, а інтенсивність випаровування – лише близько п'яти. Як видно із табл. 1, лише за кіль-

кості шарів тканини більше семи вдається досягнути росту інтенсивності випаровування на рівні росту інтенсивності випаровування за збільшення площі дзеркала рідини. Зі збільшенням кількості шарів вище 13–15 приріст інтенсивності випаровування практично вичерпується і за подальшого додавання смужок бавовни практично не зростає. Це свідчить про те, що в системі встановилися максимальні параметри продуктивності й потовщувати полотнище шляхом додавання шарів тканини недоцільно, оскільки воно не забезпечуватиме відповідного росту інтенсивності випаровування.

Висновки. Проведені дослідження підтверджують можливість використання матеріалів із капілярними властивостями як інтенсифікатора процесу випаровування з поверхні рідини. При цьому інтенсифікація відбувається за рахунок суттєвого збільшення площі випаровування. Причому процес не потребує додаткових пристроїв, оскільки таке збільшення площі відбувається за рахунок капілярного ефекту. Тому для реалізації описаної технології значну увагу необхідно приділяти вибору тканин із максимальною висотою підняття рідкої фази. Збільшення інтенсивності випаровування за окремих умов більше ніж на 2–2,5 порядки є суттєвим чинником для подальших досліджень та впровадження технології на промислових об'єктах.

Список літератури:

1. Выпарные аппараты с рекомпрессией водяного пара – энергосберегающая технология и оборудование (ЭСВА) / А.А. Поворов и др. URL: <http://www.zaobmt.com/index.php/articles/153-vacuum-evaporator-article.html> (дата звернення: 24.01.2019).
2. Белобаба А.Г., Маслий А.И., Гусев А.А. Выделение хлорида натрия из растворов минерализации экзометаболитов человека и растительных отходов применительно к замкнутым экосистемам. *Химия в интересах устойчивого развития*. 2013. № 3. С. 291–297.
3. Михайловська М.В. Знешкодження екологічно небезпечних рідких відходів коксохімічних виробництв : дис. ... канд. техн. наук : 21.06.01. Київ : НТУУ «КПІ», 2009. 21 с.
4. Кисеев В.М. Тепломассоперенос и фазовые превращения в мелкопористых капиллярных структурах : автореф. дис. ... док. физ.-мат. наук. : 01.04.14. Екатеринбург, 2001. 43 с.
5. Радовенчик Я.В. Використання матеріалів з капілярними властивостями в процесах зневоднення осадів та очищення води : дис. ... канд. техн. наук : 21.06.01. Київ : НТУУ «КПІ», 2013. 23 с.
6. Радовенчик Я.В., Гомеля М.Д. Основні закономірності руху рідин в капілярних матеріалах. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2012. № 2. С. 31–34.
7. Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. Москва : Химия, 1976. 232 с.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВЫПАРИВАНИЯ ЖИДКОСТЕЙ

В работе приведены результаты изучения возможности интенсификации процессов выпаривания жидкостей путем использования материалов с капиллярными свойствами. Исследовано влияние разнообразных факторов на эффективность процессов выпаривания. Определена интенсивность испарения из поверхности ткани и возможность ее регулирования. Предложена физическая модель процесса выпаривания. Установлено, что использование материалов с капиллярными свойствами позволяет более чем на два порядка увеличить интенсивность испарения из поверхности водной среды без использования дополнительных энергетических затрат и сложного оборудования.

Ключевые слова: капилляр, материалы с капиллярными свойствами, выпаривание жидкостей, обработка жидких отходов.

INTENSIFICATION OF LOW TEMPERATURE LIQUID EVAPORATION

The results of the study of the possibility for intensifying the liquids evaporation processes by use of materials with capillary properties are presented in this work. The influence of various factors on the efficiency of evaporation processes is investigated. The intensity of evaporation from the surface of the tissue and the possibility of its regulation are determined. The physical model of evaporation process is proposed. It was established that the use of materials with capillary properties allows increasing more than two orders the rate of evaporation from the surface of the aquatic environment without the use of additional energy and complex equipment.

Key words: capillary, materials with capillary properties, liquids evaporation, liquid waste treatment.

Гомеля М.Д.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Трус І.М.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Глушко О.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОЧИСТКА ВОДИ ВІД ІОНІВ МІДІ ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ МАГНЕТИТУ

У роботі представлено результати дослідження процесів сорбційного очищення води від іонів міді під час використання синтезованого магнетиту із солей заліза (II) та заліза (III). У процесі синтезу магнетиту співвідношення іонів заліза (II) до заліза (III) були 1:2; 1:1 та 2:1. Окрім того, у процесі синтезу до реакційної суміші додавали модифікуючі добавки: сульфід натрію, гуанідін, тіосемікарбазид та тіокарбамід. Показано, що сорбційна ємність магнетиту по іонах міді зростає з підвищенням вмісту в магнетиті іонів заліза (II). При цьому модифікуючі добавки забезпечують підвищення сорбційної ємності магнетиту по іонах міді. Найкращі результати отримано під час використання сульфиду натрію.

Ключові слова: важкі метали, магнетит, сорбція, сорбційна ємність, модифікування.

Постановка проблеми. Вилучення іонів міді з води з високим ступенем очищення, як і проблема очищення води від інших важких металів, є досить складним. Відомі методи очищення води від іонів важких металів супроводжуються утворенням токсичних шламів, які складно утилізувати, або рідких відходів, переробка яких вимагає значних затрат. Окрім того, більшість відомих методів очищення води від іонів важких металів не забезпечує необхідної ефективності їх вилучення з води. Так, у водоймах рибогосподарського призначення гранично допустима концентрація (ГДК) по іонах міді сягає 1 мкг/дм³. Тому навіть у разі скиду відносно чистих стічних вод від електростанцій, де вміст іонів міді сягає ~ 50 мкг/дм³, виникає загроза перевищення рівня ГДК у таких водоймах. Разом із тим більшість із відомих методів очищення води від іонів міді не забезпечує необхідної ефективності очищення води. Проблема ускладнюється великими об'ємами стічних вод, що містять іони міді. Витрата води на скид в атомних електростанціях сягає 300000–800000 м³/добу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. До сучасних методів очищення води від іонів важких металів, включаючи й іони міді, можна віднести реагентні, електрохімічні, сорбційні, іонообмінні, біологічні методи та ін. [1, с. 750; 2, с.106]. Як правило, реагентні методи [3, с.140; 4, с. 482] характе-

ризуються невисокою ефективністю і супроводжуються утворенням токсичних гідрофільних осадів, витратою цінних компонентів [5, с. 58]. Досить ефективними є іонообмінні методи вилучення важких металів із води [6, с. 1525; 7, с. 461]. Проте цей метод ефективний під час вилучення іонів важких металів із промислових стічних вод, в яких відсутні іони жорсткості [8, с. 99]. В іншому разі іони жорсткості створюють серйозну конкуренцію іонам важких металів під час їх сорбції на іоніті. Досить складною є проблема використання мембранних методів для вилучення важких металів із води [8, с. 102], оскільки даний метод передбачає досить глибоке попереднє очищення води перед подачею її на мембрану і не завжди забезпечує достатню ефективність очищення води. Біологічні методи є досить складними для реалізації, крім того, виникає проблема утилізації осадів, забруднених важкими металами [6, с. 1528; 10, с.95]. Сорбційні методи [11, с. 127] здебільшого є низькоефективними, а органічні сорбенти характеризуються низькою сорбційною ємністю.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження процесів вилучення іонів міді з води під час використання сорбентів на основі магнетиту, визначення умов модифікування сорбентів для досягнення ефективного очищення води від іонів міді в присутності іонів жорсткості.

Виклад основного матеріалу дослідження. Відомо, що сорбенти на основі магнетиту забезпечують ефективно вилучення іонів важких металів із води [12, с. 96, 103]. Вони є достатньо ефективними в процесі вилучення іонів важких металів із води в присутності іонів жорсткості [13, с. 150]. Як правило, використовують магнетит, отриманий за співвідношення іонів заліза (II) та заліза (III) у реакційній суміші 1:2. Хоча відомо, що за збільшення вмісту заліза (II) магнетит має більш аморфну структуру, що повинно впливати на його сорбційну здатність. Тому в даній роботі використовували магнетит, сорбований за методикою [13, с. 151], за співвідношення Fe (II)/Fe (III) як 1:2; 1:1 та 2:1.

Для підвищення сорбційної ємності отриманих сорбентів під час синтезу магнетиту в розчині луку, яким обробляли суміш солей заліза (II) та заліза (III), додавали тіокарбамід, гуанідін, тісемікарбазид у концентрації 1% та сульфід натрію в концентрації 1% та 2%.

Для побудови ізотерми сорбції міді використовували розчини сульфату міді концентрацією 2–1000 мг/дм³ за дози магнетиту 1 300 мг/дм³. В окремих дослідах до заданої дози магнетиту додавали різні об'єми розчину сульфату міді з концентрацією міді 10 мг/дм³, визначаючи величину сорбції за різних доз сорбенту. Концентрацію міді визначали методом спектрофотометрії [14, с. 350] та методом хронопотенціометрії [7, с. 345].

Результати щодо використання магнетиту для вилучення іонів міді з води приведено на рис. 1. Як видно з ізотерм, приведених на рис. 1, сорбційна здатність магнетиту зростає як із підвищен-

ням концентрації міді в розчині, так і з співвідношенням $K=[Fe^{2+}]/[Fe^{3+}]$ в ряду 1:2; 1:1 та 2:1. Так, за $K=1:2$ сорбційна ємність магнетиту не перевищувала 100 мг/г у всьому діапазоні вибраних концентрацій. За $K=1:1$ сорбційна ємність магнетиту сягала 108 мг/г за сорбції з дистильованої води та 134 мг/г за сорбції із водопровідної води.

За $K=2$ сорбційна ємність магнетиту як у дистильованій, так і водопровідній воді перевищувала 200 мг/г. Це говорить про те, що зі збільшенням співвідношення K магнетит має більш аморфну структуру, що зумовлює підвищення його сорбційної ємності. Крім того, із приведених даних видно, що іони кальцію та магнію практично не сорбуються на магнетиті (це відповідає даним [12, с. 41, 103]), тому ніяк не впливають на сорбцію іонів міді. Це дуже важливо, тому що за таких властивостей сорбенту його можна використовувати для вилучення іонів важких металів як із природних, так і стічних вод, що містять іони жорсткості. Під час використання магнетиту сорбуються лише іони важких металів без вилучення іонів жорсткості. Під час застосування катіонітів іони жорсткості та іони важких металів сорбуються разом, причому відношення ємності катіоніту по іонах жорсткості та по іонах важких металів близьке до співвідношення концентрацій даних катіонів у розчині [15, с. 374]. А якщо врахувати, що концентрації іонів жорсткості у воді часто в десятки разів вищі за концентрації іонів важких металів, то стає зрозумілим, що застосування іонного обміну доцільне лише за глибокого пом'якшення

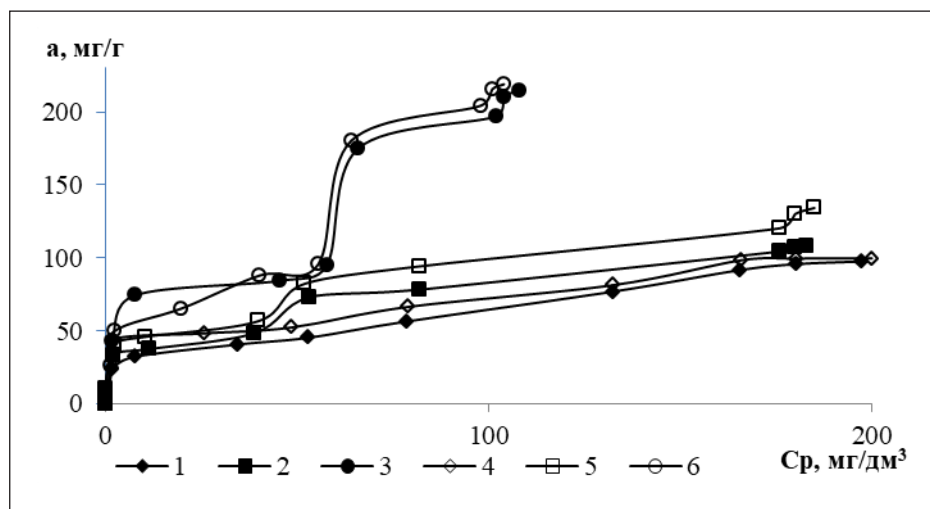


Рис. 1. Ізотерми адсорбції іонів міді на магнетиті (1; 2; 3; 4; 5; 6) з дистильованої (1; 2; 3) та водопровідної (4; 5; 6) води під час використання як сорбенту магнетиту, отриманого за співвідношення Fe^{2+}/Fe^{3+} (K): 1:2 (1; 4); 1:1 (2; 5) та 2:1 (3; 6) (доза магнетиту – 1 300 мг/дм³)

води. Такий підхід недоречний, якщо йдеться про очищення стічних вод.

Якщо подивитися на ізотерми, приведені на рис. 1, то можна сказати, що в даному разі реалізується механізм активованої адсорбції. Тобто іони міді включаються в кристалічну решітку магнетиту. При цьому за невисоких концентрацій міді за $K=1:1$ та $2:1$ спостерігається практично повне вилучення міді, що можна пояснити згаданим механізмом сорбції. При цьому, як описано в роботі [12, с. 103–106], іони важких металів практично не десорбуються з магнетиту без кислотної обробки та руйнування структури сорбенту.

Підвищення сорбційної ємності магнетиту по міді за збільшення співвідношення K від $1:2$ до $2:1$, крім позитивного значення, має й суттєві недоліки. Насамперед магнетит, отриманий за $K=1:2$, має найвищі магнітні характеристики, що спрощує його відділення з води, має найвищу щільність осаду та найвищу хімічну стійкість, тому що має кристалічну структуру. За зростання значення K внесок аморфних елементів у магнетит зростає, що погіршує його магнітні властивості, знижує хімічну стійкість та призводить до зростання об'єму осаду через зниження його щільності [12, с. 92, 94]. Тому для підвищення сорбційної ємності магнетиту, отриманого за співвідношення $K=1/2$, у процесі його синтезу модифікували гуанідином, тіокарбамідом, тіосемікарбазидом та сульфідом натрію. Дані речовини, які частково включаються в структуру магнетиту, містять функціональні групи $>C=S$, $>C=N-H$, $Me=S$, які здатні утворювати комплексні зв'язки з іонами

важких металів (із d-металами), не взаємодіють з іонами жорсткості й здатні підвищувати сорбційну здатність магнетиту. Підтвердженням даного припущення є результати, приведені на рис. 2 та рис. 3. Як видно із цих рисунків, модифіковані форми магнетиту переважають немодифікований магнетит як за сорбції з дистильованої, так і водопровідної води. Гранична адсорбція зростає під час переходу від немодифікованого магнетиту до магнетиту, модифікованого гуанідином або тіокарбамідом, далі – до магнетиту, модифікованого тіосемікарбазидом, і далі – до модифікованого сульфідом натрію. Останній, окрім того, що він забезпечує найвищі значення граничної адсорбції (на рівні 332–388 мг/г), також є найбільш доступним і дешевим реагентом. Більше того, він досить стійкий до гідролізу в розчинах лугу.

Виходячи з отриманих результатів, можна сказати, що під час використання магнетиту, модифікованого сульфідом натрію, іони міді можна вилучати з розчинів, що містять іони жорсткості.

Крім того, у роботі було проведено дослідження щодо визначення ефективності розроблених сорбентів залежно від співвідношення кількості сорбенту й об'єму розчину. При цьому враховано, що головною є проблема вилучення іонів міді з розведених розчинів. Тому сорбцію було проведено за доз магнетиту $500\text{--}10000\text{ мг/дм}^3$. Як видно з рис. 4, 5, за сорбції міді з розчинів із концентрацією міді 10 та 50 мг/дм^3 сорбційна ємність сорбенту знижується зі збільшенням дози адсорбенту. Вищі значення адсорбції відзначено для магнетиту за ($K=2$). Сорбція зростає під час переходу від немоди-

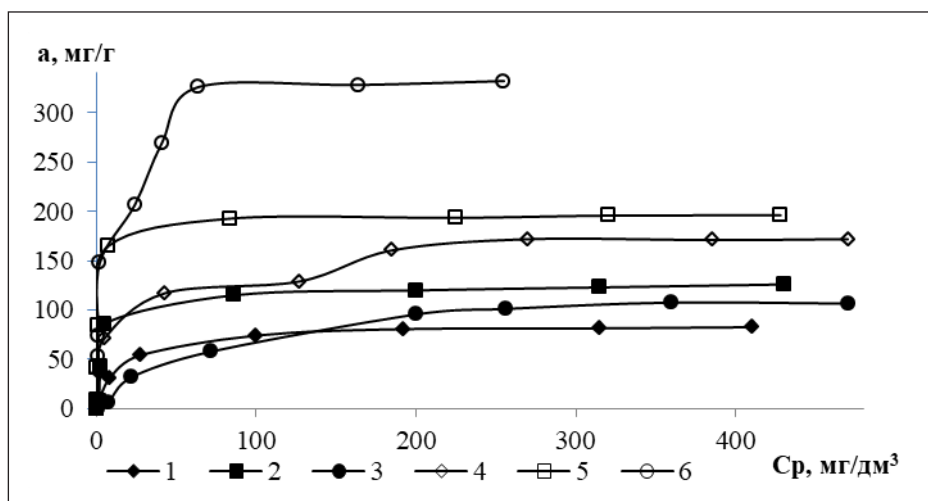


Рис. 2. Ізотерми адсорбції іонів міді з дистильованої води (1; 2; 3; 4; 5; 6) на магнетиті ($K=[Fe^{2+}/Fe^{3+}]=1/2$) немодифікованому (1), модифікованому 1%-ними розчинами тіокарбаміду (2), гуанідину (3), тіосемікарбазиду (4), сульфїду натрію (5) та 2%-ним розчином Na_2S (6)

фікованого магнетиту до магнетиту, модифікованого тіосемікарбазидом та сульфідом натрію. При цьому в разі використання магнетиту, модифікованого сульфідом натрію, сорбційна ємність мало залежить від співвідношення K .

Модифікування магнетиту сульфідом натрію суттєво впливає на рівноважні концентрації міді в очищеній воді (рис. 6). Як видно з рис. 6, під час використання немодифікованого магнетиту за $K = 1/2$ рівноважні концентрації міді досить значні (2,0–6,7 мг/дм³), і лише за дози магнетиту 10 г/дм³ рівноважна концентрація знизилася до 0,55 мг/дм³. За співвідношення $K=2$ за дози магнетиту 2,5–10,0 г/дм³ за вихідної концентрації міді 10 мг/дм³ рівноважні

концентрації були в межах 0,00–0,75 мг/дм³. Але за менших доз магнетиту вони все одно зростали до 2–5 мг/дм³. Під час використання магнетиту, модифікованого Na_2S за $K = 1/2$, рівноважні концентрації міді за вихідної концентрації 10 мг/дм³ знижувалися до 0,08–0,28 мг/дм³ за всіх використаних доз магнетиту, а за $K = 2$ вони взагалі були на рівні 0,0–0,1 мг/дм³. Навіть за вихідної концентрації міді 50 мг/дм³ під час використання модифікованого магнетиту ($K = 2$) за доз від 1,25 до 10 мг/дм³ рівноважні концентрації були на рівні 0,00–0,12 мг/дм³.

У цьому разі можна сказати, що модифікований сульфідом натрію магнетит є досить доступ-

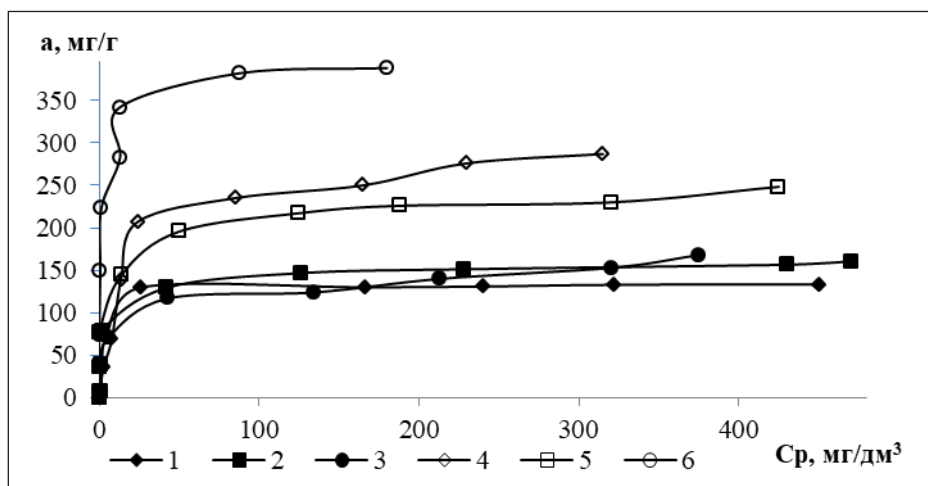


Рис. 3. Ізотерми адсорбції іонів міді з водопровідної води (1; 2; 3; 4; 5; 6) на магнетиті ($K= 1/2$) немодифікованому (1), модифікованому 1%-ними розчинами тіокарбаміду (2), гуанідину (3), тіосемікарбазиду (4), сульфіду натрію (5) та 2%-ним розчином Na_2S (6) (доза магнетиту – 1 300 мг/дм³)

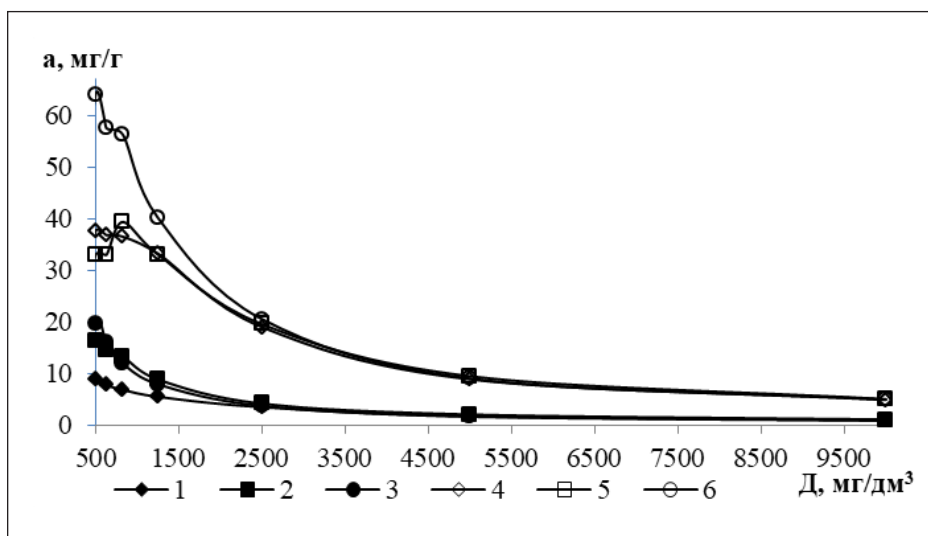


Рис. 4. Залежність сорбційної ємності магнетиту ($K= 2$) (1; 2; 3; 4; 5; 6) від дози за концентрації іонів міді 10 мг/дм³ (1; 2; 3) та 50 мг/дм³ (4; 5; 6) під час використання магнетиту немодифікованого (1; 4), модифікованого тіосемікарбазидом (2; 5) та сульфідом натрію (3; 6)

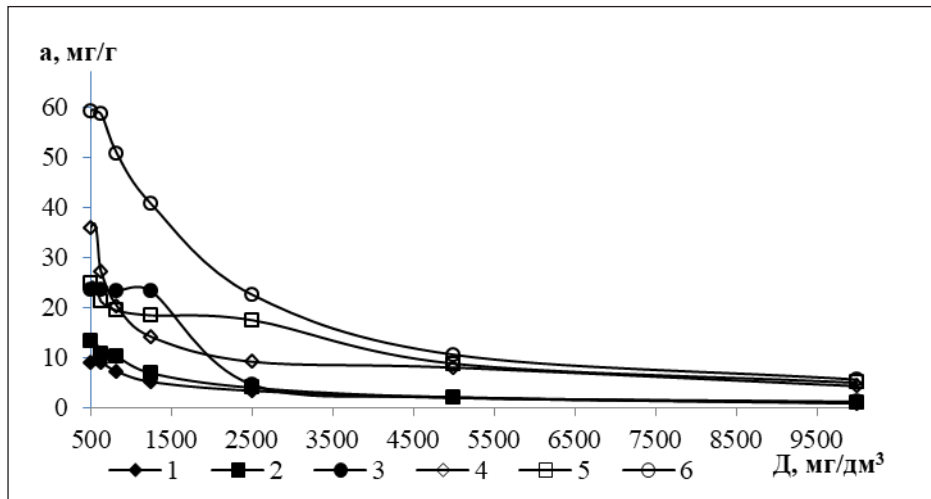


Рис. 5. Залежність сорбційної ємності магнетиту ($K=1/2$) (1; 2; 3; 4; 5; 6) від його дози за концентрації іонів міді 10 мг/дм^3 (1; 2; 3) та 50 мг/дм^3 (4; 5; 6) під час використання магнетиту немодифікованого (1; 4), модифікованого тіосемікарбазидом (2; 5) та сульфідом натрію (3; 6)

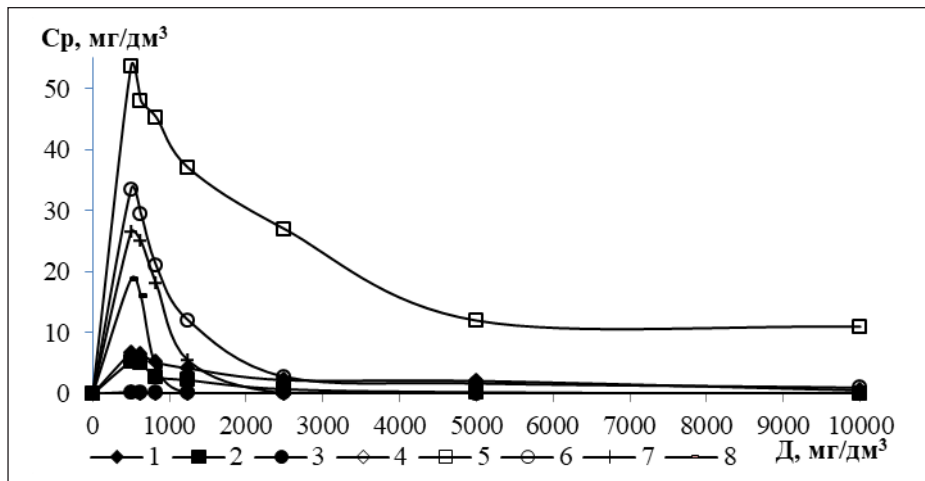


Рис. 6. Залежність рівноважної концентрації іонів міді (1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8) від дози магнетиту за концентрації міді 10 мг/дм^3 (1; 2; 3; 4) та 50 мг/дм^3 (1; 6; 7; 8) під час використання магнетиту ($K=1/2$) (1; 3; 5; 7) та ($K=2$) (2; 4; 6; 8) немодифікованого (1; 2; 5; 6) та модифікованого 2%-ним розчином Na_2S (3; 4; 7; 8)

ним синтетичним неорганічним сорбентом з високою селективністю по іонах міді, який доцільно використовувати для доочищення води від іонів важких металів.

Висновки. На прикладі вилучення іонів міді з водних розчинів показано, що ефективність сорбентів на основі магнетиту зростає за збільшення відношення концентрацій іонів заліза (II) до заліза (III), за синтезу магнетиту від 1:2 до 1:1 та 2:1 сорбційна здатність магнетиту зростає.

Встановлено, що застосування азото- та сірковмісних сполук для модифікування магнетиту забезпечує підвищення його ємності по іонах

міді. Сорбційна ємність зростає під час переходу за модифікації магнетиту від гуанідину до тіокарбаміду, тіосемікарбазиду та сульфиду натрію. Найкращим реагентом для модифікування магнетиту є сульфід натрію, який доцільно додавати в кількості 2% у лужному розчині, що використовується для гідролізу заліза в процесі синтезу магнетиту.

Показано, що сорбенти на основі магнетиту забезпечують високу ефективність вилучення іонів міді як із дистильованої, так і водопровідної води, що зумовлено низькою селективністю сорбенту по іонах жорсткості та високою селективністю по іонах міді.

Список літератури:

1. Heavy metal ions removal from metal plating wastewater using electrocoagulation: Kinetic study and process performance / M. Al-Shannag et al. *Chemical Engineering Journal*. 2015. № 260. P. 749–756. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.09.035>.
2. Arbabi M., Hemati S., Amir M. Removal of lead ions from industrial wastewater: A review of removal methods. *International Journal of Epidemiologic Research*. 2015. № 2(2). P. 105–109.
3. Экология очистки сточных вод физико-химическими методами / Н.С. Серпокрылов. Москва : Ассоциация строительных вузов, 2009. 261 с.
4. Paulino A. T. Novel adsorbent based on silk worm chrysalides for removal of heavy metals from wastewaters. *J Colloid Interf Sci*. 2006. V. 301. P. 479–487.
5. Electroextraction of heavy metals from wastewater for the protection of natural waterbodies from pollution / N. Gomelia et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 1(10). P. 55–61
6. Removal of nickel (II) ions from aqueous solution using the natural clinoptilolite and preparation of nano-NiO on the exhausted clinoptilolite / R. Nevenka et al. *Applied Surface Science*. 2010. V. 257. I. 5. P. 1524–1532.
7. Strategies based on silica monoliths for removing pollutants from wastewater effluents / Rodrigues D. et al. *A review. Science of The Total Environment*. 2013. P. 461–462, 126–138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.04.091>.
8. Филатова Е.Г. Обзор технологий очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов, основанных на физико-химических процессах. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2015. №. 2(13). С. 97–109.
9. Эффективность использования баромембранных методов в процессах глубокой очистки воды от ионов тяжелых металлов / Н.Д. Гомеля и др. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2018. Т. 29 (68). Ч. 2. № 4. С. 94–98.
10. Терещенко О.М., Мельниченко Є.В., Макаренко І.М. Очистка стічних вод від іонів міді методом комплексоутворення та ультрафільтрації. *Збірник наукових праць НУК*. 2017. № 2. С. 93–97.
11. Strategies based on silica monoliths for removing pollutants from waste water effluents: A review / D. Rodrigues et al. *Science of The Total Environment*. 2013. V. 461–462. № 9. P. 126–138.
12. Гончарук В.В., Радовенчик В.М., Гомеля М.Д. Отримання та використання високодисперсних сорбентів з магнітними властивостями. Київ : Графіка, 2003. 264 с.
13. Боженко О.М., Омельчук Ю.А., Гомеля М.Д. Отримання високоселективних сорбентів для вилучення міді із вод систем охолодження АЕС. *Збірник наукових праць СХУЯЕтаП*. 2009. Вип. 4(32). С. 148–154.
14. Лурье Ю.Ю. Аналитическая химия промышленных сточных вод. Москва : Химия, 1984. 448 с.
15. Trokhymenko G., Gomelya M. Development of low waste technology of water purification from copper ions. *Chemistry and Chemical Technology*. 2017. V.11. № 3. P. 372–377.

ОЧИСТКА ВОДЫ ОТ ИОНОВ МЕДИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МАГНЕТИТА

В работе представлены результаты исследования процессов сорбционной очистки воды от ионов меди при использовании синтезированного магнетита из солей железа (II) и железа (III). В процессе синтеза магнетита соотношения ионов железа (II) к железу (III) были 1:2; 1:1 и 2:1. Кроме того, в процессе синтеза в реакционную смесь добавляли модифицирующие добавки: сульфид натрия, гуанидин, тиосемикарбазид и тиокарбамид. Показано, что сорбционная емкость магнетита по ионам меди растет с повышением содержания ионов железа (II) в магнетите. При этом модифицирующие добавки обеспечивают повышения сорбционной емкости магнетита по ионам меди. Лучшие результаты получены при использовании сульфида натрия.

Ключевые слова: тяжелые металлы, магнетит, сорбция, сорбционная емкость, модифицирование.

WATER PURIFICATION FROM COPPER IONS USING MAGNETITE

The paper presents the results of a study of the sorption processes of water purification from copper ions using synthesized magnetite from iron (II) and iron (III) salts. In the process of magnetite synthesis, the ratio of iron (II) ions to iron (III) ions was 1: 2; 1: 1 and 2: 1. In addition, in the course of the synthesis, modifying additives — sodium sulfide, guanidine, thiosemicarbazide, and thiocarbamide — were added to the reaction mixture. It was shown that the sorption capacity of magnetite for copper ions increases with an increase in the content of iron (II) ions in magnetite. In this case, modifying additives provide an increase in the sorption capacity of magnetite for copper ions. Best results are obtained using sodium sulfide.

Key words: heavy metals, magnetite, sorption, sorption capacity, modification.

Іванченко А.В.

Дніпровський державний технічний університет

Пасс О.В.

Дніпровський державний технічний університет

ВИКОРИСТАННЯ ДОДАТКОВОГО ЕЖЕКТОРА В СИСТЕМІ ВАКУУМНОЇ КОНДЕНСАЦІЇ КОМПРЕСОРА СИНТЕЗ-ГАЗУ НА АГРЕГАТІ СИНТЕЗУ АМОНІАКУ

Робота присвячена дослідженню використання додаткового ежектора для поглиблення показу вакууму в системі вакуумної конденсації відпрацьованої пари компресора синтез-газу на агрегаті синтезу амоніаку. Поглиблення вакууму дозволяє знизити витрату природного газу котлами за рахунок зменшення споживання пари турбіною компресора. Зазначено актуальність проблеми економії природного газу у виробництві амоніаку. На підставі експериментальних досліджень виявлено вплив додаткового ежектора на технологічні параметри систем утворення та розподілу пари. Представлено основні переваги його використання.

Ключові слова: амоніак, компресор синтез-газу, система пароутворення та паророзподілу, система вакуумної конденсації, ежектор.

Постановка проблеми. Амоніак та його сполуки широко використовуються в усіх областях діяльності людини і, в першу чергу, у виробництві мінеральних добрив та синтезу таких важливих полімерних матеріалів, як поліаміди, поліуретани та ін. [1].

В Україні амоніак виробляється в основному на п'яти хімічних комбінатах великої одиночної потужності. Більшість із них побудовані у 80-х роках минулого сторіччя [2], і без оптимізації технології та модернізації наявних виробництв, у зв'язку з підвищенням цін на сировину, собівартість амоніаку значно зростає.

Основною сировиною у виробництві амоніаку є природний газ, який використовується як у процесі конверсії метану, так і для забезпечення агрегату парою. Пара потрібна для реакції конверсії і роботи турбін основних компресорів. Через високу вартість та великі витрати природного газу питання вдосконалення виробництва для зниження його споживання є актуальним.

На установці синтезу амоніаку парові турбіни компресорів та деяких насосів обладнано системами вакуумної конденсації відпрацьованої пари [3]. Такі турбіни перетворюють максимально можливу частину теплоти пари в механічну роботу. Модернізація систем конденсації для поглиблення показнику вакууму та підвищення КПД турбін дозволяє економити природний газ, що витрачається котлами на виробництво пари.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Науковцями запропоновано [4] модернізацію сис-

теми вакуумної конденсації, яка полягає в монтажі турбіни м'ятої пари, яка паралельно з'єднана на вході з лінією відпрацьованої пари турбіни компресора до повітряного та водного конденсаторів. Турбіна м'ятої пари обладнана електрогенератором для можливості виробітку електроенергії під час роботи повітряного конденсатора. Під час нормальної роботи конденсатор повітряного охолодження знаходиться в резерві та може бути використаний у випадку несправності в роботі турбіни м'ятої пари або двоступеневого теплообмінника.

У патенті [5] розроблено установку подання відпрацьованого конденсату із системи вакуумної витяжки в деаератор на установці синтезу амоніаку Одеського припортового заводу за рахунок використання очистки парового конденсату через відповідний фільтр.

На Северодонецькому об'єднанні «АЗОТ» установка синтезу амоніаку додатково обладнана двопорожнинним парогенератором [6], один із входів якого з'єднаний із трубопроводом виходу відпрацьованої пари з турбіни компресора технологічного повітря, а один із виходів його з'єднаний із входом подачі конденсату в повітряний конденсатор для його переохолодження.

Постановка завдання. На рис. 1 представлена схема паророзподілу агрегату синтезу амоніаку, в якій головним споживачем пари високого тиску (10,15 МПа) є турбіна компресора синтез-газу 1, велика частина якої виробляється так званим

допоміжним котлом 2, який вмонтовано в конвекційну зону реактора первинного риформінгу.

У процесі утворення пари деаерована вода з парозбірника 3 по опускних трубах надходить до котлів-утилізаторів та допоміжного котла 2, де за рахунок утилізації тепла конвертованого газу і спалювання паливного газу в топці допоміжного котла 2 відбувається випаровування води при тиску 10,15 МПа.

Пароводяна емульсія повертається до парозбірника (за рахунок природної циркуляції) по підйомних трубах. Для відділення води від насиченої пари парозбірник обладнано циклонними сепараторами і відбійними пристроями.

Насичена пара з тиском 10,15 МПа і температурою 583 К надходить у пароперегрівач 4, який вмонтовано в конвекційну зону печі первинного риформінгу. За рахунок утилізації тепла димових газів печі і допоміжного котла, які вилучаються димососами через конвекційну зону печі, а також тепла, що виділяється за рахунок додаткового спалювання паливного газу в пальниках пароперегрівача, пара перегрівається до 755 К і потрапляє в колектор пари високого тиску, звідки витрачається на роботу турбіни компресора синтез-газу та інші технологічні потреби.

Після проходження другого ступеня турбіни проводиться відбір частково відпрацьованої пари під тиском 3,8–4,3 МПа в колектор пари серед-

нього тиску за допомогою автоматичних регуляторів та клапанів відбору. Постійний тиск пари підтримується за допомогою регулятора і клапанів відбору. Пара середнього тиску витрачається на реакцію конверсії і на роботу решти компресорів.

Після четвертого ступеня компресора синтез-газу та інших компресорів 5 відпрацьована пара направляєється до систем вакуумних витяжок. Кожен компресор обладнано своєю системою вакуумної конденсації відпрацьованої пари, вакуумні лінії яких з'єднані між собою. У даній роботі розглянута система конденсації (рис. 2) компресора синтез-газу, оскільки цей компресор найбільш енергоємний і працює на парі високого тиску.

Система вакуумної витяжки, крім основного призначення, забезпечує також отримання парового конденсату, який використовується для охолоджуючих «сорочок» реактора вторинного риформінгу і котлів-утилізаторів 1-го ступеня.

До нижньої частини вихлопного паропроводу турбіни 1 приєднано конденсатозбірник 2, конденсат із якого під час роботи системи вилучається водоструминним ежектором 3 до збірника конденсату 4.

Далі неконденсована пара потрапляє у турбінні пучки секцій первинного повітряного теплообмінника (конденсатора) 5, трубки якого омиваються

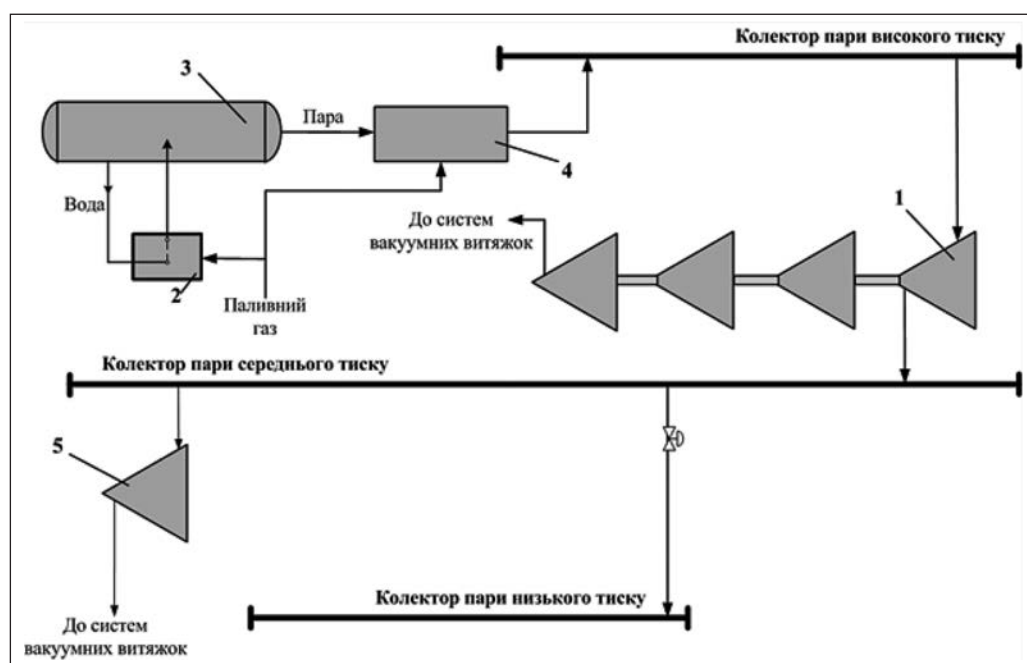


Рис. 1. Схема паророзподілу агрегату синтезу амоніаку
1 – перша ступінь турбіни компресора синтез-газу; 2 – допоміжний котел;
3 – парозбірник; 4 – пароперегрівач; 5 – інші компресори

потоками повітря, яке нагнітається вентиляторами. Піднімаючись по трубкам, пара конденсується та стікає у вихлопний колектор, звідки потрапляє до конденсатозбірника. У первинному повітряному теплообміннику конденсується близько 95% загальної кількості відпрацьованої пари. Решта неконденсованої пари, інерти та повітря проходять трубні пучки вторинного повітряного теплообмінника (дефлегматора), звідки конденсат стікає у збірник конденсату.

Залишкова пара відкачується ежекторами 6 і 7 до двоступеневого теплообмінника 8, в якому конденсуються залишки відпрацьованої пари в суміші з повітрям, інертами та парою від ежекторів за рахунок охолодження конденсатом, який подається з конденсатозбірника насосом 9 у трубний простір теплообмінника. Залишкова пара, інерти та повітря з міжтрубного простору теплообмінника викидаються в атмосферу на «свічу», а конденсат відводиться до збірника конденсату.

Вакуум у системі утворюється за рахунок значного зменшення об'єму відпрацьованої пари під час її конденсації. Підтримка вакууму в заданих межах у процесі роботи системи здійснюється групою із двох ежекторів. Ежектор першого ступеня 6 відкачує пару в першу секцію теплообмінника, а ежектор другого ступеня 7 відкачує пару з першої секції до другої секції теплообмінника.

До сопла ежекторів подається пара з колектора низького тиску (0,35 МПа). Далі з вихідного вузького перетину сопла пара надходить із великою швидкістю в так звану камеру змішування, при цьому тиск знижується. Пара з колектора низького тиску проходить по вузькому перетину та створює розрідження в камері змішування, яке забезпечує надходження відпрацьованої пари до двоступеневого теплообмінника.

У роботі запропоновано використання додаткового ежектора 10 для поглиблення вакууму в конденсаційній установці, що дозволяє знизити витрату пари високого тиску на турбину для економії природного газу. Вакуумна лінія додаткового ежектора пов'язана з паропроводом відпрацьованої пари після компресора синтез-газу. Лінія викиду пари з ежектора виведена до атмосфери.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження проведено на підприємстві «ДНІАПРОАЗОТ» у м. Кам'янському, в цеху синтезу амоніаку № 1Б на установці потужністю 1500 т рідкого амоніаку на добу.

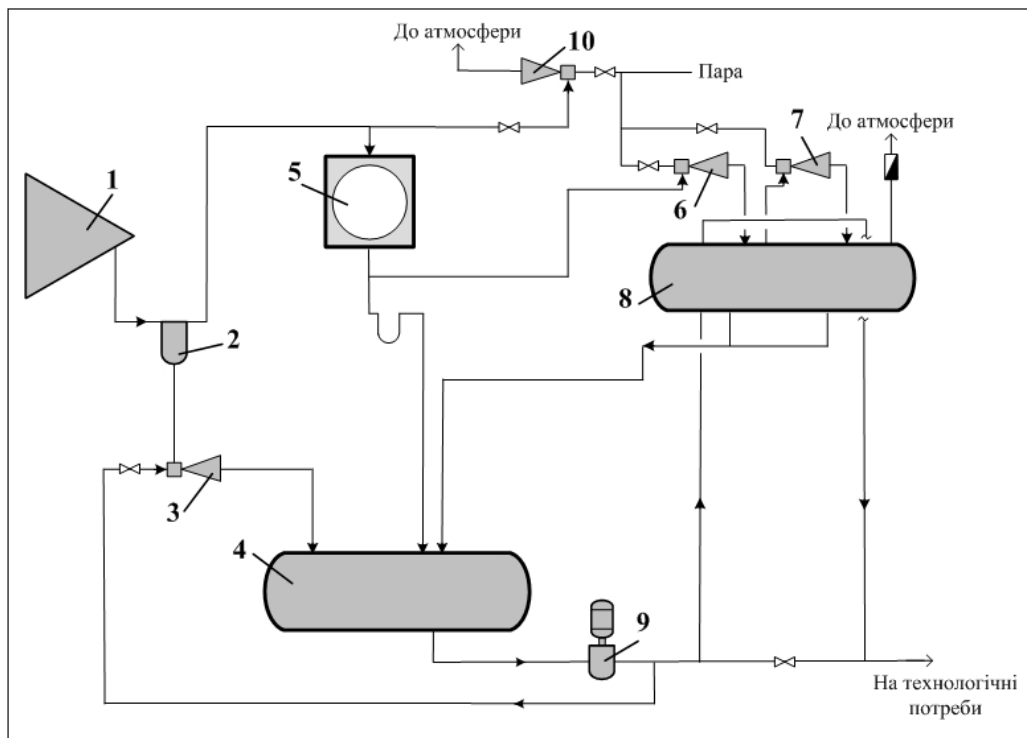


Рис. 2. Схема вакуумної витяжки компресора синтез-газу
 1 – турбіна компресора синтез-газу; 2 – конденсатозбірник; 3 – водоструминний інжектор; 4 – збірник конденсату; 5 – повітряний конденсатор; 6, 7 – ежектори; 8 – двоступеневий теплообмінник; 9 – насос конденсату; 10 – додатковий ежектор

Експеримент із включення в роботу додаткового ежектора проведено при навантаженні на первинний риформінг 40000 м³/год. на 3,9 МПа та при температурі зовнішнього середовища –2°C. При даній температурі оптимальний регламентований показник вакууму становить – 3630 Па...– 4120 Па. Більші показники вакууму можуть спричинити заморожування конденсату в трубах повітряного конденсатора або інших місцях вакуумної витяжки, що може призвести до тріщини та під час розморожування викликає підсмоктування повітря із зовнішнього середовища та зниження показників вакууму.

У ході експерименту встановлено вплив допоміжного ежектора на параметри системи утворення та розподілу пари (табл. 1).

Після подачі пари з колектора низького тиску на додатковий ежектор відбуваються такі процеси:

1) падіння тиску у колекторі пари низького тиску з 0,367 МПа до 0,348 МПа;

2) поглиблення вакууму в системі з –3700 Па до –4060 Па;

3) зменшення витрати пари високого тиску на турбіну компресора синтез-газу з 359,1 до 355,3 т/год.

Менша витрата пари високого тиску, у свою чергу, призвела до:

1) зростання тиску пари в парозбірнику з 10,15 МПа до 10,19 МПа;

2) зростання температури перегрітої пари з 755°C до 758°C.

Порівняння економічності системи пароутворення наведено в табл. 2.

У результаті зміни показників тиску та температури пари виконано такі дії з використанням системи автоматичного регулювання:

– для компенсації витрати пари низького тиску збільшено ступінь відкриття клапана, що з'єднує колектори пари середнього та низького тиску, і показник тиску пари повернувся до встановленого завдання 0,367 МПа;

– зменшено ступінь відкриття клапана видачі паливного газу на пальники допоміжного котла, в результаті чого знижено витрату газу з 4450 м³/год. до 4240 м³/год., і тиск пари в парозбірнику повернувся на встановлене завдання 10,15 МПа;

– прикрито клапан видачі паливного газу на пальники пароперегрівача, в результаті чого знижено витрату газу з 2970 м³/год. до 2885 м³/год., і температура перегрітої пари знизилась до встановленого показнику 755 К.

Експериментальні дані показують, що в результаті включення в роботу додаткового ежектора та поглиблення вакууму витрата паливного газу допоміжним котлом знизилась на 210 м³/год., та на 85 м³/год. – пароперегрівачем, що за місяць складе 212400 м³. При загальному споживанні газу 70000 м³/год. і виході рідкого амоніаку 62,5 т/год. витратний коефіцієнт складає 1120 м³ газу на виробництво однієї тонни готового продукту. Отже, економія газу за температури повітря –2°C за умов даного навантаження на первинний риформінг еквівалентна – 189,6 т рідкого амоніаку на місяць.

У разі поглиблення вакууму більше допустимих регламентом показників можна знизити швидкість вентиляторів повітряного конденса-

Таблиця 1

Вплив допоміжного ежектора на параметри системи утворення та розподілу пари

	Вакуум, Па	Тиск, МПа		Витрата пари високого тиску, т/год.	Температура перегрітої пари, К
		пари в котлі	пари низького тиску		
Без ежектора	–3700	10,15	0,367	359,1	755
З ежектором	–4060	10,19	0,348	355,3	758

Таблиця 2

Порівняння економічності системи пароутворення

	Тиск, МПа		Температура перегрітої пари, К	Витрата, м ³ /год.	
	пари в котлі	пари низького тиску		газу на котел	газу на пароперегрівач
До включення ежектора	10,15	0,367	755	4450	2970
Після стабілізації режиму	10,15	0,367	755	4240	2885

тора або вимкнути їх, що дозволить також економити електроенергію.

У випадку недостатньої кількості парового конденсату в «сорочках» реактора вторинного риформінгу та котлів-утилізаторів можна збільшити витрату конденсату з відпарної колони або відкрити подачу охолоджуючої води до «сорочок».

Висновки. Експериментально встановлено, що за температури повітря -2°C та у випадку наван-

таження на первинний риформінг $40000\text{ м}^3/\text{год.}$ на $3,9\text{ МПа}$ використання додаткового ежектора в системі вакуумної конденсації відпрацьованої пари компресора синтез-газу економить $210\text{ м}^3/\text{год.}$ паливного газу допоміжним котлом та $85\text{ м}^3/\text{год.}$ – пароперегрівачем. Також поглиблення вакууму дозволяє за необхідності економити електроенергію за рахунок зниження навантаження на вентилятори повітряного конденсатора.

Список літератури:

1. Кузнецов Л.Д. Синтез аммиака. Москва : «Химия», 1982. 296 с.
2. Янковский Н.А. Аммиак. Вопросы технологии. Донецк : «Новая печать», 2001. 122 с.
3. Инструкция по рабочему месту аппаратчика конверсии 6 разряда / ЧАО «ДНЕПРАЗОТ». Каменское, 2017. 173 с.
4. Установка для утилизации отработанного пара турбин производства амиака: пат. 23840А Україна. № 97062700; заявл. 09.06.1997; опубл. 16.06.1998. Бюл. № 4. 3 с.
5. Установка подання конденсату турбин производства амиака у деаератори : пат. 24922А Україна. № 97063331 ; заявл. 27.06.1997 ; опубл. 06.10.1998. Бюл. № 6. 2 с.
6. Установка для производства амиака : пат. 65356А Україна. № 2003076698 ; заявл. 16.07.2003; опубл. 15.03.2004. Бюл. № 3. 4 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ЭЖЕКТОРА В СИСТЕМЕ ВАКУУМНОЙ КОНДЕНСАЦИИ КОМПРЕССОРА СИНТЕЗ-ГАЗА В ЦЕХЕ СИНТЕЗА АММИАКА

Работа посвящена исследованию использования дополнительного эжектора для углубления показателя вакуума в системе конденсации отработанного пара компрессора синтез-газа на агрегате синтеза аммиака. Углубление вакуума позволяет снизить расход природного газа на котлы за счет уменьшения потребления пара турбиной компрессора. Указана актуальность проблемы экономии природного газа в производстве аммиака. На основании экспериментальных исследований определено влияние дополнительного эжектора на технологические параметры систем образования и распределения пара. Представлены основные преимущества его использования.

Ключевые слова: аммиак, компрессор синтез-газа, система парообразования и парораспределения, система вакуумной конденсации, эжектор.

THE USING OF THE SUPPORTING EJECTOR IN THE VACUUM CONDENSATION SYSTEM OF SYNTHESIS-GAS COMPRESSOR IN THE AMMONIA SYNTHESIS

The article is devoted to research of the using of an supporting ejector to make deeper vacuum value in the condensation system of synthesis-gas compressor in the ammonia synthesis. Deepening the vacuum reduces the consumption of natural gas to the boilers by reducing the steam consumption of the compressor turbine. The urgency of the problem of saving natural gas in ammonia production is noted. Based on experimental studies the influence of the supporting ejector on technological parameters of the steam formation and distribution systems is determined. The main advantages of its use are presented.

Key words: ammonia, synthesis-gas compressor, steam formation and distribution systems, vacuum condensation system, ejector.

УДК 631.632

Ларичева Л.П.

Дніпровський державний технічний університет

Черненко Я.М.

Дніпровський державний технічний університет

Зима Ю.С.

Дніпровський державний технічний університет

ПЕРЕРобКА НИЗЬКОЯКІСНИХ ФОСФОРИТІВ У ЗАЛІЗОАМОНІЙФОСФАТНЕ ДОБРИВО

Досліджено процес виробництва залізоамонійфосфатного добрива з низькоякісних фосфоритів шляхом сульфатнокислотного розкладання з подальшою амонізацією екстракційної фосфатної кислоти амоніаком. Показано, що амонізацією ЕФК рідким амоніаком при 60 °С до рН розчину 4,5 – 5,0 можливо отримати добриво такого складу, % мас.: $P_2O_{5\text{засв.}}$ – 44,5; $P_2O_{5\text{засв.}}$ – 44,2; $P_2O_{5\text{вод.}}$ – 28,0; N – 11,4; Fe_2O_3 – 4,65; Al_2O_3 – 4,14; F – 1,48. Присутні в добриві полуторні оксиди заліза та алюмінію пов'язані з фосфором і нітрогеном у вигляді комплексних залізоалюмоамонійних солей і є повільно діючими добривами.

Ключеві слова: кислотна переробка фосфоритів, екстракційна фосфатна кислота, амонізація, залізоамонійфосфатне добриво, повільно діюче добриво.

Постановка проблеми.

Україна має потребу в забезпеченні сільгоспвиробників складними мінеральними добривами, що містять нітроген, фосфор і другорядні елементи живлення, і має запаси фосфатної сировини, яка характеризується різноманітністю хіміко-мінералогічного складу. Значна частина вітчизняних фосфоритів відноситься до «бідних», що містять 6 – 12% P_2O_5 і значну кількість шкідливих для переробки домішок, зокрема полуторні оксиди заліза та алюмінію. Сьогодні немає достатньо надійної технології для переробки такої сировини, тому дослідження, спрямовані на розробку технології виробництва мінеральних добрив із низькоякісних фосфоритів, є актуальними та мають вагоме народногосподарське значення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Для виробництва добрив застосовуються в основному високоякісні фосфатні руди і їх концентрати із суворо регламентованим хіміко-мінералогічним складом. Запаси таких руд в Україні практично відсутні. Більша частина українських фосфоритів характеризуються наявністю низькоякісних важкозбагачуваних руд, що містять значну кількість домішок, зокрема полуторних оксидів заліза та алюмінію [1, с. 7].

Дослідження в галузі переробки «бідних» фосфатів проводяться в основному в таких напрямках: пряме внесення тонко розмелених фосфоритів на кислі ґрунти у вигляді фосфатного

борошна, переробка на добрива типу суперфосфату, сульфатнокислотна екстракція фосфатної кислоти з наступною переробкою останньої на добрива, нітратнокислотна переробка на добрива типу нітроамофоски [2, с. 109].

Найпростішим способом переробки фосфоритів є подрібнення, оскільки осадові породи, якими є фосфорити, мають дисперсну структуру з добре розвиненим поровим простором [3, с. 140]. Однак використання фосфоритного борошна є малоефективним через низьку технологічність його внесення, обмеження в застосуванні на різних ґрунтах, невисоку концентрацію поживних речовин у добриві.

Пропонований спосіб отримання фосфатних добрив шляхом механічної активації фосфатної сировини у планетарному шаровому млині з наступною обробкою вуглекислим газом [4, с. 174]. У результаті утворюються дикальційфосфат, що засвоюється рослинами, та розчинний гідрокарбонат кальцію. Однак даний метод є малоефективним через низьку концентрацію засвоюваних рослинами речовин у готовому продукті.

Розкладання фосфоритів мінеральними кислотами складає основну групу методів їх переробки у фосфатну кислоту та мінеральні добрива. Під час кислотної переробки низькоякісних фосфоритів більшість домішок переходить у розчин, із якого повільно кристалізуються [5, с. 64]. Це веде до погіршення умов технологічного процесу і втрат корисних речовин. Зниження температури

до 50-60°C і збільшення концентрації сульфат-іонів у розчині до 3-4% мас. дозволяє збільшити стабільність пересичених фосфатами заліза та алюмінію розчинів. Однак у процесі зберігання отриманої екстракційної фосфатної кислоти (ЕФК) відбувається кристалізація фосфатів із розчину, що веде до втрат P_2O_5 та ускладнює її подальшу переробку.

Швидкість розкладання природних фосфатів мінеральними кислотами є функцією багатьох факторів, зокрема концентрації кислоти, температури, співвідношення рідкої і твердої фаз, хіміко-мінералогічного складу і фізичної структури фосфатної сировини. Ступінь і швидкість розкладання фосфатної частини в інтервалі температур 40-80°C практично не залежать від температури. Але температура істотно впливає на розкладання домішкових мінералів, що містять полуторні оксиди заліза і алюмінію, і цей вплив неоднаковий для зразків руди, що відрізняються хіміко-мінералогічним складом [6, с. 185].

Перспективним напрямком переробки низькоякісних фосфоритів вважається нітратнокислотне розкладання, яке дає можливість комплексної переробки фосфатної сировини незалежно від якості початкового фосфориту за безвідходною технологією. У результаті нітратнокислотного розкладання Ново-амвросієвського концентрату отримана витяжка такого складу: (% мас.): $[HNO_3]$ – 4–6, $[H_3PO_4]$ – 11–12, $[Ca(NO_3)_2]$ – 40–46, $[H_2O]$ – 41–45, $[Fe(NO_3)_3]$ – 3–5, $[Al(NO_3)_3]$ – 3–5, $[Mg(NO_3)_2]$ – 1–3, $[NaNO_3]$ – 0,02–0,05, $[KNO_3]$ – 1–3, $[H_2SiF_6]$ – 0,5–0,7 [7, с. 227–228]. Однак отримана витяжка має високий вміст нітрату кальцію, тому під час її подальшої переробки амонізацією в готовому продукті завжди буде присутній нітрат кальцію, що значно погіршує фізичні властивості отриманого добрива.

Автори [8, с. 242] пропонують гідросульфатний метод переробки бідних фосфоритів, який при температурі 393-408 К за 40 хвилин із витратою реагентів $KHSO_4$ та H_2SO_4 105% від стехіометрії і мольним співвідношенням реагентів 1:1 дозволяє з низькоякісної фосфатної сировини Незвиського фосфориту отримати добриво, яке містить до 11,9% загального P_2O_5 ($P_2O_{5засв.} = 8,32\%$) при ступені розкладання фосфориту до 70%. Даний метод переробки фосфатної сировини заслуговує уваги, але за умови сумісної переробки «бідних» фосфоритів та відходів галургійного виробництва. При цьому отриманий продукт має невисокий вміст засвоюваних фосфатів, тому ефективність його є низькою.

Автори [9, с. 32] пропонують часткове вирішення проблеми переробки низькоякісних вітчизняних фосфоритів на ЕФК та її солі шляхом попередньої хімічної декарбонізації фосфатної сировини циркулюючими фторвмісними розчинами. Дослідження стосуються усунення впливу карбонатних домішок на технологію отримання ЕФК, але не вирішують проблеми переробки «бідної» фосфатної сировини з підвищеним вмістом полуторних оксидів заліза та алюмінію.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, що стосуються переробки «бідних» фосфоритів, свідчить про те, що на даний час немає достатньо надійної технології переробки української фосфатної сировини, що містить значну кількість домішок, зокрема полуторних оксидів заліза та алюмінію.

Тому є актуальним дослідити процес кислотного розкладання низькоякісних фосфоритів із метою отримання складних повільно діючих добрив.

Постановка завдання. Метою роботи стало дослідження процесу отримання залізоамоній-фосфатного добрива шляхом кислотного розкладання низькоякісних фосфоритів із подальшою амонізацією екстракційної фосфатної кислоти амоніаком.

Виклад основного матеріалу.

Дослідження проводили на зразку фосфоритної руди такого хімічного складу, % мас.: P_2O_5 – 16,4; Fe_2O_3 – 7,76; Al_2O_3 – 2,2; CaO – 25,9; MgO – 1,83; CO_2 – 4,1; SiO_2 – 30,1.

Кислотне розкладання фосфориту проводили в термостатованому реакторі, обладнаному мішалкою, контактним та контрольним термометрами. У реактор заливали розраховану кількість кислотного розчину, ідентичного розчину розбавлення у виробництві ЕФК (344 г на 100 г фосфориту). Після досягнення заданої температури дозували 100 г фосфориту та перемішували протягом 30 хвилин. Після цього обережно, по краплям додавали 93 %-ву сульфатну кислоту для підтримання заданого надлишку SO_3 у рідкій фазі (56 г H_2SO_4) і продовжували перемішувати пульпу протягом 3-4 годин. Після закінчення процесу розкладання пульпу фільтрували за допомогою вакуум-фільтру. Осад промивали водою (температура води – 40-50 °C).

Дана установка з достатнім ступенем наближення моделювала безперервний процес отримання ЕФК, оскільки на розкладання подавався розчин розбавлення, який складався із частини продукційної фосфатної кислоти (200 г) та першого промивного розчину (143 г), а тривалість

екстракції дорівнювала тривалості перебування екстракційної пульпи в реакторах безперервної дії.

Отриману фосфатну кислоту та фосфогіпс аналізували на вміст P_2O_5 , Fe_2O_3 і Al_2O_3 за відомими методиками [10].

Дослідним шляхом встановлено, що за умови безперервного процесу впродовж 3-4 циклів відбувалося накопичення домішок фосфатів заліза та алюмінію в розчині розбавлення, після чого кількість домішок у рідинній фазі стабілізувалася, і коефіцієнт вилучення P_2O_5 у рідку фазу залишався приблизно постійним (89-99 %).

Здійснення процесу екстракції при температурі 50-60°C з підтриманням надлишкового SO_3 у продукційній кислоті 3-4% (мас.) дозволило отримати фосфатну кислоту концентрацією 18-21% мас.

У процесі упарювання та зберігання відбувалося згущення отриманої кислоти, вона втрачала текучість і ставала непридатною для подальшої переробки. Тому подальші дослідження проводилися на зразку неупареної кислоти.

У дослідах процесу амонізації ЕФК із метою отримання добрива використовували кислоту, яка містила у % мас.: P_2O_5 – 20,6; Fe_2O_3 – 2,29; Al_2O_3 – 2,23; SO_3 – 3,5; F – 1,31. Нейтралізацію кислоти рідким амоніаком проводили при 60 °C до рН розчину 4,5 – 5,0. Тривалість процесу нейтралізації складала одну годину.

Отриману пульпу висушували при температурі 70 °C або упарювали, а потім сушили. Висушену до вологості 3% пульпу аналізували на вміст основних компонентів.

У процесі амонізації отриманий продукт такого складу, % мас.: $P_2O_{5\text{зар.}}$ – 44,5; $P_2O_{5\text{засв.}}$ – 44,2; $P_2O_{5\text{вод.}}$ – 28,0; N – 11,4; Fe_2O_3 – 4,65; Al_2O_3 – 4,14; F – 1,48. Слід визначити, що різниця у вмісті $P_2O_{5\text{зар.}}$ та $P_2O_{5\text{засв.}}$ у зразку є незначною, тобто практично весь фосфор у виробленому добриві є засвоюваним.

Вміст $P_2O_{5\text{засв.}}$ у продукті амонізації визначали шляхом розчинення наважки продукту у 2%-вій лимонній кислоті впродовж 18 діб із наступним визначенням P_2O_5 фотоколориметричним методом по жовтому молібденованадієвому комплексу [10]. Застосована вдосконалена методика визначення $P_2O_{5\text{засв.}}$ враховувала припущення, що в отриманому добриві значна кількість фосфору представлена у вигляді комплексних залізоалюмоамонійних солей та середніх фосфатів заліза та алюмінію. Дані речовини є засвоюваними рослинами, тому не можна нехтувати фосфором, що зв'язаний із полуторними оксидами заліза і алюмінію.

Хімічним та рентгенографічним дослідженням зразків отриманого добрива виявлено, що основними компонентами водорозчинної частини добрива є комплексні з'єднання: моноамонійфосфат ($NH_4H_2PO_4$), диамонійфосфат ($(NH_4)_2HPO_4$) та монокальційфосфат ($CaHPO_4$) з домішками магнійамонійфосфату, сульфату амонію, фосфатів заліза та алюмінію.

Водонерозчинна частина складалася в основному зі з'єднань складу $RNH_4(HPO_4)_2 \cdot 0,5H_2O$, що практично націло розчиняються в розчині Петермана, а також – CaF_2 , $(NH_4, K)_2SiF_6$ та $(NH_4)_2AlF_6$ і містила у % мас.: $P_2O_{5\text{зар.}}$ – 40,5; N – 6,7; Fe_2O_3 – 9,15; Al_2O_3 – 10,0; CaO – 2,37; F – 3,32. Рентгенограма залізоамонійного добрива та його водонерозчинного осаду наведена на рисунку 1.

Залізо споживається рослинами у значно більших кількостях, ніж інші метали, завдяки чому його раніше відносили не до мікро-, а до макроелементів живлення. Потреба рослин у залізі особливо відчутна на лужних ґрунтах, які є розповсюдженими в Україні. Тому отримане в результаті досліджень добриво може бути доволі ефективним, і не тільки в сенсі живлення рослин фосфором і нітрогеном, але і залізом.

Для визначення ступеня та швидкості засвоєння рослинами отриманого добрива представляло інтерес дослідити динаміку зростання вмісту $P_2O_{5\text{засв.}}$ у часі у продукті амонізації ЕФК (залізоамонійному добриві), у чистому $FePO_4 \cdot 2H_2O$ та у водонерозчинному осаді отриманого добрива, який містив у % мас.: $P_2O_{5\text{зар.}}$ – 40,5; N – 6,7; Fe_2O_3 – 9,15; Al_2O_3 – 10,0; CaO – 2,37; F – 3,32. Результати експерименту представлені на рисунку 2.

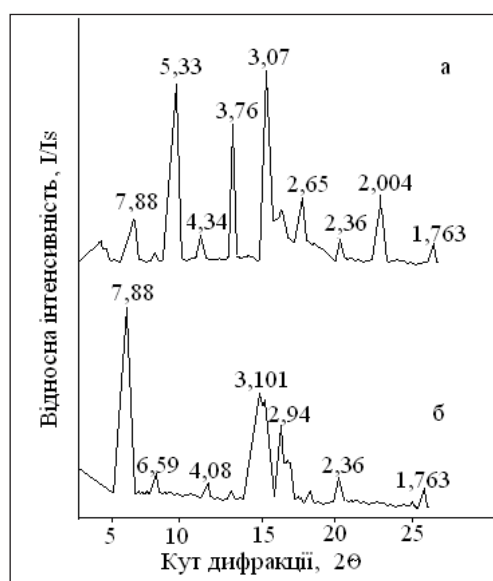


Рис. 1. Рентгенограма зразка добрива (а) та його водонерозчинної частини (б)

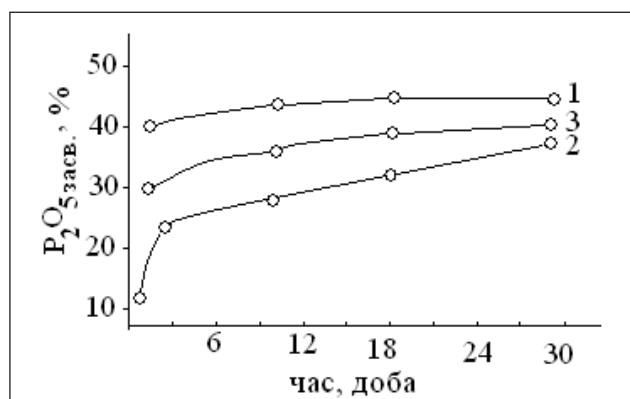


Рис. 2. Динаміка зростання вмісту $P_2O_{5засв.}$ у часі
1 – продукт амонізації ЕФК; 2 – $FePO_4 \cdot H_2O$; 3 – водонерозчинний осад продукту амонізації

Чисті фосфати заліза готувалися осадженням із гарячих фосфорнокислих розчинів гідроксиду заліза розчином міцного амоніаку з наступною промивкою осаду водою. Отриманий продукт містив у % мас.: P_2O_5 – 41,8; Fe_2O_3 – 37,7 та 20,5 – H_2O , що практично відповідало формулі $FeO_4 \cdot 2H_2O$.

Із рисунку видно, що впродовж 30 діб вміст $P_2O_{5засв.}$ зразка 2 (чистий фосфат заліза) збільшився практично у 2,9 рази (з 11,3% до 32,9%), зразка 3 – у 1,2 рази (з 30,0% до 36,0%). Величина $P_2O_{5засв.}$ в отриманому добриві повільно зростала у часі із 40,0% до

45,2% впродовж 18 діб, після чого мала практично постійне значення. При цьому кількість засвоюваного фосфору у зразку отриманого добрива була найбільшою. Процес розчинення фосфатів заліза у всіх трьох зразках був доволі тривалим, що дозволяє віднести їх до повільно діючих добрив.

Висновки.

Дослідження процесу сульфатнокислотного розкладання «бідних» озалізених фосфоритів із подальшою амонізацією ЕФК рідким амоніаком показали принципову можливість отримання залізоамонійфосфатного добрива із загальним вмістом P_2O_5 44,5 % мас.

Основними компонентами водорозчинної частини добрива є комплексні з'єднання фосфатів амонію, заліза та алюмінію з домішками магнійамонійфосфату та сульфату амонію. Водонерозчинна частина складалася в основному зі з'єднань складу $RNH_4(HPO_4)_2 \cdot 0,5H_2O$, CaF_2 , $(NH_4, K)_2SiF_6$ та $(NH_4)_2AlF_6$, і містила до 40,6% P_2O_5 .

Дослідження динаміки зростання вмісту $P_2O_{5засв.}$ в отриманому продукті показало, що фосфатні з'єднання отриманого добрива є засвоюваними, а тривалий процес вивільнення фосфатів у розчин лимонної кислоти дозволяє віднести отримане залізоамонійфосфатне добриво до повільно діючих.

Список літератури:

1. Вакал С.В., Астрелін І.М., Трофіменко О.Є. Сучасний стан фосфатно-тукової промисловості. Суми : Собор, 2005. 80 с.
2. Пляцук Л.Д., Вакал С.В., Андриенко Н.И. Методы переработки природных фосфатов. *Вісник СумДУ*. 2006. № 5. С. 108–115.
3. Скрильник Є.В., Бацула О.О., Головачев Є.А., Зіменко В.В. Перспективи використання українських фосфоритів у виробництві нових видів добрив. *Фосфор і калій у землеробстві. Проблеми мікробіологічної мобілізації: праці міжнар. наук.-практ. конф.* (Чернігів, 12-14 липня 2004 р.). Чернігів. 2004. С. 139–144.
4. Исследование возможности замены сильных минеральных кислот в технологии производства фосфорных удобрений на угольную кислоту / Г.С. Жаксыбаева та ін. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2017. № 3-2. С. 172–174.
5. Ларичева Л.П., Спіцина Л.О., Мігура С.І. Кислотное разложение фосфоритов с повышенным содержанием полоторных оксидов. *Scientific journal "Progressive researches "Science & Genesis". Prague (Czech Republic)*. 2014. P. 63–65
6. Ларичева Л.П., Волошин М.Д., Усенко В.І. Дослідження процесу розкладання фосфоритів фосфатною кислотою. *Збірник наукових праць ДДТУ*. Вип. 2(27). Дніпродзержинськ. 2015. С. 182–186.
7. Вецнер Ю.И., Савенков А.С., Белогур И.С. Исследование систем «карбамид – азотнокислотная вытяжка». *Праці Одеського політехнічного університету*. Вип. 42. 2013. С. 227–229.
8. Василінич Т. Дослідження процесу взаємодії природних фосфатів з гідросульфатами лужних металів. *Вісник ТНТУ*. 2011. Том 16. № 3. С. 237–242.
9. Теоретичні та практичні передумови попередньої хімічної обробки фосфоритів з підвищеним вмістом домішок / А.В. Лапінський та ін. *Наукові і матеріалознавчі проблеми хімії фосфору і його неорганічних сполук*: тези доп. VI наук.-техн. семінару по фосфору «Фосфор України-93». Львів : ЛДУ, 1993. С. 32.
10. Методы анализа фосфатного сырья, фосфорных и комплексных удобрений, кормовых фосфатов / И.М. Кувшинников и др. Москва : Химия. 1975. 218 с.

ПЕРЕРАБОТКА НИЗКОКАЧЕСТВЕННЫХ ФОСФОРИТОВ В ЖЕЛЕЗОАММОНИЙФОСФАТНОЕ УДОБРЕНИЕ

Исследован процесс получения железоаммонийфосфатного удобрения из низкокачественных фосфоритов путем сернокислотного разложения с последующей аммонизацией экстракционной фосфорной кислоты аммиаком. Показано, что аммонизацией ЕФК жидким аммиаком при 60 °С до рН раствора 4,5–5,0 можно получить удобрение следующего состава, % мас.: $P_2O_{5\text{заг}}$ – 44,5; $P_2O_{5\text{засв}}$ – 44,2; $P_2O_{5\text{вод}}$ – 28,0; N – 11,4; Fe_2O_3 – 4,65; Al_2O_3 – 4,14; F – 1,48. Присутствующие в удобрении полторные оксиды железа и алюминия связаны с фосфором и азотом в виде комплексных железоалюмоаммонийфосфатных солей и являются медленнодействующими удобрениями.

Ключевые слова: кислотная переработка фосфоритов, экстракционная фосфорная кислота, аммонизация, железоаммонийфосфатное удобрение, медленнодействующее удобрение.

PROCESSING OF LOW-QUALITY PHOSPHORITES IN IRON-AMMONIUM PHOSPHATE FERTILIZER

The research process of the receiving iron-ammonium phosphate fertilizer of low-quality phosphorites by sulfuric acid decomposition with the subsequent ammonization phosphoric acid by ammonia. It has been shown, that by ammonization extraction phosphoric acid of liquid ammonia at 60 °C to pH solution 4,5 – 5,0 you can get a fertilizer of the following composition, % weight: $P_2O_{5\text{заг}}$ – 44,5; $P_2O_{5\text{засв}}$ – 44,2; $P_2O_{5\text{вод}}$ – 28,0; N – 11,4; Fe_2O_3 – 4,65; Al_2O_3 – 4,14; F – 1,48. Present in the fertilizer a oxides of iron and aluminum, associated with phosphorus and nitrogen in the complex phosphate salts, and are slow-acting fertilizers.

Key words: phosphoric acid processing, extraction phosphoric acid, ammonization, iron-ammonium phosphate fertilizer, slow-acting fertilizers.

Михайлова Є.О.

Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця

Мороз М.О.

Український державний університет залізничного транспорту

Маркова Н.Б.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Багрова І.В.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ХІМІЧНО ОСАДЖЕНОГО КАРБОНАТУ КАЛЬЦІЮ

У статті досліджено залежність насипної густини, питомої поверхні, дисперсності і фазового складу хімічно осадженого карбонату кальцію від технологічних параметрів: способу змішування вихідних розчинів, температури і часу процесу. За результатами експериментальних даних розроблено математичні моделі, які встановлюють залежність головних фізико-хімічних характеристик карбонату кальцію від умов процесу його осадження. На їх основі проведено оптимізацію технологічного режиму и визначено параметри, що дозволяють одержати продукт, якість якого відповідає нормативним вимогам.

Ключові слова: карбонат кальцію, хімічне осадження, насипна густина, питома поверхня, дисперсність.

Постановка проблеми. Хімічно осаджений карбонат кальцію – це високодисперсний порошок білого кольору, який є невіддільним складником різноманітних композиційних матеріалів. Цей продукт широко використовується в багатьох галузях промисловості завдяки низькій вартості, високій білизні і низькому показнику заломлення світла, високому вмісту основної речовини (CaCO_3), відсутності важких металів, високій дисперсійній здатності, порівняно низькій насипній густині, розвиненій питомій поверхні тощо. Головна функція карбонатного наповнювача полягає у зниженні собівартості продукції, покращенні специфічних властивостей виробів (міцності, твердості, теплостійкості, кислотостійкості, крихкості), або він може застосовуватися самостійно як білий пігмент. В останні десятиліття потреба в хімічно осадженому карбонаті кальцію значно зросла, особливо в процесі виробництва паперу і картону, переробки каучуків і пластмас, а також під час виготовлення друкарських фарб, барвників і клейких речовин [1].

Більшість зазначених фізико-хімічних характеристик карбонатного наповнювача визначається особливостями його хімічного і кристалографічного складів. Зазвичай безводний CaCO_3 існує у

виді трьох кристалографічних модифікацій: кальциту, арагоніту та ватериту. Кристали кальциту зазвичай мають форму ромбоєдрів із гексагональною решіткою. Арагоніт має витягнуту (голчасту) форму з ромбічною решіткою. Ватерит утворює кристали з гексагональною решіткою сферичної форми. За нормальної температури і тиску ватерит нестабільний і переходить у кальцит і арагоніт. За зміни умов одержання осаду форма частинок CaCO_3 може трансформуватися в інші кристалічні форми. Отже, використання хімічно осадженого карбонату кальцію має значний практичний інтерес з технологічної точки зору, оскільки його властивості можливо регулювати в процесі синтезу і отримувати наповнювач необхідної якості [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На цей час виробництво хімічно осадженого карбонату кальцію в Україні займає лише незначну частину в загальному обсязі виробництва високодисперсних карбонатних наповнювачів [3]. Крім того, наявна технологія одержання CaCO_3 вапняним способом шляхом карбонізації суспензії $\text{Ca}(\text{OH})_2$ вуглекислим газом, що утворюється при термічному розкладанні природної карбонатної сировини при температурі близько $1\ 000\ \text{C}^\circ$ [4],

характеризується високою енергоємністю, малою інтенсивністю і високими вимогами до якості сировини, оскільки очищення від домішок в технології не передбачено. При цьому якість одержуваного продукту не завжди відповідає встановленим вимогам. Це стосується ступеня дисперсності і насипної густини, які залежать від параметрів процесу карбонізації, а також залишкової вільної лужності продукту у вигляді СаО, що є наслідком низького ступеня конверсії. Тому удосконалення наявного або розроблення нового способу отримання високоякісного синтетичного карбонату кальцію є перспективним напрямом основної хімії.

Для зниження енергоємності процесу в роботі [5] пропонується використовувати відходи виробництва гідроксиду кальцію замість суспензії Са(ОН)₂, послідовно одержуваної у вапняному способі. Але в цьому разі не вирішується проблема якості продукту щодо дисперсності і залишкової лужності. Це може бути усунуто, якщо як джерело іонів Са²⁺ використовувати нейтральні розчини солей кальцію за температури синтезу до 100 С°.

Доступною і дешевою сировиною для виробництва хімічно осадженого карбонату кальцію може стати дистилерна рідина виробництва кальцинованої соди. Авторами [6] наведено експериментальні дані щодо одержання карбонату кальцію з дистилерної рідини шляхом її карбонізації та амонізації. Істотні труднощі під час використання газоподібних реагентів пов'язані з необхідністю використання обладнання, великого за розміром, а також у зв'язку з чітким дотриманням певних швидкостей подання СО₂ і NH₃ та співвідношенням між ними. Практично неминучі у виробничих умовах порушення режиму подання газу можуть різко погіршити якість продукту. У роботі [7] карбонат кальцію рекомендується одержувати з дистилерної рідини за одночасного гідролізу карбаміду, що дає можливість контрольованого осадження та утворення осаду необхідної якості. Але використання карбаміду як достатньо дорогого реагенту може призвести до підвищення собівартості наповнювача.

Для покращення якісних характеристик і техніко-економічних показників процесу синтезу СаСО₃ авторами статті запропоновано застосовувати як сировину освітлену дистилерну рідину виробництва кальцинованої соди, що містить іони кальцію, та надлишковий маточний розчин виробництва очищеного гідрокарбонату натрію, до складу якого входять карбонатні та гідрокарбонатні іони. Ці обидві речовини є відходами у від-

повідних технологічних циклах, в результаті чого скидаються до відстійників-накопичувачів, створюючи екологічну небезпеку довкіллю.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження залежності фізико-хімічних характеристик карбонату кальцію від умов процесу його осадження з вихідних розчинів, а також визначення технологічних параметрів, що дозволять одержати продукт, якість якого відповідає нормативним вимогам.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для досягнення встановленої мети наукової роботи проведено експериментальні дослідження згідно з методиками, описаними в роботі [8].

Однією з головних характеристик хімічно осадженого карбонату кальцію виступає насипна густина ($\rho_{\text{нас}}$), яка не є абсолютною характеристикою. Її значення може коливатися залежно від дисперсного складу та форми частинок карбонату кальцію. На неї також впливає і наявність зростків кристалів, які містяться в продукті. Насипна густина будь-якої речовини має велике значення під час зберігання та транспортування продукту, а також враховується під час її подальшої переробки. На основі результатів досліджень встановлено, що на значення насипної густини карбонату кальцію, яке відповідно до 1-го сорту [8] не повинно перевищувати 0,25 г/см³, значно впливають послідовність змішування вихідних розчинів, температура і час процесу осадження.

Під час експерименту досліджено зразки СаСО₃, отримані при введенні освітленої дистилерної рідини до надлишкового маточного розчину (ДР→МР), введені маточного розчину в дистилерну рідину (МР→ДР) та при одночасному змішуванні вихідних розчинів (МР↓ДР↓). Результати досліджень наведено в табл. 1:

Аналіз експериментальних даних вказує на те, що осадки СаСО₃ з найменшою насипною густиною можливо отримати при одночасному змішуванні вихідних реагентів. Введення надлишкового маточного розчину в освітлену дистилерну рідину призводить до збільшення величини насипної густини продукту. Осадження СаСО₃ з найвищим показником $\rho_{\text{нас}}$ відбувається під час введення дистилерної рідини до маточного розчину. Слід зазначити, що така закономірність зберігається у кожному окремому випадку за температур 50, 70 і 90 С° відповідно. Таким чином, найбільш придатним для одержання осадженого карбонату кальцію з найменшою величиною $\rho_{\text{нас}}$ є спосіб, за якого вихідні розчини одночасно подаються до реактора-осаджувача.

Також встановлено, що за умов підвищених температур утворюється осад CaCO_3 з меншим значенням $\rho_{\text{нас}}$. Збільшення часу процесу осадження навпаки сприяє одержанню карбонату кальцію з високим показником насипної густини.

Велике значення як для процесу осадження в цілому, так і для подальшого використання продукту має питома поверхня ($S_{\text{пит}}$), яка для карбонату кальцію повинна становити не менше 6–12 $\text{m}^2/\text{г}$ [8]. Ця характеристика значно залежить від середнього розміру та форми частинок, а також від густини самої кристалічної речовини. Чим дрібніші частинки, тим більш розвинутою поверхню має продукт. Це пояснюється тим, що дисперсність, а відповідно і питома поверхня, є одними з головних характеристик, від яких залежать експлуатаційні властивості композиційних матеріалів, складовою частиною яких виступає даний наповнювач.

Дослідження впливу температури і часу процесу осадження за умов одночасного змішування вихідних розчинів на питому поверхню CaCO_3 представлено на рис. 1. Графічні дані говорять про складний характер відповідних залежностей. Встановлено, що при всіх температурах дослідження кінетичні криві питомої поверхні проходять через максимум, після чого значення $S_{\text{пит}}$ починає поступово зменшуватися. Це можна пояснити тим, що на початку процесу осадження утворюється велика кількість дрібних частинок, що призводить до зростання питомої поверхні. Причому, чим вища

температура процесу, тим швидше відбувається досягнення максимального значення $S_{\text{пит}}$. Відомо, що в реакційному середовищі, крім процесу кристалізації частинок карбонату кальцію, відбувається їх перекристалізація та утворення нових зародків іншої модифікації. Оскільки ці процеси проходять в результаті розчинення одних частинок та утворення інших, то на рис. 1 величина питомої поверхні CaCO_3 зменшується до встановлення рівноваги вказаних вище процесів.

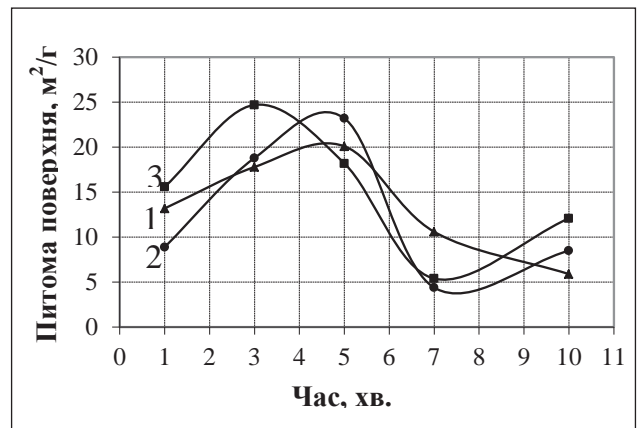


Рис. 1. Залежність питомої поверхні карбонату кальцію від часу і температури, С: 1 – 50; 2 – 70; 3 – 90

Результати рентгеноструктурного аналізу показали, що температура і час проведення процесу значно впливають на фазовий склад CaCO_3 [9]. Причому в кожному окремому випадку

Таблиця 1

Залежність насипної густини CaCO_3 від способу змішування вихідних розчинів, часу і температури, $\text{г}/\text{см}^3$

Час, хв.	Спосіб змішування вихідних розчинів								
	ДР→МР			МР→ДР			МР↓ДР↓		
	50 °C	70 °C	90 °C	50 °C	70 °C	90 °C	50 °C	70 °C	90 °C
1	0,381	0,313	0,265	0,352	0,303	0,25	0,334	0,287	0,229
3	0,413	0,355	0,281	0,381	0,332	0,248	0,348	0,291	0,231
5	0,447	0,369	0,31	0,418	0,347	0,276	0,379	0,308	0,257
7	0,481	0,407	0,363	0,449	0,393	0,339	0,43	0,366	0,321
10	0,554	0,432	0,375	0,469	0,418	0,357	0,448	0,402	0,309

Таблиця 2

Залежність фазового складу осадів CaCO_3 від часу і температури, мас. %

Час, хв.	Температура, С								
	50			70			90		
	К	А	В	К	А	В	К	А	В
1	20	10	70	10	20	70	95	5	
3	70	15	15	80	10	10	40	40	20
5	65	–	35	80	15	5	89	10	1
7	55	–	45	40	30	30	25	70	5
10	70	–	30	98	1	1	60	40	–

утворюється осад з різним вмістом кальциту (К), арагоніту (А) та ватериту (В), що пояснюється зміною умов осадження та властивостями самої фази. Динаміку структуроутворення осаду карбонату кальцію протягом певного часу за умов різних температур наведено в табл. 2:

Аналіз представлених даних показує, що низькі температури сприяють утворенню частинок ватериту, який в ході подальшого осадження за збільшення часу і температури процесу осадження перетворюється у кальцит або арагоніт. Збільшення температури призводить до поступового зростання масової кількості в осаді

кристалів арагоніту, розчинність якого за умов підвищених температур зменшується, порівняно з розчинністю інших форм CaCO_3 . Треба зазначити, що постійною фазою усіх зразків, що аналізуються, незалежно від умов осадження, виступає кальцит, який є найбільш термодинамічно стійкою модифікацією карбонату кальцію.

Під час обробки експериментальних даних за допомогою стандартних комп'ютерних програм одержано математичні моделі, які встановлюють залежність характеристик карбонату кальцію від часу і температури процесу осадження, а також від фазового складу зразків CaCO_3 :

$$\rho_{\text{нас}} = 787,335 + 18,522 \cdot \tau - 364,127 \cdot \left(\frac{T_0 + t}{T_0} \right)^2 +$$

$$+ 1534,918 \cdot \left(\frac{A}{100} \cdot d_A + \frac{B}{100} \cdot d_B \right),$$

$$S_{\text{пит}} = 178,924 - \frac{77,029}{\tau + 0,1} - 375,937 \cdot \left(\frac{T_0 + t - 280}{T_0} \right)^2 - 0,192 \cdot \rho_{\text{нас}} - 1635,98 \cdot \frac{K}{100} \cdot d_K -$$

$$- \tau \cdot \frac{T_0 + t}{T_0} \cdot \left(165,899 \cdot \frac{A}{100} \cdot d_A + 479,082 \cdot \frac{B}{100} \cdot d_B \right),$$

$$A = 10,091 - 0,0088 \cdot \exp(1,1 \cdot \tau) \cdot \frac{T_0 + t - 313}{T_0} +$$

$$+ 12,145 \cdot \tau^{2,5} \cdot \left(\frac{T_0 + t - 313}{T_0} \right)^2,$$

$$BK = \frac{B}{B + K} =$$

$$= \left(19,817 + \frac{556,138 - 0,893 \cdot (T_0 + t - 335)^2}{\exp(2 \cdot \tau)} \right),$$

де $\rho_{\text{нас}}$ – насипна густина осадженого CaCO_3 , кг/м^3 ;

$S_{\text{пит}}$ – питома поверхня CaCO_3 , $\text{м}^2/\text{г}$;

А, В, К – концентрація в осаді кристалів арагоніту, ватериту та кальциту відповідно, мас. %;

d_A, d_B, d_K – розмір частинок арагоніту, ватериту та кальциту відповідно, мкм ;

τ – час проведення процесу, хв. ;

t – температура процесу осадження карбонату кальцію, $^{\circ}\text{C}$;

$T_0 = 273 \text{ K}$,

Встановлено, що арагоніт виступає самостійною фазою, яка не залежить від масової кількості

інших модифікацій карбонату кальцію в осаді. Тобто на вміст кристалів арагоніту впливають тільки технологічні параметри процесу осадження. Інші кристалічні форми CaCO_3 (кальцит і ватерит) мають взаємозалежність одна від одної, а також від температури і часу процесу утворення осаду карбонату кальцію.

Оскільки утворення осаду карбонату кальцію складається з цілої низки процесів – кристалізації, перекристалізації, появи нових зародків, то не вдалося встановити чітку математичну залежність розмірів кристалів CaCO_3 від умов процесу осадження. Результати досліджень показали, що

розміри частинок карбонату кальцію коливаються в середньому від 0,02 до 0,05 мкм. Це свідчить про можливість утворення за даних умов високодисперсного хімічно осажденного карбонату кальцію, який може бути використаний як наповнювач у виробництві паперу, гуми та пластмас.

Висновки. Розроблені математичні моделі дозволили провести оптимізацію технологічного режиму процесу осаження карбонату кальцію з вихідних розчинів та визначити параметри, які дозволяють отримати продукт, що відповідає встановленим нормам. Для цього було вико-

ристано оптимізаційну комп'ютерну програму, в основу якої покладено метод звичайного покровового спуску. Під час розрахунків dK , dA , dB приймалися рівними 0,035 мкм, що відповідає середньому значенню розмірів частинок карбонату кальцію.

Встановлено: якщо осаження карбонату кальцію проводити при температурі до 85 °С протягом не більше 3-х хвилин, то одержаний продукт матиме насипну густину, яка не перевищує 0,24 г/см³, та питому поверхню, яка становить не менше 23 м²/г.

Список літератури:

1. Караваєв Т.А., Свідерський В.А. Перспективи ринку карбонатних наповнювачів в Україні. *Товари і ринки*. 2011. № 2. С. 18–26.
2. Аршинніков Д.І., Свідерський В.А. Порівняльний аналіз мінералогічного складу природної крейди родовищ України. *Технологический аудит и резервы производства*. 2015. № 4/4 (24). С. 7–11.
3. Аршинніков Д.І., Свідерський В.А. Дослідження фізико-хімічних властивостей поверхні осадових крейд вітчизняних родовищ. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2015. Т. 4. № 6(76). С.17–22.
4. Валиуллин А.К. *Производство химически осажденного мела*. Москва : НИИТЭИМ, 1984. 74с.
5. Посторонко А.И., Попов В.В. Использование отходов производства гидроксида кальция для получения химически осажденного мела. *Наукові праці ДонНТУ*. 2005. № 95. С. 123–126.
6. Золотарьова О.В. Виготовлення високодисперсного карбонату кальцію із дистилерної рідини содового виробництва. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2017. № 5(235). С. 12–15.
7. Архипова В.В., Смотраев Р.В. Дослідження процесу осаження карбонату кальцію з одночасним гідролізом карбаміду у водних розчинах хлориду кальцію. *Наукові вісті НТУУ «КПІ*. 2011. № 3. С. 115–118.
8. Mikhailova E.O., Panasenko V.O., Markova N.B. Calcium carbonate synthesis with prescribed properties based on liquid waste of soda production. *Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi*. 2016. Iss. 2(49). PP. 122–128.
9. Михайлова Є.О., Мороз М.О., Сінческул О.Л. Хімічне осаження карбонату кальцію різних кристалічних модифікацій. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2017. № 48(1269). С. 68–73.

ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ХИМИЧЕСКИ ОСАЖЕННОГО КАРБОНАТА КАЛЬЦИЯ

В статье исследована зависимость насыпной плотности, удельной поверхности, дисперсности и фазового состава химически осажденного карбоната кальция от технологических параметров: способа смешивания исходных растворов, температуры и времени процесса. По результатам экспериментальных данных разработаны математические модели, которые устанавливают зависимость главных физико-химических характеристик карбоната кальция от условий процесса его осаждения. На их основе проведена оптимизация технологического режима и определены параметры, позволяющие получить продукт, качество которого соответствует нормативным требованиям.

Ключевые слова: карбонат кальция, химическое осаждение, насыпная плотность, удельная поверхность, дисперсность.

RESEARCH AND MODELING OF PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF CHEMICALLY PRECIPITATED CALCIUM CARBONATE

In the article the dependence of bulk density, specific surface, dispersion and phase structure of chemically precipitated calcium carbonate on technological parameters: way of mixture of initial solutions, temperature and time of process, is investigated. According to the experimental data, mathematical models that determine the dependence of the main physical and chemical characteristics of calcium carbonate on the conditions of its precipitation are developed. On their basis the optimization of the technological mode is carried out and parameters allow to obtain the product, the quality of which corresponds to the normative requirements, is determined.

Key words: calcium carbonate, chemical precipitation, bulk density, specific surface, dispersion.

УДК 547.915

Николаева В.Г.

Одесский национальный политехнический университет

Пушкарев Ю.Н.

Одесский национальный политехнический университет

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕНДЕНЦИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПИЩЕВЫХ МАСЕЛ И ЖИРОВ

В статье обосновывается преимущество метода переэтерификации над методом гидрогенизации растительных масел, основываясь на сравнении физико-химических свойств продукта. Значительное место занимает объяснение таких физических параметров, как высокая пластичность, температура плавления и однородность. Уделено особое внимание данным исследования о влиянии трансизомеров на здоровье человека. Приведены статистические данные по содержанию трансизомеров в продуктах питания разных стран. Актуальность анализа обуславливается тем, что рассмотрены безопасные методы модификации масел.

Ключевые слова: саломас, триглицериды, гидрогенизация, переэтерификация, цис-связи, транс-связи, транс-жиры, энзимная переэтерификация, неспецифическая липаза.

Введение. Одним из самых необходимых компонентов рациона человека являются жиры, благодаря тому, что энергия, заключающаяся в них, легко запасается и при необходимости используется. Жиры, которые поступают с пищей, являются основой для создания мембран и других биологических структур. Следовательно, важно следить за тем, какие жиры поступают в наш организм [6, с. 244].

Постановка проблемы. Увеличение спроса населения на продукты здорового питания стало толчком для революции в пищевой промышленности. Мировому рынку пищевых продуктов уже нерентабельно делать упор только на увеличение вкусовой палитры продуктов. Появились новые рекомендации и требования от организаций здравоохранения и медиков к качественному составу продовольственных продуктов. Большое внимание уделяется уменьшению количества опасных для здоровья веществ и насыщению более полезными и питательными ингредиентами, улучшению физических качеств, таких как температура плавления, пластичность, однородность, а также высокая пищевая ценность. Вырос спрос и масштабы производства маргариновой продукции [5, с. 35].

Строение жиров. Молекула жира состоит из двух основных частей, одна из которых содержит до трех длинных цепочек молекул жирных карбоновых кислот, и другой основной части – триглицерида, который определяет функцию жира в организме.

Важным типом жиров, которые входят в основу клеточных мембран, являются фосфолипиды. Кроме двух жирных кислот, в их составе содержится также остаток фосфорной кислоты [6, с. 242].

Одни и те же жирные кислоты выполняют разные функции в жирах. При этом используются готовые молекулы, отщепленные от триглицеридов пищевых масел и жиров. Отдельные жирные кислоты организм не синтезирует, а получает с пищей. К таким кислотам относят незаменимые жирные кислоты, такие как линолевая и линоленовая.

У «насыщенных» жирных кислот все связи заполнены и соединяются между собой ковалентными связями (рис. 1, а). Молекулы веществ с двойными связями могут существовать в двух пространственных конфигурациях. В «ненасыщенных» соединениях присутствуют цис- и транс-двойные связи, позволяющие в дальнейшем присоединить атомы водорода (рис. 2, б и в).

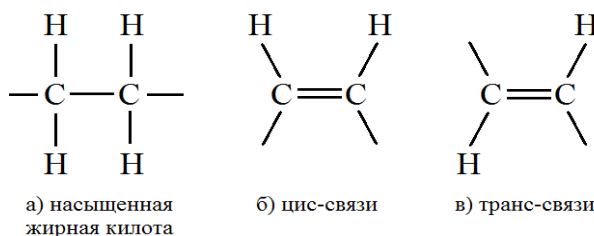


Рис. 1. Пространственная конфигурация насыщенных и ненасыщенных жирных кислот

В цис-изомерах одноименные боковые группы или атомы находятся по одну сторону от двойной

связи, а в транс-изомерах – по разные стороны. Естественной пространственной конфигурацией природных ненасыщенных жирных кислот является цис-форма. Ненасыщенные жирные кислоты в трансформе не способны выполнять свои функции в составе биологических структур. Термин «степень насыщения» жирных кислот используется для обозначения количества двойных связей между атомами углерода в цепи.

Жиры с высоким содержанием ненасыщенных жирных кислот обладают хорошей текучестью и имеют более низкую температуру плавления. Например, масла ненасыщенных жирных кислот, таких как рапсовое, оливковое, подсолнечное, соевое, остаются текучими при комнатной температуре. Пальмовое, кокосовое масло и животные жиры, которые содержат 40–50% ненасыщенных соединений, находятся в твердом состоянии.

С увеличением содержания ненасыщенных жирных кислот в масле повышается способность к окислению на воздухе, поэтому его труднее сохранить.

Гидрогенизация растительных жиров. Жиропереработка получила широкое развитие в связи с тем, что для производства спредов, маргарина и кулинарных жиров, а также некоторых других продуктов, требуются в основном твердые жиры. Развитие технологии процессов гидрогенизации и переэтерификации открыло перспективы получения из дешевого растительного масла твердой, устойчивой массы, используемой для производства спредов, маргаринов, кондитерских, кулинарных и фритюрных жиров [2].

Суть гидрогенизации заключается в том, что в результате взаимодействия водорода с ненасыщенным маслом, при определенной температуре и давлении в присутствии катализатора (чаще всего никелевого) снижается его непредельность [4, с. 194].



В результате гидрогенизации повышаются температура плавления, пластичность, твердость, стойкость к окислению и термическому воздействию. Степень гидрогенизации и конечная консистенция продуктов зависит от условий протекания процесса и времени обработки. Жир, получаемый в процессе гидрогенизации масел, называют *саломасом*. Гидрогенизированные масла и маргарины дешевле и дольше хранятся, в отличие от натурального сливочного масла. Для получения саломаса при гидрогенизации используют рафинированные растительные масла

в чистом виде (соевое, низкоэруковое рапсовое и подсолнечное) или их смеси с пальмовым или животным жиром [2].

Метод гидрогенизации, разработанный французским химиком Полем Сабатье в 1897 г., Вильгельм Норман применил для переработки жидких растительных масел в твердые жиры еще в 1901 г. Процесс гидрогенизации происходит при пропускании водорода под давлением через нагретое до 200 С° масло. При этом часть ненасыщенных жирных кислот превращается в насыщенные жиры. Получив широкое распространение в мире, установка гидрогенизации была построена в России для мыловарения.

Длительное время считалось, что гидрогенизированное масло безвредно и его рекомендовали как здоровый заменитель животных жиров. На этом этапе никто не обратил внимания на то, что при частичной гидрогенизации изменяется пространственная структура молекул, при которой около 60% ненасыщенных жирных кислот переходит в трансформу. Только к 1993 году появилась статья Уолтера Виллета, который утверждал, что потребление транс-жиров приводит к повышению риска сердечно-сосудистых заболеваний. Он доказал, что транс-жиры вызывают изменение соотношения липопротеидов высокой и низкой плотности в сторону увеличения первых, что в свою очередь является фактором, предрасполагающим к атеросклерозу [6, с. 242–243]. Дальнейшие исследования показали, что транс-жиры, по сравнению с цис-жирами, ведут себя иначе не только при жарке, но и в организме человека. Например, попав в состав фосфолипидов клеточных мембран, они влияют на работу белковых молекул, так называемых трансмембранных белков, что в свою очередь нарушает передачу сигналов, например, при взаимодействии гормонов с рецепторами, поскольку рецепторы как раз являются трансмембранными белками. В связи с тем, что фосфолипиды являются сырьем для синтеза регуляторных молекул иммунной системы, наличие в них жирных кислот в транс-конформации приводит к нарушению биохимии и воспалительным процессам. Кроме повышения риска развития атеросклероза и сопутствующих заболеваний сердца и сосудов, происходит снижение чувствительности клеток поджелудочной железы к инсулину (диабет второго типа), развитию хронических воспалительных процессов и ожирению.

Трансизомеры, доля которых в гидрогенизированном масложировом продукте достигает 40%,

повышают уровень холестерина в крови, нарушают нормальную работу клеточных мембран, способствуют развитию сосудистых заболеваний, отрицательно сказываются на половой потенции.

Данные, полученные в лаборатории физиологии Института питания, показали, что трансизомеры нарушают работу ферментов, портят клеточные мембраны, увеличивают уровень холестерина в крови. Учёные подсчитали, что ежедневное потребление 40 г гидрогенизированного маргарина, содержащего 5 г трансизомеров, увеличивает на 50% риск инфаркта, и выяснили, что среди лиц, употребляющих маргариновую продукцию, наблюдаются следующие явления [2]:

- повышается смертность от ишемической болезни сердца и число инфарктов миокарда;
- у женщин рак груди встречается чаще на 40%;
- ухудшается качество молока у кормящих матерей;
- дети рождаются с низким весом;
- увеличивается риск развития диабета.

По этим причинам гидрогенизированные жиры являются вредоносными для здоровья человека, в связи с чем в некоторых странах метод гидрогенизации запрещен для производства твердых жиров. Как видно из данных, приведенных в таблице 1, показатель содержания транс-жиров очень высок.

Таблица 1

Содержание транс-жиров в процентах от общего количества жиров в порции жареного картофеля, купленного в ресторанах «Макдоналдс» в разных странах [6, с. 244].

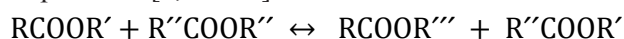
Страна (город)	Содержание транс-жиров, %
ЮАР	28
Перу	24
США (Нью-Йорк)	23
США (Атланта)	19
Польша	18
Великобритания (Лондон)	16
Франция	15
Италия	14
Испания	13
Финляндия, Норвегия, Швеция	12
Чехия	11
Германия, Венгрия, Россия	10
Голландия	7
Дания	1

Таким образом, если организму давать структурно измененный продукт, то повышается воз-

можность образования дефектных биологических структур, которые начинают давать сбой в самых разных ситуациях.

Переэтерификация растительных жиров.

Исходя из вышеизложенного, в мире все чаще стали применять процесс переэтерификации [3, с. 18] для модификации жиров, осуществляемый по реакции [4, с. 440]:



Переэтерификация (рандомизация) – обмен радикалами жирных кислот в молекулах глицеридов. Переэтерификация приводит к улучшению консистенции и физических свойств, а также способствует созданию устойчивой кристаллической структуры жира или смеси жиров. Переэтерификации, как и гидрогенизации, подвергают различные жиры и масла, как в смеси, так и в чистом виде. В отличие от гидрогенизации, процесс переэтерификации позволяет получать жировые системы с минимальным содержанием трансизомеров жирных кислот, так как данный процесс не оказывает влияния на изомеризацию двойной связи ненасыщенных жирных кислот. Кроме того, процесс переэтерификации позволяет вводить в жировую основу повышенное количество физиологически ценной линолевой кислоты.

У масел (одного или смеси), прошедших процесс переэтерификации, отмечается:

- повышение пищевой ценности жировой смеси, так как переэтерификация смесей тугоплавких жиров (пальмового масла, пальмового стеарина) с жидкими растительными маслами обеспечивает наибольшую степень превращения трудноусвояемых организмом высокоплавких глицеридов в низкоплавкие;
- изменение температуры плавления;
- повышение пластичности и однородности;
- увеличение способности жира кристаллизоваться в устойчивой мелкокристаллической полиморфной модификации, что является отличительной особенностью переэтерифицированных жиров.

Переэтерификация позволяет получать новые виды пищевых жировых продуктов с заданными свойствами, дает возможность регулировать содержание в пищевых жирах высокоплавких жирных кислот. При переэтерификации смесей растительных масел и животных жиров, а также тройных смесей (например, с саломасом) получают продукты высокого качества по структуре и органолептическим показателям, такие как кулинарные жиры или основа для производства спредов. Данная технология позволяет расширить ассортимент жиров для кондитерских изделий,

хлебопечення и консервирования, а также увеличить дозировку в маргарине негидрированных растительных масел, что существенно улучшает структурно-механические характеристики продукции.

Переэтерификация открывает большие возможности для изменения свойств жира без изменения их жирно-кислотного состава. Именно этот процесс позволяет максимально приблизить свойства заменителя к свойствам молочного жира, что дает возможность достигать широчайшего диапазона совместимости данных продуктов.

Как указано в работе [1, с. 70], в зависимости от используемого катализатора выделяют следующие виды переэтерификации: химическую и энзимную (ферментативную). При химической переэтерификации используются натриевые катализаторы (метилат или этилат натрия), которые наиболее распространены. Данные соединения не являются истинными катализаторами реакции, а служат лишь инициатором для их образования таковых (глицерата натрия). После реакции катализатор должен дезактивироваться и удаляться, поскольку переэтерификация является обратимой. Разрушение катализатора производится путем введения в систему воды или фосфорной кислоты. Продукт, полученный методом химической переэтерификации, подвергается дополнительной очистке и соответствует всем требованиям безопасности, установленным действующими нормативными документами.

В результате работ, проведенных производителями ферментных препаратов, энзимная переэтерификация стала доступна при производстве масложировой продукции в промышленных масштабах [7]. Существует два вида каталитических липаз, различающихся по проявлению специфичности:

– неспецифическая липаза – катализирует реакции в трех позициях глицерида случайным образом;

– 1,3-специфическая липаза – катализирует реакции только на внешних положениях глицерида.

Использование неспецифической липазы практически не имеет преимуществ перед обычными химическими методами, а получаемые продукты по своим свойствам подобны полученным химическим методом. Применение 1,3-специфических

липаз позволяет производить продукты, имеющие особый триглицеридный состав, который нельзя получить химической переэтерификацией. Основное направление использования таких липаз – производство эквивалентов масла какао.

Исходное сырье, используемое для энзимной переэтерификации, необходимо подвергать рафинации и дезодорации, так как при превышении качественных показателей (содержание свободных жирных кислот, первичных и вторичных продуктов окисления, влаги) значительно снижается активность фермента, что уменьшает возможность его многократного использования.

В процессе химической переэтерификации образуются метиловые эфиры жирных кислот (МЭЖК), присутствие которых вызывало неоднозначную оценку специалистов. Однако достоверно установлено, что МЭЖК присутствуют в липидах животных, грибов, бактерий. У человека и высших животных они содержатся в клетках поджелудочной железы, печени, кожи и в плазме крови. Ученым не удалось найти никаких научных исследований или публикаций, которые служили бы основанием для отнесения их к канцерогенным веществам.

Химическая переэтерификация, как и ферментативная, широко используется производителями специализированных жиров в Европе и СНГ для получения продуктов с меньшим содержанием насыщенных жирных кислот и отсутствием транс-изомеров и является безопасным методом модификации масел по всем показателям [1, с. 71].

Вывод. Благодаря методу гидрогенизации масложировая отрасль смогла удовлетворить растущий спрос на жиры и расширить линию продукции. Суть процесса заключается в насыщении водородом глицеридов ненасыщенных жирных кислот. В результате такого насыщения жидкие жирные кислоты превращаются в насыщенные и твердые высокоплавкие кислоты, но большинство из них переходят в трансформу, что небезопасно для здоровья человека. Сейчас происходит переход к переэтерификации и ферментации, что связано с возможностью минимального влияния на изомеризацию двойной связи насыщенных жирных кислот. Появилась возможность увеличения ассортимента и уменьшения себестоимости продукции, улучшения физических качеств продукта без изменения жирно-кислотного состава.

Список литературы:

1. Алексеенко А.В., Предыбайло А.В. Переэтерификация: мифы и реальность. *Молочная промышленность*. 2013. № 3. С.70

2. Гидрогенизация и переэтерификация жиров. 2017. URL: <https://tulchinka.ru/article/gidrogenizatsiya-i-pereeterifikatsiya-zhirov/>.
3. Ивашина О.А., Терещук А.В., и др. Переэтерификация как альтернативный способ модификации жиров, свободных от трансизомеров. *Техника и технология пищевых производств*. 2015. № 3. С. 18–23.
4. Лебедев Н.Н. Химия и технология основного органического и нефтехимического синтеза: Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. Москва. 1988. С. 440, 194.
5. Музыка Л. Производство мягких маргаринов с улучшенными физиологическими свойствами. *Масложировой комплекс : научно-практический журнал*. 2006. № 6. С. 35–38.
6. Развитие инновационной экономики : результаты, проблемы, перспективы : сборник научных статей международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию основания университета, Гомель, 9–10 октября 2014 г. Белкоопсоюз, Белорусский торгово-экономический университет потребительской кооперации; под науч. ред. С.Н. Лебедевой. Гомель, 2014. С. 242–245.
7. Sellami M. et al. Enzymatic transesterification of palm stearin and olein blends to produce zero-trans margarine fat. *BMC biotechnology*. 2012. №. 1. P. 48.

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕНДЕНЦІЙ У ВИРОБНИЦТВІ ХАРЧОВИХ МАСЕЛ І ЖИРІВ

У статті обґрунтовується перевага методу переетерифікації над гідрогенізацією рослинних масел, ґрунтуючись на порівнянні фізико-хімічних властивостей продукту. Значне місце займає пояснення таких фізичних параметрів, як висока пластичність, температура плавлення і однорідність. Придільено особливу увагу даними дослідження про вплив транс-ізомерів на здоров'я людини. Наведено статистичні дані за складом транс-ізомерів в продуктах харчування різних країн. Актуальність аналізу зумовлюється тим, що розглянуті безпечні методи модифікації масел.

Ключові слова: саломас, тригліцериди, гідрогенізація, переетерифікація, цис-зв'язки, транс-зв'язок, транс-жири, ензимна переетерифікація, неспецифічна ліпаза.

ANALYSIS OF CURRENT TRENDS IN THE PRODUCTION OF EDIBLE OILS AND FATS

In this article are substantiated advantage of the transesterification method over hydrogenation of vegetable oils, based on a comparison of the physico-chemical properties of the product. Significant place occupies explanation of physical parameters like high plasticity, melting point and uniformity. Special attention is devoted to results of research impact of trans-isomers on human health. Statistics data are adduced about the content of transisomers in food of different countries. The relevance of the analysis is due to the fact that considered safe methods for modifying oils.

Key words: salomas, triglycerides, hydrogenation, transesterification, cis-bonds, trans-bonds, trans fats, enzyme transesterification, non-specific lipase.

УДК 678-13:678.744

Похмурська А.В.

Національний університет «Львівська політехніка»

Гриценко О.М.

Національний університет «Львівська політехніка»

Баран Н.М.

Національний університет «Львівська політехніка»

Волошкевич П.П.

Національний університет «Львівська політехніка»

ОСОБЛИВОСТІ СИНТЕЗУ ТА СТРУКТУРА Ag(0)/пГЕМА-пр-ПВП НАНОКОМПОЗИТІВ, ОДЕРЖАНИХ ПОЛІМЕРИЗАЦІЄЮ З ОСАДЖЕННЯМ МЕТАЛУ

У статті досліджено особливості одержання Ag(0)-наповнених кополімерів 2-гідроксіетилметакрилату з полівінілпіролідом методом полімеризації з одночасним відновленням Ag⁺. Температурні умови, необхідні для хімічного відновлення, досягаються за рахунок тепла, яке виділяється під час екзотермічної реакції полімеризації. Використання комбінованої ініціювальної системи FeSO₄/ПБ дає можливість здійснювати процес за кімнатної температури, на повітрі. Підтверджено утворення полімерної матриці на основі прищепленого сітчастого кополімеру. Одержані Ag(0)-наповнені композити та гідрогелі характеризуються бактерицидними та антифунгальними властивостями.

Ключові слова: срібло, полівінілпіролідон, 2-гідроксіетилметакрилат, гідрогелі, сріблорізані гідрогелі, наночастинки, металополімерні композити.

Постановка проблеми. Причиною широкого та різноманітного використання полімерних гідрогелів є їх унікальна пориста структура разом з присутністю гідрофільних функціональних груп, які забезпечують набрякання полімерної матриці у воді та інших полярних розчинниках, що обумовлює високу проникність для розчинених низькомолекулярних речовин [1; 2]. Завдяки сорбційній здатності, еластичності та стабільності форми у водному середовищі, сумісності з різними біологічними системами гідрогелі використовуються в різних галузях народного господарства.

Модифікація гідрогелів та створення на їх основі металонаповнених композитів забезпечують одержання матеріалів зі спеціальними характеристиками та розширюють можливості їх використання [3]. Унікальність таких матеріалів полягає в поєднанні властивостей полімерної матриці та металу-наповнювача. Введення до структури гідрогелів частинок срібла Ag(0) відкриває додаткові можливості для надання їм нових властивостей, наприклад бактерицидних та антифунгальних, та робить незамінними для використання в медичній галузі як пов'язок для лікування ран, опіків, різних виразок. Головна проблема,

яка виникає під час створення таких матеріалів, полягає у виборі оптимальних способів введення Ag(0) у полімерну матрицю, оскільки від способу наповнення залежать величина та характер розподілу частинок наповнювача в об'ємі композиту, отже, його структура та властивості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Інтерес науковців до розроблення композиційних полімерів, особливо полімерних гідрогелів, які містять металічне срібло, постійно зростає [4]. З давніх-давен відомо про антимікробну (бактерицидну) властивість срібла, яка характерна також для гідрогельних полімерних матеріалів, наповнених його частинками [5; 6]. Через високу антимікробну дію срібла до широкого спектру мікроорганізмів Ag(0)-наповнені гідрогелі використовують для виготовлення бактерицидних та бактеріостатичних гелевих лікарських форм.

Створення металонаповнених гідрогелів внаслідок змішування попередньо одержаних компонентів на перший погляд є найбільш очевидним та простим методом, адже вихідні реагенти, полімери та частинки металу є стабільними об'єктами, які мають певні характеристики та синтезують з використанням стандартних мето-

дик і обладнання [7]. В разі гідрогелевих матеріалів фізичний метод змішування лежить в основі технології одержання композитів з розчинів полімерів [7], а також полімеризаційного наповнення [8]. Однак наповнення порошками не завжди дає бажаний результат з технологічної точки зору. Під час змішування компонентів композиції досягнення рівномірного розподілу частинок металу в гідрогелі не завжди є можливим через їх обмежену сумісність, а також можливість седиментації, яка викликає неоднорідність властивостей композиту, тому іноді для отримання гомогенних композитів синтез частинок металічного наповнювача здійснюють безпосередньо в матриці полімеру. Під час аналізування наукових джерел не виявлено конкретного домінуючого методу отримання частинок металевого наповнювача, проте спостерігається значна перевага хімічних методів перед фізичними, а саме хімічне відновлення в розчинах [3]. Процес здійснюють у присутності відновників різного типу. В разі срібла ними є формалін, гіпофосфіти калію та натрію, борогідрид натрію, гідразинборан. Використання токсичних відновників під час наповнення гідрогелів хімічним відновленням іонів металів є суттєвим недоліком, що значною мірою обмежує їх застосування, особливо в біомедичній галузі. Залежно від умов та природи окисно-відновної системи температура відновлення складає 60–140°C [9]. Більшої уваги заслуговують способи хімічного синтезу металевих частинок без застосування додаткових відновників, коли роль відновника відіграє розчинник [10] або полімер [11]. Проте наповнення відновленням іонів металів у сітці полімерної матриці потребує використання великих кількостей розчинів окисника та відновника, що вимагає додаткової стадії регенерації та супроводжується перевитратою реагентів. Крім того, цей метод, як й інші наявні методи одержання металонаповнених полімерів, є принаймні двостадійним та містить стадію синтезу полімерної матриці й стадію одержання частинок металу-наповнювача.

Таким чином, пошук та розроблення нових простих у технологічному виконанні та високопродуктивних способів одержання сріблonaповнених гідрогелевих матеріалів медичного призначення обумовлюють необхідність проведення досліджень в цьому напрямі.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження особливостей одержання сріблonaповнених композиційних полімерних гідрогелів на основі кополімерів 2-гідроксіетилметакрилату

(ГЕМА) з полівінілпіролідом (ПВП) методом полімеризації з одночасним осадженням металу.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Матеріали й методи досліджень. Як матрицю для наповнення Ag (0) вибрано рідкоструктуровані полімери, які одержували радикальною полімеризацією ГЕМА в присутності ПВП. Для кополімеризації використовували 2-гідроксіетилметакрилат, який переганяли у вакуумі (залишковий тиск склав 130 Н/м², T_{кип.} = 351 К), полівінілпіролідон високої очистки з ММ 12000 (сушили при 338 К у вакуумі 2–3 години). Ініціатором полімеризації вибрано ініціатор радикального типу пероксид бензоїлу (ПБ), який перекристалізовували з етанолу. Неорганічні солі (феруму (II) сульфат, аргентуму нітрат) використовували марок ч. д. а.

Досліджували композиції складу ГЕМА:ПВП=90÷70:10÷30 мас. ч. з використанням 10÷100 мас. ч. розчинника (H₂O). Необхідність присутності розчинника у вихідній композиції обумовлена розчиненням у ньому прекурсорів відновлення. Для відновлення Ag⁺ використовували окисно-відновну систему (ОВС) EtOH/AgNO₃. Синтез здійснювали за початкової температури T₀=50 °C (ініціатором є ПБ) та T₀=25 °C (ініціатором є ПБ/FeSO₄). Готували полімер-мономерну композицію (ПМК) з ініціатором ПБ (0,3 мас. %), розчиняючи за кімнатної температури в ГЕМА необхідну кількість ПБ та ПВП до одержання гомогенної суміші. Окремо готували розчин ОВС (P_{ОВС}), тобто водний розчин окисника AgNO₃ (18–50 г/л) з відновником C₂H₅OH (300 мл/л) з додаванням FeSO₄ (0,01 мас. %). ПМК та ОВС змішували та дозували в полімеризаційну форму. Після формування зразки одержаних композитів промивали у дистильованій воді задля видалення непрореагованих ГЕМА, ПВП, окисника та відновника, а також продуктів реакції відновлення.

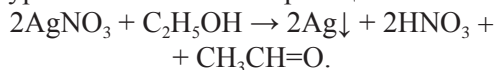
Зміну температури реакційного середовища під час реакції полімеризації досліджували термометричним методом за розробленою методикою [12]. Електронно-мікроскопічні дослідження здійснювали з використанням растрового електронного мікроскопу-мікроаналізатора РЕММА-102-02, рентгенографічні дослідження – на дифрактометрі ДРОН-4-07. Термічну стійкість композитів досліджували на дериватографі системи «Паулік-Паулік-Ердей». Бактерицидні та антифунгальні властивості зразків вивчали на тест-культурах бактерій *Escherichia coli* (E. coli), *Staphylococcus aureus* (S. aureus), *Staphylococcus epidermidis* (S. epidermidis), *Streptococcus viridans* (S. viridans)

і диплоїдного грибка *Candida albicans* (*C. albicans*) за методикою, поданою у джерелі [13].

Результати та обговорення.

Технологічні особливості одержання полімерів (вихідний склад композиції, тривалість та температура процесу) значною мірою залежать від кінетичних закономірностей полімеризації. Однак в разі здійснення одночасно двох процесів, а саме полімеризації та осадження металу, через багатоконпонентність вихідної композиції, присутність у реакційній системі прекурсорів та продуктів реакції відновлення конкретне визначення кінетичних параметрів полімеризації є ускладненим. Водночас полімеризація ГЕМА в присутності ПВП відбувається за радикальним механізмом через стадію утворення комплексу з перенесенням заряду (КПЗ) [2] та є процесом екзотермічним, тобто відбувається з гель-ефектом, що викликає саморозігрівання системи [14]. З огляду на це кінетичні закономірності полімеризації оцінювали термометричним методом за отриманими термометричними кривими, на яких були виділені характерні параметри, що відповідають часу початку гелеутворення ($\tau_{п.г.}$), часу досягнення максимальної температури екзотермії ($\tau_{макс.т.}$), області гель-ефекту ($\tau_{о.г.}$) та максимальній температурі екзотермії ($T_{макс.}$).

На основі аналізу попередніх досліджень [10] та з огляду на медичне призначення сріблосодержачого гідрогелю осадження срібла здійснювали з його нітрату у водно-етанольному розчині. Процес відновлення інтенсивно відбувається за температури 60–70°C за такою реакцією:



Термометричними дослідженнями доведено, що тепло, яке виділяється внаслідок екзотермії, є

достатнім для забезпечення перебігу реакції відновлення Ag^+ (рис. 1). В разі ГЕМА/ПВП композицій полімеризація в присутності ПБ відбувається з високою швидкістю вже за температури 50°C з $T_{макс.}=97^\circ C$, яка досягається через 34 хвилини з $\tau_{о.г.}=27$ хвилин (рис. 1, а).

Швидкість полімеризації залежить від складу ПМК: зі збільшенням у композиції вмісту ПВП зростає її полімеризаційна здатність, отже, зменшується час початку гелеутворення (рис. 1, б). Збільшення у ПМК кількості ПВП прискорює початок настання екзотермії, однак приводить до зменшення $T_{макс.}$ Зменшення $T_{макс.}$ в цьому разі можна пояснити зменшенням вмісту у ПМК мономеру, який викликає інтенсивне тепловиділення.

Підвищення T_0 полімеризації (рис. 1, а), звичайно, сприяє зростанню швидкості процесів полімероутворення, максимальної температури екзотермії, отже, швидкості осадження срібла. Однак через високу швидкість тепловиділення та погану теплопровідність полімеру відбуваються теплове розширення та виникнення внутрішніх напружень, що є причиною появи тріщин в об'ємі зразка [12]. Одним з методів здійснення полімеризації ГЕМА/ПВП композицій за низьких температур є полімеризація в присутності $FeSO_4$ [15]. Під дією іонів металів змінного ступеня окиснення процес відбувається з високою швидкістю за кімнатної температури, на повітрі, а залежно від складу композиції завершується через 10–60 хвилин. Завдяки дослідженню кінетики кополімеризації ГЕМА з ПВП в присутності іонів металів змінного ступеня окиснення встановлено, що процес відбувається за іон-радикальним механізмом з чітко вираженим гель-ефектом та мінімальним індукційним періодом [15]. Результати термометричних досліджень (табл. 1, поз. 1) підтверджують

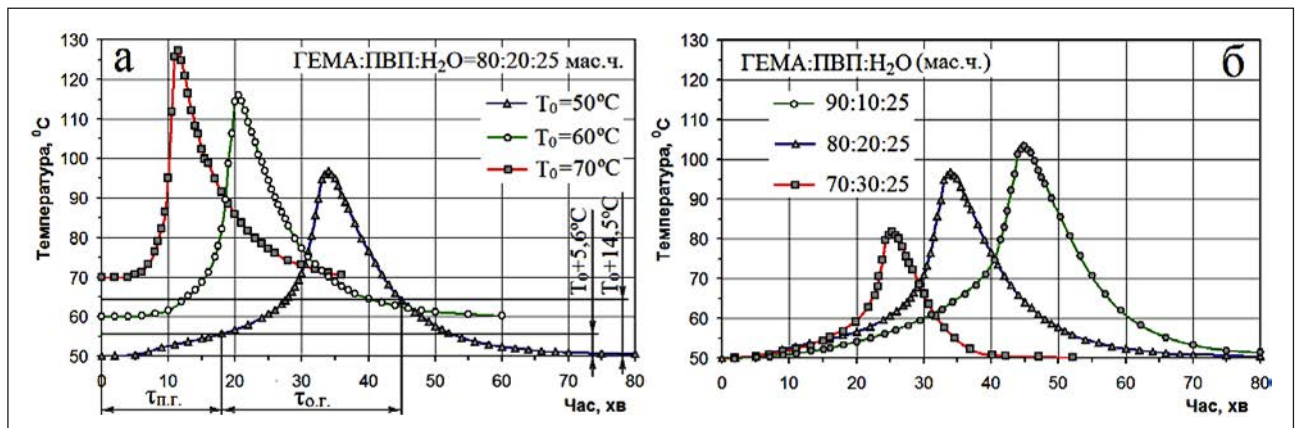


Рис. 1. Термометричні криві полімеризації залежно від початкової температури T_0 (а) та складу вихідної композиції (б)

Залежність параметрів гель-ефекту полімеризації від типу ініціуювальної системи
(ГЕМА:ПВП:Н₂О=80:20:10 мас. ч.)

№	Ініціуювальна система	ОВС	T ₀ , °C	τ _{п.г.} , хв.	τ _{T.макс.} , хв.	τ _{о.г.} , хв.	T _{макс.} , °C
1	FeSO ₄	–	25	0,3	10	22,7	52
2	ПБ	–	50	12	26	27	121
3	ПБ	AgNO ₃ /EtOH	50	14	30	31	107
4	FeSO ₄ /ПБ	–	25	2	33	44	83
5	FeSO ₄ /ПБ	AgNO ₃ /EtOH	25	18	37	29	81

екзотермічну природу полімеризації ГЕМА/ПВП композицій під дією Fe²⁺.

Однак в конкретному випадку для ПМК складу ГЕМА:ПВП=80:20 мас. ч. максимальна температура екзотермії становить 52°C та є недостатньою для інтенсивного відновлення Ag⁺, хоча й настає через 10 хвилин, а полімеризація відбувається без індукційного періоду. Водночас встановлено можливість полімеризації ГЕМА/ПВП композицій за кімнатної температури в присутності комбінованої ініціуювальної системи FeSO₄/ПБ. Полімеризація ГЕМА в присутності ПВП під дією ПБ за T₀=50°C характеризується максимальною температурою екзотермії 121°C, яка настає через 26 хвилин від її початку (табл. 1, поз. 2). В присутності ОВС швидкість процесу полімеризації є дещо меншою, адже зменшується T_{макс.}, зростають τ_{п.г.}, τ_{макс.}, τ_{о.г.}. За використання комбінованої ініціуювальної системи FeSO₄/ПБ для полімеризації ГЕМА/ПВП композицій досягнуто T_{макс.}=83°C за порівняно короткий проміжок часу 33 хвилини та в умовах початкової кімнатної температури (табл. 1, поз. 3). Отриманий ефект використано для полімеризації ГЕМА/ПВП композиції у присутності окисно-відновної системи EtOH/AgNO₃

(табл. 1, поз. 4). Максимальна температура екзотермії в цьому разі становить 81°C.

Забарвлення зразків, одержаних методом полімеризації з одночасним відновленням Ag⁺, змінюється від срібно-сірого до коричневого залежно від умов формування, складу вихідної ПМК та концентрації AgNO₃. Така зміна кольору, вочевидь, пов'язана з появою у структурі полімеру металічного срібла. Одержані зразки відрізняються високою якістю поверхні та гомогенною структурою полімерної матриці. В цьому разі не спостерігається виникнення макропор, а частинки срібла мають однаковий розмір у межах 100 нм (рис. 2, а).

Рівномірність розподілу частинок срібла в об'ємі полімерної матриці забезпечується ще на стадії змішування компонентів вихідної композиції завдяки комплексоутворенню [2; 15], яке супроводжується утворенням міжмолекулярних контактів між мономером, іоном металу та карбаматними групами ланцюга ПВП, отже, фіксації Ag⁺ в сітці полімеру.

Результати, отримані за допомогою СЕМ, не дають можливості стверджувати про одержання Ag(0) внаслідок хімічного відновлення Ag⁺ під час полімеризації. Для додаткового підтвердження утворення металічного наповнювача здійснено

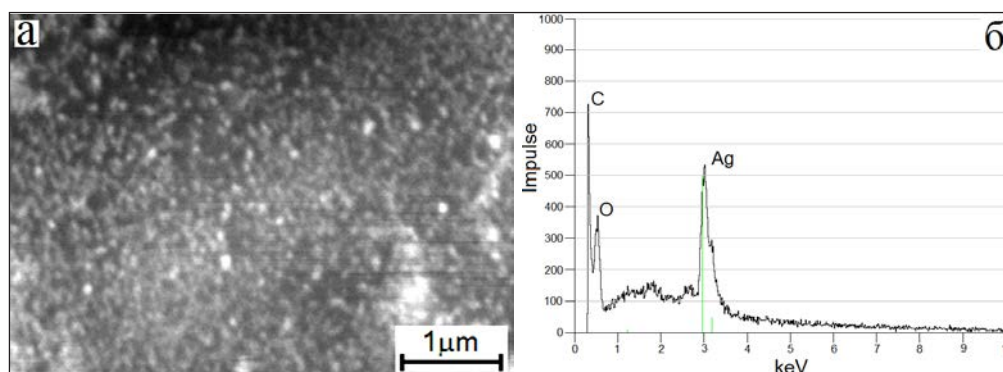


Рис. 2. СЕМ-зображення зламу зразка Ag(0)/пГЕМА-пр-ПВП композита (а) та спектр ЕДА поверхні наповнювача (б) (ГЕМА:ПВП:Р_{ОВС}=80:20:100 мас. ч.; [AgNO₃] = 0,11 моль/л, T₀=25°C)

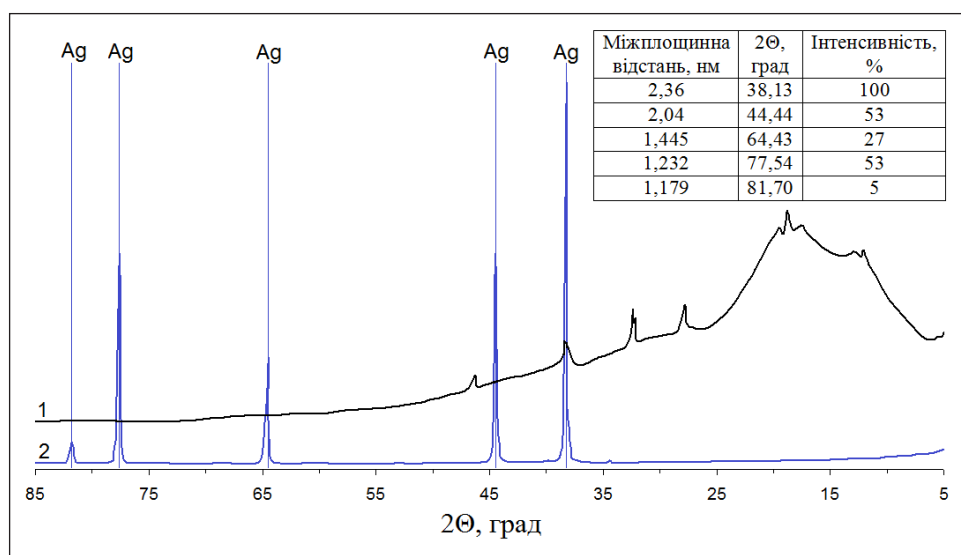


Рис. 3. Дифрактограми Ag(0)/пГЕМА-пр-ПВП композитів: 1 – до термообробки; 2 – після термообробки

рентгеноструктурний аналіз одержаних композитів (рис. 3, крива 1).

Однак, аналізуючи отриману рентгенограму, можемо зауважити, що на кривій відсутні піки, які відповідають нуль-валентному металу. Можна припустити, що під час синтезу утворюється рентгеноаморфне срібло, яке не проявляється на рентгенограмах. Для підтвердження висунутого припущення проведено рентгеноструктурний аналіз зразка після його термообробки (рис. 3, крива 2). Як бачимо, після рекристалізації з'являються піки, характерні Ag(0). Враховуючи той факт, що зразки для аналізу використовувалися відмитими від залишків окисника, відновника та продуктів реакції відновлення, можемо зробити висновок, що піки, характерні Ag(0), з'явилися після рекристалізації рентгеноаморфного металу, одержаного хімічним відновленням Ag⁺ під час полімеризації.

Задля підтвердження перебігу реакції з передачею кінетичного ланцюга на макромолекулу ПВП та утворення прищепленого кополімеру під час полімеризації ГЕМА в присутності ПВП з одночасним хімічним відновленням Ag⁺ були отримані й проаналізовані ІЧ-спектри ПВП, Ag(0)/пГЕМА-пр-ПВП композиту та Ag(0)/пГЕМА-пр-ПВП композиту, екстрагованого водою до повного видалення не прореагованого ПВП. Аналіз ІЧ-спектрів показує, що характеристичні смуги ПВП в областях 650 см⁻¹, 1 415 см⁻¹, 1 480 см⁻¹ присутні в спектрі композиту, екстрагованого водою. Цей чинник вказує на наявність у кополімері ланцюгів ПВП.

Здатність набрякати й не розчинятись у воді та інших розчинниках, а також результати термогравіметричних досліджень свідчать про формування сіт-

частої просторовозшитої структури в одержаних композитах. Прищеплення ГЕМА до ПВП з утворенням сітчастого кополімеру підтверджене порівнянням результатів термогравіметричного (ТГ) та диференційного термічного (ДТА) аналізів суміші гомополімерів поліГЕМА та ПВП у співвідношенні 80:20 з попередньо отриманим хімічним осадженням Ag(0) (зразок 1) та кополімеру із співвідношенням вихідної композиції ГЕМА:ПВП:Р_{овс}=80:20:100, одержаного полімеризацією з одночасним відновленням Ag⁺ (зразок 2).

Аналізуючи криву ТГ суміші гомополімерів, можемо зробити висновок, що втрата маси зразка починається приблизно при температурі 423К, тоді як композит починає втрачати масу приблизно при 463К, що свідчить про його більш щиту структуру. На кривій ДТА для суміші спостерігається пік екзотермічного ефекту при 423–513К, який зі зростанням температури змінюється ендоефектом в області 513–573К, а в інтервалі температур 598–693К знову настає екзотермічний ефект. Термоокиснення полімеру при 423–513К відбувається за місцем третинних воднів ПВП, які найслабше пов'язані з макромолекулярними ланцюгами внаслідок відтягування електронної густини на атом азоту. На кривій ДТА кополімеру екзоефект в температурному інтервалі 423–513К майже відсутній, що вказує на те, що кополімер окислюється повільніше, ніж суміш.

Однак ендоефект в інтервалі температур 513–598К та екзоефект при 633–723К мають місце. Зміщення інтервалу екзотермічного ефекту на кривій ДТА в область високих температур пояснюється його більшою термічною стійкістю.

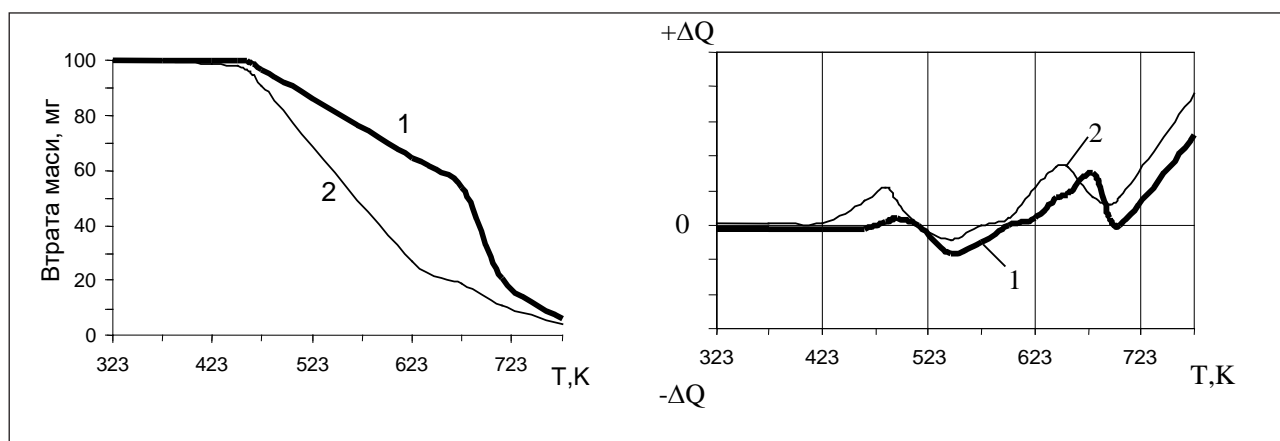


Рис. 4. ТГ (а) та ДТА (б) аналізи (ко)полімерів: 1 – Ag/пГЕМА-пр-ПВП композит (ГЕМА:ПВП:Р_{овс} = 80:20:10 мас.ч. [Ag] = 1,5 мас.%); 2 – суміш полі-ГЕМА/ПВП/Ag (полі-ГЕМА:ПВП = 80:20 мас.ч., [Ag] = 1,5 мас.%)

Таблиця 2

Бактерицидна та антифунгальна активність сріблорозповнених гідрогелів, одержаних на основі кополімерів ГЕМА з ПВП

Тривалість зберігання гідрогелевих плівок	Величина зони затримки росту мікроорганізмів, мм				
	<i>S. aureus</i>	<i>S. epidermidis</i>	<i>Str. viridans</i>	<i>E. coli</i>	<i>C. albicans</i>
1 місяць	12, 10, 9	12, 8, 9	11, 11, 9	3, 3, 0	11, 11, 7
18 місяців	5, 4, 8	5, 4, 5	11, 8, 8	–	0, 4, 2

В лабораторних умовах кафедри мікробіології Львівського національного медичного університету імені Данила Галицького виконані медико-біологічні дослідження одержаних Ag(0)/пГЕМА-пр-ПВП композитів. Внаслідок порівняльного аналізу бактерицидних та антифунгальних властивостей ненаповнених та Ag(0)-наповнених гідрогелів щодо використаних мікроорганізмів встановлено, що ненаповнені гідрогелі не мають бактерицидних та антифунгальних властивостей. Водночас матеріали, які містять Ag(0), блокують ріст бактерій та грибів (табл. 2).

Встановлено, що бактерицидні та антифунгальні властивості сріблорозповнених гідрогелів за умови зберігання в дистильованій воді з часом погіршуються та зникають відносно бактерій *Escherichia coli*.

Висновки. Встановлено можливість одержання Ag(0)/пГЕМА-пр-ПВП-композитів та їх гідрогелів

полімеризацією з одночасним хімічним відновленням Ag⁺ за використання екзо ефекту реакції полімеризації. Запропонований метод забезпечує осадження срібла без попереднього нагрівання полімер-мономерної композиції. Розроблені композиції відзначаються високою реакційною здатністю й можуть отверджуватись на повітрі за кімнатної температури протягом 10–40 хвилин з максимальною температурою екзотермії 70–121°C. Одержані матеріали характеризуються гомогенністю структури, наповнені наночастинками Ag(0), розмір яких перебуває в межах 100 нм. Підтверджено утворення полімерної матриці на основі прищепленого сітчастого кополімеру ГЕМА з ПВП. На прикладі тест-культур бактерій *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus epidermidis*, *Streptococcus viridans* та диморфного грибка *Candida albicans* підтверджено бактерицидні та антифунгальні властивості одержаних сріблорозповнених гідрогелів.

Список літератури:

1. Enas M.A. Hydrogel: Preparation, characterization, and applications. *Journal of Advanced Research*. 2015. № 6. P. 105–121.
2. Suberlyak O., Skorokhoda V. Hydrogels Based on Polyvinylpyrrolidone Copolymers. *Hydrogels. InTechOpen*. 2018. P. 136–214.
3. Nicolais L., Carotenuto G. Metal-Polymer Nanocomposites. John Wiley & Sons, 2004. 320 p.

4. Garcia-Astrain C., Chen Ch., Burón M. et al. Biocompatible hydrogel nanocomposite with covalently embedded silver nanoparticles. *Biomacromolecules*. 2015. Vol. 16. № 4. P. 1301–1310.
5. Franci G., Falanga A., Galdiero S. et al. Silver nanoparticles as potential antibacterial agents. *Review. Molecules*. 2015. Vol. 20. № 5. P. 8856–8874.
6. Skorokhoda V., Semenyuk N., Dziaman I., Suberlyak O. Mineral filled porous composites based on polyvinylpyrrolidone copolymers with bactericidal properties. *Chemistry & Chemical Technology*. 2016. Vol. 10. № 2. P. 187–192.
7. Булатова Р.Р., Бакеева И.В. Наноконкомпозитные гели. *Вестник МИТХТ*. 2011. Т. 6. № 1. С. 3–21.
8. Suberlyak O., Grytsenko O., Hischak Kh. Influence of the metal surface of powder filler on the structure and properties of composite materials based on the co-polymers of methacrylates with polyvinylpyrrolidone. *Materials Science*. 2016. № 52 (2). P. 155–164.
9. Гресь О.В., Лебедев Є.В., Матюшов В.Ф. Срібловмісні полімерні наноконкомпозити. *Полімерний журнал*. 2008. Т. 30. № 3. С. 186–191.
10. Shmakov S.N. Synthesis and properties of silver nanoparticles stabilized by polymers. *Abstr. III Int. Specialty polymers for environmentprotection, bio-, nanotechnology and medicine*. Almaty, 2008. P. 14.
11. Reactive Hydrogel Networks for Fabrication of Metal-Polymer Nanocomposites / I. Tarnavchyk, A. Voronov, A. Kohut, N. Nosova, S. Varvarenko et al. *Macromolecular Rapid Communications*. 2009. Vol. 30. № 18. P. 1564–1569.
12. Коваль Ю.Б., Гриценко О.М., Суберляк О.В., Волошкевич П.П. Встановлення температурного режиму одержання металогідрогелів полівінілпіролідону на стадії полімеризації. *Вісник НУ «Львівська політехніка»*. 2015. № 812. С. 372–378.
13. Grytsenko O., Pokhmurska A., Suberliak S. et al. Technological features in obtaining highly effective hydrogel dressings for medical purposes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 6. No. 6 (96). P. 6–13.
14. Суберляк О.В., Курило М.С., Шекета М.Л. Термометрические исследования блочной трехмерной полимеризации композиций на основе 2-ОЭМА. *Вестник Львовского политехнического института*. 1982. № 163. С. 41–43.
15. Suberlyak O., Skorokhoda V., Grytsenko O. Complex PVP-Meⁿ⁺ – active catalyst of vinyl monomers polymerization. *Materialy polimerowe i ich przetworstwo*. 2004. № 1. P. 140–145.

ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА И СТРУКТУРА AG(0)/ПГЕМА-ПР-ПВП НАНОКОМПЗИТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПОЛИМЕРИЗАЦИЕЙ С ОСАЖДЕНИЕМ МЕТАЛЛА

В статье исследованы особенности получения Ag(0)-наполненных сополимеров 2-гидроксиэтилметакрилата с поливинилпирролидоном методом полимеризации с одновременным восстановлением Ag⁺. Температурные условия, необходимые для химического восстановления, достигаются за счет тепла, которое выделяется при экзотермической реакции полимеризации. Использование комбинированной иницирующей системы FeSO₄/ПБ позволяет осуществлять процесс при комнатной температуре, на воздухе. Подтверждено образование полимерной матрицы на основе привитого сетчатого сополимера. Полученные Ag(0)-наполненные композиты и гидрогели характеризуются бактерицидными и антифунгицидными свойствами.

Ключевые слова: серебро, поливинилпирролидон, 2-гидроксиэтилметакрилат, гидрогели, серебрянонаполненные гидрогели, наночастицы, металлополимерные композиты.

SYNTHESIS FEATURES AND STRUCTURE OF AG(0)/PHEMA-GR-PVP NANOCOMPOSITES OBTAINED BY POLYMERIZATION WITH METAL DEPOSITION

In the article, the features of obtaining Ag (0)-filled co-polymers of 2-hydroxyethylmethacrylate with polyvinylpyrrolidone through the polymerization with simultaneous Ag⁺ reduction are investigated. Temperature conditions needed for chemical reduction are achieved due to the heat, which releases during exothermic reaction of polymerization. The use of combined initiating system of iron (II) sulfate/benzoyl peroxide makes it possible to carry out the process at room temperature, in the open air. It is confirmed the formation of polymer matrix based on grafted net copolymer. Ag(0)-filled composites and hydrogels obtained are characterized by antibacterial and antifungal properties

Key words: silver, polyvinylpyrrolidone, 2-hydroxyethylmethacrylate, hydrogels, silver-containing hydrogels, nanoparticles, metal-polymeric composites.

УДК 502.3: 504.03

Соболев В.О.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

АЛЬТЕРНАТИВНА ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТА І БЕЗПЕЧНА ЖИТТЄДІЯЛЬНІСТЬ ЗАДЛЯ ЗАХИСТУ ТА ЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИРОДНИХ РЕСУРСІВ

На основі результатів робіт щодо захисту довкілля від негативного антропогенного впливу із застосуванням модифікованих форм мінералів, які забезпечують екологічно чисте господарювання навіть в регіонах, забруднених катіонами важких металів, радіонуклідами тощо, розглянуті екологічні та соціальні аспекти сучасних умов життєдіяльності й шляхи вирішення життєво важливих проблем, що існують, зокрема, в житлово-комунальному комплексі. Досягнення щодо розроблення та створення нових матеріалів і технологій екологічної спрямованості підготували базу для реалізації ідеї створення повністю замкнутої безвідходної схеми автономної життєдіяльності та самозабезпечення на забруднених та неплодних територіях, зокрема в умовах територіальної ізоляції. Додатковою рисою такого підходу є попередження масової міграції населення з неблагополучних та постраждалих регіонів.

Ключові слова: глобальна зміна клімату, антропогенна діяльність, мінеральні ресурси, деградація та ерозія ґрунту, екологічно чисте землекористування.

Постановка проблеми. Протягом останніх більш ніж 20 років автор статті з односторонніми спрямовує свої зусилля на втілення ідеї відновлення та комплексної реабілітації забруднених, а також рекультивациі неплодних та пустельних територій. Як буде згадано далі, для цього ми раніше від усіх груп дослідників розробили, багаторазово випробували в різних умовах та утворили дослідне виробництво альтернативних самодостатніх органо-мінеральних композицій (ОМК) захисно-стимулюючої та пролонгованої дії. Нам навіть вдалось наприкінці 1990-х рр. попрацювати на замовлення МінНС України й отримати значні результати, які викликали жвавий інтерес, зокрема, на міжнародних конференціях. Були також пропозиції співробітництва на фінансовій основі, але тільки не з боку завжди зайнятих вузько корпоративними інтересами українських міністерств та відомств, які через свою професійну орієнтацію повинні були би бути заклопотаними можливостями прискороного та порівняно дешевого відновлення продуктивності ґрунтів, що постраждали від забруднень радіонуклідами, важкими катіонами та нафтопродуктами. З іншого боку, автору неодноразово доводилось відповідати, майже виправдовуючись, на запитання закордонних фахівців (з Канади, Східної Європи, Нігерії) про те, чому такі розробки не затребувані в Україні. Як би я міг відповісти, щоб не дуже образити рідних чиновників-урядовців?

Однією з причин виникнення гострих екологічних проблем є невжиття комплексу природо-

охоронних заходів, які включають перш за все контроль хімічних, біологічних, фізичних та екологічних факторів впливу з урахуванням реакції на них природних та антропогенних екосистем. До речі, в Україні, багатій водними ресурсами, майже відсутня чиста питна вода достатньою мірою. Від цього потерпає більшість міст України (міське населення країни складає близько 70%), тому разом з іншими досі не розв'язаними проблемами ЖКГ питання водопідготовки потребує сучасного вирішення. Однак проблеми, що ми обговорюємо, мають більш глобальний характер. «Людське суспільство і природа вступили у стан протиріччя. Діяльність людини наносить величезну, не виправдану шкоду довкіллю і життєво важливим ресурсам», – такого висновку дійшли 1 700 вчених із 71 країни в аналітичному труді «Попередження вчених Світу людству» ще в 2005 р. Більш жорсткої позиції дотримується відомий захисник атомної енергетики, який дослідив багато моделей еволюції життя [1] й зробив висновок про неминучість катастрофічності ефекту глобального потепління. Аналізуючи зміни клімату планети, автори [2] вважають, що природно-техногенні катаклізми стали визначальними для цивілізації та потребують прогнозування наслідків їх впливу на агроекосистеми, аналітичного дослідження їх продуктивності та біосферної ролі, адже рослини у формуванні альbedo мають 40%. З 3,5 млрд. га родючих земель, які освоєні людьми для цілей сільськогосподарства, за багатотисячолітню історію повністю неродючими вже стали 2 млрд. га.

В останні 50 років ми щорічно втрачаємо до 15 млн. га ґрунтів, а до середини сторіччя 9 млрд. людей на планеті будуть харчуватись всього із 750 млн. га, що залишаться [3]. На основі аналізу геокліматичних змін, а також ролі сільськогосподарської та промислової діяльності людини протягом тисячі років зроблені невтішні висновки про недалеке майбутнє Землі, засновані на виснаженні та деградації екосистем [4]. Українські чорноземи втрачають щорічно по 1 тонні гумусу з 1 га, а для компенсації таких втрат природним шляхом знадобляться сотні років.

Постановка завдання. Отже, головним завданням сьогодення є встановлення рівноваги між постійно зростаючими потребами людства й природними ресурсами, що дедалі більше виснажуються. Яким чином мінімізувати негативний вплив сучасної життєдіяльності на довкілля, як захистити його від подальшого «прогресу»? Згідно з метою статті далі розглянуті деякі аспекти прикладної екології, що безпосередньо стосуються захисту біосфери.

Виклад основного матеріалу дослідження. Фахівці пропонують заходи, вжиття яких спрямоване на мінімізацію наслідків глобального парникового ефекту, актуальне для народного господарства України, зокрема скорочення орних земель. Суттєва роль відводиться генетико-селекційним роботам з підвищення продуктивності та адаптації до кліматичних змін, а також поповненню ґрунтів гуматами [2; 4]. Сфера діяльності автора статті охоплює питання захисту довкілля від негативного впливу техногенних факторів із застосуванням модифікованих форм природних мінералів [5; 6], які забезпечують умови екологічно чистого землекористування на забруднених і неродючих ґрунтах.

Наявність в надрах Закарпатського регіону України цеолітистких мінералів, що є основою розроблених нами селективних сорбентів та органо-мінеральних композицій (добрих пролонгованої та вибіркової дії для біоземлеробства, зокрема на територіях, забруднених катіонами важких металів та радіонуклідами), дає змогу комплексно вирішувати обговорювані проблеми з використанням наших технологій. Однак результати діяльності в ім'я продовження життя на Землі багато в чому залежать не тільки від фахівців найбільш широкого профіля, але й від політиків, яким слід зрозуміти, що пріоритетом повинна стати необхідність інтеграції всіх ресурсів планети або хоча б розвинутих країн задля розроблення та реалізації технологій виживання, іншими сло-

вами, відновлення обличчя нашої колись зеленої планети. Людство має всебічно підготуватись до очікуваної зустрічі з астероїдом; створити й вивести на орбіту, наприклад, «сонячний парус» для регульованого екранування сонячної радіації над проблемними регіонами (з наявністю озонівих дір); озеленити пустельні та неплодні території, оновити джерела питної води; приступити до реалізації ідеології «сонячних вегетарієв», що здатні нагодувати населення продукцією, яку можна компактно вирощувати, зокрема в умовах територіальної ізоляції, за одночасної рекультивациі та консервації земель на користь наступних генерацій людей; утворити ареали самодостатньої життєдіяльності населення зі штучним кліматом та субстратом (при цьому розширення виробничих площ повинне мати вертикальний, а не горизонтальний характер); поставити заслін на шляху бездумного вироблення надр та зобов'язати нафтове лобі спонсорувати розвиток альтернативної енергетики тощо.

Основа екологічно чистого та продуктивного землекористування.

Автор статті розробив концепцію створення екопоселень, інфраструктура яких давала б змогу вирішувати проблеми виживання, зокрема великих груп населення, навіть в екстремальних умовах на основі забезпечення можливостей екологічно чистої життєдіяльності [6], адже Україна вже давно є зоною екологічного лиха через наслідки аварії на ЧАЕС, звалища токсичних відходів (промислових та побутових), екологічні катастрофи [7]. Отже, реабілітація забруднених територій, консервація земель, що очищуються, й хоча б часткове їх використання задля одержання екологічно чистої продукції поряд із захистом населення мало би бути найважливішим завданням проблеми ліквідації наслідків чорнобильської аварії в рамках вирішення завдання відновлення природокористування.

Отже, ерозія ґрунтів, деградація та значний ступінь забрудненості земель України обумовили крайню необхідність використання таких засобів оброблення ґрунту, що насамперед забезпечують умови екологічно чистого господарювання. На заході України існують поклади найкращих у світі (за якістю) природних цеолітів, а саме кліноптилоліту та морденіту (лише у надрах Сокирницького родовища нараховуються 130 млн. тонн мінералу). На їх основі була створена технологія виробництва органо-мінеральних композицій, що містять 1–5 мас. % сорбентів вибіркової дії, які зв'язують катіони важких металів та радіонуклідів

Таблиця 1

Вміст катіонів важких елементів у зразках ґрунту, оброблених вибіркоким сорбентом, мг/кг

Елементи	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
До оброблення	89	7,4	6,7	960	<0,1	10	1 790	1 520
Після оброблення	14	1,9	2,6	210	<0,1	4,7	578	369

(насамперед, ізотопи стронцію) в ґрунті та водних розчинах, що практично повністю виключає їх подальший перехід в ґрунтові води та біомаси рослин. ОМК на основі цеолітистких мінералів поліпшують структуру ґрунту, попереджають утворення нітратів, а також підвищують продуктивність агрокультур на 20–60%. Економічна ефективність ОМК як добрива доведена на прикладі багатьох культур; під час внесення ОМК прибуток отримується перш за все за рахунок підвищення приросту врожаю. При цьому мінодобрива в ґрунт не вносяться, або їх застосування скорочується до 50%. Не говорячи навіть про екологічний ефект, бачимо, що економічні переваги використання ОМК очевидні [8]. На землях з різним ступенем забрудненості проведена широка апробація ОМК задля екологічно чистого землекористування та підвищення врожайності.

В табл. 1 наведені результати оброблення забрудненого ґрунту вибіркоким сорбентом (Цеоліт Р) у співвідношенні 10 : 1 (через 8 годин). Результатами багаторічних випробувань в умовах рекультиваційного стаціонару доведено значне підвищення врожайності овочевих культур завдяки ОМК (табл. 2).

Таблиця 2

Приріст врожайності овочевих культур за рахунок органо-мінеральної композиції (2 т/га)

Культура	Приріст врожайності, ц/га
Картопля	30–46
Огірки	62–71
Капуста	9–12
Томати	8–12
Перець солодкий	6–9
Баклажани	28

Серед заходів, вжиття яких зменшує надходження важких катіонів та радіонуклідів в рослини, суттєву роль відіграє, наприклад, видалення верхнього шару 4–5 см, що дає змогу значно зменшити радіоактивне забруднення. Однак для цього потрібно було би перемістити близько 750 т ґрунту з 1 га, а за нашої технології «очищення» немає потреби переміщення забрудненого ґрунту, адже

для процесу “in situ” необхідно не більше 2–4 т цеолітової композиції. З 1994 р. створені органо-мінеральні композиції та вибіркокі сорбенти були випробувані як засіб забезпечення екологічно чистого господарювання, зокрема під час очищення ґрунту в передмісті Будапешту, забрудненому викидами акумуляторного заводу (1994 р.); неодноразово підтвержені випробуваннями на базах Інституту фізіології рослин та генетики НАН України (1995 р), Аграрного університету в Геделле (Угорщина, 1996 р), Інституту агропромислового виробництва у В. Бакті (Закарпаття, 1996–1998 рр.). У 1998 р. на замовлення МінНС України був успішно виконаний пілотний проект з реабілітації 100 га забруднених радіонуклідами територій в Овруцькому районі Житомирської обл. У 1999 р. на замовлення Українського НДІ сільгоспродіології були виготовлені партії ОМК пролонгованої та селективної дії, які в подальшому випробувані як засіб деконтамінації в умовах польових дослідів. У 1999–2002 рр. ОМК вироблялись для спільних дослідів з угорськими вченими та для продовження польових досліджень Закарпатським інститутом агропромислового виробництва УААН. За цей період на землях з різним ступенем забрудненості проведена широка апробація ОМК під час ведення екологічно чистого землекористування та задля підвищення врожайності. На основі отриманих практичних результатів були оформлені Рекомендації МінНС 1998 р. «Щодо використання органо-мінеральної композиції для повернення радіаційно-забруднених територій в продуктивне землекористування». Ефективність розробленої ґрунтової композиції стимулює активність кореневої системи рослин, яка забезпечена пролонгованим у часі постачанням вологи та поживних речовин до ризосферного шару [9].

З вищенаведеного зрозуміло, скільки зусиль (навіть під егідою МінНС) витрачено на розроблення комплексної технології, що так потрібна Україні, проте, незважаючи на це, вітчизняні фахівці зі своїм науково-технічним потенціалом й далі принизливо ігноруються державними установами на користь «авантюристам-грантоїдам». Через 10 років після всього, що ми зробили, МінНС надав зелене світло японському проекту

очищення ґрунту від цезію за допомогою ріпаку (такий був якийсь інтерес!), який зовсім не є меліорантом в цьому разі (подробіці викладені в джерелі [11]). До речі, через 20 років після аварії не цезієм забруднена земля, а стронцієм та америцієм. Чим ця робота закінчилась, невідомо, і МінНС вже нема. Чи хтось колись відповість, скільки й на що це відомство витратило грошей платників податків в Україні та світі? Існують також проблеми радіаційного забруднення, притаманні не тільки Чорнобильській зоні, але й Жовтководському району уранових копалень. Існує в Україні також пустельна зона «Олешківські піски» на Херсонщині (4 500 км²), яка могла би прогодувати 1,5 млн. фермерських господарств, адже застосування наших ОМК є можливим також задля озеленення й боротьби з опустелюванням. Наші досягнення щодо розроблення та створення нових матеріалів і технологій екологічної спрямованості підготували базу для реалізації ідеї створення повністю замкнутої безвідходної схеми автономної життєдіяльності та самозабезпечення на забруднених і неплодних територіях, зокрема в умовах територіальної ізоляції [10].

Деякі додаткові практичні рішення на базі розроблених ОМК стосуються очищення забруднених водних потоків та водної поверхні від нафти та інших органічних забруднень із застосуванням сорбційних матеріалів. Комплекс робіт виконується у співпраці з нижчезгаданими співавторами та партнерами.

1) Схема басейнової водопідготовки й очищення водних потоків, зокрема питної води, за допомогою цеолітвміщуючих продуктів (використана ідея В. Гомоная, УЖДУ), наведена на рис. 1, не потребує енергетичних витрат. Очищенню підлягають сільськогосподарські води, води з тваринницьких ферм, стічні та промислові води. При цьому отримується вода технічного призначення. За необхід-

ності можна здійснити глибоке доочищення води до питних стандартів.

2) Переробка золо-шлакових відходів ТЕС. В процесі діяльності теплоенергетичних підприємств утворюється велика кількість золо-шлакових відходів (ЗШВ), використання яких, зокрема сухої золи викиду з електрофільтрів ТЕС, обмежене у зв'язку з їх токсичністю, тому дуже актуальною є переробка таких відходів. Це можна зробити шляхом виділення зі складу золи як токсичних, так і цінних компонентів з подальшою утилізацією маси золи в будівельній індустрії та виробництві добрив. Пропонуємо реалізувати спосіб переробки ЗШВ за допомогою спеціально синтезованого вибіркового сорбенту на цеолітовій основі. Процес засновано на адсорбційному видаленні токсичних катіонів та їх безпечному похованні в мікрокапсульованому стані. Крім цього, забезпечується подальша утилізація продуктів переробки, зокрема фракції, яка включає мікроелементи, що видалені адсорбційною екстракцією та можуть бути використані як компоненти виробництва ОМК.

3) Геліовететарій – альтернатива самозабезпеченню на забруднених та неплодних територіях (використана ідея академіка Міжнародної академії екології О. Іванько). Практичне втілення ідеї згаданого вище екопоселення створює можливості втілення концепції Геліовететарію, який забезпечує енергоавтономне вирощування біоактивних продуктів харчування.

Розроблені системи життєзабезпечення геліотеплиць дають можливість практично не використовувати паливо, заощаджувати поливну воду, забезпечувати теплиці азотом та фосфором. Субстратом є ОМК, що розроблена для неплодних ґрунтів. Для реалізації технологій крапельного зрошення запропоноване безенергетичне отримання води з повітря.

4) Базальто-волокнисті матеріали для очищення водної поверхні (Г.С. Павлик та інші спеціалісти,



Рис. 1. Схема водопідготовки басейнового типу

ІХП НАН України). Задля вирішення важливих народно-господарчих питань раціонального використання водних ресурсів для очищення водної та твердої поверхні від нафтових забруднень був рекомендований ефективний матеріал на модифікованій базально-волокнистій основі (нафтоємність становить 15–20 кг/кг, можлива багаторазова регенерація).

Технологія й матеріал належать до фізико-хімічних, сорбційних способів очищення. Перевагами цього методу є можливість видалення забруднень будь-якої вуглеводневої природи практично до будь-якої остаточної концентрації, можливим є збирання палаючої нафти. Використання традиційних сорбентів для цього неефективне, тому що вони тонуть, насичуючись нафтою.

Висновки. Результати опробування, зокрема в польових умовах, вищезазначених технологій та

їх етапів спростовують наявну на управлінському рівні в Україні думку про збитковість вкладання коштів у виконання робіт екологічного призначення, адже окремі етапи окупаються за 3–5 років. Поетапне впровадження результатів розглянутих розробок забезпечить як поступове вирішення комплексу наявних міських проблем (завдяки поміркованому використанню земельних і водних ресурсів та енергоносіїв), так і створення умов екологічно чистої та безпечної для природи життєдіяльності в майбутньому. Очікуваними результатами масштабної реалізації є такі:

1) повернення забруднених (важкими катіонами, радіонуклідами) та порушених територій (військових баз та нафтобаз) у продуктивне господарювання;

2) можливість «вертикального» екологічно чистого агровиробництва, рекультивация та

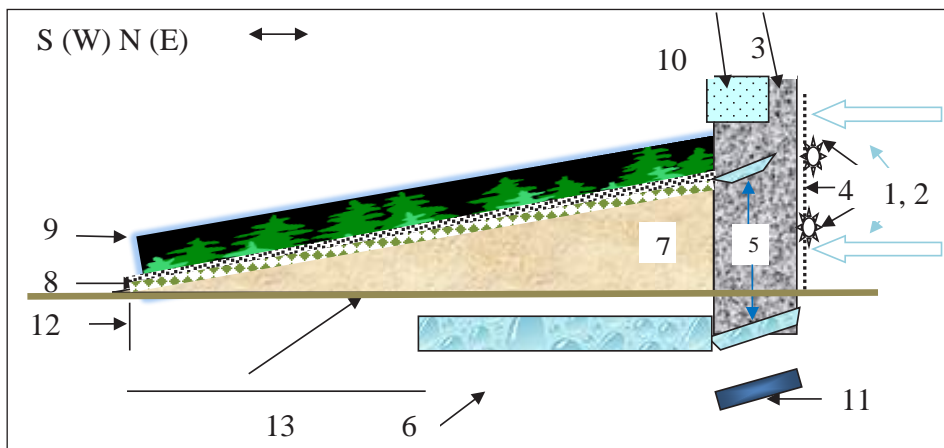


Рис. 2. Схема геліоветерарію із системою отримання води з повітря: 1, 2 – повітряні потоки, 3 – вентилятор, 4 – полімерна або металева сітка, 5 – водонакопичувачі, 6 – басейн з конденсованою водою, 7 – уклін 10–30 градусів, 8 – шар ґрунту, 9 – робочий об'єм вегетарію, 10 – лабораторія, 11, 12 – службові приміщення, 13 – рівень ґрунту



Рис. 3. Базальто-волокнисті бони для локалізації нафтопродуктів на водній поверхні

консервація земельних угідь і водних ресурсів на користь майбутніх генерацій людей;

3) озеленення й відновлення господарювання на неплодних та пустельних територіях, тваринництво та птахівництво в екологічно чистих умовах;

4) відновлення екологічно чистого муніципального середовища, забезпечення чистоти земельних

та водних ресурсів, скорочення викидів парникових газів;

5) використання ресурсів та відходів виробництва задля отримання вторинних продуктів.

Додатковою перевагою такої діяльності є попередження масової міграції населення з регіонів, що постраждали від екологічних та економічних негараздів.

Список літератури:

1. Lovelock J. The revenge of Gaia. London : Allen Lane. 2006. 177 p.
2. Ситник К., Багнюк В. Біосфера і клімат: минуле, сьогодення і майбутнє. *Вісник НАН України*. 2006. № 9. С. 3–20.
3. Иванчук Л. Глобальное потепление для нашего села. *Зерно*. 2006. № 2. С. 40–45.
4. Герасименко С., Герасименко В. Вариация урожайности зерновых культур в Украине: причины и последствия. *Актуальні проблеми економіки*. 2004. № 5. С. 140–149.
5. Some results of using Zeolite-based composites for treatment of soils polluted by radionuclides / W. Sobolev, V. Ijjin, S. Varany, V. Nizhko, V. Tkachenko. *CERECO'2000* : proceedings of the 3-rd International Conference on Carpathian Euroregion Ecology. Miskolc – Lillafured, Hungary, 2000 May, 21–24. P. 224–230.
6. Соболев В. Про можливості продуктивного використання забруднених земель завдяки органо-мінеральним композиціям з сорбентами селективної дії. *Винахідник і раціоналізатор*. 2005. № 10 (48). С. 15–17.
7. Холоша В., Соботович Э. Проблемы чернобыльской зоны отчуждения. *Наукова думка*. 1994. № 1. С. 3–17.
8. Угрин В., Соболев В., Корбут М., Троп Л. Про досвід продуктивного використання забруднених земель із застосуванням ОМК для ремідації ґрунту. *Реалізація державної політики у сфері регулювання ядерної і радіаційної безпеки в Україні* : праці V Міжнародної конференції (Київ, 11–14 жовтня 2006 р.). Київ : Міжнародний виставковий центр, 2006. С. 132–134.
9. Ґрунтова композиція для техногенно забруднених і неплодних ґрунтів пустельних територій : пат. 99999 Україна : МПК C05G 3/00, C03G 3/04. № 2012 08530 ; заявл. 10.07.2012; опубл. бюл. № 20, 6 с.
10. Соболев В. Промисловість цеолітів: шлях від виробництва і застосування до демократизації суспільства. *Регіональні проблеми та перспективи розвитку ринків збуту промислової продукції* : праці науково-практичної конференції (Київ, 6–7 грудня 2006 р.). Київ : УкрІНТЕІ, 2006. Т. 1. С. 160–163.
11. Как очистить Чернобыльскую зону? URL: <http://www.unian.net/science/45895-kak-ochistit-chernobyilskuyu-zonu-ot-adiatsii.html>.

АЛЬТЕРНАТИВНАЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТАЯ И БЕЗОПАСНАЯ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТЬ С ЦЕЛЬЮ ЗАЩИТЫ И СОХРАНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

На основе результатов работ касательно защиты окружающей среды от негативного антропогенного влияния с применением модифицированных форм минералов, которые обеспечивают экологически чистое хозяйствование даже в регионах, загрязненных катионами тяжелых металлов, радионуклидами и др., рассмотрены экологические и социальные аспекты современных условий жизнедеятельности и пути решения жизненно важных проблем, которые существуют, в частности, в жилищно-коммунальном комплексе. Достижения касательно разработки и создания новых материалов и технологий экологической направленности подготовили базу для реализации идеи создания полностью замкнутой безотходной схемы автономной жизнедеятельности и самообеспечения на загрязненных и бесплодных территориях, в частности в условиях территориальной изоляции. Дополнительной чертой такого подхода является предупреждение массовой миграции населения из неблагополучных и пострадавших регионов.

Ключевые слова: глобальное изменение климата, антропогенная деятельность, минеральные ресурсы, деградация и эрозия ґрунта, экологически чистое землекористовання.

ALTERNATIVE ECOLOGICALLY PURE AND SAFE ACTIVITY FOR PROTECTION AND CONSERVATION OF NATURAL RESOURCES

Practical application of the modified forms of minerals is ensuring an environmentally safe management even in regions, polluted by heavy metals cations, radionuclides and other. On the results of performance of jobs for protecting from negative anthropogenic impact on environment, the ecological and social aspects of modern terms of vital activity and ways for solving of vitally important problems, including in the housing communal economy, were considered. Achievements in development and creation of new materials and technologies for ecological orientation made ready a base for realization an idea of creation the fully closed-circuit and waste-free scheme of autonomous vital function and self-ensuring at the muddy and sterile territories, including in the conditions of territorial isolation. An additional feature of this approach is the prevention of mass migration of people from disadvantaged and affected regions.

Key words: global climate change, anthropogenic activities, mineral resources, soil degradation and erosion, ecologically pure land using.

УДК 621.35

Штефан В.В.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Єпіфанова А.С.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Метеньканич М.М.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Шкільнікова Т.В.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

СТРУКТУРНО-ФАЗОВИЙ СКЛАД КОМПОЗИЦІЙНОГО СПЛАВУ Co–Mo–TiO₂

Ця робота націлена на дослідження структури та фазового складу електролітично осадженого сплаву Co–Mo та композиційного покриття Co–Mo–TiO₂, одержаних на мідних зразках з удосконаленого аміачно-трилонатного електроліту за різними умовами електролізу. Представлені мікрознімки осадів демонструють глобулярну та дрібнокристалічну структуру. Наведені результати фазового складу одержаних сплавів і покриттів-композицій. Проведено аналіз рентгено-фазових спектрів, зроблено висновки щодо структури та складу фаз отриманих композиційних осадів, що дуже важливо для подальшого вивчення властивостей одержаних матеріалів та потенційних областей їх застосування.

Ключові слова: композиційний сплав, кобальт, молібден, титан, структура, фазовий склад.

Постановка проблеми. Електролітичні сплави Co–Mo поєднують у собі цінні якості обох металів: магнітні властивості кобальту і корозійну стійкість молібдену [1–6]. Хоча індивідуально кожен метал може мати перевагу в тій чи іншій області, поєднання матеріалів дає змогу регулювати їх властивості, що є дуже цінним у вирішенні конкретних завдань. Високотемпературні покриття на основі кобальту і молібдену використовуються у процесі виготовлення лопаток газових турбін, де висока міцність при підвищених температурах дуже важлива, технологія нанесення гальванічних покриттів отримала новий імпульс розвитку у зв'язку з необхідністю підвищення стійкості поверхні до окислення і повзучості [7]. Магнітні властивості сплаву Co–Mo вищі, ніж у чистого кобальту, що в поєднанні з високою зносостійкістю дає змогу використовувати такі осадки в магнітних мікроприладах, мікроелектромеханічних системах, магнітних реле і датчиках [8].

Унікальні властивості функціональних матеріалів [9–15], які можна отримати тільки за допомогою гальванічних методів, це тонкі плівки прогнозованого складу і структури, на поверхні яких завдяки синергетичному ефекту компонентів і взаємному розташуванню атомів металів реалізується поверхнева дифузія водню. Наслідком цього

є електрокаталітичні властивості цих матеріалів у реакції виділення водню [8].

Додавання TiO₂ істотно знижує рівень залишкових напружень, сприяє високій адгезії та утворенню компактних покриттів-композицій.

Відомо, що хімічний і фазовий склад матеріалів, одержуваних методом електроосадження, може істотно відрізнитися від аналогічних сплавів, отриманих металургійними методами. З цієї точки зору проблема цього дослідження досить актуальна нині, що пов'язано з її недостатньою розробкою [16].

Постановка завдання. Метою роботи є визначення структури та фазового складу сплаву Co–Mo та композицій Co–Mo–TiO₂ з полілігандного електроліту. Робота спрямована на дослідження природи включення неметалевих домішок до складу електродних осадів, визначення валентного стану елементів у них, а також одержання інформації про їх структуру та морфологію.

Методика експерименту

Електроосадження проводили на мідному зразку у вигляді пластин (1,5×1,6×2 см²) для сплаву Co–Mo та (1×1×2 см²) – для композицій Co–Mo–TiO₂. Однією з перших операцій є підготовка поверхні зразків, вона включає в себе: попереднє механічне полірування від технологічних

забруднень та продуктів корозії, знежирення в розчині соди з метою найбільш повного видалення масляних слідів, пилу, солей і поліпшення змочування поверхні металу електролітом. Наступною підготовчою операцією обробки металевих пластин є травлення поверхні металів у розчині нітратної кислоти густиною 1,15 г/см³ із подальшим їх промиванням у дистильованій воді.

Осадження сплаву Со–Мо проводили з удосконаленого аміачно-трилонатного електроліту, склад та режим електролізу описано в описі патенту [17]. Формування композиційних покриттів Со–Мо–TiO₂ здійснювали з модифікованого діоксидом титану аміачно-трилонатного електроліту.

Розчини готували на дистильованій воді з реактивів марок «ч» і «хч». Наважки твердих речовин зважували на аналітичних вагах із точністю до четвертого знаку. Регулювали *pH* розчину при осадженні осадів за допомогою додавання NH₄OH та H₂SO₄ та NaOH при одержанні покриття Со–Мо–TiO₂.

Електроліз здійснювали з використанням джерела постійного струму Б5–44 у двохелектродній системі в гальваностатичному режимі у процесі безперервного перемішування магнітною мішалкою. Отримані зразки з осадом промивали дистильованою водою і сушили на повітрі. Допоміжним електродом служив анод із платинової сітки.

Таблиця 1

Умови осадження покриттів

	Со–Мо	Со–Мо–TiO ₂
<i>j</i> , А/дм ²	1–10	10–40
<i>V</i> , мл	250	100
<i>T</i> , °	70	70
<i>τ</i> , хв.	10–40 (2 шари)	30 (2 шари)

Структура покриттів вивчена із застосуванням металографічного мікроскопу Leica DM ILM із цифровою відеокамерою Leica DFC 295 за підтримки відповідного апаратного та програмного забезпечення.

Дослідження фазового складу отриманих покриттів проводили на рентгенівському дифрактометрі ДРОН–3.0 (CuKα–випромінювання).

Виклад основного матеріалу дослідження. Аналіз мікроснімків показав, що покриття Со–Мо є суцільним та має глобулярну текстуру (рис. 1). Як встановлено раніше в нашій роботі [5], де опрацьовані режими електролізу осадження з аміачно-трилонатного електроліту, густина струму та *pH* розчину суттєво впливає на вміст молібдену в сплаві, що, своєю чергою, є значним фактором у процесі керування формування осаду. При збільшенні *pH*

від 2 до 3,5–4 (залежно від густини струму) вміст молібдену в покритті незначно збільшується, подальше збільшення *pH* призводить до зменшення вмісту молібдену. Ця тенденція спостерігається для діапазону густин струму 1–10 А/дм². Найбільший вміст молібдену в сплаві спостерігається при низькій густині струму (*j* = 1 А/дм²) у межах *pH* = 2–4. У такому режимі електролізу отримані матеріали містять 80–85 мас.% молібдену [5]. Зі збільшенням вмісту тугоплавкого компоненту – глобули поверхні стають більшими та глибшими. Подібний результат отримано у роботі [16], де одержали при *pH* електроліту від 4,2 до 6,2 гладеньке блискуче покриття з високою твердістю. Однак осади, отримані при *pH* = 6,6 і більше, мають тріщинувату поверхню [16].

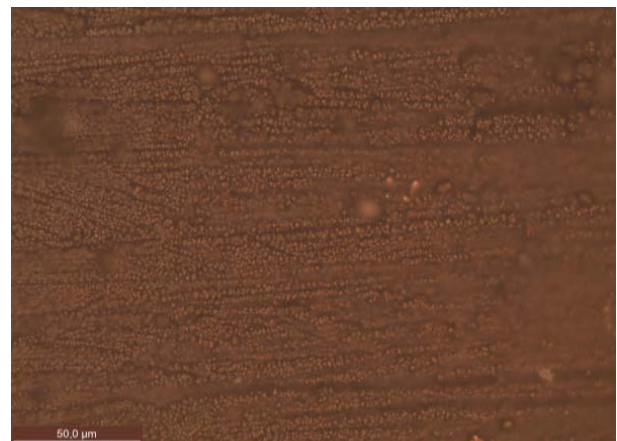


Рис. 1. Мікроснімок поверхні сплаву Со82–Мо18

Представлені мікроснімки електролітичного композиції Со–Мо–TiO₂, одержаного при густинах струму 30 (рис. 2) та 40 А/дм² (рис. 3), на яких видно, що в обох випадках осади мають сірий матовий колір та глобулярну текстуру, але більш дрібнокристалічні, ніж сплав Со–Мо.

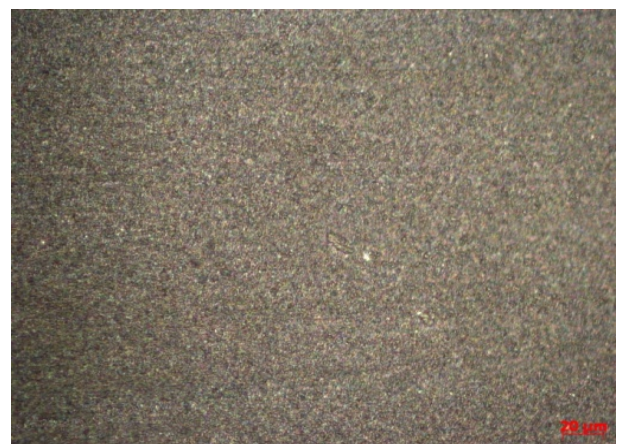


Рис. 2. Мікроснімки поверхні композиційного сплаву Со65–Мо19–TiO_{2,16}

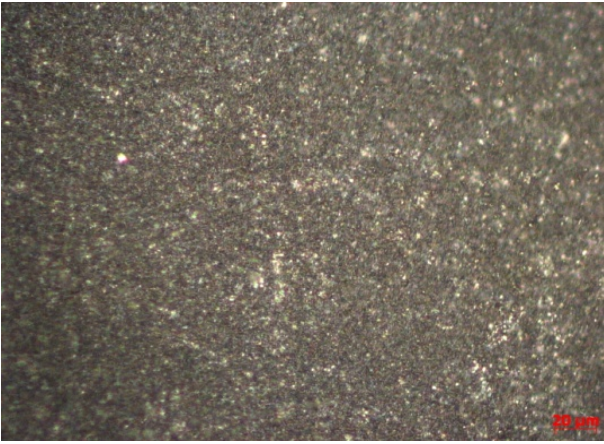


Рис. 3. Мікрознімки поверхні композиційного сплаву Co60–Mo20–TiO_{2,20}

Рентгено-фазовий аналіз використовують із метою ідентифікації різних сполук в їх хімічному складі на основі отриманих результатів дифракційної картини з досліджуваного зразка. Визначення речовини в покритті проводиться за набором його міжплощинних відстаней і порівняним інтенсивностям відповідних ліній на рентгенограмі.

За результатами рентгено-фазового аналізу (рис. 4) встановлено, що отримані покриття сплаву містять сполуки: Mo₉O₂₆, MoO₃, MoO₂, Mo₂C, CoO, Co₃O₄, Co₇Mo₆, Co₂Mo₇, Mo, Co₂O₃, C, Co, Co₂Mo₃, серед яких переважає Co₇Mo₆. Крім того, відбувається кристалізація інтерметалідної сполуки Co₃Mo, ідентифікація якого на дифрактограмах однозначна. Завдяки синергетичному ефекту компонентів цієї фази і взаємному

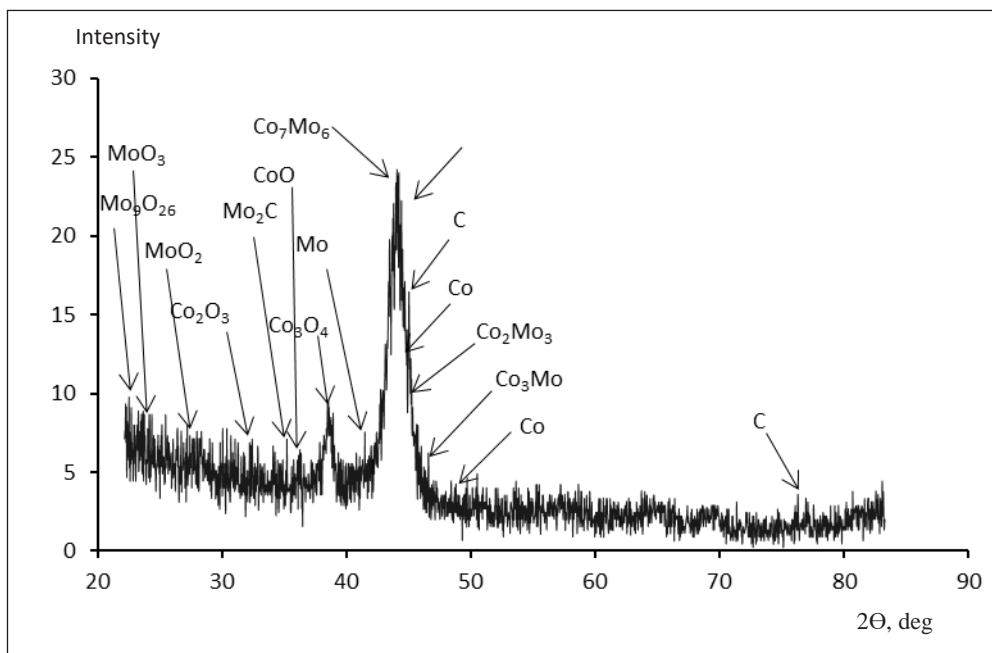


Рис. 4. Рентгенограма покриття сплаву Co72–Mo28

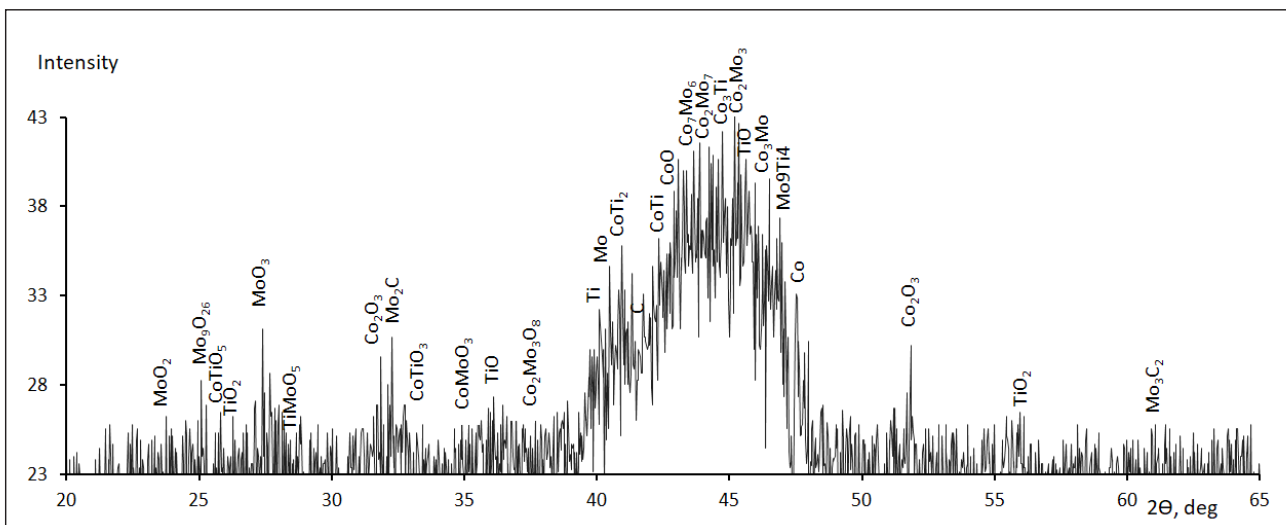


Рис. 5. Рентгенограма композиційного покриття Co56–Mo29–TiO_{2,15}

розташуванні атомів металів реалізується поверхнева дифузія водню. Наслідком цього є висока вірогідність, що покриття Co-Mo володіє електрокаталітичними властивостями в реакції виділення водню.

У покриттях, сформованих із модифікованого діоксидом титану аміачно-трилонатного електроліту (рис. 5), крім оксидів кобальту, молібдену та титану, виявлені фази: CoTiO_5 , TiMoO_5 , Mo_2C , CoTiO_3 , CoMoO_3 , $\text{Co}_2\text{Mo}_3\text{O}_8$, Co, Mo, C, CoTi_2 , CoTi , CoO , Co_7Mo_6 , Co_2Mo_7 , Co_3Ti , Co_2Mo_3 , Co_3Mo , Mo_9Ti_4 , Mo_3C_2 . Включення органічного ліганду трилон Б призводить до появи вуглецю, про що свідчать піки на одержаному спектрі. В глибині осаду фіксується невелика кількість Co^{+2} ,

що збігається з кількістю оксидного кисню. Отже, в цьому випадку присутній CoO, а молібден знаходиться як у металевому стані, так і у фазі оксиду молібдену, подібні результати були представлені у роботі Т.В. Пшеничкиної [16]. Фази оксиду молібдену різних ступенів окиснення вказують на неповне відновлення Mo(VI) до металевому стану.

Висновки. Аналіз рентгено-фазових спектрів дає змогу зробити висновки щодо структури та складу фаз отриманих композиційних сплавів, що дуже важливо для подальшого вивчення властивостей покриттів та потенційних областей їх застосування. Одержані осади не мають тріщини та виявляють глобулярну текстуру, а для композиції – дрібнокристалічну структуру.

Список літератури:

1. Subramania A., Sathiyapriya A.R., Muralidharan V.S. Electrocatalytic cobalt-molybdenum alloy deposits. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2007. V. 32. P. 2843-2847.
2. Соколов А.Ю., Курбатов А.П., Уразалин А.К. и др. Получение кобальт-молибденовых сплавов из цитратного электролита. *Горение и плазмохимия*. 2008. Т. 6, № 4. С. 298–305.
3. Кузнецов В.В., Бондаренко З.В., Пшеничкина Т.В. и др. Электроосаждение сплава Co–Mo из аммиачно-цитратного электролита. *Электрохимия*. 2007. № 43. Вып. 3. С. 367–372.
4. Громова В.А., Японцева Ю.С., Кублановский В.С., Дикусар А.И. Электроосаждение сплавов Co–Mo из цитратно-пирофосфатного электролита. *УКРАИНСКИЙ ХИМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ*. 2008. Т. 74, № 3. С. 44–48.
5. Shtefan V.V., Epifanova A.S., Koval'ova A.A., Bairachnyi B.I. Electrolytic Deposition of Highly Hard Coatings of a Cobalt–Molybdenum Alloy. *MaterSci*. 2017. V. 52. P. 1–8.
6. Gomez E., Pellicer E., Duch M., etc. Molybdenum Alloy Electrodeposits for Magnetic Actuation. *Electrochim. Acta*. 2006. V. 51. P. 3214–3222.
7. Coutsouradis D., Davin A., Lamberigts M. Cobalt-based superalloys for applications in gas turbines. *Mater. Sci. Eng.* 1987. V. 88. P. 11–19.
8. Yarpontseva Yu.S., Kublanovsky V.S., Vyshnevskiy O.A. Electrodeposition of CoMoRe alloys from a citrate electrolyte. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018. V. 766. P. 894–901.
9. Японцева Ю.С., Дикусар А.И., Кублановский В.С. Исследование состава, коррозионных и каталитических свойств сплавов Co-W, электроосажденных из цитратно-пирофосфатного электролита. *Электронная обработка материалов*. 2014. Т. 50, № 4. С. 49–55.
10. Громова В.А., Японцева Ю.С., Кублановский В.С. Сплавы Co-Mo электроосаждены із полілігандного електроліту. *Тези доп. II Всеукр. наук.-практ. конф. Молодих вчених*. Київ, 2007. С. 88.
11. Kublanovsky V.S., Yarpontseva Yu.S. Electrocatalytic Properties of Co-Mo Alloys Electrodeposited from a Citrate-Pyrophosphate Electrolyte. *Electrocatalysis*. 2014. V. 5. P. 372–378.
12. Штефан В.В., Єпіфанова А.С., Кобзев М.М., Метенканич М.М. Вольтамперометрія осадження сплаву Co-Mo. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ» – Серія: хімічна технологія та екологія*. 2017. № 39. С. 80-83.
13. Shtefan V., Yepifanova A., Berezovskyi I., Shkolnikova T. Study of morphology and microhardness of Co-Mo alloys films. *XVI International conference on physics and technology of thin films and nanosystems: materials ICPTTFN-XVI, Ivano-Frankivsk, 15–20 may 2017 yr. Ivano-Frankivsk, 2017*. P. 204.
14. Штефан В.В., Єпіфанова А.С., Мануйлов А.М. и др. Вольтамперометрия $d^4 - d^{10}$ металлов. *Международная научно-техническая конференция «Современные электрохимические технологии и оборудование»: материалы докладов Международной научно-технической конференции «Современные электрохимические технологии и оборудование», Минск, 24–25 ноября 2016 г. Минск, 2016*. С. 335.
15. Штефан В.В., Єпіфанова А.С., Метенканич М.М. та ін. Механізм катодних реакцій осадження сплаву Co-Mo. *Записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Сер.: Технічні науки*. 2019. Т. 30 (69). № 1. Ч. 2. С. 51–56.
16. Пшеничкина Т.В. Получение сплава кобальт-молибден электрохимическим методом и его свойства : автореф. дис. ... канд. хим. наук : спец. 02.00.01 «Неорганическая химия»; 02.00.05 «Электрохимия». Москва, 2010. 19 с.
17. Електроліт для нанесення покриття кобальт-молібден : пат. 112925 Україна: МПК (2006.01) C25D 3/56, № а201307706 ; заявл. 20.04.2015 ; опубл. 10.11.2016, Бюл. № 21.

СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЙ СОСТАВ КОМПОЗИЦИОННОГО СПЛАВА Co–Mo–TiO₂

Данная работа направлена на исследование структуры и фазового состава электролитически осажденного сплава Co-Mo и композиционного покрытия Co-Mo-TiO₂, полученных на медных образцах из усовершенствованного аммиачно-трилонатного электролита при различных условиях электролиза. Представлены микроснимки осадков, демонстрирующие глобулярную и мелкокристаллическую структуру. Приведены результаты фазового состава полученных сплавов и покрытий-композиций. Проведен анализ рентгено-фазовых спектров, сделаны выводы относительно структуры и состава фаз полученных композиционных осадков, что очень важно для дальнейшего изучения свойств полученных материалов и потенциальных областей их применения.

Ключевые слова: композиционный сплав, кобальт, молибден, титан, структура, фазовый состав.

STRUCTURAL-PHASE COMPONENTS OF COMPOSITE ALLOY Co–Mo–TiO₂

This work is aimed at studying the structure and phase composition of the electrolytically deposited Co-Mo alloy and the Co-Mo-TiO₂ composite coating obtained on copper samples from the improved ammonium trilonate electrolyte under different electrolysis conditions. The presented microscopic images of sediments show a globular and fine-crystalline structure. The results of the phase composition of the alloys and coatings obtained are presented. X-ray spectra analysis has been carried out, conclusions have been drawn regarding the structure and composition of the phases of the composite sediments obtained, which is very important for the further study of the properties of the obtained materials and their potential applications.

Key words: composite alloy, cobalt, molybdenum, titanium, structure, phase composition.

UDC 621.35

Shtefan V.V.

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”

Kanunnikova N.A.

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”

Leshchenko S.A.

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”

Balamut N.S.

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”

ANODIC DISSOLUTION OF STAINLESS STEEL IN ACID SOLUTIONS

In this work, the kinetics of anodic dissolution of stainless steel was studied using linear voltammetry. It is shown that an increase in the concentration of molybdates leads to an increase in anodic currents and an expansion in the region of active dissolution, which indicates that the oxoanions of the steel surface are passivated. The influence of electrolyte composition on the formation of a passive film was investigated. It has been established that at high potential sweep rates, dense layers of stoichiometric oxide do not have time to form and the passive film has a defective structure. Molybdenum-, zirconium-, aluminum-, titanium-containing compounds have been shown to increase the passivity area, which is the basis for the formation of protective oxide films on stainless steel.

Key words: stainless steel, polarization curves, voltammetry, scan rate, passive film.

Introduction. Surface treatment of metals and alloys (etching, polishing, oxidation), based on the electrochemical dissolution of the material, has been widely used in production due to a number of its remarkable features arising from the processes: the possibility of high-performance processing of materials; obtaining on the surface of the material an oxide coating of high quality [1–3]. However, these types of processing are sensitive to the chemical composition of the material, and especially when it contains elements such as chromium and nickel [4].

The study of the laws of anodic dissolution of stainless steel in acid solutions is important because they are of practical importance in such technologies as surface treatment of materials and electrochemical protection against corrosion of metals and alloys [5]. Particularly important are such studies for periodic technological processes in which the composition of reactive masses changes during synthesis and, accordingly, the corrosion activity of materials changes. Such an activity is conveniently evaluated using electrochemical parameters such as passivation potentials, full passivation potentials and oxygen allocation potentials, which are determined from polarization dependencies [6–7].

Analysis of recent research and publications. Anodic processes in aqueous media with the participation of stainless steels are of great practical impor-

tance not only in the technology of metal surface treatment, but also in the electrochemical protection of materials [5–8]. Thus, the difficulties in solving the problem of corrosion cracking of austenitic stainless steels, their lack of resistance to pitting and crevice corrosion have become the main reason that prompted scientists to investigate the Anodic dissolution of this metal. The lack of reliable information about the mechanisms of dissolution of high-alloyed stainless steels in acidic environments containing corrosive anions is a serious gap, since they should be the basis for the development of anti-corrosion monitoring and prediction. To improve the protective and dielectric properties of oxide coatings, it is advisable to introduce valve metal compounds, which include titanium, aluminum, molybdenum, and zirconium. Modifying the oxide coating in order to obtain it with desired properties requires a preliminary study of the effect of valve metal compounds on the Anodic behavior of steel [9–10].

In recent years, numerous studies have also appeared on the development of accelerated methods for the electrochemical testing of steels for susceptibility to IGC (intergranular corrosion) [11; 12]. The proposed accelerated methods are mainly based on distinction in the passive-active transition steel when fixing the Anodic polarization curve. The polarization curves are fixed in various media, but most often in

solutions of acids: perchloric acid, with the addition of chlorine ion, sulfuric acid, with the addition of rodanide, etc. [13–16].

It is known that the study of Anodic dissolution of chromium-nickel austenitic steel in alkalis showed that active and passive areas, areas of repassivation, secondary passivity, oxygen evolution were found on the polarization curves. The active region of nickel-chromium steels has a double loop corresponding to the dissolution and passivation of the iron and nickel components of the alloys [17]. The maximum current in the repassivation zone corresponds to the preferential dissolution of the chromium component [18–20].

The purpose of the work is to study the influence of the composition, the concentration of molybdenum-, zirconium-, aluminum-, titanium-containing compounds and the potential scanning speed for Anodic dissolution of stainless steel.

Materials and methods. For experimental studies, AISI 304 stainless steel was chosen as a working electrode from a class of stainless steels, the chemical composition of which includes passivating elements, such as chromium and nickel (surface area 4 cm²). Anodic dissolution of stainless steel was investigated by the method of linear voltammetry in the solutions presented in table 1. All measurements were carried out in a three-electrode cell using an IPC-pro potentiostat. Electrode potentials were measured and compared with the silver chloride-saturated reference electrode. The auxiliary electrode was platinum [8; 11].

The essence of the method lies in the fact that before fixing the Anodic potentiodynamic curve, the steel electrode is subjected to cathodic polarization at a potential of -1 V for 30 min. [16]. Reproducible results are obtained only if, after cathodic polarization, continuous potentiodynamic polarization is immediately carried out with a potential scan rate 2 mV·c⁻¹ (5, 10, 25, 50, 75, 100) [9]. All the tests were conducted at 20±2°C.

Presentation of the main material and results. The most effective way to create protective oxide films (oxidation) on stainless steel is to increase the inhibition of the kinetics of the Anodic process, i.e. this is the formation of films, which greatly facilitates the ability of the metal to pass into a passive state or increases the stability of the passive state of the material.

The kinetics of the Anodic process can be most clearly represented by the ratio between the density of the Anodic current and the potential of the electrode, that is, the Anodic polarization curve [13–16].

Figure 1 shows the potentiodynamic curves obtained in solution № 3. An increase in the potential sweep rate does not change the shape of the potentiodynamic curve; however, the passivation potential becomes somewhat more positive, and the passivation current decreases. With a rapid change in potential, the passivating layer does not have time to fully form, and, consequently, the passivation and full passivation currents are lower than with a slow change.

At low potential scanning speeds, the anode current drops sharply after passing through a maximum. However, at a speed of 75 mV·c⁻¹, it is almost impossible to see the area of a sharp decrease, and the current value is several orders of magnitude higher than in stationary conditions. This behavior of the system indicates the dependence of the film structure on the process time.

As the potential sweep rate increases, the value of the passivation current decreases. This is explained by the fact that at high speeds, the potential sweep does not have time to go through the processes of formation, which lead to the formation of dense layers of stoichiometric oxide [9]. The film formed under these conditions has a defective structure, which contributes to the movement of hydroxide ions through it. The higher the potential sweep frequency, the higher the passivation current and the total passivation current.

Table 1

Electrolyte Compositions for Polarization Studies

№	Electrolyte composition, g·L ⁻¹					
	H ₂ SO ₄	NaCl	Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	Zr(SO ₄) ₂ ·4H ₂ O	Al ₂ (SO ₄) ₃ ·4H ₂ O	TiOSO ₄
1	300	50				
2	300	50	5			
3	300	50	10			
4	300	50	15			
5	300	50	20			
6	300	50		10		
7	300	50			10	
8	300	50				10

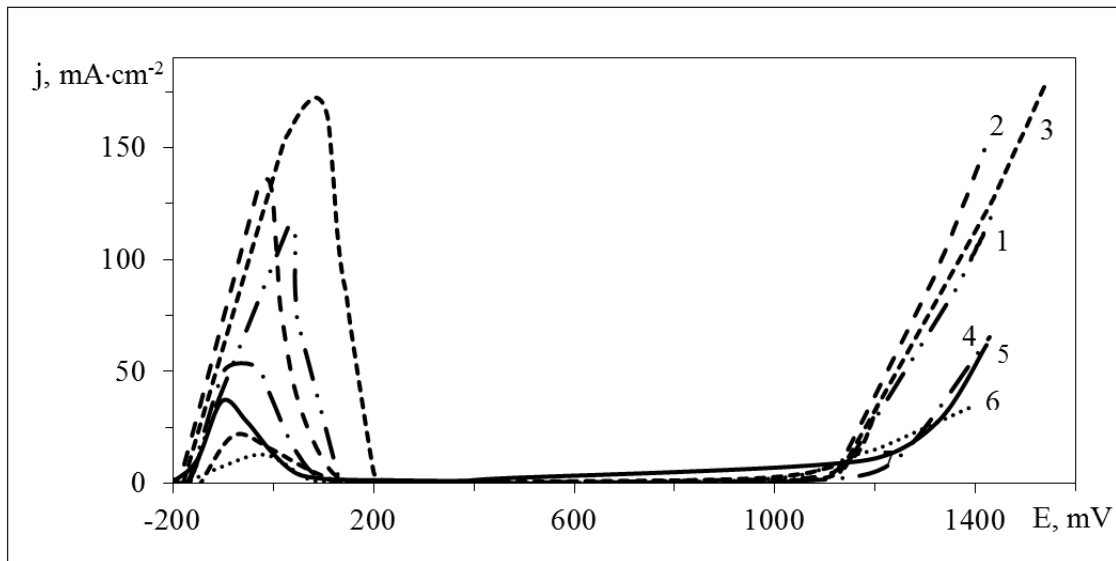


Fig. 1. The dependence of the rate of Anodic dissolution of stainless steel in electrolyte № 1 in terms of the potential scan rate, $\text{mV}\cdot\text{c}^{-1}$: 1 – 2, 2 – 5, 3 – 10, 4 – 25, 5 – 50, 6 – 75, 7 – 100.

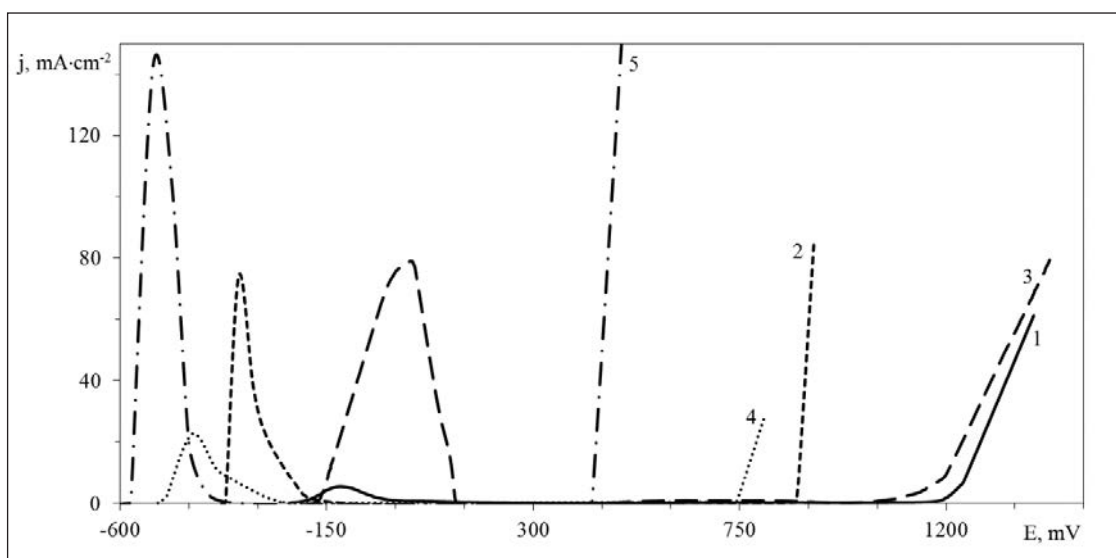


Fig. 2. Anodic polarization curves ($2 \text{ mV}\cdot\text{c}^{-1}$) AISI 304 steel in acid electrolytes. The numbers of the curves correspond to the serial numbers of electrolytes

Fig. 2 presents the polarization dependences of the Anodic dissolution of AISI 304 steel obtained from electrolytes № 2–5. It can be seen that at low concentrations of sodium molybdate, stainless steel is relatively easily passivated, but a further increase in the concentration of molybdenum-containing compounds complicates the passivation, as indicated by a strong increase in passivation currents. When the concentration of molybdates in the electrolyte increases, the oxygen release potential shifts in the negative direction, which indicates that the activation process is facilitated [17].

The change in the potential of the steel electrode with time in molybdenum-containing solutions is shown in Fig. 3. The change in the stationary potential of the electrode depends on the concentration of molybdate ions. Thus, with the introduction of Na_2MoO_4 into the solution, the stationary potential shifts towards more positive values.

Fig. 4 presents the polarization curves obtained from electrolytes № 1, 3, 6–8. Adding molybdenum, zirconium-containing compounds to electrolyte № 1 shifts the stationary potential in a more positive direction by 500 mV, and aluminum-, titanium-containing

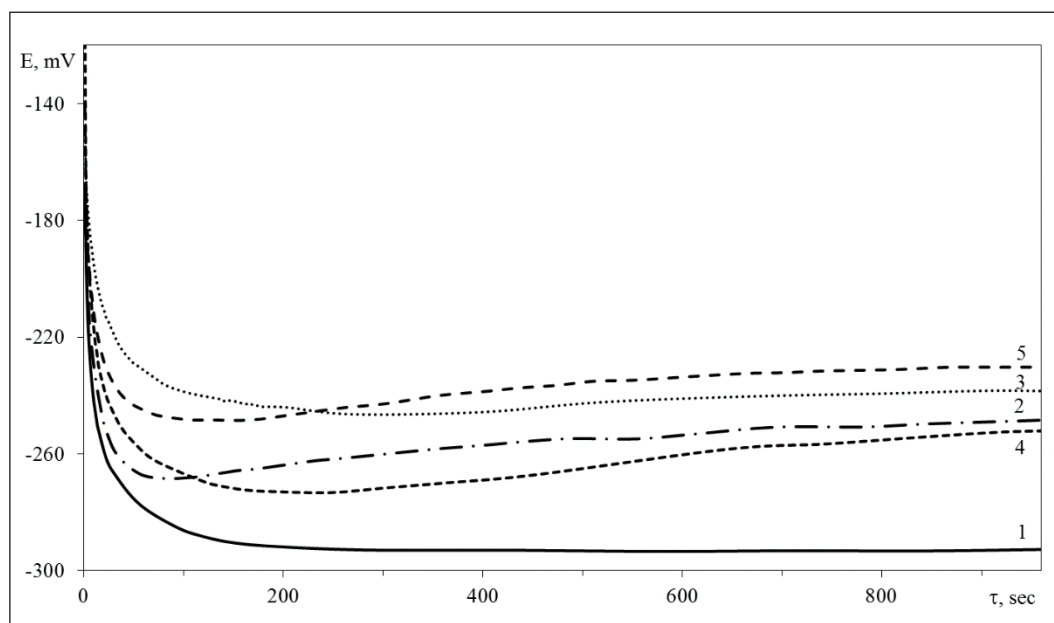


Fig. 3. Chronopotentiogram of AISI 304 steel in acid electrolytes.
The numbers of the curves correspond to the serial numbers of electrolytes.

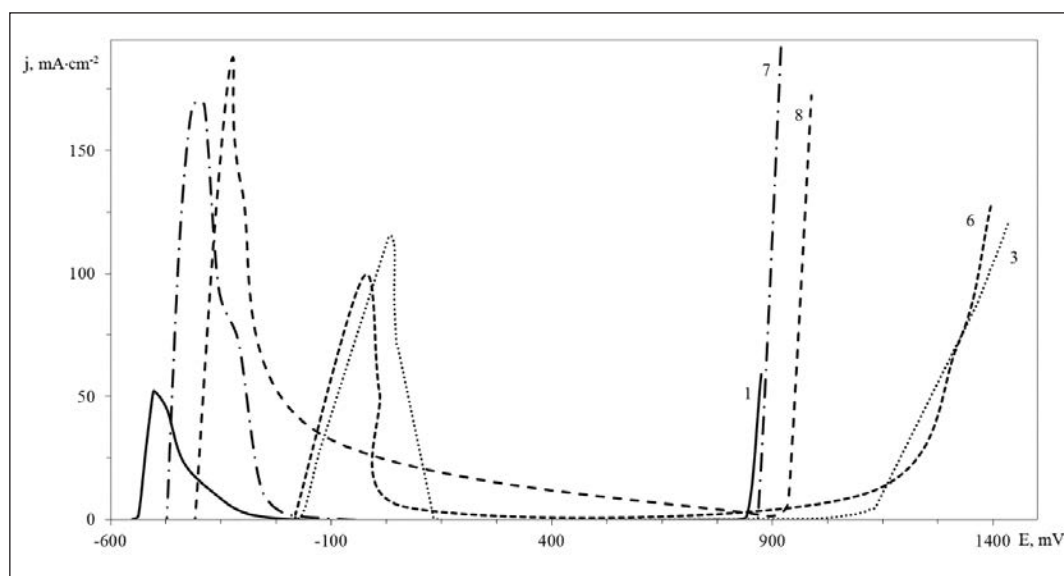


Fig. 4. Anodic polarization curves ($2 \text{ mV} \cdot \text{c}^{-1}$) AISI 304 steel in acid electrolytes.
The numbers of the curves correspond to the serial numbers of electrolytes.

compounds by 150–200 mV. This suggests that there is a complication of the process of dissolution of AISI 304 steel, that is, its activity decreases. The current density of passivation in dependencies (3, 6–8) is significantly higher than in solution № 1, which is explained by the active influence of oxygen-containing components in these electrolytes. The area of complete passivation increases with the addition of molybdenum-, zirconium-, aluminum-, and titanium-containing compounds to electrolyte № 1. When the potential of oxygen evolution on the Anodic

polarization curves is reached, a sharp increase in the current strength is observed, which does not correspond to the resumption of the secondary dissolution of the metal, and the onset of oxygen release occurs. On dependencies (3, 6–8), the potential of oxygen evolution occurs later, which proves the influence of the electrolyte composition on the Anodic behavior of steel.

Conclusions. It is shown that with an increase in the potential sweep rate, the values of the total passivation current decrease. This is explained by the fact that at

high speeds of potential sweep dense layers of stoichiometric oxide do not have time to form, and the oxide film formed under these conditions has a defective structure. It was found that at low concentrations of sodium molybdate, stainless steel is easily passivated; however, an increase in concentration makes passivation difficult, as indicated by an increase in passivating currents.

Anodic polarization dependences obtained from molybdenum-, zirconium-, aluminum-, titani-

um-containing electrolytes showed that compounds introduced into a solution of sulfate and sodium chloride increase anode currents in the active region, expand the region of the active potential and increase the passive region. The presence of a certain dependence of the rate of Anodic dissolution of stainless steel on the nature of anions indicates that they are directly involved in the electrochemical act of dissolution.

References:

1. Ibrahim M. A. M., Rehim Abd El S. S., Hamza M. M. Potentiodynamic polarization behavior of some austenitic stainless steel AISI samples of different molybdenum contents in H₂SO₄ solutions. *Arabian Journal of Chemical and Environmental Research*. 2015. Vol. 2. № 2. P. 37–50.
2. Bellezze T., Roventi G., Quaranta A., Fratesi R. Improvement of pitting corrosion resistance of AISI 444 stainless steel to make it a possible substitute for AISI 304L and 316L in hot. *Materials and Corrosion*. 2008. Vol. 59. № 9. P. 727–731.
- 3 Taveira L. V., Montemor M. F., Da Cunha Belo M., Ferreira M. G., Dick L. F. P. Influence of incorporated Mo and Nb on the Mott-Schottky behaviour of Anodic films formed on AISI 304L. *Corrosion Science*. 2010. Vol. 52. P. 2813–2818.
4. Мирзоев Р. А., Давыдов А. Д. Анодные процессы электрохимической и химической обработки металлов : учеб. пособие. Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 382 с.
5. Loto R. T., Joseph O. O. and Akanji O. Electrochemical corrosion behaviour of austenitic stainless steel (type 304) in dilute hydrochloric acid solution. *J. Mater. Environ. Sci*. 2015. Vol. 6. № 9. P. 2409–2417.
6. Amaral C. C. F., Ormiga F., Gomes J. A. C. P. Electrochemical-induced dissolution of stainless steel files. *International Endodontic Journal*. 2015. Vol. 48. P. 137–144.
7. Morales A., Hevia J., Santis D., Cifuentes G. Anodic electrolytic dissolution of copper sulphides precipitated from ammoniacal leaching media. *J. Chil. Chem. Soc*. 2009. Vol. 54, № 2. P. 119–122.
8. Баламут Н.С., Штефан В.В., Канунникова Н.А. Анодное поведение стали 08X18H10 в хлоридных растворах. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : XXVI Міжнар. наук.-практ. конф.* м. Харків, 16-18 травня 2018 р. НТУ «ХПІ», 2018. С. 186.
9. Штефан В.В., Епифанова А.С., Мануйлов А.М. и др. Вольтамперометрия d⁴- d¹⁰ металлов. *Современные электрохимические технологии и оборудование : матер. док. междунар. науч.-техн. конф.* г. Минск. 24-25 ноября 2016 г. БГТУ, 2016. С. 335.
10. Ajeel Dr. Sami A., Abdul-Hussein Basheer A., Baker Yaqoob M.. Electrochemical measurements of anodizing stainless steel type aisi 304. *Journal Impact Factor*. 2013. Vol. 4. № 3. P. 63–74.
11. Shtefan V. V., Vairachnyi B. I., Lisachuk G. V. and etc. Corrosion of Aluminum in Contact with Oxidized Titanium and Zirconium. *Materials Science*. 2016. Vol. 51. № 5. P. 711–718.
12. Канунникова Н.А., Штефан В.В., Смирнова А.Ю. Анодное поведение титана в Zr-и Mo-содержащих растворах. *X Міжнарод. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів.* м. Харків, 05–08 квітня 2016. НТУ «ХПІ», 2016. С. 225–226.
13. Alar V., Žmak I., Runje B., Horvatić A. Development of Models for Prediction of Corrosion and Pitting Potential on AISI 304 Stainless Steel in Different Environmental Conditions. *Int. J. Electrochem. Sci*. 2016. Vol. 11. P. 7674–7689.
14. Shtefan V. V., Smirnova A. Yu. Oxidation of Titanium in Zr- and Mo-Containing Solutions. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2017. Vol. 53, № 2. P. 322–328.
15. Umoru L. E., Afonja A. A., and Ademodi B. Corrosion Study of AISI 304, AISI 321 and AISI 430 Stainless Steels in a Tar Sand Digester. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*. 2008. Vol. 7, № 4. P. 291–299.
16. Gupta R. K., Birbilis N. The Influence of Nanocrystalline Structure and Processing Route on Corrosion of Stainless Steel: A review. *Corros. Sci*. 2015. Vol. 92. P. 1–15.
17. Shtefan V. and etc. Influence of chloride on the anode dissolution of aisi 304 steel. *Science, research, development. Technics and technology: monografia pokonferencyjna*. Rotterdam, 29.11–30.11.2018, Rotterdam, 2018. № 11. P. 62–64.
18. Liu S., Gao S. Y., Zhou Y. F., Xing X. L., Hou X. R. and etc. Research on The Microstructure Evolution of Austenite Stainless Steel by Surface Mechanical Attrition Treatment. *Mater. Sci. Eng*. 2014. Vol. 617. P. 127–138.

19. Huang, H. W., Wang Z. B., Lu J., Lu K. Fatigue Behaviors of AISI 316L Stainless Steel with a Gradient Nanostructured Surface Layer. *Acta Mater.* 2015. Vol. 87. P. 150–160.

20. Chui P., Sun K., Sun C., Yang X., Shan T. Effect of Surface Nano-crystallization Induced by Fast Multiple Rotation Rolling on Hardness and Corrosion Behavior of 316L Stainless Steel. *Appl. Surf. Sci.* 2011. Vol. 257. P. 6787–6791.

АНОДНЕ РОЗЧИНЕННЯ НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ В КИСЛИХ РОЗЧИНАХ

У даній роботі вивчалася кінетика анодного розчинення нержавіючої сталі методом лінійної вольтамперометрії. Показано, що збільшення концентрації молибдатів призводить до збільшення анодних струмів і розширення області активного розчинення, що вказує на пасивацію оксоаніонів поверхні сталі. Досліджено вплив складу електролітів на процес формування пасивної плівки. Встановлено, що при високих швидкостях розгортки потенціалу не встигають утворюватися щільні шари стехіометричного оксиду, і пасивна плівка має дефектну структуру. Доведено, що молибден, цирконій-, алюміній-, титанвмісні сполуки збільшують область пасивності, що є підставою для формування захисних оксидних плівок на нержавіючій сталі.

Ключові слова: нержавіюча сталь, поляризаційні криві, вольтамперометрія, швидкість розгортки потенціалу, пасивна плівка.

АНОДНОЕ РАСТВОРЕНИЕ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ В КИСЛЫХ РАСТВОРАХ

В данной работе изучалась кинетика анодного растворения нержавеющей стали методом линейной вольтамперометрии. Показано, что увеличение концентрации молибдатов приводит к увеличению анодных токов и расширению области активного растворения, что указывает на пассивацию оксоанионами поверхности стали. Исследовано влияние состава электролитов на процесс формирования пассивной пленки. Установлено, что при высоких скоростях развертки потенциала не успевают образовываться плотные слои стехиометрического оксида, и пассивная пленка имеет дефектную структуру. Доказано, что молибден-, цирконий-, алюминий-, титансодержащих соединений увеличивают область пассивности, что является основанием для формирования защитных оксидных пленок на нержавеющей стали.

Ключевые слова: нержавеющая сталь, поляризационные кривые, вольтамперометрия, скорость развертки потенциала, пассивная пленка.

ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 614.8-023:623

Антоненко А.В.

Київський університет культури

Земліна Ю.В.

Київський університет культури

Грищенко І.М.

Київський університет культури

Приходько К.О.

Київський національний університет культури і мистецтв

Гусаченко Я.С.

Київський національний університет культури і мистецтв

Мандригелю О.В.

Київський університет культури

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗАМОРОЖЕНИХ ДЕСЕРТІВ НА ОСНОВІ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ

У статті наведено технологію приготування заморожених десертів на основі рослинної сировини для людей, що дотримуються доктрин веганства. За результатами проведених досліджень було доведено, що бананово-грушеве морозиво на основі кокосового молока з додаванням глоду, брусниці або барбарису є ефективною альтернативою традиційному молочному морозиву. Розроблено технології приготування та нові рецептури десертів, що відрізняються підвищеною кількістю БАП та мають високі смакові властивості. Обґрунтовано технологічні параметри процесу виробництва та побудовано модель комплексної оцінки якості.

Ключові слова: технологія, кріотехнологія, веган, морозиво, антиоксиданти, органолептична оцінка.

Постановка проблеми. У сучасному світі все більше людей намагаються піклуватися про своє здоров'я, яке значною мірою залежить від продуктів харчування. Однак розібратися в темі здорового харчування буває непросто через суперечливість інформації про те, що корисно, а що ні. Це стало причиною зростання популярності різного роду дієт, які переросли навіть у спосіб життя і нове світобачення. Одним із таких напрямів є вегетаріанство. Вважається, що сьогодні в рядах вегетаріанців перебувають понад 800 мільйонів людей, що становить майже 14% людського населення планети Земля [1].

Виділяють велику кількість видів вегетаріанства. Критерієм класифікації даного альтернативного виду харчування є ті продукти, вживання

яких обмежується. Одним з найсуворіших напрямів вегетаріанства є веганство, тобто відмова від вживання будь-яких продуктів тваринного походження: молока, яєць, м'яса, риби і навіть меду. Кількість послідовників його досить незначна – приблизно 7% серед всіх прихильників вегетаріанства, але кількість продуктів і страв, які можна приготувати, є досить невеликою (порівняно зі змішаним або збалансованим харчуванням) [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В меню веганів, як і у вегетаріанців, велика кількість фруктів, овочів, необроблених зерен, горіхів, соєвих продуктів. Потреба в білках компенсується шляхом вживання бобових, таких як сочевиця, горох, соя, квасоля, горіхи, а також шпинату, цвітної капусти, кольрабі, пшениці. Жири в раціоні

вегана тільки рослинні: кукурудзяна, соняшникова, оливкова, лляна, горіхова, мигдальна та інші олії.

Веганство має досить багато переваг, але потрібно не забувати, що даний тип харчування – це перш за все дієта, і постійне дотримання її приховує безліч загроз, що проявляються в наступному.

Більшість дієтологів стверджують, що веганство генетично протипоказано. Так, споживання великого обсягу виключно рослинної їжі призводить до дефіциту вітаміну B_{12} безпосередньо в плазмі крові. Своєю чергою відсутність або нестача вітаміну B_{12} діє негативно на нервову систему людини, приводячи до сліпоти і глухоти. Доведено, що веганство призводить до зниження пам'яті, збільшує ризик розвитку хвороби Альцгеймера [3].

Крім того, у веганів часто є підвищеною концентрація амінокислоти під назвою гомоцистеїн. Ця амінокислота має виражений токсичний ефект: вона руйнівню впливає на клітини, провокуючи розвиток тромбозів.

Також в організм вегана в недостатній кількості надходить вітамін Д, виникає дефіцит певних мікроелементів (зокрема, гемового заліза), вітамінів групи В: тіамін, рибофлавін, фолієва кислота, біологічна цінність білків досить низька.

Постановка завдання. Зважаючи на всезростаючу популярність веганства і обмеженість сировини для приготування страв, розроблення продукції для веганів, що може збалансувати їх раціон, є актуальним напрямом роботи в галузі конструювання харчових продуктів. І оскільки більшість стають веганами усвідомлено, то їм легше перейти на нову дієту, якщо вживати аналоги тих продуктів і страв, які були в їх раціоні до відмови від тваринної їжі. Одним з таких продуктів є морозиво.

Мета – удосконалити технологію приготування традиційного молочного морозива із застосуванням рослинної сировини.

Об'єкт – технологія заморожених десертів на основі рослинної сировини.

Предмет – бананово-грушеве морозиво на основі кокосового молока з додаванням глоду, брусниці, барбарису.

Методи дослідження: органолептичні, методи планування експерименту і математичної обробки експериментальних даних на основі комп'ютерних технологій.

Виклад основного матеріалу дослідження. Основними структуроутворювачами розробленого аналога традиційного молочного морозива виступили банан, груша та кокосове молоко.

Банан – це висококалорійний фрукт. Харчова користь бананів полягає в наявності в них глюкози, сахарози і фруктози, а також дієтичної клітковини. Банани мають високу енергетичну цінність через наявність в м'якоті вуглеводів і натуральних цукрів. Крім того, банани містять протеїн і триптофан, що перетворюється в організмі людини на серотонін (препарат або гормон щастя), який славиться позитивним впливом на поліпшення настрою і розслаблення. Даний фрукт багатий на калій, містить магній, фосфор, залізо і кальцій, а також складні ефіри, які формують аромат плодів.

Веганам банани будуть корисні завдяки вмісту заліза, а також вітаміну B_{12} .

Груша – це фрукт з невеликою калорійністю, проте вона є відмінним джерелом сил і енергії. Це пояснюється високим вмістом клітковини, мінеральних, азотистих, пектинових і дубильних речовин, а також вітамінів С, Р, B_1 , фолієвої кислоти, фітонцидів і флаваноїдів, хоча з органічних кислот в них присутня тільки яблучна. Оскільки в груші фруктози більше, ніж глюкози (а як відомо, фруктоза не вимагає для свого засвоєння в організмі інсуліну), цей фрукт корисний при порушенні функції підшлункової залози. У м'якоті груші міститься багато іонів калію, без достатньої кількості яких не порушується функціонування серця і м'язів, адже іони калію відповідають в організмі за регенерацію кліток.

Кокосовим молоком називається солодка молочно-біла рідина, яку отримують з м'якоті стиглого кокоса. Кокосове молоко містить багато рослинних жирів і білка. Воно багате вітамінами С і групи В, а також марганцем і залізом. Цей відносно низькокалорійний продукт корисний при хронічній втомі, занепаді сил і авітамінізмі.

Кокосове молоко корисне також через високий вміст в ньому омега-3, 6, 9, які разом з амінокислотами, що входять до його складу, дозволяють отримати необхідні людині щодня поживні речовини всього однією склянкою напою. Продукт не викликає алергічних реакцій, від нього не буває діареї та шлункових кольок. Крім того, він містить фосфор, а отже, забезпечує організм фосфатами, які є ключовими речовинами, що беруть участь у будівництві кісток.

Під час розробки аналогу молочного морозива застосовувалося консервоване кокосове молоко, виготовлене в Індонезії ТМ «Кара».

Бананово-грушеве морозиво на основі кокосового молока обране за основу. Для збагачення його есенціальними речовинами, а також

надання унікальних органолептичних властивостей до нього було додано барбарис, глід та брусницю.

Зрілі плоди барбарису складаються з вуглеводів, вітамінів та інших корисних речовин, а ось білки і жири в них повністю відсутні. Червоні ягоди вважаються дуже цінним джерелом аскорбінової кислоти і вітаміну Е. Крім того,

в плодах наявний високий вміст каротиноїдів. Ягоди містять в собі корисні мікро- і макроелементи, а також бета-каротин, який використовується організмом для синтезу вітаміну А. Плоди барбарису застосовувалися у сушеному вигляді. Сушені ягоди мають жарознижувальні та протизапальні властивості, активізують роботу щитовидної залози, нервової системи, статевих

Таблиця 1

Поживна цінність основних компонентів морозива на основі рослинної сировини

Показники	Банан	Кокосове молоко	Груша	Глід сушений	Брусниця	Барбарис сушений
<i>Харчова цінність</i>						
Калорійність, кКал	89	197	47	52,5	46	100
Білки, г	1,09	2,02	0,4	-	0,7	29,6
Жири, г	0,33	21,33	0,3	-	0,5	-
Вуглеводи, г	22,84	2,81	10,3	14	8,2	-
Харчові волокна, г	2,6	-	2,8	-	3	7,9
Крохмаль, г	5,38	5,38	0,5	-	-	-
Вода, г	74,91	72,88	85	-	86	-
<i>Макроелементи</i>						
Кальцій, мг	5	18	19	30	25	-
Магній, мг	27	46	12	100	7	-
Натрій, мг	1	13	14	-	7	-
Калій, мг	358	220	155	131	90	-
Фосфор, мг	22	96	16	-	16	-
<i>Мікроелементи</i>						
Залізо, мг	0,26	3,3	2,3	4	0,4	-
Цинк, мг	0,15	0,56	0,19	0,07	-	-
Мідь, мкг	78	223	120	290	-	-
Марганець, мг	0,27	0,768	0,065	-	0,65	-
Селен, мкг	1	2,2	0,1	11,8	-	-
<i>Вітаміни</i>						
А (РЕ), мкг	3	-	2	2333,33	8	-
В ₁ , мг	0,031	0,022	0,02	-	0,01	1150
В ₂ , мг	0,0073	-	0,03	-	0,02	-
Е, мг	0,1	-	0,4	2	1	-
В ₆ , мг	0,367	0,0028	0,03	-	-	2
Холін, мг	9,8	8,5	9,8	-	-	-
Бета-каротин, мг	0,026	-	0,01	14	0,05	-
В ₉ (фолієва кислота), мкг	20	14	2	-	0,03	7
В ₅ , мг	0,334	-	0,05	-	-	-
РР, мг	0,67	0,637	0,1	330	2	-
С, мг	8,7	1	5	90	15	-
К, мкг	-	-	4,5	-	-	-

**Харчові композиції морозива
на основі рослинної сировини**

№	Найменування сировини	Дослід 1	Дослід 2	Дослід 3
1.	Банан	23	22	22
2.	Кокосове молоко	30	30	30
3.	Груша	30	26	28
4.	Мед	5	3	3
5.	Арахіс	10	10	5
6.	Сік лимону	2	2	2
7.	Сушений барбарис	-	7	-
8.	Глід сушений	-	-	5
9.	Брусниця	-	-	5
	Вихід, г	100	100	100

гормонів. Володіючи терпкими властивостями, ягоди барбарису виводять з організму токсини, шлаки, солі важких металів та інші шкідливі речовини [4].

Плоди глоду відомі ще з давніх часів. За своїми лікувальними та корисними властивостями він мало чим поступається шипшині. У складі плодів глоду від 4 до 11% цукру, здебільшого фруктози, а також комплекс біологічно активних речовин – тритерпенових кислот (олеанова, урсолова, що має антимікробну, судинорозширювальну і протизапальну дію, і кратегова), холіну і ацетилхоліну, кверцетину, дубильних речовин, фітостеринів, винної та лимонної кислоти, вітамінів А, С, Р. Досить багато пектину, який під час переробки не тільки утворює желе, але і виводить з організму солі важких металів та інші шкідливі речовини. Тобто глід не лише значно поліпшує хімічний склад розроблюваного продукту, але виступає структуроутворювачем.

Брусниця містить багато корисних речовин: цукри (глюкозу, фруктозу), органічні кислоти (лимонну, яблучну та інші), вітамін С, марганець, дубильні речовини. Ягоди брусниці багаті мікро- і макроелементами. Зокрема, брусниця вельми багата марганцем. Марганець спричинює позитивний вплив на функцію кровотворних органів, бере участь у вуглеводному обміні (необхідний для секреції інсуліну – гормону підшлункової залози), бере участь у ліпідному обміні (перешкоджає відкладенню жиру в печінці) і синтезі холестерину. Також ягоди брусниці містять органічні кислоти. Бензойна кислота є природним антиоксидантом, зміцнює клітинні мембрани в організмі. Наявність в ягодах брусниці винної та саліцилової кислот дозволяє використовувати їх як протиревматичний засіб [6; 7].

Поживна цінність основних компонентів розробленого морозива наведена в таблиці 1.

В процесі розробки технології веганського морозива контрольним зразком слугувало традиційне молочне морозиво, виготовлене за ДСТУ 4733:2007. Сконструйовані і пророблені харчові композиції розробленого замороженого десерту такі (табл. 2): дослід 1 – бананово-грушеве морозиво на основі кокосового молока (основа) – отримало назву «Банана»; дослід 2 – основа з додаванням сушених ягід барбарису – має назву «Барбера»; дослід 3 – основа з додаванням сушеного глоду та свіжих плодів брусниці – «Бакка» [5].

Технологічна схема приготування бананово-грушевого морозива на основі кокосового молока наведена на рис. 1–3.

Аналіз хімічного складу розроблених аналогів традиційного молочного морозива показав, що продукти мають знижену калорійність. Вміст харчових волокон у 3 рази більший в дослідних зразках, порівняно з контролем (табл. 3).

Вітамінно-мінеральний склад бананово-грушевого морозива на основі кокосового молока з додаванням барбарису / брусниці та глоду покращився: збільшився вміст ретинолового еквіваленту та бета-каротину; вітамінів групи В, зокрема, тіаміну (в 1,4 рази) та фолієвої кислоти (майже в 6 разів), які є дефіцитними в раціоні веганів; вміст вітаміну С зріс більше ніж у 7, 5 разів; вітаміну Е – у 2,8 рази; вітаміну РР – у 1,7 разів; магнію (у середньому) – на 29 мг; заліза – на 2,19 мг. Також у 2 рази збільшився вміст харчових волокон порівняно з контролем. У зв'язку з тим, що для контролю застосовувалося молоко тваринного походження, а для розроблених зразків лише рослинна сировина, аналоги на кокосовому молоці містять порівняно небагато кальцію, і в 2 рази зменшилась кількість вітаміну В5 та рибофлавіну.

На основі визначених якісних показників та коефіцієнтів вагомості розраховано комплексний показник якості веганського морозива на основі кокосового молока, виготовленого за розробленою технологією, та побудовано модель якості (рис. 4).

Висновки. Розроблені десерти відповідають вимогам теперішньої тенденції харчування, тобто містять у своєму складі натуральні компоненти, характеризуються стабільністю органолептичних і фізико-хімічних показників під час зберігання, відрізняються високими поживними

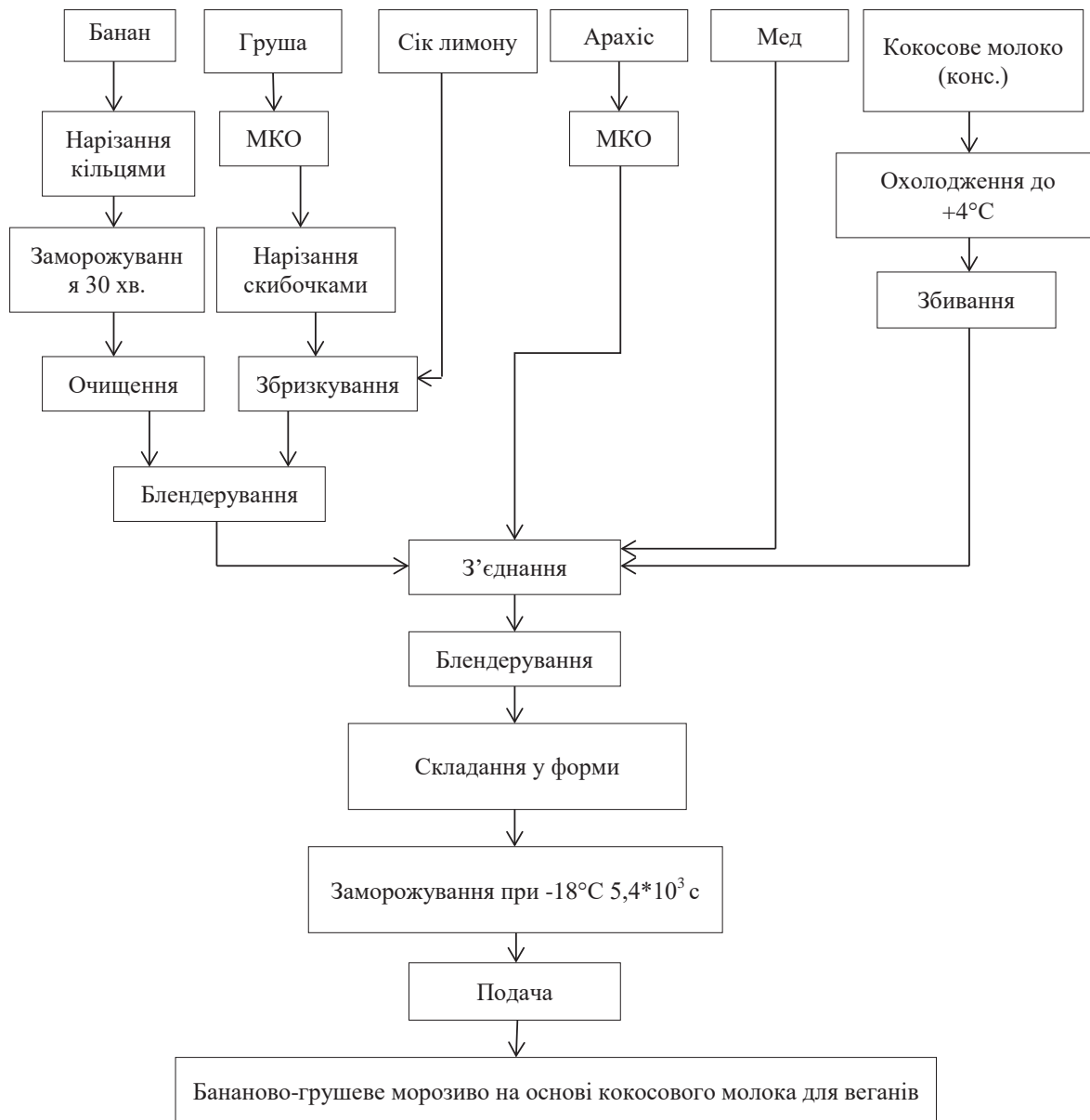


Рис. 1. Технологічна схема приготування бананово-грушевого морозива на основі кокосового молока



Рис. 2. Технологія підготовки додаткових інгредієнтів для морозива «Барбера»



Рис. 3. Технологія підготовки додаткових інгредієнтів для морозива «Бакка»

**Поживна та енергетична цінність розроблених зразків морозива на основі рослинної сировини
(на 100 г)**

Показники	Всього			+/-			%			
	Контр.	Дослід 1	Дослід 2	Дослід 3	Дослід 1	Дослід 2	Дослід 3	Дослід 1	Дослід 2	Дослід 3
Харчова цінність										
Калорійність, кКал	207	165,8	158,7	134,87	-41,23	-48,33	-72,14	-19,92	-23,35	-34,85
Білки, г	3,50	3,66	3,62	2,34	0,16	0,12	-1,16	4,43	3,31	-33,03
Жири, г	11,00	11,08	11,07	8,84	0,08	0,07	-2,16	0,77	0,63	-19,63
Вуглеводи, г	22,90	14,35	12,58	12,84	-8,55	-10,32	-10,06	-37,33	-45,08	-43,91
Харчові волокна, г	0,70	2,24	2,10	1,91	1,54	1,40	1,21	219,71	200,00	172,29
Крохмаль, г	0,10	3,28	3,09	3,10	3,18	2,99	3,00	-	-	-
Вітаміни										
А (РЕ), мкг	22,00	1,29	81,68	118,29	-20,71	59,68	96,29	-94,14	271,27	437,6
Е, мг	0,30	1,15	1,28	0,79	0,85	0,98	0,49	284,33	328,13	164,33
В ₆ , мг	0,05	0,13	0,13	0,11	0,08	0,08	0,06	166,42	156,76	121,4
Холін, мг		12,99	12,50	10,08	12,99	12,50	10,08			
Бета-каротин, мг	0,01	0,01	0,52	0,71	0,00	0,51	0,70	-40,20	5090,	6982,2
В ₉ , мкг	5,00	34,35	33,75	21,79	29,35	28,75	16,79	587,00	575,00	335,83
В ₅ , мг	0,58	0,27	0,27	0,18	-0,31	-0,31	-0,40	-52,84	-53,42	-68,48
Вітамін РР, мг	0,12	2,26	2,26	1,41	2,14	2,14	1,29	1786,71	1781,17	1078,6
С, мг	0,60	5,03	22,32	9,91	4,43	21,72	9,31	738,50	3620,67	1551,5
В ₃ , мг	-	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	-	-	-
Н, мкг	-	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	-	-	-
К, мкг	-	1,35	1,17	1,26	1,35	1,17	1,26	-	-	-
Макроелементи										
Кальцій, мг	128,00	20,83	20,22	19,55	-107,1	-107,7	-108,45	-83,73	-84,20	-84,73
Магній, мг	14,00	42,12	41,29	37,78	28,12	27,29	23,78	200,86	194,93	169,8
Натрій, мг	80,00	11,17	10,66	10,14	-68,83	-69,34	-69,86	-86,04	-86,68	-87,33
Калій, мг	199,00	264,78	254,78	236,03	65,78	55,78	37,03	33,06	28,03	18,61
Фосфор, мг	105,00	74,84	73,70	57,32	-30,16	-31,30	-47,68	-28,72	-29,81	-45,41
Сірка, мг	-	1,80	1,76	1,88	1,80	1,76	1,88	-	-	-
Мікроелементи										
Залізо, мг	0,09	2,28	2,17	2,19	2,19	2,08	2,10	2433,11	2312,44	2330,2
Цинк, мг	0,69	0,59	0,58	0,42	-0,10	-0,11	-0,27	-15,00	-15,55	-38,59
Марганець, мг	0,01	0,51	0,50	0,44	0,50	0,49	0,43	4954,00	4919,20	4280

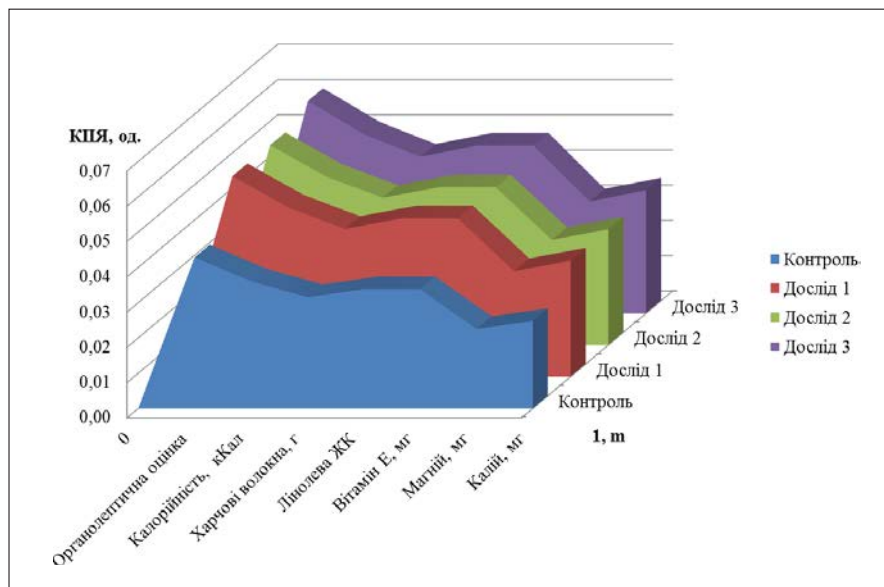


Рис. 4. Модель якості бананово-грушевого морозива на основі рослинної сировини з додаванням барбарису / глуду та брусниці

властивостями та харчовою цінністю. Розроблені кріотехнології, завдяки доступності рецептурних компонентів і нескладному процесу приготування, дозволяють здійснювати виробництво заморожених десертів у закладах ресторанного господарства та у кейтерінговому обслуговуванні, що сьогодні є модним та актуальним. Адже для кейтерінгового обслуговування головною перевагою розроблених десертів є їх низька калорійність, високий вміст вітамінів з антиоксидантними властивостями та можливість швидкого приготування, миттєва подача безпо-

середньо на місці події, що скорочує затрати на зберігання, транспортування та створення відповідних умов [8].

Узагальнюючи одержані результати, завдяки високому вмісту біологічно активних і мінеральних речовин заморожені десерти «Банана», «Бакка» і «Барбера» можна рекомендувати для розширення раціону харчування веганів. Також їх можна рекомендувати всім верствам населення, особливо людям, які з певних причин (алергія на лактозу, специфічна дієта) не можуть споживати традиційне молочне морозиво.

Список літератури:

1. Антоненко А.В. Технологія харчових продуктів функціонального призначення: монографія / за ред. М. І. Пересічного. Київ : Київ. нац. торг.-екон. ун-т, 2012. 1116 с.
2. Антоненко А.В. Інноваційні технології харчової продукції функціонального призначення: монографія / за ред. О.І. Черевка, М.І. Пересічного. Харків : Харк. держ. ун-т харч. та торгівлі. 2017. 591 с.
3. Антоненко А.В. Перспективные тенденции развития науки : техника и технология : монографія / *Інноваційні технології харчової продукції функціонального призначення*: монографія / за ред. И.Я. Львович, А.В. Некрасова. Одеса : Куприенко С.В. 2016. 197с.
4. Антоненко А. Наукове обґрунтування і розроблення фруктових систем як основи для солодких соусів. *Міжнар. наук.-практ. журн. «Товари і ринки»*. 2009. № 2. С. 76–82.
5. Мазаракі А.А., Кравченко М.Ф., Антоненко А.В. Збірник рецептур кулінарної продукції і напоїв функціонального призначення. Київ : Київ. нац. торг.-екон. ун-т, 2013. 772 с.
6. Антоненко А.В. Оцінка якості нових соусів підвищеної харчової цінності. *Міжнар. наук.-практ. журн. «Товари і ринки»*. 2009. № 1. С. 58–62.
7. Антоненко А.В. Плодово-ягідні системи як основа для соусів. *Збірник наукових праць ХДУХТ*. 2013. № 21. С. 102–108.
8. Шпилей А. Лечебно-профилактические виды замороженных десертов. *Food&drinks*. 2014. № 2. С. 55–69.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЗАМОРОЖЕННЫХ ДЕСЕРТОВ НА ОСНОВЕ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

В статье приведены технологии приготовления замороженных десертов на основе растительного сырья, для людей придерживающихся доктрин веганства. По результатам проведенных исследований было доказано, что бананово-грушевое мороженое на основе кокосового молока с добавлением боярышника, брусники или барбариса является эффективной альтернативой традиционному молочному мороженому. Разработаны технологии приготовления и новые рецептуры десертов, отличающихся повышенным количеством БАР и имеющих высокие вкусовые свойства. Обоснованы технологические параметры процесса производства и построена модель комплексной оценки качества.

Ключевые слова: технология, криотехнологии, веган, мороженое, антиоксиданты, органолептическая оценка

MODERN TECHNOLOGIES OF FROZEN DESSERTS ON THE BASIS OF PLANT RAW MATERIAL

The article presents the technology of cooking frozen desserts based on vegetable raw materials, for people who adhere to the doctrines of veganism. According to the results of the research it was proved that banana-pear ice cream based on coconut milk with the addition of hawthorn, lingonberry or barberry is an effective alternative to traditional dairy ice cream. Developed cooking technology and new recipes of desserts, characterized by an increased number of BAR and have high taste properties. The technological parameters of the production process are substantiated and a comprehensive quality assessment model is built.

Key words: technology, cryotechnology, vegan, ice cream, antioxidants, sensory evaluation.

Гончаров Д.С.

Одеська національна академія харчових технологій

Ткаченко Н.А.

Одеська національна академія харчових технологій

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ФІТОСТЕРОЛІВ У ВИРОБНИЦТВІ ПРОДУКТІВ ДЛЯ ЗДОРОВОГО ХАРЧУВАННЯ

У статті розглянуто фітостероли як інгредієнти для продуктів із додатковими терапевтичними властивостями. Представлено основні відомості про природу стеролів, джерела та технології видобутку фітостеролів. Проаналізовано історію відкриття та застосування фітостеролів. Користь використання рослинних стеролів розглянуто в розрізі результатів клінічних досліджень. Описано сучасні методики аналізування стеролів та особливості внесення їх до харчових продуктів. Значну увагу приділено останнім дослідженням властивостей фітостеролів у профілактиці серцево-судинних та ракових захворювань.

Ключові слова: фітостероли, продукти для здорового харчування, біосинтез, методи аналізу, холестерол, гіперхолестеролемія.

Постановка проблеми. Зв'язок між харчуванням та здоров'ям людини почали помічати ще в давні часи, проте розуміння цих взаємовідносин часто ускладнювалося соціальними та історичними реаліями. У ХХ ст. технологічне забезпечення та впорядкований медичний досвід дали змогу визначити чіткі взаємозв'язки між харчуванням людини та виникненням захворювань. У той же час харчові технології вийшли на новий рівень обсягів виробництва, що інколи потребувало нових рішень та інгредієнтів, властивості яких не були до кінця визначені, тому середина та кінець ХХ ст. були часом побудови основ взаємодії медицини та харчових технологій. Нині спостерігається тенденція до консолідації нових знань у медицині з розробленням нових продуктів, яке відбувається з урахуванням їхнього майбутнього впливу на здоров'я людини. Одним із найбільш яскравих прикладів такої консолідації є ідея впровадження харчових продуктів, збагачених фітостеролами.

Основою для розроблення харчових продуктів, збагачених фітостеролами, послужили медичні дослідження серцево-судинних захворювань, чинників, що їх викликають, та можливих варіантів профілактики. Нині на ринку представлено декілька продуктів з фітостеролами, проте вони ще не стали повсюдно вживаними. Основною проблемою таких продуктів є їхня висока ціна, що відштовхує більшість споживачів, а відсутність чітко вираженого ефекту погано втримує тих, хто почав уживати ці продукти. Тож для можливостей упровадження нових ефективних продуктів проведено роботу з аналізу джерел фітостеринів,

можливостей їхнього вилучення, особливостей змішування харчових продуктів з фітостеролами, також розглянуто медичні ефекти від уживання додаткової кількості фітостеролів.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Загальні відомості про стероли

Стероли – високомолекулярні циклічні спирти (рис. 1), в основі будови яких лежить ядро циклопентанпергідрофенантрону. Стероїдами називають вторинні спирти групи $C_{27} - C_{29}$ рослинного або тваринного походження (рис. 1). На відміну від звичайних спиртів вони можуть мати кристалічну форму з температурами плавлення в межах $100-200^{\circ}C$, тому ці сполуки отримали загальну назву «стероїди» (від грец. Steros – твердий). Холестерол – мононенасичений стерол $C_{27}H_{45}OH$ (т. пл. $149^{\circ}C$) був названий так, тому що вперше був виявлений у жовчних каменях і є їх основним компонентом (грец. Chole – жовч). Холестерол є основним представником стеролового ряду в організмі людини і тварин. Так, для дорослої людини вагою $80-82$ кг уміст холестеролу в організмі може становити близько 240 г [7, с. 13]. Стероли також широко представлені в рослинах (фітостероли) і грибах (мікостероли).

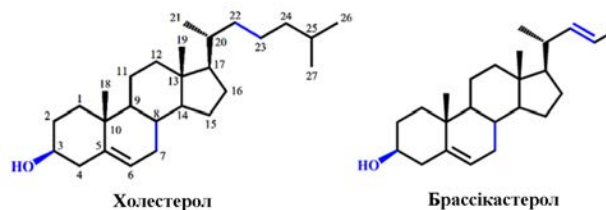


Рис. 1. Структура стеролів

Уперше фітостероли описав Ф. Бенекє у 1862 р. Він виявив стероїдну сполуку в горосі, але через недосконалість аналітичних методик того часу помилково припустив, що це був холестерол. Знадобилося понад 50 років, поки було встановлено, що сполука, яку відкрив Бенекє, насправді була бета-ситостеролом. У 1897 р. Г. Томс установив, що всі стероли рослинного походження відрізняються від холестеролу, і відніс їх до окремої групи – фітостеролів [2, с. 35].

Рослинні стероли входять до складу клітинних мембран разом із фосфоліпідами: фосфатидилетаноламіном, фосфатидилхоліном, кардіоліпіном, фосфатидилсеріном; також вони мають деяку схожість із гліколіпідами, сфінголіпідами. Рослинні стероли близькі за будовою до холестеролу, але відрізняються більшою гідрофобністю. Фітостероли часто містяться у мембранах клітин і виконують упорядковуючу дію на структуру мембран, забезпечують виборчу проникність, регуляторну функцію, впливають на активність ферментів. Однак відзначено, що стігмастерол має розпорядкову вплив на мембрани. Це співвідноситься з тим, що молярне відношення стігмастеролу до інших фітостеролів у плазматичній мембрані збільшується під час старіння рослин [30, с. 468]. У всіх рослинних тканинах фітостероли зустрічаються в декількох загальних формах: як вільні спирти, як ефіри жирних кислот, як стерильні глікозиди й як ацильовані стерильні глікозиди. Останні три форми загалом називаються фітостероловими кон'югатами.

Для рослин найбільш характерними стеролами є бета-ситостерол, кампастерол, стігмастерол.

Механізми біосинтезу стеролів

Холестерол – стероїд, характерний для тваринних організмів. Він синтезується в багатьох тканинах людини, але основне місце синтезу – печінка. У печінці синтезується понад 50% холестеролу, у тонкому кишечнику – 15–20%, решта холестеролу синтезується у шкірі, корі надниркових залоз, статевих залозах. За добу в організмі синтезується близько 1 г холестеролу; з їжею надходить 300–500 мг. Холестерол виконує багато функцій: входить до складу всіх мембран клітин і впливає на їхні властивості, служить вихідним субстратом у синтезі жовчних кислот і стероїдних гормонів. Попередники синтезу холестеролу в метаболічному шляху перетворюються також на убіхінон – компонент дихального ланцюга, а також у доліхол, який бере участь у синтезі глікопротеїнів. Реакції синтезу холестеролу відбуваються у цитоплазмі клітин. Це один із найдовших метаболіч-

них шляхів в організмі людини. Складний шлях синтезу стеролів можна розділити на три етапи. Перший етап полягає в утворенні мевалоната (мевалонаної кислоти): дві молекули ацетил-КоА конденсуються ферментом тіолаза з утворенням ацетоацетил-КоА, фермент КоА-синтаза приєднує третій ацетильний залишок з утворенням ГМГ-КоА (3-гідрокси-3-метилглутарил-КоА). У наступній реакції відбувається відновлення ГМГ-КоА до мевалоната.

На другому етапі синтезу мевалонат перетворюється на п'ятивуглецеву ізопреноїдну структуру, яка містить пірофосфат – ізопентенілпірофосфат. Продукт конденсації двох ізопренових одиниць – геранілпірофосфат. Приєднання ще однієї ізопренової одиниці призводить до утворення фарнезилпірофосфата – сполуки, яка складається з 15 вуглецевих атомів. Дві молекули фарнезилпірофосфата конденсуються з утворенням сквалєну – вуглеводню лінійної структури, що складається з 30 вуглецевих атомів.

Після утворення сквалєну утворення холестеролу і фітостеролів йде різними шляхами.

На третьому етапі синтезу холестеролу сквалєн через стадію утворення епоксиду ферментом циклазою перетворюється на молекулу ланостеролу, яка містить чотири конденсованих цикли і 30 атомів вуглецю. Далі відбувається 20 послідовних реакцій, що перетворюють ланостерол на холестерол. На останніх етапах синтезу від ланостеролу відділяються три атоми вуглецю, тому холестерол містить 27 атомів вуглецю [6, с. 233].

Під час утворення фітостеролів зі сквалєну може протікати декілька варіантів реакцій: зі сквалєну утворюється 2,3-оксидосквалєн, частина якого йде на утворення циклоартенолу, частина – на ланостерол.

Циклоартенол перетворюється на циклоукалінол і потім – на обтусіфолеол. Ланостерол і обтусіфолеол під дією ферментів можуть перетворитися на кампастерол і ізофукостерол. Кампастерол далі перетворюється на брассікостероїди, ізофукостерол далі перетворюється на сітостерол, а потім – на стігмастерол.

Методи аналізу стеролів

У сучасній лабораторній практиці на підприємствах аналізування стеролів можна розділити на дві основні групи: перша – це пряме дослідження стеролового складу продукту; друга – визначення фальсифікації сировини за рахунок визначення її стеролового складу.

У харчових продуктах стероли можуть бути представлені як вільні стероли, стеролові ефіри,

стерил-глікозиди, тому оптимальна пробопідготовка для аналізування повинна включати виділення стеролів з усіх перерахованих вище форм. Основні розроблені методики описані в таких стандартах: ISO 6799, IUPAC-методи 2.401 і 2.403, ISO 12228 та AOCS Ch 6-91, а також Codex Stan 210, який посилається на ISO 6799 і IUPAC 2.403. Усі перераховані вище методи можуть застосовуватися для аналізу фітостеролів у природних продуктах, у яких уміст загального стеролу становить до 1%. Також методи можуть застосовуватися й для аналізу продуктів для здорового або спеціального харчування, де вміст фітостеролів може досягати 8%.

Методики визначення фальсифікації продукції засновані на відмінності стеролового складу рослинної та тваринної сировини. Для визначення наявності домішок рослинних жирів у тваринних критичним є вміст бета-ситостеролу, оскільки даний стерол присутній у великій кількості в рослинних жирах і відсутній у тваринних. Для даного визначення можуть бути використані як загальні методики ISO 12228, так і специфічні ISO 3594-1976, ISO 3595-1976. На схожому принципі засновано й визначення домішок тваринних жирів у рослинних, основним показником у цьому разі є вміст холестеролу, який відсутній у рослинних жирах.

Більшість методів, за яких екстрагуються ліпіди, дає змогу також виділити й фітостероли. Так, наприклад, гексаном можна екстрагувати вільні стероли і фітостеролові ефіри жирних кислот. При цьому стеролові глікозиди й ацильовані глікозиди жирних кислот екстрагуються краще з підвищенням полярності розчинника. Найбільший ефект досягають екстракцією хлороформ-метанолом за Bligh і Dyer [28, с. 907].

Аналізування стеролів у рослинній сировині зазвичай виконується за допомогою газової капілярної хроматографії з використанням полум'яно-іонізаційного або мас-спектрометричного детектування, також можливе використання високоефективної рідинної хроматографії (ВЕРХ). Зазвичай аналізування стероїдного складу включає екстрагування ліпідної частини; її омилення або кислотний гідроліз; омилення вільних стеролів; екстрагування неомілюваної частини і поділ стеролів методом тонкошарової хроматографії з подальшим застосуванням капілярної газової хроматографії [16, с. 1488].

Джерела отримання фітостеролів

У організмі тварин присутня велика частина холестеролу і його похідних, а в усіх рослинах

присутні фітостероли як міжклітинний сполучний компонент. Уміст фітостеролів у фруктах та овочах украй малий: так, для моркви, латуку і томата характерний уміст у межах 7–12 мг у 100 г продукту, яблуко може містити до 18,5 мг у 100 г продукту, а рис – 72,3 мг у 100 г продукту [15, с. 1].

Найбільша кількість стеролів міститься в таловій олії – продукті обробки сірчаною кислотою сульфатного мила, яке одержують як побічний продукт під час варінні целюлози сульфатним способом. Загальний вміст стеролів у таловій олії може досягати 10 000 мг у 100 г [15, с. 1].

Основним джерелом фітостеролів для людини є рослинні олії та масла, в яких якісний і кількісний склад стеролової фракції може суттєво відрізнятися (табл. 1).

Технологія отримання фітостеролів

Найчастіше фітостероли виділяють за допомогою повного омилення продукту і подальшого розділення за рахунок різної розчинності і температури кристалізації. Для зниження вартості і збільшення корисності природних ресурсів нині тривають пошуки нових джерел фітостеролів і технологій їх видобутку. Так, фітостероли можливо добувати з відходів переробки олійних і бобових культур [1, с. 40], також практичну цінність мають відходи переробки олійно-жирової промисловості, зокрема деодистилят [4, с. 1], що утворюється під час рафінації соняшникової олії, і soapstock [3, с. 43].

Найбільша кількість фітостеролів може бути отримана з продуктів переробки деревини в целюлозу. Сульфатне варіння є одним з основних способів виробництва целюлози. Сульфатний луг є проміжним продуктом сульфатного варіння, він містить екстрактивні речовини стовбурової частини дерева. Натрієві солі жирних і смоляних кислот мають найбільше практичне значення, вони виділяються на поверхню упареного луку і називаються сульфатним милом. Фітостероли можна отримати, виділивши неомілювану фракцію із сульфатного мила [5, с. 195].

Фітостероли в боротьбі з надлишковим холестеролом

Рослинні стероли були відкриті в 1922 р., проте механізм їхнього впливу на організм людини і тварин довгий час залишався не вивченим.

Передусім варто виділити важливість отримання фітостеролів у боротьбі із серцево-судинними захворюваннями. Спочатку було встановлено, що високий уміст холестеролу в сироватці крові напряму пов'язаний із захворюваннями судин. Одним із чинників розвитку атеросклерозу (хронічного захво-

рювання, що характеризується ущільненням стінок артерій і звуженням їх просвіту з подальшим порушенням кровопостачання органів) є гіперхолестеролемія – підвищення рівня холестеролу в крові. На початковому етапі розуміння причин гіперхолестеролемії пацієнтам призначалися спеціальні дієти для зниження рівня холестеролу, який надходить з їжі, і ліки, які пригнічували біосинтез холестеролу в організмі [30, с. 460].

Потім дослідники дійшли висновку, що проблеми судин викликає не високий вміст холестеролу, а відхилення у його метаболізмі в організмі. Насамперед відхилення від норми пов'язані з кількістю ліпопротеїдів низької щільності (ЛПНЩ), які переносять холестерол до тканин і ліпопротеїдів високої щільності, які відносять надлишковий холестерол і жири з тканин (ЛПВЩ).

Істотний інтерес до фітостеролів виник після припущень про те, що фітостероли можуть перешкоджати всмоктуванню надлишкового холестеролу [11, с. 472]. Було показано, що фітостероли і фітостаноли (перш за все, 4-десметил-стероли і станоли) інгібують абсорбцію як харчового, так і ендогенного (жовчного) холестеролу з кишечника. Також було відзначено, що збільшення споживання фітостеролів поліпшує загальний метаболізм холестеролу в організмі.

Фітостероли надходять в організм за звичайної для жителів Європи дієти в кількості 200–400 мг/день [12, с. 962; 13, с. 695]. Основними джерелами фітостеролів є рослинні жири, хліб, крупи й овочі. Однак, змінивши харчування і додавши в нього більше вегетаріанської їжі, можливо підвищити надходження фітостеролів до 500–1000 мг/день [13, с. 695].

Перші спроби застосування фітостеролів проводилися ще в 1950-х роках [24, с. 704], однак через погану всмоктуваність чистих фітостеролів доводилося використовувати великі дози, близько 20–25 г на день [30, с. 462]. Нові перспективи для застосування фітостеролів з'явилися після того, як був розроблений метод етерифікації стеролів жирними кислотами, що підвищило їх засвоюваність, а також розчинність у рослинних оліях і зробило можливим застосування в традиційних харчових продуктах [30, с. 465; 33, с. 177]. Застосування фітостеролових ефірів дало змогу отримати відчутне зниження загального рівня холестеролу, а також холестеролу, який переноситься ліпопротеїдами низької щільності вже за дозування в кількості 2–3 г на день, що було підтверджено клінічними дослідженнями [29, с. 767].

Протягом багатьох років проводилися дослідження впливу введення фітостеролів у дієту

Таблиця 1

Стероловий склад різних олій [9, с. 5–6]

	Холестерол	Брасіко-стерин	Кампастерин	Стігмастерин	β -Сіто-стерин	δ -5-Авакастерин	δ -7-Стігмастерин	δ -7-Авекастерин	Інші	Усього стеринів (мг/кг)
Арахісова олія	НВ*-3,8	НВ*-0,2	12,0-19,8	5,4-13,2	47,4-69	5,0-18,8	НВ*-5,1	НВ*-5,5	НВ*-1,4	900-2900
Олія виноградних кісточок	НВ*-0,5	НВ*-0,2	7,5-14,0	7,5-12,0	64,0-70,0	1,0-3,5	0,5-3,5	0,5-1,5	НВ*-5,1	2000-70000
Кукурудзяна олія	0,2-0,6	НВ*-0,2	16,0-24,1	4,3-8,0	54,8-66,6	1,5-8,2	0,2-4,2	0,3-2,7	НВ*-2,4	7000-22100
Кунжутна олія	0,1-0,5	0,1-0,2	10,1-20,0	3,4-12,0	57,5-61,9	6,2-7,8	0,5-7,6	1,2-5,6	0,7-9,2	4500-19000
Соева олія	0,2-1,4	НВ*-0,3	15,8-24,2	14,9-19,1	47,0-60	1,5-3,7	1,4-5,2	1,0-4,6	НВ*-1,8	1800-4500
Соняшникова олія	НВ*-0,7	НВ*-0,2	6,5-13,0	6,0-13,0	50-70	НВ*-6,9	6,5-24,0	3,0-7,5	НВ*-5,3	2400-5000
Кокосова олія	НВ*-3,0	НВ*-0,3	6,0-11,2	11,4-15,6	32,6-50,7	20,0-40,7	НВ*-3,0	НВ*-3,0	НВ*-3,6	400-1200
Пальм-ва олія	2,6-6,7	НВ*	18,7-27,5	8,5-13,9	50,2-62,1	НВ*-2,8	0,2-2,4	НВ*-5,1	НВ*	300-700

*НВ – нижче порогу визначення

пацієнтів, що показало явні поліпшення у зниженні загального холестеролу крові і холестеролу низької щільності у досліджуваних пацієнтів [8, с. 244; 20, с. 422], причому даний ефект неодноразово був перевірений за різних початкових умов, із використанням плацебо [8, с. 244]. Позитивний ефект від уведення фітостеролів також може спостерігатися і за їх додавання до звичайного раціону [22, с. 844].

Проблема зниження холестеролу і поліпшення метаболізму жирів є дуже важливою проблемою національного масштабу, оскільки внаслідок погіршення умов життя і зміни дієти жителів розвинених країн у напрямі збільшення споживання тваринних жирів і перероблених рослинних жирів спостерігається висока тенденція серцево-судинних захворювань серед працездатного населення і загальне зниження здоров'я нації.

Уперше уряд прийняв серйозні заходи в рамках North Karelia Project. Так, у 1970 р. у Фінляндії спостерігалася найбільша в Європі захворюваність серцево-судинними захворюваннями. Найбільш яскраво ця проблема була виражена в Північній Карелії, і програма була розпочата із цієї місцевості, через що й отримала свою назву. У період із 1970 по 1995 р. велася активна пропаганда здорового харчування, оскільки до цього в дієті фінів була велика кількість м'яса і тваринних жирів. Результатами програми стало зниження серцево-судинних захворювань на 65%.

У США в 1985 р. було розпочато National Cholesterol Education Program. Ця програма була ініційована Національним інститутом серця, легенів і крові, й основною метою було знизити рівень серцево-судинних захворювань, викликаних гіперхолестеролемією [17, с. 33].

Значення фітостеролів у дієті населення в рамках зниження рівня холестеролу і захворюваності на серцево-судинні хвороби було вивчено в статистичних довгострокових дослідженнях у Нідерландах [14, с. 1067], Іспанії [18, с. 850], Фінляндії [23, с. 587].

Європейською Комісією були проведені великомасштабні дослідження ринку продуктів і напоїв із додаванням фітостеролів [10, с. 133].

Імуномоделюючі властивості фітостеролів

Зазвичай раку товстої кишки передуює гіперплазія – збільшення проліферації клітин у слизовій оболонці товстої кишки, що можливо зменшити за зниження всмоктування холестеролу в кишечнику [26, с. 2127]. Під час досліджень ефекту застосування фітостеролів був виявлений їхній протизапальний ефект [32, с. 371], антиоксидантний ефект [25, с. 488] і нейрозахисний ефект [31, с. 1323].

Харчові продукти з фітостеролами

Перші продукти з додаванням фітостеролів у вигляді ефірів були випущені на ринок у Фінляндії в 1990 р, після чого в інших країнах Європи також були випущені подібні продукти. На ринок

Таблиця 2

Приклади різноманітних продуктів із фітостеролами [21, с. 1]

Найменування товару	Формат продукту	Розмір порції	Вміст фітостеролів та фітостанолів, г
Benecol® spread	Бутербродна намазка	1 столова ложка	0,5
Benecol® Smart Chews	Жувальна гумка	2 гумки	0,8
Cardio Juice	Напій на основі соку	170 г	0,5
Corazonas Chips	Картопляні чіпси	28,35 г	0,4
Giant EagleFat Free milk	Молочний продукт	226,8 г	0,4
Heart Goodness®Egg Product	Продукт з яєчних білків	59,15 мл	0,5
Lifetime® Low FatBlock Cheese	Сирний продукт	28,35 г	0,65
Promise Activ TMs spread	Бутербродна намазка	1 столова ложка	1,0
Promise Activ TMLight spread	Бутербродна намазка	1 столова ложка	1,0
Smart Balance®Heart Right LightButtery Spread	Бутербродна намазка	1 столова ложка	1,7
VitaBrownieTMDark ChocolatePomegranate	Шоколадне печиво	14,17 г	0,4
Vitafusion Platinum 50+ Multivitamins	Жувальні цукерки	2 цукерки	0,4

США продукти з фітостеролами потрапили в 1999 р. через тривалі дискусії про їх регулювання [19, с. 149].

У 1999 р. компанія Lipton спільно з Uniliver випустили продукт Take Control, який включав ефіри стеролів із рослинними оліями, що було більш економічно вигідно порівняно з гідрогенізованими стеролами [30, с. 480].

У жовтні 2000 р. Forbes Medi Tech Inc проголосили початок маркетингових досліджень в Австралії та США продукту Phytrol, який в основі мав неетерифіковані фітостероли з талової олії і, за запевненнями виробника, міг використовуватися в різних продуктах харчування [19, с. 150].

Протягом 2000–2001 рр. компанія Procter & Gamble тестувала Cook Smart – лінію рослинних олій для кулінарії з ефірами стеролів соєвої олії. Також у 2000 р. Forbes Medi-Tech Inc анонсувало «Дизайнерські олії» на підставі продукту Phytrol.

Сьогодні фітостероли вносять у харчові продукти різних груп (табл. 2).

Косметичні продукти з фітостеролами

Фітостероли часто використовуються під час виробництва кремів проти старіння і лосьйонів від засмаги, концентрація фітостеролів у таких продуктах зазвичай варіюється від 0,5% до 2,0%, при цьому вміст стеролових ефірів може бути аж до 5%; у першу чергу допустима концентрація обмежується можливостями розчинності. Додавання фітостеролів у креми істотно підвищує захист від УФ-випромінювання. Крім того, про-

тизапальний ефект фітостеролів може бути використаний у продуктах, призначених для лікування atopічної екземи та захисту дитячої шкіри.

Додавання фітостеролів до шампуню і кондиціонера для волосся може надати оксамитовий блиск і збільшити витривалість волосся після сушіння.

Також фітостероли можуть бути додані до декоративної косметики, зокрема помади або пудри. Клінічними дослідженнями [27, с. 294] підтверджено, що місцеве застосування і накопичення фітостеролів у шкірі підвищує вміст вологи й еластичність.

Висновки. У продуктів із фітостеролами є всі шанси зайняти свою нішу в дієті звичайної людини, оскільки важливість уживання фітостеролів визнається не тільки окремими дослідниками, а й навіть урядами розвинених країн.

Найбільші шанси у продуктів із фітостеролами будуть у тому разі, якщо вдасться створити дешеву й універсальну технологію видобування фітостеролів.

Великий інтерес представляє ідея впровадження фітостеролів в олійно-жирові, передусім емульсійні, продукти, кондитерські вироби, йогурти, а також у м'ясні продукти.

Оскільки фітостероли є складниками людської дієти з давніх часів, цілком ймовірно, що за стільки років еволюції вони стали складовими частинами біохімічних процесів людського організму, про які нам ще належить дізнатися.

Список літератури:

1. Извлечение смеси фитостеролинов из отходов переработки соевых бобов и использование её в производстве 9 α -гидроксиандрост-4-ен-3, 17-диона. *Химико-фармацевтический журнал*. 2012. Вып. 46. № 3. С. 40–43.
2. Круглякова А., Раменская Г. Бета-ситостерин: свойства, подходы к количественному определению. *Вестник Национального медико-хирургического Центра им. НИ Пирогова*. 2016. Вып. 11. № 4.
3. Луцкий В.И., Д.В. Молокова. Фитостерины из отходов масложиркомбината. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2012. № 2(3).
4. Масла и жиры. Фитостерины из отходов переработки растительных масел – ценное сырье для производства стероидных лекарственных препаратов : веб-сайт. URL: <http://www.oilbranch.com/publ/view/424.html> (дата звернення: 26.08.2018).
5. Некрасова В.Б., Безбородова Т.Г. Получение и применение биокорректоров питания из биомассы дерева. *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2012. № 198. С. 190–201.
6. Северин Е.С. Биохимия : учебник для вузов / под ред. Е.С. Северина. Москва : Гэотар-Мед. 2003. Биохимия.
7. Физер Л., М. Физер. Стероиды. Рипол Классик, 2013. 982 с.
8. A softgel dietary supplement containing esterified plant sterols and stanols improves the blood lipid profile of adults with primary hypercholesterolemia: a randomized, double-blind, placebo-controlled replication study. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*. 2014. Vol. 114. № 2. P. 244–249.
9. Alimentarius C. Codex standard for named vegetable oils. *Codex Stan*. 1999. Vol. 210. P. 1–13.
10. Authority (EFSA) E.F.S. Consumption of Food and Beverages with Added Plant Sterols. *EFSA Journal*. 2008. Vol. 6. № 3. P. 133.

11. Bouic P.J. The role of phytosterols and phytosterolins in immune modulation: a review of the past 10 years. *Current Opinion in Clinical Nutrition & Metabolic Care*. 2001. Vol. 4. № 6. P. 471–475.
12. Consumption of plant sterols in Belgium: estimated intakes and sources of naturally occurring plant sterols and β -carotene. *British Journal of Nutrition*. 2011. Vol. 105. № 6. P. 960–966.
13. Food sources of plant sterols in the EPIC Norfolk population. *European journal of clinical nutrition*. 2008. Vol. 62. № 6. P. 695.
14. Intake of phytosterols from natural sources and risk of cardiovascular disease in the European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition-the Netherlands (EPIC-NL) population. *European journal of preventive cardiology*. 2015. Vol. 22. № 8. P. 1067–1075.
15. Kalliny S., Zawistowski J. Phytosterols and Phytostanols. 2015.
16. Lagarda M.J., G. García-Llatas, R. Farré. Analysis of phytosterols in foods. *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis*. 2006. Vol. 41. № 5. P. 1486–1496.
17. Lipid responses to plant-sterol-enriched reduced-fat spreads incorporated into a National Cholesterol Education Program Step I diet-. *The American journal of clinical nutrition*. 2001. Vol. 74. № 1. P. 33–43.
18. Naturally-occurring phytosterols in the usual diet influence cholesterol metabolism in healthy subjects. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*. 2012. Vol. 22. № 10. P. 849–855.
19. Pascal S.L., Segal R. Phytosterols—biological active compounds in food. *Journal of Agroalimentary Processes and Technologies*. 2006. Vol. 12. № 1. P. 149–158.
20. Phytosterol capsules and serum cholesterol in hypercholesterolemia: a randomized controlled trial. *Atherosclerosis*. 2013. Vol. 228. № 2. P. 421–425.
21. Phytosterols: Sterols & Stanols Phytosterols Diet | Cleveland Clinic. URL: <https://my.clevelandclinic.org/health/articles/17368-phytosterols-sterols--stanols/phytosterols-diet> (дата звернення: 13.11.2018).
22. Phytosterols supplementation decreases plasma small and dense LDL levels in metabolic syndrome patients on a westernized type diet. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*. 2012. Vol. 22. № 10. P. 843–848.
23. Plant sterol and stanol intake in Finland: a comparison between users and nonusers of plant sterol-and plant stanol-enriched foods. *European journal of clinical nutrition*. 2014. Vol. 68. № 5. P. 587.
24. Pollak O.J. Reduction of blood cholesterol in man. *Circulation*. 1953. Vol. 7. № 5. P. 702–706.
25. Antioxidant effects of the combination of conjugated linoleic acid and phytosterol supplementation in Sprague–Dawley rats. *Food Research International*. 2012. Vol. 49. № 1. P. 487–493.
26. Awad A.B., Fink C.S. Phytosterols as Anticancer Dietary Components: Evidence and Mechanism of Action. *The Journal of Nutrition*. 2000. Vol. 130. № 9. P. 2127–2130.
27. Bhattacharyya A.K., Connor W.E., Lin D.S. The Origin of Plant Sterols in the Skin Surface Lipids in Humans: From Diet to Plasma to Skin. *Journal of Investigative Dermatology*. 1983. Vol. 80. № 4. P. 294–296.
28. Bligh E.G., Dyer W.J. A rapid method of total lipid extraction and purification. *Canadian Journal of Biochemistry and Physiology*. 1959. Vol. 8. № 37. P. 7.
29. Hallikainen M.A., Sarkkinen E.S., Uusitupa M.I.J. Plant Stanol Esters Affect Serum Cholesterol Concentrations of Hypercholesterolemic Men and Women in a Dose-dependent Manner. *The Journal of Nutrition*. 2000. Vol. 130. № 4. P. 767–776.
30. Moreau R.A., Whitaker B.D., Hicks K.B. Phytosterols, phytostanols, and their conjugates in foods: structural diversity, quantitative analysis, and health-promoting uses. *Progress in Lipid Research*. 2002. Vol. 41. № 6. P. 457–500.
31. Neuroprotective effects of phytosterol esters against high cholesterol-induced cognitive deficits in aged rat. *Food & Function*. 2017. Vol. 8. № 3. P. 1323–1332.
32. Othman R.A., Moghadasian M.H. Beyond cholesterol-lowering effects of plant sterols: clinical and experimental evidence of anti-inflammatory properties. *Nutrition Reviews*. 2011. Vol. 69. № 7. P. 371–382.
33. Povey K. Developing food products, which help consumers to lower their cholesterol level. *Developing Food Products for Consumers with Specific Dietary Needs*. Elsevier, 2016. P. 173–199. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081003299000098>. (дата звернення: 11.09.2018).

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФИТОСТЕРОЛОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПРОДУКТОВ ДЛЯ ЗДОРОВОГО ПИТАНИЯ

В статье рассмотрены фитостеролы как ингредиенты для продуктов с дополнительными терапевтическими свойствами. Представлены основные сведения о природе стеролов, об источниках и технологии добычи фитостеролов. Проанализирована история открытия и применения фитостеролов. Польза использования растительных стеролов рассмотрена в разрезе результатов клинических исследований. Описаны современные методики анализа стеролов и особенности внесения их в пищевые продукты. Значительное внимание уделено последним исследованиям свойств фитостеролов в профилактике сердечно-сосудистых и раковых заболеваний.

Ключевые слова: фитостеролы, продукты для здорового питания, биосинтез, методы анализа, холестерол, гиперхолестеролемиа.

**PERSPECTIVES FOR USE OF PHYTOSTEROLS IN MANUFACTURING
OF FOOD PRODUCTS FOR HEALTHY NUTRITION**

Phytosterols are considered as ingredients for products with additional therapeutic properties in this article. The text provides basic information about the nature of sterols, the sources and technologies of phytosterol production. The history of the discovery and application of phytosterols is analyzed. The benefit of using plant sterols is considered in the context of the results of clinical studies. The modern methods of analysis of sterols and their introduction into food products are described. Considerable attention is paid to the latest research on the properties of phytosterols in the prevention of cardiovascular and cancerous diseases.

Key words: *phytosterols, products for healthy eating, biosynthesis, analytical methods, cholesterol, hypercholesterolemia.*

UDC 641.13:544.773.43

Kondratjuk N.V.

Oles Honchar Dnipro National University

Pyvovarov Ye.P.

Kharkiv State University of Food Technology and Trade

Stepanova T.M.

Sumy National Agrarian University

Chernushenko O.O.

Oles Honchar Dnipro National University

THEORETICAL REASONING OF THE HYDROGELS DEVELOPMENT BASED ON URONATE POLYSACCHARIDES

The article reveals the role of modern scientific basis of hydrogel formation. The main mechanisms for the hydrogels formation with the participation of uronate polysaccharides on the example of the system "sodium alginate: pectin: xanthan" were analyzed. Conditions and factors for the hydrogels formation on the basis of composite systems consisting of uronate polysaccharides were considered. Modern strategies for the creation of innovative food and pharmaceutical products based on hydrogels from uronate polysaccharides were reflected..

Key words: *uronate polysaccharides, hydrogels, pectin, sodium alginate, xanthan, innovative food.*

Formulation of the problem. Uronate polysaccharides are biopolymers consisting of uronic acid, such as guluronic, mannuronic, glucuronic, galacturonic acids. Brown algae are a raw materials for the harvesting of uronate polysaccharides. Alginates are produced from these algae. Pectins are isolated from the polysaccharide base of plants. Xanthan is a microbial polysaccharide, as well as a source of glucuronic acid. Poorly nutritious parts of cattle, birds, as well as soy products and winemaking products can quickly and effectively saturate the body with hyaluronic acid.

It can be noted, resource base of uronate polysaccharides is available and diverse. This resource base is formed as a result of the animals and birds reproduction, metabolism of microorganisms and the cultivation of plants and algae. Uronate polysaccharides are used in various technologies as gel formation agents, stabilizers, thickeners, because they can bind a lot of water and form polymer hydrogels [1].

Examples of the such gels use as components of controlled-release systems of medicinal and biologically active substances were described in the literature. These gels also were used as matrix for cellular engineering, materials for implants and filling materials in surgery and dentistry, for immobilization and transportation of substances with high reactivity or those that are destroyed in an aggressive environment

of the stomach with the need for their delivery as a whole in the intestine [2–7].

Polymer hydrogels, based on uronate polysaccharides are obtained by the reaction of high molecular weight polymers hydration. The resulting hydrogels are capable of cross-linking in the presence of ionic polymerization initiators, for example, calcium ions.

The absence of toxic low molecular weight substances (monomers or cross-linking agents) in the reaction system is an advantage of this approach. At the same time, the reaction proceeds under standard conditions. This greatly simplifies and reduces the cost of technology for the production of hydrogel systems based on the uronate polysaccharides and also significantly increases the possibility of their use [8-10]. Amino acids, fatty acids, vitamins, biologically active substances and even short-chain peptides, for example, glutathione, serotonin can also be cross-linking agents.

Therefore, the development of methods and approaches that allow receiving hydrogels from uronate polysaccharides on the basis of biocompatible polymers with biologically active substances in such a scheme is very important for many branches of science and technology related to human life and health.

Analysis of recent research and publications.

Hydrogels based on uronate polysaccharides (HUP) are dispersed binary systems, consisting of a

three-dimensional grid and formed by cross-linked hydrophilic polymers, in which a large number of water molecules are distributed as a dispersion medium. Significant water absorption allows HUP to be sensitive to changes in external conditions. At the same time, particles of the dispersed phase, connected together in a spatial grid, deprive the system of fluidity. Therefore, HUP exhibit mechanical properties that are similar to those of solids [3; 11; 12].

HUP properties depend on the strength and degree of the cross-links. The chemical and molecular composition of a macromolecule segment between two nodes determines the density of cross-linking, that affects the fundamental properties of hydrogels, as degree of swelling, mechanical strength and elasticity, permeability (size of mesh openings), diffusion characteristics, etc. [13].

Swelling degree of HUP depend on the chemical and spatial structures of uronate polysaccharides macromolecules, the number of hydrophilic groups, presence of ionogenic groups, cross-linking degree and external conditions (temperature, pH, ionic strength of the solution) and inversely proportional to the density of cross-links [14].

The chemical structure of the HUP determines the dynamics, and ionic strength of the solvent determines the kinetics of their swelling. Thus, HUP contains a significant number of hydrophilic groups swell faster and more in comparison with such HUP containing hydrophobic groups [2]. In connection with the above information, it was predicted, that in the case of the combination of uronate polysaccharides in a single solution it is possible to achieve the maximum swelling for a small number of dry matters. This is an important aspect for studying the processes of biologically active substances immobilization, which involve electrostatic attraction/repulsion forces, or the formation of “cross-copolymerization compounds” due to processes of ionotropic gel formation, for which the viscosity is the basis of the formation the stable elastic-plastic structures.

At present, the relationship between “composition – structure – mechanical properties” is not sufficiently studied for HUP. The absence of these results impedes their application in various fields of science and technology. For this reason, the question of studying the theoretical aspects of the HUP formation is relevant.

Formulating the goals of the article.

The main purpose of the article is to analyze the processes, which are associated with the formation of hydrogels on the basis of uronate polysaccharides for further application in various fields of science

and technology, primarily related to human life and health.

Setting objectives. The ability of the HUP to absorb and retain a large number of water molecules is determined by mutual repulsions of the co-charged particles of polymer chains and the osmotic pressure due to the presence of moving counterions in the mesh gel. As a result of water penetration into the structure of the gel and the deployment of uronate polysaccharides chains, the hydrogel becomes capable of significantly increasing in volume and containing a solvent in an amount hundred of times higher than its own volume. In the formed matrix it is possible to add compounds, that have high biological activity, but unstable to the conditions of the external environment; substances regulating or providing a taste and aroma, bio objects that must pass the stomach intact, etc. Such compounds in the matrices of HUP are kept by the formation of Van der Waals bonds and released under the conditions of an “acid collapse” when the pH is transferred to an alkaline medium but higher than 7.5. The study of these processes has become the main task of the article.

Presenting of main material. It is possible to estimate the probability of formation of hydrogen bonds during the formation of HUP, taking into account the chemical structure of the main constituents of the uronate polysaccharides - uronic acids (Fig. 1). This is evidenced by the presence of strong hydrophilic groups, such as carboxyl groups of uronic acids (-COOH), hydroxyl groups (-OH), amidic (-CONH₂) and with a weakened hydrophilicity: aldehyde (-CHO), ketone (-CH₂OH), carbonyls (-CO), simple etheric (-COCH₃).

Taking into account that uronic acids with the help of glycoside bond form polysaccharide chains, we have previously studied the structures of sodium alginate and pectin dimers as the most common in food systems [16; 17]. Dimers were chosen because they are the smallest compounds with properties of macromolecules. The nature of interactions was also studied in the case of combining them [18].

Thus, the presence of a large number of hydrophilic groups indicates that the swelling of the relatively seldom carved frame of the uronate polysaccharides remains unchanged at the number of nodes for the formation of cross-links. However, the distance between them can be greatly increased by swelling of each individual link located between the cross-link units.

Taking into account that HUP have the ability to form cross-copolymers of another type, that formed by the ionotropic gelation process involving calcium

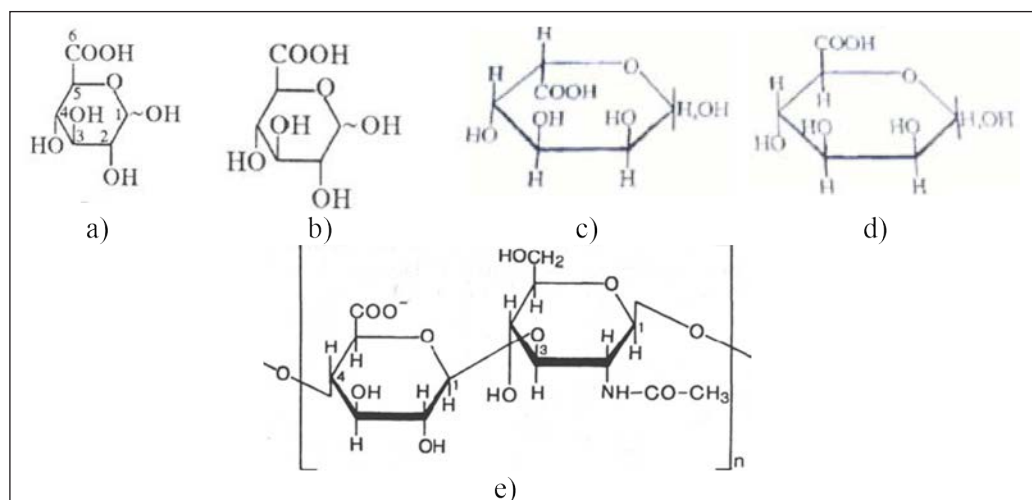


Fig. 1. The main uronic acids of the uronate polysaccharides:
 a) glucuronic; b) galacturonic; c) guluronic; d) mannuronic; e) gialuronic

ions or other ions of biometals, it becomes apparent that the effect of excess water absorption can not be inherent in such structures. It should be noted that due to the interchange of ions, the size of macromolecules decreases significantly, because water molecules lose contact and diffuse to the boundary layers of hydrogel. The formation of a structured gel occurs in this case [19; 20].

Swollen structured hydrogels with external influence exhibit elastic properties, as stretching or compression. The high cross-linking density leads to higher mechanical strength, but at the same time to reduce elasticity and swelling. Significant increase in the number of cross-links, so-called “gel-points” in hydrogels on the basis of uronate polysaccharides, initiates the formation of fragile gels. As a result, the optimal cross-linking density ensures a balance between elasticity and desired durability [21]. In the case of structured HUP, the optimal number of cross-links is based on the molar ratio of four carboxylic groups to one calcium ion. However, the spatial ori-

entation of the anionic residues should be convenient for the formation of chelating compounds with calcium.

It was established the nature of the pores formation and predicted their number on the basis of the created quantum-chemical models [16–18]. The porosity of structured and unstructured hydrogels or the size of cells is the structural property of these systems, which is determined by the distance between neighboring cross-links. Porosity is a consequence of cross-linking density, composition and concentration of uronic acid monomers. It was established, that in a stable grid the size of the cells increases with increasing of swelling.

Conclusions. Consequently, the necessary condition for the production of hydrogels on the basis of uronate polysaccharides is the presence of functional groups in the polymer that not only can react with bifunctional reagents such as water, which plays the role of solvent and cross-linking agent, but also capable to ionization, i.e. carboxyl groups uronic acids.

References:

1. Kondratjuk, N.V. & Pyvovarov, Ye.P. Rheological properties of food film-forming gels on the basis of uroconate polysaccharides. *Bulletin of NTU “KhPI”: Innovative research in students’ scientific work*. 2017. № 41. P. 47–51.
2. Pavlyuchenko V.N. & Ivanchev S.S. Composite Polymer Hydrogels. *Polymer Science*. 2009. № 7. P. 743–760.
3. Mahinroosta M. & Farsangi, Z. J. Hydrogels as intelligent materials: A brief review of synthesis, properties and applications. *Materials Today Chemistry*. 2018. № 8. P. 42–55.
4. Ahmed E. M. Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. *Journal of Advanced Research*. 2015. № 6. P. 105–121.
5. Kokkarachedu V. & Tippabattini J. A mini review on hydrogels classification and recent developments in miscellaneous applications. *Materials Science and Engineering*. 2017. № 79. P. 958–971.
6. Caló E. & Khutoryanskiy V.V. Biomedical applications of hydrogels: A review of patents and commercial products. *European Polymer Journal*. 2015. № 65. P. 252–267.

7. Кондратюк, Н.В., Пивоваров, Є.П. Роль альгінат-кальцієвого гелю як захисного компонента штаму *Bifidobacterium Lactis* BB 12 від агресивних чинників травного тракту. *Мікробіологічний журнал*. 2014. № 2. С. 35–40.

8. Кондратюк Н.В. Гелі харчові плівкоутворюючі на основі уронатних полісахаридів у виробництві сумішей для ін'єктування м'ясопродуктів. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2018. № 5. С. 20–25.

9. Кондратюк Н.В. Використання гелів харчових плівкоутворюючих на основі суміші уронатних полісахаридів у виробництві оболонки для рибних закусок. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2018. № 1. С. 48–52.

10. Кондратюк Н.В. Оптимізація базової рецептури желе плодово-ягідного на основі уронатного полісахариду та сухих концентратів соків. *Вісник Національного технічного університету ХПІ. Сер. : Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів*. 2018. № 18. С. 45–52.

11. Kondratjuk N.V. Rheological properties of food film-forming gels on the basis of uronate polysaccharides. *Збірник наукових праць ХДУХТ*. 2017. № 2. С. 86–93.

12. Ullah F. Classification, processing and application of hydrogels. *Materials Science and Engineering*. 2015. № 57. P. 414–433.

13. Кондратюк Н.В., Пивоваров Є.П. Харчові уронатні гідрогелі як основа стратегії здорового харчування у закладах ресторанного господарства. *Актуальні проблеми розвитку ресторанного, готельного та туристичного бізнесу в умовах світової інтеграції: дослідження та перспективи : матеріали міжнар. наук.-практ. конф.* 2017. № 1. С. 88.

14. Базарнова Ю.Г., Шкотова Т.В. Применение натуральных гидроколлоидов для стабилизации пищевых продуктов. *Пищевые ингредиенты: сырье и добавки*. 2005. № 2. С. 84–87.

15. Nishinari K. Hydrocolloid gels of polysaccharides and proteins. *Curr Opin Colloid Interface Sci*. 2000. № 5. P. 195–201.

16. Оковитий С.І., Пивоваров Є.П., Кондратюк, Н.В. Дослідження харчових систем на основі пектину. Квантово-хімічне моделювання димерів галактуронової кислоти. *Вісн. НТУ «ХПІ». Сер. Нові сучасні технології і матеріали*. 2017. № 17. С. 194–198.

17. Кондратюк Н.В. Квантово-химическое моделирование димера гулуруновой кислоты. *Вісник Дніпропетровського університету. Серія Хімія*. 2010. № 16. С. 200–204.

18. Kondratjuk, N.V. & Okovyty, S.I. Quantum-chemical modeling of urinate polysaccharides dimers in the strategy of creating food biodegraded coatings. *Вісн. НТУ «ХПІ». Сер. Нові сучасні технології і матеріали*. 2017. № 1. С. 58–63.

19. Nakauma M. & Funami T. Calcium binding and calcium-induced gelation of normal low-methoxyl pectin modified by low molecular-weight polyuronate fraction. *Food Hydrocolloids*. 2017. № 69. P. 318–328.

20. Kondratjuk N.V. & Pyvovarov Ye.P. Investigation of the films based on the uronate polysaccharides by the method of differential scanning calorimetry. *Food Science and Technology*. 2018. № 12. P. 34–39.

21. Parka H. & Lee K. Alginate hydrogels modified with low molecular weight hyaluronate for cartilage regeneration. *Carbohydrate Polymers*. 2017. № 162. P. 100–107.

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЦЕСУ УТВОРЕННЯ ГИДРОГЕЛІВ НА ОСНОВІ УРОНАТНИХ ПОЛІСАХАРИДІВ

У статті розкривається роль сучасних наукових бачень процесу освіти гідрогелю. Проаналізовано основні механізми формування гідрогелів за участю уронатних полісахаридів на прикладі системи «альгінат натрію: пектин: ксантан». Розглянуто умови та фактори освіти гідрогелю на основі композиційних систем, що складаються з уронатних полісахаридів. Відображено сучасні риси стратегії створення інноваційних харчових і фармацевтичних продуктів на основі гідрогелів з уронатними полісахаридами.

Ключові слова: уронатні полісахариди, гідрогелі, пектин, альгінат, ксантан, інноваційні харчові продукти.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ГИДРОГЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ УРОНАТНЫХ ПОЛИСАХАРИДОВ

В статье раскрывается роль современных научных видений процесса образования гидрогелей. Проанализированы основные механизмы формирования гидрогелей с участием уронатных полисахаридов на примере системы «альгинат натрия: пектин: ксантан». Рассмотрены условия и факторы образования гидрогелей на основе композиционных систем, состоящих из уронатных полисахаридов. Отражены современные черты стратегии создания инновационных пищевых и фармацевтических продуктов на основе гидрогелей с уронатными полисахаридами.

Ключевые слова: уронатные полисахариды, гидрогели, пектин, альгинат, ксантан, инновационные пищевые продукты.

Луговська О.А.

Національний університет харчових технологій

ДОСЛІДЖЕННЯ СТУПЕНЮ ГІДРОЛІЗУ ІНУЛІНУ ТА ОЛІГОФРУКТОЗИ В НАПОЯХ

Досліджено ступінь гідролізу інуліну і олігофруктози при різних значеннях температури і рН. Встановлено вміст продуктів гідролізу протягом терміну зберігання харчових продуктів. Важливим показником якості напоїв є стійкість. Вона залежить від специфічних властивостей їх складових частин – олігофруктози та інуліну. Розроблена науково обґрунтована технологія напоїв на основі вказаної сировини.

Ключові слова: олігофруктоза, інулін, температура, напій, зберігання, гідроліз, величина рН.

Постановка проблеми. Основою успішного функціонування безалкогольної промисловості є постійне розширення сировинної бази та вдосконалення технології використання всіх її компонентів. Високий рівень асортиментних особливостей щодо досягнення цільового призначення цієї масової продукції є необхідною умовою високоякісного забезпечення людської життєдіяльності. Використання спеціальних складових частин безалкогольних напоїв (инуліна та олігофруктози) забезпечить притаманні їм сортові харчосмакові та біологічноактивні особливості.

Пропозиція таких безалкогольних напоїв практично відсутня на ринку або представлена у вигляді напоїв, які мають короткий термін зберігання і високу вартість.

Це зумовлює необхідність проведення наукових та прикладних досліджень, спрямованих на використання та реалізацію функціонально-технологічних властивостей складових частин рецептурних компонентів – інуліну та олігофруктози [1; 2].

На даний час технологія виготовлення дієтичних напоїв є недосконалою, що в кінцевому результаті відображається на якості напоїв, особливо у процесі їх зберігання. Одним із основних показників напоїв є її стійкість, яка залежить від специфічних властивостей її складових частин – олігофруктози та інуліну [1; 8].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Із наукової та виробничої практики відомо, що деякі харчові добавки, які використовуються у виробництві харчових продуктів, можуть змінювати свої функціональні властивості в процесі зберігання харчових продуктів [1; 5; 7].

Такі добавки, як інулін і олігофруктоза, є високоякісними складовими частинами для виробництва дієтичних продуктів харчування.

Інулін і олігофруктоза використовуються для створення функціональних продуктів харчування

з різними властивостями в якості інгредієнтів, що поліпшують смак і текстуру, що дозволяють зробити заміну цукру і жиру [3].

Основними технологічними властивостями інуліну є здатність замінювати жир у харчових продуктах із водною фазою; покращувати смакові властивості продуктів зниженої жирності, наближаючи їх до властивостей продуктів нормальної жирності; виконувати функцію текстуруючого агента, стабілізатора і загущувача.

Олігофруктоза є складовою частиною природного інуліну і добувається шляхом часткового гідролізу інуліну. Відомо, що розчинність олігофруктози вища за розчинність сахарози, що робить її найбільш розчинним харчовим волокном. Олігофруктоза не кристалізується, не випадає в осад, не руйнується у високотемпературних процесах. Помірна відновна здатність олігофруктози може призводити до утворення слабкого коричневого забарвлення за рахунок реакції меланоїдиноутворення [4].

Олігофруктоза має нейтральний слабо-солодкий смак, без стороннього присмаку і післясмаку. Її профіль солодкості дуже близький до профілю солодкості сахарози (рис. 1). Тому основною технологічною властивістю олігофруктози є здатність замінювати цукор, що дозволяє отримати продукти зі зниженою калорійністю [5].

Оскільки олігофруктоза має низький коефіцієнт солодкості, її використовують у комбінаціях з інтенсивними підсолоджувачами або фруктозою. При цьому вона маскує неприємний післясмак інтенсивних підсолоджувачів і різку солодкість фруктози, покращує смакові відчуття і надає харчовим продуктам м'який, однорідний смак.

Відмітною властивістю олігофруктози є її здатність проявляти синергізм з інтенсивними підсолоджувачами, що дозволяє зменшувати дозування цих підсолоджувачів. Такий ефект, а також здатність

посилювати фруктовий смак широко використовуються у виробництві безалкогольних напоїв [6; 7].

Постановка завдання. З урахуванням дослідженої інформації необхідно є розроблення науково обґрунтованої технології напоїв на основі вказаної сировини.

Виклад основного матеріалу. У представленій роботі наведено основні положення наукових досліджень, спрямованих на встановлення закономірностей технології виробництва напоїв із використанням олігофруктози та інуліну [2; 10].

Експериментальна частина. Дослідження стабільності інуліну і олігофруктози в напоях проводили лабораторними методами: варіювали кислотність напою, змінювали величину рН, використовували метод нагрівання, а терміни зберігання перевіряли шляхом постановки напою на стійкість. Для проведення вимірювань використовували лабораторне обладнання: рН метр (Марк 901, Україна), Цукрометр (PAL 25s, фірма Atago, Японія), термометр (лабораторний ртутний термометр, похибка вимірювання (° С): $\pm 0,1$, виробник Україна.)

Об'єкт досліджень – напої з вмістом сухих речовин 10,0% та загальним компонентним складом:

1 рецептура – 80% фруктовий нектар; 20% олігофруктози;

2 рецептура – 60% фруктовий нектар; 40% олігофруктози;

3 рецептура – 80% фруктовий нектар; 20% інуліну.

Методи дослідження: фізико-хімічні, мікробіологічні, органолептичні, методи планування експерименту.

У напоях змінювали значення рівня рН середовища, температуру і час витримки.

Результати досліджень. Вивчено вплив рівня рН і температури на ступінь гідролізу олігофруктози. Зразки безалкогольних напоїв готували з вмістом олігофруктози 20% і 40%. Результати досліджень представлені в таблиці 1 і 2.

Із результатів досліджень, представлених у таблиці 1, слідує, що при значенні рН $\geq 4,0$ гідроліз відбувається незначно при всіх значеннях температури. Під час зниження рівня рН температура стає більш важливим параметром. Так, при рН = 3,5 і температурі 95°C протягом 5 хв ступінь гідролізу зростає до 16%.

Подібна тенденція спостерігається в напоях із вмістом олігофруктози 40%. Результати досліджень представлені в таблиці 2.

Таблиця 1

Залежність впливу рівня рН і температури на ступінь гідролізу олігофруктози (вміст у напої – 20%)

Температура обробки, °С	Час обробки, хв	Ступінь гідролізу олігофруктози при різних значеннях рН, %		
		рН 6,0	рН 4,0	рН 3,5
85,0	2,0	0	< 1,0	5,0
85,0	5,0	0	< 1,0	6,0
90,0	5,0	0	< 1,0	10,0
95,0	2,0	0	1,0	10,0
95,0	5,0	0	1,0	16,0

Таблиця 2

Залежність впливу рН і температури на ступінь гідролізу олігофруктози (Вміст у напої – 40%)

Температура обробки, °С	Час обробки, хв	Ступінь гідролізу олігофруктози при різних значеннях рН, %		
		рН 6,0	рН 4,0	рН 3,5
85,0	2,0	0	< 1,0	4,0
85,0	5,0	0	< 2,0	5,0
90,0	5,0	0	< 2,0	9,0
95,0	2,0	0	< 2,0	10,0
95,0	5,0	0	< 2,0	15,0



Рис. 1. Профіль інтенсивності солодкості сахарози, олігофруктози і підсолоджувачів: 1 – ацесульфам-К; 2 – сахароза; 3 – аспартам; 4 – олігофруктоза

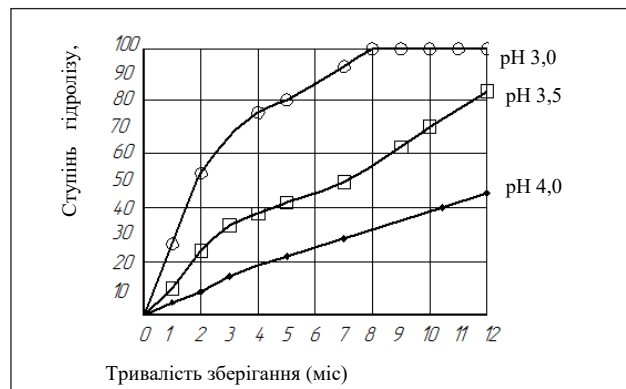


Рис. 2. Гідроліз олігофруктози під час зберігання протягом 12 місяців при температурі 20°C і різних значеннях рН

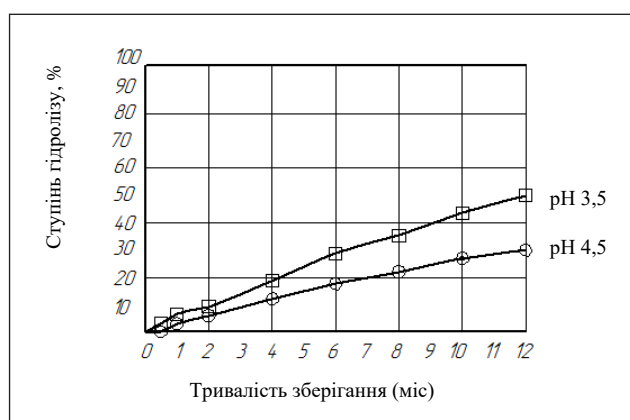


Рис. 3. Гідроліз інуліну під час зберігання протягом 12 місяців при температурі 20°C і різних значеннях рН

У наступних експериментах досліджувався вплив рН та температури на ступінь гідролізу інуліну. Готували напої із вмістом інуліну 20%. Результати досліджень представлені в таблиці 3.

Результати досліджень, наведені в таблиці 3, демонструють вплив рН і температури на ступінь гідролізу інуліну. Якщо $\text{pH} \geq 4,0$, ступінь гідролізу при всіх значеннях температури незначна. При більш низькому рівні рН температура стає

важливим параметром. Так, при температурі 70°C протягом 60 хв. ступінь гідролізу інуліну складає 13%, при температурі 90 °С – 17%.

У наступних експериментах вивчали стабільність інуліну і олігофруктози під час зберігання напоїв. Для цієї мети були використані напої із вмістом сухих речовин 10% і різними дозуванням олігофруктози й інуліну. Результати досліджень представлені на рис. 2 і 3.

На рис. 2 показано, що ступінь гідролізу олігофруктози може бути досить високою в напоях з рН 4,0 і терміном зберігання до 6 місяців. У зв'язку із цим повинно проводитися 20% передозування олігофруктози для компенсації її втрат у результаті кислотного гідролізу.

На рис. 3 показана зміна ступеня гідролізу інуліну в процесі зберігання безалкогольних напоїв протягом 12 міс при температурі 20 °С.

Висновки. Результати дослідження властивостей показують, що в кислому середовищі і при високій температурі інулін і олігофруктоза можуть піддаватися гідролізу з утворенням більш коротких ланцюгів фруктози, що призводить до часткової або повної втрати їх дієтичних властивостей, а в деяких випадках – до підвищення солодкості готового продукту.

Таблиця 3

Залежність впливу рН і температури на ступінь гідролізу інуліну (Вміст у напої – 20%)

Температура, °С	Час обробки, хв	Ступінь гідролізу олігофруктози при різних значеннях рН, %			
		рН 6,5	рН 4,0	рН 3,5	рН 3,0
70,0	5,0	0	< 1,0	< 1,5	1,0
70,0	15,0	0	< 1,0	< 1,5	5,0
70,0	30,0	0	< 1,0	< 2,0	7,0
70,0	60,0	0	< 2,0	< 2,5	13,0
90,0	5,0	0	< 2,0	< 3,0	17,0

Із результатів проведених досліджень бачимо, що інулін є більш функціональним інгредієнтом в якості, наприклад, волокна, для кислих напоїв із тривалим терміном зберігання. Так, при рН 4,0 гідроліз після 6 місяців зберігання не перевищує 15%, що може бути легко компенсовано 15% передозуванням інуліну. Це дозволяє гарантувати споживачам заявлений вміст харчових волокон протягом усього терміну придатності. Продукти гідролізу не викликають змін смаку внаслідок низької концентрації інуліну, не більше 2% від рекомендованої.

На підставі проведених досліджень встановлено, що ступінь гідролізу олігофруктози при різних значеннях температури і рН змінюється з різною інтенсивністю.

Так, при значенні рН, рівному або вище 4,0, і температурі 85-90°C гідроліз олігофруктози відбувається незначно. У тому випадку, коли рівень рН знижується, а температура підвищується, процес гідролізу різко збільшується. Так, при рН 3,5 і температурі 95°C ступінь гідролізу олігофруктози в продукті збільшується в три рази.

Під час дослідження ступеня гідролізу інуліну при температурі 70-90°C у кислому середовищі встановлено, що при рН 4,0 і вище процес гідролізу відбувається незначно. Однак при зниженні рівня рН і підвищенні температури до 95°C гідроліз інуліну збільшувався приблизно в два рази.

Крім того, відзначалося незначне підвищення солодкості готового продукту без погіршення його споживних властивостей.

Незважаючи на те, що харчові продукти завжди виконували функцію забезпечення людини харчуванням, в оборот введено поняття «функціональні харчові продукти», які завдяки наявності визначених добавок позитивно (корисно) впливають на здоров'я людини та здатні заповнити в харчуванні дефіцит відповідних речовин. Дані продукти будуть дорожчі за вартістю на 20-40% від вихідних досліджуваних напоїв у залежності від рецептурних співвідношень складових частин та ступеня заміни відповідної складової частини на олігофруктозу чи інулін. З урахуванням цього розроблення безалкогольних напоїв на основі функціональної сировини суттєво підвищить ефективність функціонування підприємств галузі, а їх реалізація дозволить розширити існуючий асортимент напоїв безалкогольної промисловості.

Науково обґрунтовано і доведено доцільність використання визначеної сировини як джерел функціональних компонентів у харчових технологіях. Встановлено закономірності впливу температурної обробки сировини та зміни рН середовища харчового продукту на функціонально-технологічний стан харчової добавки.

Список літератури:

1. Дубров К.І. Інулін і олігофруктоза – пребіотики з давніх часів і до наших днів. *Харчова промисловість*. 2007. № 4. С. 37.
2. Перковец М.В. Вплив інуліну і олігофруктози на зниження ризику деяких «хвороб цивілізації». *Харчова промисловість*. № 5. 2007.
3. Матвеева Т. Застосування інуліну і олігофруктози Beneo тм для зниження енергетичної цінності кексів і пісочних виробів. *Хлебопродукты*. 2008. № 5. С. 52.
4. PD Cani, E Joly, Y Horsmans and NM Delzenne. Oligofructose promotes satiety in healthy human: a pilot study. *European Journal of Clinical Nutrition*. 2006. № 60. P. 567–572.
5. Балашов В.Е., Балантер И.И., Бельский С.М. и др. Справочник по производству безалкогольных напитков. Москва : Пищ. пром-сть, 1979. 367 с.
6. Колотуша П.В. Технологическое проектирование солодовенных и безалкогольных заводов : учебное пособие для студентов вузов.
7. Домарецкий Н.А., Калунянц К.А., Яровенко В.Л., Колчева Р.А. и др. Технология солода, пива и безалкогольных напитков. Киев : Вища шк., 1987. 256 с.
8. Сирохман І.В., Завгородня В.М. Товарознавство харчових продуктів функціонального призначення : навч. посіб. Київ : ЦУЛ, 2009. 544 с.
9. Смоляр В.І. Харчова експертиза : навч. посіб. Київ : Здоров'я, 2005. 448 с.
10. Ковальская Л.П., Шуб И.С., Мелькина Г.М. и др. Технология пищевых производств : учебник. Москва : Колос, 1997. 752 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕПЕНИ ГИДРОЛИЗА ИНУЛИНА И ОЛИГОФРУКТОЗЫ В НАПИТКАХ

Исследована степень гидролиза инулина и олигофруктозы при различных значениях температуры и рН. Определено содержание продуктов гидролиза в течение срока хранения пищевых продуктов. Важным показателем качества напитков является устойчивость. Она зависит от специфических свойств ее составляющих – олигофруктозы и инулина. Разработана научно обоснованная технология напитков на основе данного сырья.

Ключевые слова: олигофруктоза, инулин, температура, напиток, хранение, гидролиз, величина рН.

INVESTIGATION OF STABILITY OF INULIN AND OLIGOFRUCTOSE IN DRINKS

The degree of hydrolysis of inulin and oligofructose was studied at various temperatures and pH. Identified the content of hydrolysis products during the shelf life of food products. An important indicator of the quality of beverages is stability. It depends on the specific properties of its components – oligofructose and inulin. The scientifically grounded technology of drinks based on the specified raw material is developed.

Key words: *oligofructose, inulin, temperature, beverage, storage, hydrolysis, pH value.*

УДК 633.522:664.3.032

Петраченко Д.О.

Інститут луб'яних культур Національної академії аграрних наук України

Коропченко С.П.

Інститут луб'яних культур Національної академії аграрних наук України

ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ МЕХАНІЗМУ ДЛЯ ОБРУШУВАННЯ НАСІННЯ ПРОМИСЛОВИХ КОНОПЕЛЬ

У статті охарактеризовано один із перспективних напрямів переробки насіння ненаркотичних конопель – отримання обрушеного насінневого ядра. В результаті вивчення різних за принципом дії конструкцій механізмів для обрушування визначено особливості, переваги, недоліки методів багатократного та однократного удару. Досліджено вплив форми робочого органу (колеса або диска) обрушуючого механізму на здатність руйнувати оболонку насінини. Визначено, що більш ефективним для обрушування насіння конопель є метод орієнтовного однократного удару, який реалізовано у конструкції відцентрового обрушувача. Встановлено, що робоче колесо закритого секторального типу має перспективу подальшого використання та потребує проведення глибоких досліджень.

Ключові слова: коноплі, насіння, ядро, обрушування, механізм, робоче колесо.

Постановка проблеми. Завдяки специфічним біологічним особливостям рослини конопель та унікальним споживчим властивостям конопляної продукції, коноплі були важливим складником добробуту населення впродовж багатьох століть. Тривалі кризові явища кінця ХХ-го сторіччя та їх негативні наслідки поступово і впевнено призвели до занепаду галузі коноплярства та витіснення коноплепродукції з повсякденного побуту населення [1, с. 5–7; 2, с. 6–7].

Ситуація сьогодення свідчить, що коноплі стають цікавими все більшому загалу населення, з'являються не традиційні для культури сфери застосування. Цікавим стає насіння конопель, яке привертає увагу як вчених-дослідників, так і прихильників натуральних харчових продуктів та здорового способу життя. Науковцями проведені дослідження, результати яких дозволяють віднести насіння конопель до «суперфудів» – продуктів з підвищеним вмістом корисних для людини речовин [3, с. 16–19; 4, с. 248–253].

Тенденція коноплярства України останніх років свідчить, що галузь має всі перспективи для поступового відродження. Виведені нові сорти з нульовим наркотичним ефектом, що робить вирощування конопель суспільно безпечним. Розроблені адаптовані до сучасних умов технології вирощування, збирання та переробки, що не потребують використання спеціальної техніки, збільшуються посівні площі під культуру [5]. Спостерігаються позитивні зрушення і на законодавчому полі [6]: відміна охорони, зняття тери-

торіальних обмежень посівів сприяє появі нових, раніше не задіяних в коноплярстві суб'єктів господарювання. Все це прогнозовано призводить до насичення ринку країни конопляною сировиною в достатній кількості. На фоні цього відкривається можливість впровадження однієї з перспективних технологій переробки насіння конопель – обрушеного насіння. На жаль, сьогодні в країні відсутні як технології, так і обладнання для обрушування насіння, а закордонні зразки окрім високої ціни, мають ряд вимог в обслуговуванні, потребують відповідного сервісу. Тому розробка адаптованого українського зразка механізму для обрушування насіння промислових конопель є важливим і зумовлює актуальність цього напряму наукових досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Обрушування насіння є основною технологічною операцією з розділення насінневого ядра та оболонки. Залежно від механічних властивостей, будови та форми насінини обирають метод обрушування: розчавлювання, розколювання, різання, удар, стискання, тертя. Значний вплив на ефективність обрушування чинить також задіяне під час цього обладнання. Для обрушування насіння соняшнику, яке серед олійних культур найбільш схоже за будовою з насінням конопель, в масложировій промисловості використовують бильні та відцентрові обрушуючі машини [7, с. 38].

В бильних машинах [7, с. 42] втілено метод багатократного удару, що досягається шляхом неодноразового контакту насіння з поверхнею бил та

відбивної деки. В даних машинах оброблювана сировина рухається по неконтрольованій траєкторії, характер руху частинок хаотичний, що призводить до повторних ударів не тільки насіння, а вже і обрушеного ядра. Істотний вплив в даному випадку на якість та ефективність роботи має співвідношення між фізико-механічними характеристиками насіння (вологість, масо-розмір) та режимами роботи машини (частота обертання, зазор, подача). Надмірність в налаштуваннях режимів роботи механізму призводить до подрібнення насіння та збільшення масляного пилу або зменшення ефективності внаслідок недостатньої сили удару.

У відцентрових машинах [7, с. 44] для обрушування насіння використовується метод орієнтовного однократного удару. Він полягає в руйнуванні оболонки в момент удару насінини о відбивну деку. В даних машинах насіння під дією відцентрової сили набуває певного прискорення і рухається по заданій траєкторії, що забезпечується напрямними каналами робочого диску. Однократний орієнтовний удар з наступним швидким виведення продуктів обрушування із робочої камери мінімізує можливість багатократної дії на сировину, що зменшує її подрібненість. Однак як і для бильних машин, ефективність роботи відцентрового обрушувача великою мірою залежить від оптимального співвідношення між оброблюваною сировиною та режимами налаштувань. Різниця формо-маси насіння зумовлює відмінність швидкостей в каналі робочого колеса, що забезпечує різну силу удару об поверхню деки. В результаті в частині насіння руйнується не тільки оболонка, а і ядро, а частина насіння лишається не пошкодженою.

Формулювання цілей статті. Метою роботи є вивчення процесу обрушування насіння промислових конопель залежно від методу руйнування оболонки. Це надасть можливість виявити більш ефективний та перспективний спосіб обрушування, що стане в основу розробки працездатного зразка механізму для обрушування насіння конопель.

Виклад основного матеріалу дослідження. Процес обрушування насіння соняшнику застосовують для підвищення кількісних та покращення якісних показників під час вироблення олії [7, с. 38]. Обрушування ж насіння конопель спрямоване на покращення смакових якостей готового продукту та підвищення засвоюваності корисних речовин насінневого ядра. Адже в процесі обрушування ядро звільняється від неїстівної та важко перетравної оболонки.

Сьогодні не вирішеним лишається питання організації безпосередньо процесу обрушування насіння конопель. Оскільки даний напрям переробки відносно новий, бо основним спрямуванням було виробництво харчової або технічної олії, то результатом є відсутність обладнання для обрушування насіння конопель. В зв'язку з цим у відділі інженерно-технічних досліджень Інституту луб'яних культур НААН проведено ряд досліджень з пошуку ефективного методу обрушування насіння промислових конопель. На основі аналізу конструкцій відомих вітчизняних та закордонних механізмів для обрушування насіння олійних культур розроблено універсальний діючий макетний зразок механізму для обрушування насіння конопель. Завдяки заміні типу робочого органу з диску на колесо даний механізм дозволяє змінити метод руйнування насінневої оболонки з багатократного удару на однократний удар.

Механізм складається з робочої камери діаметром 400 мм, яка утворюється та обмежується розмірами відбивної деки. В центрі робочої камери знаходиться вал електродвигуна, для якого передбачена можливість плавної зміни частоти обертання в межах 100–3000 хв⁻¹. На вал електродвигуна монтується певний робочий орган, тип якого і зумовлює метод обрушування.

Для обрушування використовували насіння промислових конопель з виробничих посівів Інституту луб'яних культур. Насіння обрушували без попереднього калібрування шляхом безпосереднього подання на робочий орган. Отриману в процесі обрушування суміш (рушанку) вручну розділяли на складники: ядро – звільнене від оболонки ядро, готовий до вживання продукт; ціляк – насіння без видимих ознак обрушування, направляється на повторне обрушування; недоруж – насіння з видимими ознаками пошкодження оболонки, направляється на повторне обрушування; січка – дрібно розмелене насіння, побічний продукт обрушування; масляний пил – частини насіння у вигляді пилу, побічний продукт обрушування. Під час аналізу компонентного складу рушанки в результаті не враховували кількість в пробі насінневої оболонки. Даний показник прямопропорційно залежить від кількості обрушеного ядра, і до того ж дана фракція є відходом процесу обрушування.

Відомо [7, с. 41], що одним з факторів ефективності руйнування оболонки виступає вологість оброблюваного насіння, яка впливає на пружні властивості волокон та визначає крихкість або міцність насінини. Вологість насіння в дослідях

становила $8,0 \pm 0,2\%$, $15,0 \pm 0,2\%$, $20,0 \pm 0,2\%$. Підвищення вологості здійснювали штучно, шляхом поступового розпилювання води на насіння з послідовним природним висушуванням маси до сипучого стану. Зниження вологості здійснювали шляхом підсушування насіння на лабораторній сушарці. Чистота обрешуваного насіння становила $99,0\%$.

В процесі роботи досліджено ефективність обрешування насіння промислових конопель з використанням обрешувача бильного (рис. 1-а, б) та відцентрового (рис. 1-в) типів.

Обрешувач бильного типу (рис. 1-а, б) являє собою закріплений на валу електродвигуна диск з встановленими лопатями, що імітують біла та виконують ударну функцію. Насіння в сипучому стані подається зверху через завантажувальний отвір на край лопаті, найдалішу ділянку від центру диска. В основу роботи даного механізму покладено метод багатократного удару. Процес руйнування насінневої оболонки відбувається в момент неконтрольованого багаторазового контакту насіння з лопатями та відбійною декою. В процесі роботи досліджено два диски діаметром 250 мм, що різняться за розміром та формою ударної лопаті. Перший варіант (рис. 1-а) має скошу форму верхньої частини, що утворена за рахунок різниці висоти лопаті: 30 мм біля центру диску, 65 мм на кінці диску. Загальна довжина лопаті 100 мм. Другий варіант (рис. 1-б), що є результатом удосконалення першого, прямокутної форми, має довжину 100 мм та висоту 10 мм. Кожен з дисків має шість лопатей для обрешування насіння [8].

Обрешувач відцентрового типу (рис. 1-в) являє собою закріплене на валу електродвигуна колесо закритого типу діаметром 250 мм. За рахунок чотирьох секторів з внутрішньою поверхнею

гіперболічної форми, що знаходяться між двох дисків, утворюються чотири профільні канали розміром 10×10 мм, які призначені для надання насінніні кінетичної енергії. Насіння в сипучому стані подається зверху через завантажувальний отвір в центр диска. Процес руйнування оболонки насіння відбувається за рахунок деформування в момент контакту з твердою поверхнею відбійної деки внаслідок орієнтовного однократного удару [9, 10].

Оскільки напрям обрешування насіння конопель відносно новий вид переробки, то відсутні будь-які технічні вимоги та стандарти до процесу та виходу продукції. Під час аналізу результатів роботи за контроль обрано вимоги до відсоткового складу рушанки насіння соняшнику. Також орієнтувалися і на технічні характеристики роботи машин для обрешування насіння соняшнику, зокрема на рекомендовані оберти робочого органу – $2100\text{--}2400 \text{ хв}^{-1}$ [11, с. 75].

Зведені дані компонентного складу рушанки насіння конопель, що були отримані в процесі дослідження роботи механізмів з урахуванням змінних параметрів діапазону частоти обертання робочого органу та вологості насіння, представлені в таблиці 1. Отримані дані характеризують потенційну можливість кожного з механізмів руйнувати насіння конопель на певні складові частини.

Першим випробувано обрешувач бильного типу з косою формою лопаті. Встановлено, що використання даного типу обрешувача, хоча і з деякими перепонами, але дає змогу одержати вільне від оболонки насіннєве ядро, тобто здійснити процес обрешування. Виявлено, що за збільшення частоти обертання робочого колеса спостерігається підвищення ефективності руй-

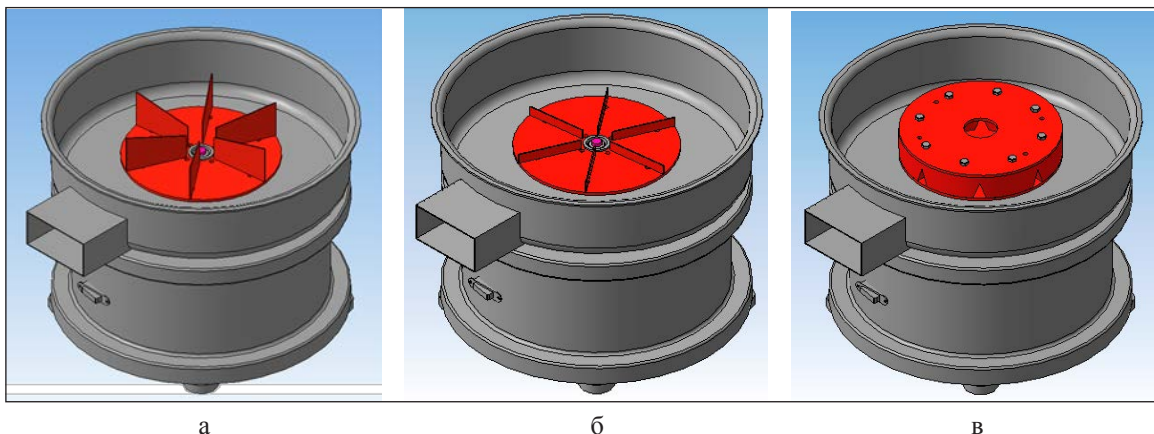


Рис. 1. Загальний вигляд досліджених механізмів для обрешування насіння конопель: а – бильного косоного типу, б – бильного прямокутного типу, в – відцентрового типу

нування оболонки. Кращі результати отримали за вологості насіння $W=15,0\pm 0,2\%$. Частка обрушеного ядра в даному випадку складала 1,1% за частоти обертання диска 500 хв^{-1} , 2,4% при 1000 хв^{-1} , 4,5% при 1500 хв^{-1} . Зі зміною вологості насіння ефективність обрушування зменшувалась. Низька вологість $W=8,0\pm 0,2\%$ підвищує крихкість насіння та сприяє значному його подрібненню. В результаті отримуємо рушанку з підвищеним вмістом січки та масляного пилу. Підвищена вологість насіння $W=20,0\pm 0,2\%$ зміцнює оболонку, що погіршує процес обрушування. Як результат отримуємо рушанку, де основна частина – це ціле та недорушене насіння.

Слід зазначити, що під час проведення досліджень з частотою обертання робочого диска 1500 хв^{-1} спостерігалось поступове збільшення часу перебування насінневої маси в робочій камері. Внаслідок надлишкового повітряного потоку, що створюється лопатями, значна частина насінневої маси закручується в робочій камері навколо диска. Це призводить до наявності постійного хаотичного руху обрушеного насіння, оболонки, ядра, які стикаються між собою та з необрушеним насінням, в результаті значна частина насіння (до 40%) вилітає з робочої камери без контакту з декою.

Для усунення виявлених недоліків проведена модернізація лопаті робочого диску. З метою усунення впливу небажаного аеродинамічного ефекту на процес обрушування змінена форма та розмір робочої частини лопаті (рис. 1-б). В результаті форма змінена з косої на прямокутну, а висота зменшена до мінімального значення 10 мм, що забезпечує роботу механізму.

Використання удосконаленого варіанту робочого диска показало позитивний ефект від проведених змін. За частоти обертання 1500 хв^{-1} небажаний аеродинамічний ефект мінімізувався, а кількість насінин, що вилетіла без контакту з декою, зменшилася на 11,0% і становила 29,0%.

Також на 2,1% збільшився вихід готового обрушеного ядра, який дорівнює 7,6%. Як і для першого варіанту досліджень, кращі показники роботи механізму отримали за вологості насіння $W=15,0\pm 0,2\%$. Зменшення або збільшення вологості насіння аналогічним чином позначається на фракційному складі рушанки.

Подальше збільшення обертів удосконаленого робочого диска до 2000 хв^{-1} призводить до погіршення якості обрушування. Так, суттєво збільшується (до 51,2%) частка перемеленого насіння, утворюється значна частина (до 20,0%) масляного пилу. Спостерігаються багаторазові удари лопатями диску по насінню, що знаходиться в підвищеному стані і обертається в напрямку його обертання. Таким чином, механізм починає виконувати функцію подрібнювача, що для нас є зовсім небажаним.

Третім досліджено здатність відцентрового обрушувача з робочим колесом закритого секторального типу руйнувати оболонку насіння конопель. Встановлено, що даний тип механізму краще серед досліджених варіантів забезпечує процес руйнування оболонки. Використання відцентрового обрушувача дозволило одержати 15,4% готового обрушеного ядра, що на 10,9% та 7,8% більше порівняно з першим і другим варіантом досліджень відповідно. Встановлено, що метод орієнтовного однократного удару забезпечує найменший відсоток подрібнення насіння (23,2%) та найменшу кількість масляного пилу (до 12,0%). Водночас значним недоліком в роботі даного механізму є частина одержаного цілого (до 45,0%) та недорушеного (до 31,0%) насіння. Слід зазначити, що характер процесу обрушування насіння різної вологості аналогічний вище описаним. Як і в перших дослідках, найбільший вихід обрушеного ядра отримали за вологості насіння $W=15,0\pm 0,2\%$.

Висновок. В результаті проведення комплексу досліджень з пошуку ефективного методу обрушування насіння конопель встановлено, що більш

Таблиця 1

Фракційний склад рушанки залежно від методу обрушування

Назва фракції	Значення, %			
	Контроль	Бильний косий	Бильний прямокутний	Відцентровий
Ядро (готове обрушене насіння)	45,0	0,5–4,5	1,0–7,6	2,8–15,4
Ціляк (непошкоджені насінини)	25,0	19,4–51,3	15,4–48,3	22,4–45,4
Недоруш (пошкоджені насінини)		10,1–27,6	15,7–34,8	18,8–31,0
Січка (подрібнене насіння)	15,0	6,3–42,1	7,3–51,2	5,2–23,2
Масляний пил (розмелене насіння)	15,0	0,3–16,4	0,5–20,0	0,2–12,0

придатним для обрушування є метод орієнтовного однократного удару, який реалізовано в конструкції відцентрового обрушуючого механізму. Встановлена закономірність впливу вологості насіння та частоти обертання робочого органу на якість обрушування. Використання робочого колеса

закритого секторального типу за частоти обертання 2000 хв^{-1} і вологості насіння $W=15,0\pm 0,2\%$ дозволяє одержати 15,4% готового до вживання обрушеного ядра. Відцентровий обрушувач показав кращі результати, що говорить про необхідність його більш глибокого подальшого вивчення.

Список літератури:

1. Вировець В.Г. Коноплі: монографія / за ред. М.Д. Мигалья, В.М. Кабанця. Суми : Видавничий будинок «Еллада», 2011. 384 с.
2. Коноплярство: наукові здобутки та перспективи: монографія / за ред. І.О. Маринченка, Guo Chunjing. Суми : ФОП Щербина І.В., 2018. 158 с.
3. Сова Н.А., Луценко М.В., Єніна Н.Ю., Васараб-Кожушна Л.Д. Насіння ненаркотичних конопель – перспективна біологічно активна сировина для харчової промисловості. *Хранение и переработка зерна*. 2017. Вип. 9 (217). С. 16–19.
4. Сова Н.А., Луценко М.В., Терещенко Т.В. Дослідження технологічних властивостей обрушеного насіння промислових конопель. *Аграрна наука та освіта в XXI столітті: проблеми, перспективи та інновації*. №9. С. 248 – 253.
5. Примаков О.А. Ненаркотичні коноплі: перспективи застосування. *Аграрний тиждень*. URL: <http://a7d.com.ua/plants/14427-nenarkotichn-konopl-perspektivi-zastosuvannya.html> (дата звернення: 03.04.2019).
6. Постанова КМУ від 22 серпня 2012 року №800 про внесення змін до Постанови КМУ від 6 травня 2000 р. № 770 «Про затвердження переліку наркотичних засобів, психотропних речовин і прекурсорів» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/800-2012-p> (дата звернення: 03.04.2019).
7. Акаева Т.К. Петрова С.Н. Основы химии и технологии получения и переработки жиров. Технология получения растительных масел. Иваново, 2007. 124 с.
8. Обґрунтувати перспективні технології переробки продукції льону-довгунця та конопель: звіт про НДР / Інститут луб'яних культур НААН; наук. керівник С.П. Коропченко., Глухів, 2015.
9. Грачев А.В. Совершенствование процесса селективной дезинтеграции семян масличных культур: дис. на соиск. уч. степени канд. техн наук. Кемерово, 2014. 169 с.
10. Пристрій для обрушування насіння конопель: пат. 122649 Україна: МПК51 В02В 3/02, С11В 1/04; заявл.06.06.2017; опубл. 25.01.2016, Бюл.№2.
11. Щербаков В.Г. Технология получения растительных масел. Москва, 1992. 207 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ МЕХАНИЗМА ДЛЯ ОБРУШИВАНИЯ СЕМЯН ПРОМЫШЛЕННОЙ КОНОПЛИ

В статье охарактеризовано одно из перспективных направлений переработки семян ненаркотической конопли – получение обрушенного семенного ядра. В результате изучения разных по принципу действия конструкций механизмов для обрушивания выявлено особенности, преимущества, недостатки методов многократного и однократного удара. Исследовано влияние формы рабочего органа (колеса или диска) обрушивающего механизма на способность к разрушению семенной оболочки. Установлено, что более эффективным для обрушивания семени конопли есть метод ориентированного однократного удара, который реализован в конструкции центробежного обрушивателя. Выявлено, что рабочее колесо закрытого секторального типа имеет перспективу дальнейшего использования и нуждается в более глубоких исследованиях.

Ключевые слова: конопля, семена, ядро, обрушивание, механизм, рабочее колесо.

RESEARCH OF THE CONSTRUCTION OF MECHANISM FOR SHELLING OF INDUSTRIAL HEMP SEEDS

The article describes one of the promising directions for the processing of seeds of non-narcotic hemp - the production of a shelled seed nucleus. Due to its biological properties and easy digestibility, shelled hemp seed are of interest to the general public. As a result of the study of the various construction of mechanisms for shelling, features, advantages, drawbacks of methods of multiple and one-time impact were determined. The influence of the form of the working body (wheel or disk) of the shelling mechanism on the ability to destroy the shell of the seed is studied. It is determined that more effective for shelling of hemp seeds is a method of approximate single impact, which is implemented in the construction of a centrifugal collider. It has been established that the closed sector type impeller has a prospect of further use and requires in-depth research.

Key words: hemp, seeds, core, shelling, mechanism, impeller.

Семешко О.Я.

Херсонський національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНЦЕНТРАЦІЇ АКТИВНИХ БАРВНИКІВ НА СВІТЛОСТІЙКІСТЬ ЗАБАРВЛЕНЬ БАВОВНЯНОГО ТРИКОТАЖНОГО ПОЛОТНА

У статті визначено вплив концентрації активних барвників на стійкість до дії світла забарвлень бавовняного трикотажного полотна шляхом дослідження кінетики вигорання. Встановлено, що концентрація барвників впливає на їх агрегатний стан на текстильному матеріалі та стійкість забарвлень до дії світла. Доведено, що зі збільшенням концентрації барвників на текстильному матеріалі світлостійкість забарвлень зростає.

Ключові слова: світлостійкість, вигорання, фарбування, активні барвники, бавовняний трикотаж.

Постановка проблеми. Забарвлені текстильні матеріали містять різну кількість барвника, яка задається необхідною інтенсивністю кольору забарвлення. Під час створення стандартів світлостійкості [1] обов'язково зазначається стандартна концентрація барвника, для якої проводять визначення, а в промислових проспектах барвників [2; 3] зазначаються показники якості забарвлень для відповідного тону. Однак слід зазначити, що на виробництві не завжди застосовують концентрації, що вказані у проспектах. Визначення впливу концентрації активних барвників на світлостійкість отриманих забарвлень є необхідною умовою розроблення високоякісних текстильних матеріалів з високими показниками якості, зокрема до дії світла.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відповідно до сучасної теорії фарбування текстильних матеріалів [4; 5] барвник на волокні може перебувати в різноманітному стані залежно від хімічної структури цього барвника, фізичної та хімічної природи волокна, характеру сил, що виникають між барвником та волокном, умов фарбування та присутності допоміжних препаратів, що використовуються при цьому. Для водорозчинних барвників, до яких належать активні барвники, залежно від концентрації барвника його стан у волокні може змінюватись від мономолекулярної адсорбції на активних центрах волокна до полімолекулярної адсорбції. В цьому разі перехід від моно- до полімолекулярної адсорбції, яка є фактично агрегацією барвника на волокні, значною мірою залежить від наявності порожнеч у структурі волокна, їх кількості та розміру [5].

Вперше увагу на залежність агрегації барвника у субстраті від його світлостійкості звернув у своїх роботах Ч.Г. Джайлз [6–9]. Г.Є. Кричевський [10] вважає, що вплив агрегації барвників на світлос-

тійкість забарвлень перебільшений спробою звести поведінку під час опромінення різноманітних та складних систем до руйнування або існування агрегатів барвника, оскільки залежність фоторуйнування барвників від концентрації та характеру його розподілення в матриці має дуже складний характер.

Таким чином, у науковій літературі спеціалістами, що займались дослідженнями світлостійкості текстильних матеріалів, не сформовано єдиної позиції щодо впливу концентрації барвників, зокрема активних, на світлостійкість отриманих забарвлень.

Постановка завдання. Метою статті є вивчення впливу концентрації активних барвників на процес кінетики вигорання забарвлень на бавовняному трикотажному полотні.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження впливу концентрації барвника здійснено з використанням бавовняного трикотажного полотна переплетення піке з поверхневою щільністю 175 г/см², яке попередньо підготовлене сумішним способом відварки та пероксидного відбілювання [11]. Фарбування проводили активними біфункціональними барвниками Bezaktiv Cosmos Rot S-C та Bezaktiv Cosmos Blue S-C (“Bezema”) при різній концентрації (0,3%, 1%, 2%) періодичним способом. Після фарбування зразки проходили миловку, висушувались та піддавались інсоляції на приладі Light Fastness Tester RF 1201 BS (“REFOND”) зі ртутно-вольфрамовою лампою. Світлостійкість оцінювали шляхом визначення кольорових відмінностей за допомогою колориметра PCE-TCR 200.

На рис. 1, 2 наведено результати дослідження кінетики вигорання забарвлень на бавовняному трикотажному полотні залежно від концентрації барвників. Для отриманих кінетичних кривих знайдені рівняння, що описують ці процеси, та кое-

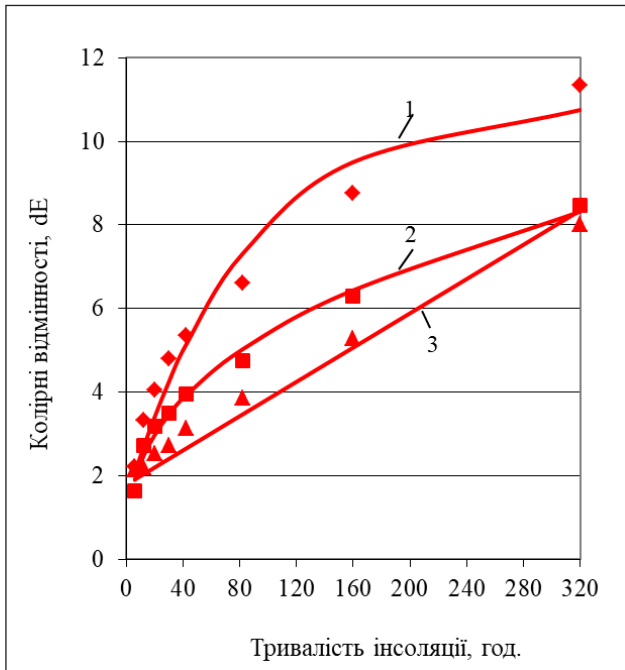


Рис. 1. Кінетичні криві вигорання забарвлень активним барвником Bezaktiv Cosmos Rot S-C на бавовняному трикотажі: 1) 0,3% барвника:

$$y = 9,575(1,147 - e^{-0,012x}),$$

$$R=0,975; 2) 1\% \text{ барвника: } y = \frac{9,734 + 444,759x^{0,377}}{463,538 + x^{0,377}},$$

$$R=0,997; 3) 2\% \text{ барвника: } y = 1,783 + 0,021x, R=0,950$$

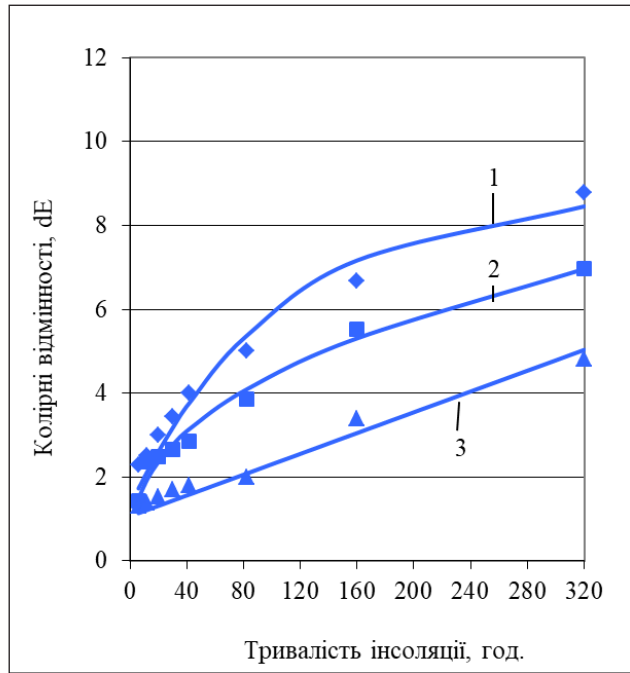


Рис. 2. Кінетичні криві вигорання забарвлень активним барвником Bezaktiv Cosmos Blue S-C на бавовняному трикотажі: 1) 0,3% барвника:

$$y = 7,507(1,175 - e^{-0,009x}),$$

$$R=0,972; 2) 1\% \text{ барвника: } y = \frac{58,275 + 570,534x^{0,400}}{820,774 + x^{0,400}},$$

$$R=0,994; 3) 2\% \text{ барвника: } y = 1,067 + 0,012x, R=0,948$$



Рис. 3. Типи кривих вигорання барвників

фіцієнти кореляції R. Під час дослідження впливу концентрації біфункціональних активних барвників у фарбувальній ванні на волокні на кінетику їх вигорання (рис. 1, 2) встановлено, що зі збільшенням концентрації барвників на волокні світлостійкість забарвлень зростає.

Аналіз кінетичних кривих фотодеструкції активних барвників на бавовняному трикотажі (рис. 1, 2) дає змогу відзначити різний характер залежно від концентрації барвників.

Ч.Г. Джайлз [6] на основі досліджень великої кількості барвників різних класів на плівках та волокнах різноманітної хімічної та фізичної природи описав

типи кривих залежності концентрації синтетичних барвників від тривалості інсоляції (рис. 3).

Відповідно до теорії кожному типу кінетичних кривих відповідає певний агрегатний стан барвника на текстильному матеріалі.

Для залежності типу I коефіцієнт вигорання зменшується з часом, швидкість фотодеструкції барвника в цьому разі описується рівнянням першого або другого порядку. При цьому барвник у волокні має мономолекулярну форму або форму агрегатів та частинок малих розмірів, а також є рівно доступним для дії фотонів світла та хімічно активних речовин.

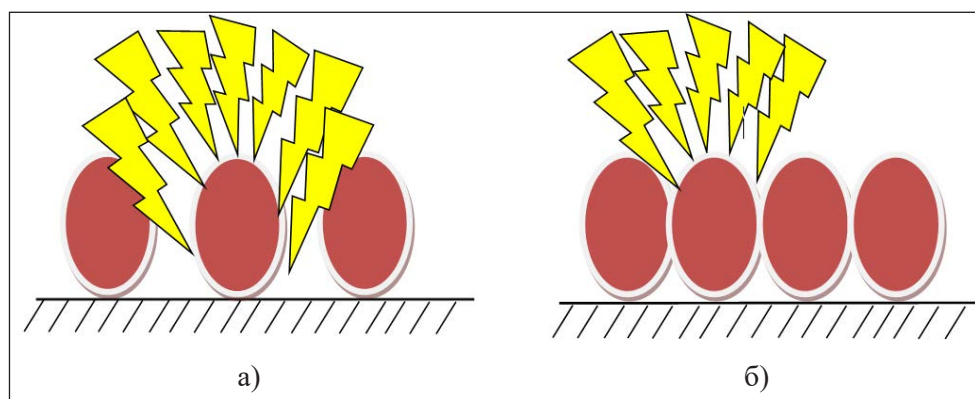


Рис. 4. Механізм дії світла на текстильний матеріал з різним вмістом барвника: а) низька концентрація; б) висока концентрація

Залежність типу II ілюструє процес фотодеструкції барвника. Спочатку процес проходить швидкими темпами та підпорядковується рівнянню першого чи другого порядку, потім швидкість фотодеструкції барвника стає постійною та підпорядковується рівнянню нульового порядку. Ч.Г. Джайлз пояснював таку поведінку наявністю у субстраті барвника у формі агрегатів малого та крупного розмірів.

Криві фотодеструкції барвника типу III характеризуються постійною швидкістю фотодеструкції барвника, що відповідає рівнянню нульового порядку. У цьому разі барвник існує у волокні у формі крупних агрегатів та частинок, загальна поверхня яких під час фотодеструкції барвника залишається практично незмінною.

Для кінетичних кривих фотодеструкції барвників типу IV та V характерними є дезагрегація крупних агрегатів барвника та збільшення кількості забарвлених частинок, як наслідок, підвищення оптичної густини забарвленого зразка. Отже, згідно з теорією Ч.Г. Джайлза, кінетичні криві фотодеструкції барвників типів IV та V також відповідають наявності в субстраті крупних агрегатів барвника, але для кожної є індивідуальне трактування.

Для кінетичних кривих типу IV характерною є поява максимуму, що пояснюється тим, що швидкість диспергування крупних агрегатів значно перевищує швидкість фотодеструкції дрібних частинок.

Кінетичні криві фотодеструкції барвника типу V будуть спостерігатись тоді, коли швидкість дезагрегації крупних агрегатів є вищою, ніж швидкість їх фотодеструкції.

Залежності, наведені на рис. 1, 2, є оберненими до тих, що були отримані Ч.Г. Джайлзом, оскільки величина колірних відмінностей dE пропорційно

зростає зі зменшенням концентрації барвника на волокні.

Таким чином, з огляду на узагальнені результати Ч.Г. Джайлза (рис. 3) отримані залежності (рис. 1, 2) зміни колірних відмінностей зразків з різною початковою концентрацією барвників можна охарактеризувати за агрегатним станом барвника на текстильному матеріалі.

Так, при початковій концентрації барвників 0,3% (криві 1 на рис. 1, 2) спостерігається залежність, що відповідає I типу кривих вигорання, що дає змогу говорити про наявність барвника на текстильному матеріалі у мономолекулярній формі, що робить його рівно доступним для дії фотонів світла та хімічно активних речовин.

Зі збільшенням початкової концентрації барвників характер кривих вигорання змінюється. При концентрації 1% (криві 2 на рис. 1, 2) на початковій стадії процес вигорання відбувається швидко, а потім вона стає постійною, барвник же перебуває в субстраті у формі агрегатів малого та крупного розмірів.

При початковій концентрації барвників 2% (криві 3 на рис. 1, 2) криві фотодеструкції відповідають типу III та характеризуються постійною швидкістю фотодеструкції барвника. При цьому барвник перебуває на текстильному матеріалі у формі крупних агрегатів та частинок, їх загальна поверхня в процесі фотодеструкції практично не змінюється.

Загалом збільшення концентрації барвника на волокні сприяє зниженню швидкості вигорання. Механізм дії світла на забарвлення з різною концентрацією барвника наведений на рис. 4.

Світлостійкість одного й того ж барвника при різній його концентрації пов'язана з просторовим розташуванням молекул барвників або їх агрегатів на текстильному матеріалі, а також їх доступністю щодо дії світла. Крім того, збільшення кон-

центрації барвника сприяє можливості передачі енергії збудження між сусідніми молекулами, що сприяє зменшенню квантової ефективності фотодеструкції барвника. При цьому слід зазначити, що передача енергії збудження легко відбувається між тими молекулами барвників, які перебувають в безпосередньому постійному контакті.

Висновки. Таким чином, за знайденими кривими вигорання активних барвників можна охарактеризувати їх агрегатний стан на текстильному матеріалі залежно від початкової концентрації, а також спрогнозувати світлостійкість забарвлень бавовняного трикотажного полотна активними барвниками.

Список літератури:

1. ДСТУ ISO 105-B01:2015. Текстиль. Випробування на стійкість до забарвлення. Ч. B01. Стійкість кольору до світла: Денне світло. Київ, 2015. 13 с.
2. Colourshadecard Bezaktiv V. URL: [https://www.cht.com/cht/medien.nsf/gfx/med_RSCR-B8EGN2_4484DE/\\$file/Colourshadecard-Bezaktiv-V-de-en-WEB.pdf](https://www.cht.com/cht/medien.nsf/gfx/med_RSCR-B8EGN2_4484DE/$file/Colourshadecard-Bezaktiv-V-de-en-WEB.pdf).
3. Colourshadecard COLVAZOL LC series. URL: <http://www.dghengxiangdyes.com/en/pro/show.php?id=8>.
4. Кричевский Г.Е. Химическая технология текстильных материалов. Колорирование текстильных материалов. Москва : Российский заочный институт текстильной и легкой промышленности, 2001, Т. 2. 540 с.
5. Physico-Chemical Principles of Color Chemistry / ed. by A.T. Peters, H.S. Freeman. Glasgow : Blackie Academic & Professional, an imprint of Chapman & Hall, 1996. 309 p.
6. Giles C.H. The fading of coloring matters. *Journal of Applied Chemistry*. 1965. Vol. 15 (12). P. 541–550.
7. Baxter G., Giles C.H., McKee M.M.N., Macaulay N. The Influence of the Physical State of Dyes upon their Light Fastness. *Journal of the Society of Dyers and Colorists*. 2008. Vol. 71 (5). P. 218–235.
8. Lightfastness and Surface Activity of Dyes: The Effect of Alkylation and of Sulfonation / C.H. Giles, G. Baxter, W.A. Black, N. Macaulay, S.M.K. Rahman. *Textile Research Journal*. 1960. Vol. 30 (12). P. 934–943.
9. Giles C.H., McKay R.B. The Lightfastness of Dyes: a Review. *Textile Research Journal*. 1963. Vol. 33 (7). P. 528–577.
10. Кричевский Г.Е. Фотохимические превращения красителей и светостабилизация окрашенных материалов. Москва : Химия, 1986, 248 с.
11. Лабораторный практикум по химической технологии текстильных материалов / под ред. Г.Е. Кричевского. Москва : Российский заочный институт текстильной и легкой промышленности, 1995. 414 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ АКТИВНЫХ КРАСИТЕЛЕЙ НА СВЕТОСТОЙКОСТЬ ОКРАСОК ХЛОПЧАТОБУМАЖНОГО ТРИКОТАЖНОГО ПОЛОТНА

В статье определено влияние концентрации активных красителей на устойчивость к воздействию света окрасок хлопчатобумажного трикотажного полотна путем исследования кинетики его выгорания. Установлено, что концентрация красителей влияет на их агрегатное состояние на текстильном материале и устойчивость окрасок к действию света. Доказано, что с увеличением концентрации красителей на текстильном материале светостойкость окрасок возрастает.

Ключевые слова: светостойкость, выгорание, покраска, активные красители, хлопчатобумажный трикотаж.

STUDY OF THE CONCENTRATION EFFECT OF REACTIVE DYES ON THE LIGHTFASTNESS OF COLOURS COTTON KNITTED FABRICS

In the article determined the concentration effect of reactive dyes on the resistance to light exposure of colors of cotton knitted fabric by studying the light their fading kinetics. It is established that the concentration of dyes affects their aggregative state on the textile material and the resistance of colors to the action of light. It was found that with an increase in the concentration of dyes on textile materials, the lightfastness of colors increases.

Key words: lightfastness, fading, dyeing, reactive dyes, cotton knitted fabric.

УДК 637.147.2: 66.047: 001.891

Скрипніченко Д.М.

Одеська національна академія харчових технологій

Котляр Є.О.

Одеська національна академія харчових технологій

Галкіна Д.В.

Одеська національна академія харчових технологій

Панфілов М.О.

Одеська національна академія харчових технологій

Куделько С.Ю.

Одеська національна академія харчових технологій

ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБІВ ОТРИМАННЯ ТА СУШІННЯ ХАРЧОВОГО КАЗЕЇНУ

Обґрунтована можливість одержання сухого казеїну з високими показниками якості способом сушіння в завислому шарі, в нерухомому шарі й під вакуумом з інфрачервоним (ІЧ) нагрівом. Одержано зразки казеїнового зерна, білки яких виділені кислотною та сичуговою коагуляцією. Найменша тривалість сушіння спостерігалась у зразках, отриманих кислотною коагуляцією як у завислому, так і в нерухомому шарі, в порівнянні зі зразком, отриманим сичужною коагуляцією. У зразках, отриманих способом кислотної коагуляції, спостерігалась найвища розчинність (індекс розчинності 0,19-0,22) та менша зольність (2,2-2,4%), у зразку, отриманому способом сичугової коагуляції, індекс розчинності – 0,32, зольність – 3,1%. Розчинність із підвищенням температури сушильного агенту збільшується як у завислому так, і в нерухомому шарі, при цьому розчинність у завислому шарі вища. Під час сушіння у вакуум-сушарці з ІЧ нагрівом найбільша розчинність спостерігається при температурах 80°C і становить 0,2 см³. Підвищені температури під час цієї сушки призводять до зниження розчинності казеїну. Тривалість сквашування знежиреного молока закваскою «Симбітер концентрований» нижча в порівнянні зі зразком, заквашеним комбінацією заквасок FD DVS CHN-19+ FD DVS Flora Danica (4-6 годин та 8-10 годин відповідно), скорочена тривалість процесів пресування та сушіння казеїнового зерна до 30 хвилин. Якість отриманого казеїну, що висушений різними способами, досить висока і відповідає вимогам стандарту.

Ключові слова: харчовий казеїн, технологія, коагуляція, закваска, способи сушіння.

Постановка проблеми. Казеїн – важливий харчовий продукт. Використовується він у деяких добавках, які часто пропонуються при різних патологічних станах, наприклад, при важких опіках, лихоманці або затяжних захворюваннях. Його також використовують як водостійку речовину, що забезпечує адгезію клею на поверхнях, що склеюються, як едальну речовину у виробництві клейових фарб і при проклеюванні паперу, а також як стабілізатори в різних емульсіях [1, с. 60].

Харчовий казеїн використовується на молочних, м'ясних і кондитерських підприємствах як білковий наповнювач, що поліпшує якість готового продукту. У харчових цілях він звичайно переробляється в казеїнати натрію, калію й кальцію [1, с. 59].

Найбільші виробники казеїну на теперішній час: Нова Зеландія, Австралія, Аргентина, Франція. На їх частку припадає 90% світового виробництва й експорту [2, с. 11].

Казеїн випускають для різних цілей і він може бути:

1) кислотним – харчовий казеїн, отриманий із використанням у ролі коагулянта кислоти, бактеріальної закваски або сироватки, заквашеної закваскою молочнокислих бактерій;

2) сичуговим – харчовий казеїн, отриманий із використанням для коагуляції знежиреного молока химозину або інших ферментів.

У виробництві кислотного казеїну дозволяється використовувати в ролі коагулянту такі кислоти: молочну, соляну, сірчану, лимонну, оцтову й ортофосфорну [3, с. 40].

У зв'язку з тим, що на ринку України переважає казеїн, який не відповідає вимогам за якісними показниками, існує гостра необхідність одержання якісного харчового казеїну. Якість харчового казеїну залежить від правильного ведення технологічного процесу, її можливо поліпшити практично на всіх стадіях його отримання (сепарування, коагуляція, відділення сироватки й промивання зерна, пресування, дроблення (гранулювання) й сушіння).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У зв'язку з ростом конкуренції за сировину між молокопереробними підприємствами різко знизилася виробництво казеїну в Україні [4, с. 4–6]. Попит на казеїн низький із-за високих цін на товар і здебільшого низької якості, яка не відповідає нормативно-технічним вимогам за якісними показниками. Тому існує гостра необхідність одержання якісного харчового казеїну [5, с. 57].

Одним із основних і важливих факторів, що впливають на якість казеїну, є процес сушіння [5, с. 58].

Обґрунтування вибору способу й режиму сушіння такого термолабільного продукту, як казеїн, з урахуванням одержання готового продукту бажаної якості може бути проведене лише під час аналізу його фізико-хімічних і структурно-механічних властивостей.

Однак у всіх випадках під час вибору способу сушіння треба керуватися такими принципами:

1) зниження вартості сушіння, тобто зменшення енергетичних витрат, витрат на обслуговування й ремонт, повну безпеку процесу, високу продуктивність сушильної установки;

2) забезпечення технологічності процесів, облік факторів щодо організації руху матеріалу, який висушується, й теплоносія в системі, одержання продукту із заданими властивостями, що визначають умови подальшого застосування й зберігання [6, с. 15].

Недоліки способів сушіння казеїну, які використовують у виробництві, перераховані в [6, с. 18].

Мінімізація витрат на сушіння означає зменшення енерговитрат і ефективне використання енергії. Це пов'язано з досягненням мінімально можливої вологості матеріалу до сушіння із застосуванням максимально можливої температури сушильного агента й максимальних температурних перепадів у сушильних апаратах.

Перша умова може бути досягнута за рахунок максимального видалення вологи механічним шляхом під час пресування казеїну, що характеризується істотно меншими у порівнянні із сушінням енерговитратами.

Друга умова може бути досягнута під час високоінтенсифікованого сушіння [7, с. 421–423].

Найбільш ефективним способом сушіння казеїну є сушіння в завислому шарі, що відповідає всім основним вимогам, пропонованим до сушильних установок.

Під час сушіння в завислому шарі частинки матеріалу перебувають у стані безперервного руху й перемішування, досягається турбулізація граничного шару випаровуваної вологи, максимальна поверхня випаровування, рівномірність тепло- і масообміну, можливість застосування підвищених температур сушильного агента. Завдяки цьому значно скорочується тривалість сушіння. Крім того, сумарний вплив підвищених температур сушильного агента й тривалості процесу сушіння дозволяє одержати продукти високої якості [8, с. 145].

Таким чином, оптимальним методом сушіння для такого молочнобілкового продукту, як казеїн, до якості якого пред'являються високі вимоги, є спосіб сушіння в завислому шарі. У літературних джерелах є незначна інформація щодо сушіння казеїну у вакуумній сушарці та щодо сушіння казеїну в нерухомому шарі.

Тому основною метою даної роботи є дослідження впливу способів сушіння харчового казеїну на якість продукту.

Постановка завдання.

Мета роботи – отримання харчового казеїну та сушіння різними способами, а також порівняльна характеристика якісних показників із метою отримання продукту підвищеної якості.

Об'єктом дослідження служило знежирене молоко, з якого отримували харчовий казеїн.

Робота виконувалася в лабораторних умовах кафедри технології молочних, олійно-жирових продуктів і косметики Одеської національної академії харчових технологій.

Виклад основного матеріалу.

Харчовий казеїн отримували за загальною технологічною схемою, яка різнилась видом коагулянту, що впливає на вихід казеїну та його якісні показники.

Схема отримання харчового казеїну

1. Сепарування незбираного молока (температура сепарування 40–45°C).

2. Отримання знежиреного молока з масовою часткою жиру не більше 0,05%. При жирності знежиреного молока вище 0,05% одержання експортного казеїну практично неможливо: жирність його в цьому випадку перевищує припустимі норми, й ціна на казеїн знижується.

3. Пастеризація знежиреного молока (температура $72 \pm 2^\circ\text{C}$ протягом 15-20 сек) та охолодження до температури $30-35^\circ\text{C}$;

4. Внесення коагулянту. Обробка згустку.

4.1. Внесення кислоти сироватки з титрованою кислотністю 160 °Т у знежирене молоко температурою $30-35^\circ\text{C}$ (**зразок 1**). Сироватку заквашували закваскою FD DVS CH-N 22 фірми Хрістіан Хансен (це мезофільна культура з кількома змішаними штамми, яка складається з *Lactococcus lactis* підвид *cremoris*, *Lactococcus lactis* підвид *lactis* і *Leuconostoc mesenteroides* підвид *cremoris* і *Lactococcus lactis* підвид *diacetylactis*). Вимішування пластівців казеїну протягом 10-15 хв. Видалення 60% сироватки. Внесення кислоти сироватки до кислотності 62-70 °Т, перемішування до готовності казеїну (рН 4,5-4,8 од.).

4.2. Внесення комбінації заквасок FD DVS CHN-19 + FD DVS Flora Danica у знежирене молоко температурою $30-35^\circ\text{C}$ (**зразок 2**). Сквашування відбувалося протягом 8-10 годин. Розрізання на кубики. Нагрівання до температури $60-65^\circ\text{C}$ при постійному вимішуванні зерна протягом 10-15 хв. Збільшувати температуру не можна, оскільки погіршується розчинність казеїну.

4.3. Внесення сичугового ферменту у знежирене молоко температурою $30-32^\circ\text{C}$ (**зразок 3**). Сквашування знежиреного молока протягом 20 хвилин. Розрізання на кубики. Нагрівання до температури $58-60^\circ\text{C}$ при постійному вимішуванні зерна протягом 10-15 хв.

4.4. Внесення лабораторної закваски «Симбітер концентрований» (4% від об'єму знежиреного молока) (закваска складається з *Bifidobacterium*, *Lactobacillus*, *Propionibacterium*, *Lactococcus*, число штамів у пробіотику – 14, концентрація клітин 10^{12} , КУО/дозі) (**зразок 4**). Флакон (дозу) вносили у знежирене молоко (250 см^3) температурою $30-35^\circ\text{C}$, ретельно перемішували. Сквашування відбувалося протягом 4-6 годин при темпе-

ратурі $30-35^\circ\text{C}$. Розрізання на кубики. Нагрівання до температури $40-48^\circ\text{C}$ при постійному вимішуванні зерна протягом 25-30 хв.

5. Видалення сироватки.

6. Промивання пластівців (зерна) казеїну пастеризованою та охолодженою водою 3 рази по 10 хвилин.

7. Пресування зерна до вологовмісту 150-170%.

8. Гранулювання казеїну.

9. Сушіння (в завислому шарі, в нерухомому шарі, у вакуум-сушарці).

Характеристика згустків і казеїнового зерна, отриманих за наведеною вище схемою, наведена в табл. 1.

Отримана консистенція згустків пояснюється таим чином: у 1-му, 2-му та 4-му зразках відбулась кислотна коагуляція; у 1-му зразку має місце істинна коагуляція – в результаті швидкого зниження рН знежиреного молока з 6,6...6,8 до 4,7...4,6 утворився осад казеїну. Механізм істинної коагуляції полягає у зниженні негативного заряду, зумовленого карбоксильними групами моноамінодикарбонових кислот (аспарагінової й глютамінової) і залишками фосфорної кислоти іонами водню сироватки (утворюється молочна кислота). Молочна кислота, як більш сильна, відщеплює кальцій від фосфату кальцію, що зв'язує субміцели казеїну в міцели, в результаті чого міцели розпадаються до субміцел, тобто осад тонкодиспергований.

У зразках 2-му і 4-му механізм утворення згустку той же. Тільки відбувається не утворення осаду (як у 1-му зразку), а утворюється гель, структура якого субміцелярна.

У 3-му зразку відбувається сичугова коагуляція, механізм якої полягає в тому, що: під дією сичужного ферменту χ -казеїн, що займає 50% поверхні міцели казеїну, розщеплюється між 105 і 106 амінокислотами на пара-капа-казеїн і глікомакропептид. Останній має високий заряд і воло-

Таблиця 1

Характеристика отриманих згустків і казеїнового зерна

Зразок (вид коагулянту)	Консистенція згустку	Характеристика казеїнового зерна
Зразок 1 (кисла сироватка)	пластівці у сироватці	пружне, міцне
Зразок 2 (комбінація заквасок FD DVS CHN-19+ FD DVS Flora Danica)	у міру щільний згусток, однорідний	рихле та зернисте
Зразок 3 (молокозсідальний фермент СНУ-MAX Extra 600 IMCU)	щільний згусток, однорідний	пружне, гумоподібне
Зразок 4 (закваска «Симбітер концентрований»)	ніжний згусток, однорідний, в міру щільний	рихле та зернисте

діє гідрофільністю. При його відщипленні дзета-потенціал (заряд) на поверхні знижується майже вдвічі. У результаті зниження заряду міцели поєднуються, тому що сили притягіння починають переважати над силами відштовхування. Утворюється гель, що складається з міцел, тобто виділений казеїн має різний ступінь дисперсності.

У 1-му, 2-му, 4-му зразках гель тонкодиспергований, частки мають розмір 10...15 нм. У 3-му зразку розмір частинок – до 400 нм.

Отримане казеїнове зерно піддавали пресуванню до вологовмісту 150-170%, гранулюванню та сушінню в завислому, нерухомому шарі та у вакуум-сушарці з ІЧ нагрівом.

Порівняльна характеристика способів сушіння зразків казеїну наведена в табл. 2.

Аналізуючи представлені дані (табл. 2), можна відзначити, що з підвищенням температури тривалість процесу значно скорочується.

Тривалість сушіння казеїну в завислому шарі знижується у 1,5 рази в порівнянні із сушінням у нерухомому шарі при температурі сушіння 100°

У зразках, отриманих способом кислотної коагуляції (зразки 1, 2, 4) спостерігалась найвища розчинність (індекс розчинності 0,19-0,22) і менша зольність (2,2-2,4%), у зразку 3, отриманому способом сичугової коагуляції, індекс розчинності – 0,32, а зольність – 3,1%.

Кислотний казеїн містить менше мінеральних речовин (кальцію) у порівнянні із сичужним казеїном. Це пояснюється різницею в механізмі коагуляції казеїну. Під час коагуляції під дією кислот білок переходить в ізоелектричний стан, при цьому казеїнові частинки втрачають як колоїдний фосфат кальцію, так і кальцій, що входить у їхній склад. Таким чином, кислотний казеїн осаджується в ізоелектричній точці (при рН 4,6-4,7), маючи незначний вміст кальцію. Під дією ж сичужного ферменту казеїн переходить у параказеїн, що потім осаджується, не втрачаючи кальцію.

Незалежно від способу осадження вміст мінеральних речовин у казеїні залежить від кількості коагулянту, кислотності знежиреного молока, температури коагуляції, кислотності сироватки,

Таблиця 2

Тривалість процесу сушіння казеїну в завислому та нерухомому шарі (питоме навантаження матеріалу 60 кг/м², швидкість сушіння 5 м/с, впоч=170%, вкін=4%) при температурі сушильного агенту, °

Зразок (вид коагулянту)	завислий шар						нерухомий шар					
	70	80	90	100	110	120	70	80	90	100	110	120
Зразок 1 (кисла сироватка)	147	102	64	50	42	34	152	117	72	59	48	41
Зразок 2 (закваска <i>FD DVS CHN-19+FD DVS Flora Danica</i>)	140	90	55	44	35	28	146	98	66	54	43	34
Зразок 3 (сичужовий фермент <i>CHY-MAX Extra 600 IMCU</i>)	149	111	68	53	44	36	154	120	74	62	51	45
Зразок 4 (закваска «Симбітер»)	145	96	61	42	33	32	150	114	70	49	39	37

Таблиця 3

Індекс розчинності та масова частка золи у зразках сухого казеїну (сушіння в завислому шарі, температура сушильного агенту 100°)

Зразок (вид коагулянту)	Індекс розчинності, см ³	Масова частка золи, %
Зразок 1 (кисла сироватка)	0,22	2,2
Зразок 2 (закваска <i>FD DVS CHN-19+ FD DVS Flora Danica</i>)	0,20	2,4
Зразок 3 (сичужовий фермент <i>CHY-MAX Extra 600 IMCU</i>)	0,32	3,1
Зразок 4 (закваска «Симбітер»)	0,19	2,4

що утворюється, тривалості витримки в ній зерна, а також у більшому ступені від режимів промивання готового продукту (кількості промивань, їхньої тривалості тощо). Отже, кількість мінеральних речовин, або зольність кислотного і сичужного казеїну можна регулювати за допомогою технологічних режимів.

У таблиці 4 наведені результати індексу розчинності харчового казеїну (зразок 4), отриманого сушінням різними способами.

Розчинність залежить від температури та тривалості сушіння. Зі збільшенням температури тривалість сушіння знижується, розчинність збільшується (для завислого шару та нерухомого шару), особливо під час сушіння в завислому шарі, оскільки при температурах вище 100°

Як свідчать результати таблиці 5, способи сушіння казеїну незначно впливають на показники якості. Якість отриманого казеїну (зразок 4), що висушений різними способами, досить висока і відповідає вимогам стандарту.

Висновки

Одержано зразки з різною структурою, білки яких виділені кислотною (зразки 1, 2, 4) та сичужною коагуляцією (зразок 3).

Тривалість сушіння казеїну в завислому шарі знижується у 1,5 рази в порівнянні із сушінням у нерухомому шарі при температурі сушіння 100°С до кінцевого вологовмісту 10%.

Найменша тривалість сушіння спостерігалась у зразках, отриманих кислотною коагуляцією (зразки 1, 2, 4) як у завислому, так і в нерухомому шарі, в порівнянні зі зразком, отриманим сичужною коагуляцією (зразок 3).

У зразках, отриманих способом кислотної коагуляції (зразки 1, 2, 4), спостерігалась найвища розчинність (індекс розчинності – 0,19-0,22) та менша зольність (2,2-2,4%), у зразку, отриманому способом сичужової коагуляції, індекс розчинності – 0,32, зольність – 3,1%.

Розчинність із підвищенням температури сушильного агента збільшується як у завислому, так і в нерухомому шарі, при цьому розчинність у

Таблиця 4

Індекси розчинності харчового готового казеїну (зразок 4) в залежності від способу сушіння та температури сушильного агента

Спосіб сушіння	Індекс розчинності казеїну, висушеного при температурі, °			
	70	80	90	100
Завислий шар	0,26	0,25	0,22	0,19
Нерухомий шар	0,42	0,34	0,26	0,21
Вакуум-сушарка з ІЧ нагрівом	0,29	0,20	0,24	0,27

Таблиця 5

Показники якості казеїну (зразок 4), висушеного різними способами (в перерахунку на сухі речовини)

Найменування показників	Сухий казеїн t с.а. = 100°		
	завислий шар t с.а. = 100°	нерухомий шар t с.а. = 100°	вакуум сушіння t с.а. = 75°
Масова частка вологи, %	10±0,25	10,9±0,25	10,5±0,25
Кислотність, °Т	53	58	60
Індекс розчинності – об'єм осаду на 1 грам казеїну, см ³	0,19	0,21	0,20
Масова частка золи, %	2,4±0,25	2,4±0,25	2,3±0,25
Масова частка жиру, %	1,4±0,05	1,4±0,05	1,4±0,05
Зовнішній вигляд	Сухе пористе зерно	Сухе щільне зерно	
Колір	Однорідний по всій масі, від світло-жовтого до жовтого		
Загальна кількість мікроорганізмів в 1 г казеїну, КУО	1 · 10 ³	2 · 10 ³	2,5 · 10 ³

завислому шарі вища. Під час сушіння у вакуум-сушарці з ІЧ нагрівом найбільша розчинність спостерігається при температурах 80 °С і становить 0,2 см³. Підвищені температури під час цієї сушки призводять до усадки продукту завдяки зміні білків і зниженню розчинності казеїну.

Технологічний процес виробництва казеїну (зразок 4) менш тривалий. Тривалість сквашування знежиреного молока закваскою «Симбітер

концентрований» нижча в порівнянні зі зразком 2 (4-6 годин та 8-10 годин відповідно); скорочена тривалість процесів пресування та сушіння казеїнового зерна до 30 хвилин.

Способи сушіння казеїну незначно впливають на показники якості казеїну. Якість отриманого казеїну (зразок 4), що висушений різними способами, досить висока і відповідає вимогам стандарту.

Список літератури:

1. Богосян М.В. Пищевой и технический казеин: способы использования. *Экономические науки*. 2010. № 3. С. 59–62.
2. «Alfalfa protein concentrate market: Global industry analysis 2013–2017 and Opportunity Assessment», market research report. URL : <https://www.futuremarketinsights.com/reports/alfalfa-protein-concentrate-market>.
3. «Casein», dairy processing. URL : <http://dairyprocessinghandbook.com/chapter/casein>.
4. Информационное республиканское унитарное предприятие «Национальный центр маркетинга и конъюнктуры цен», «Обзор мирового рынка казеина». Минск, 2016. 9 с.
5. Нечаев А.П., Траубенберг С.Е., Кочеткова А.А. и др. Пищевая химия. Санкт-Петербург : ГИОРД, 2007. 640 с.
6. Горина Т.А. Коагулянты и сычужные ферменты для сыроделия. *Сыроделие и маслоделие*. 2010. № 1. С. 22–23.
7. Shantanu Agarwal, Роберт LW Beausire, Соня Патель, Хасмух Патель. Инновационное использование концентратов молочных белков в разработке продуктов. *Food Science*. 2015. С. 23–29.
8. Gürkan Uçar. Abdullah Badem Production of caseins and their usages. *Journal of Food Science and Nutrition*. Volume 2; Issue 1. 2017. P. 04–09.
9. Молочников В.В., Орлова Т.А., Остроухова Л.А. Концентрат натурального казеїну. *Молочна промисловість*. 2008. № 12. 57 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ И СУШКИ ПИЩЕВОГО КАЗЕИНА

Обоснована возможность получения сухого казеина с высокими показателями качества во взвешенном слое, в неподвижном слое и под вакуумом с инфракрасным (ИК) нагревом. Получены образцы казеинового зерна, белки которых выделены кислотной и сычужной коагуляцией. Наименьшая продолжительность сушки наблюдалась в образцах, полученных кислотной коагуляцией как во взвешенном, так и в неподвижном слое, по сравнению с образцом, полученным сычужной коагуляцией. В образцах, полученных способом кислотной коагуляции, наблюдалась самая высокая растворимость (индекс растворимости 0,19-0,22) и меньшая зольность (2,2-2,4%), в образце, полученном способом сычужной коагуляции, индекс растворимости – 0,32, зольность – 3,1%. Растворимость с повышением температуры сушильного агента увеличивается как во взвешенном, так и в неподвижном слое, при этом растворимость во взвешенном слое выше. При сушке в вакуум-сушилке с ИК нагревом наибольшая растворимость наблюдается при температурах 80 °С и составляет 0,2 см³. Повышенные температуры при этой сушке приводят к снижению растворимости казеина. Продолжительность сквашивания обезжиренного молока закваской «Симбітер концентрований» меньше по сравнению с образцом, заквашенным комбинацией заквасок FD DVS CHN-19 + FD DVS Flora Danica (4-6 часов и 8-10 часов соответственно), сокращена продолжительность процессов пресования и сушки казеинового зерна до 30 минут. Качество полученного казеина, который высушен различными способами, достаточно высокое и соответствует требованиям стандарта.

Ключевые слова: пищевой казеин, технология, коагуляция, закваска, способы сушки.

RESEARCH OF METHODS OF OBTAINING AND DRYING FOOD CASEIN

The possibility of obtaining dry casein with good qualitative parameters by the method of drying in an weighted layer, in a fixed layer and under vacuum with IR heating is substantiated. Samples of casein grains were obtained, the proteins of which were isolated by acid and sichug coagulation. The smallest drying time was observed in specimens obtained by acid coagulation both in the weighted and in the fixed layer, as compared to the sample obtained by pith coagulation. In the samples obtained by the method of acid coagulation, the highest solubility (the index of solubility 0,19-0,22) and the lower ash content (2,2-2,4%) were observed in the sample obtained by the method of sichug coagulation – the solubility index 0,32, ash content – 3,1%. The solubility with increasing temperature of the drying agent increases both in the weighted and in the fixed layer, while the solubility in the weighted layer is higher. When drying in a vacuum dryer with infrared heat, the highest solubility is observed at temperatures of 80 °C and is 0,2 cm³. The elevated temperatures during this drying process lead to a decrease in the casein solubility. The duration of the fermentation of skimmed milk by the “Simbiter Concentrated” is lower in comparison with the sample, of the fermentation of FD DVS CHN-19 + FD DVS Flora Danica (4-6 hours and 8-10 hours respectively), and the reduced duration of pressing and drying of casein grain to 30 minutes. The quality of the casein, dried in various ways, is quite high and meets the requirements of the standard.

Key words: food casein, technology, coagulation, lower, ways of drying.

ТРАНСПОРТ

УДК 378, 517.3

Завальнюк І.П.

Херсонська державна морська академія

Нестеренко В.Б.

Херсонська державна морська академія

Завальнюк О.П.

Херсонська державна морська академія

АНАЛІЗ ВИКОРИСТОВУВАНИХ МЕТОДІВ НАБЛИЖЕНИХ РОЗРАХУНКІВ ПІД ЧАС ФОРМУВАННЯ СФЕРИ КОМПЕТЕНТНОСТІ СУДНОВОДІЯ

У статті висвітлено основну проблему побудови дисципліни «Теорія та будова судна» з погляду прикладного характеру та відповідності сучасним світовим тенденціям неперервного професійного розвитку морського фахівця. У зв'язку із цим взято за приклад та проведено аналіз використовуваних методів наближених розрахунків під час формування сфери компетентності судноводія. Акцентовано увагу на єдиному практичному стрижні побудови зазначеної дисципліни – вантажному плані судна, який у майбутній професійній діяльності виконуватиметься судноводієм. Приділено значну увагу порівнянню двох методів – трапеції та Сімпсона – за такими критеріями, як швидкість, зручність, точність, зрозумілість і доступність для курсантів. Для оцінювання точності розрахунків за порівнювальними методами розглянуто обчислення площі криволінійної фігури, обмеженої кривою діаграми статичної остійності, побудованої під час складання вантажного плану для реального суховантажного судна. Опрацювання експериментальних даних проведено у програмі Mathcad.

Ключові слова: наближені розрахунки, компетентність, судноводій, статика судна, остійність, діаграма статичної остійності.

Постановка проблеми. Компетентнісний підхід до підготовки фахівців морської галузі, зокрема судноводіїв, уже декілька років є провідним напрямом у навчальному процесі Херсонської державної морської академії.

Бакалавр судноводіння – це фахівець, який, згідно з вимогами Міжнародної конвенції ПДНВ [1], здатний виконувати низку важливих функцій, серед яких слід відзначити: планування й забезпечення завантаження, розміщення, кріплення та розвантаження вантажів, а також поводження з ними під час рейсу; управління операціями судна та піклування про людей на судні на рівні експлуатації та управління, включаючи вирішення завдань, які виникають під час аварійних ситуацій, пов'язаних з остійністю та міцністю судна.

В освітній програмі підготовки судноводія передбачений класичний навчальний курс «Теорія та будова судна», який є базовим і покликаний забезпечити судноводія знаннями, вміннями

і навичками контролювати остійність та міцність судна під час його експлуатації, забезпечуючи плавання судна в різних умовах.

Відповідно до [2], «компетентність – динамічна комбінація знань, умінь і практичних навичок, способів мислення, професійних, світоглядних і громадянських якостей, морально-етичних цінностей, яка визначає здатність особи успішно здійснювати професійну та подальшу навчальну діяльність і є результатом навчання на певному рівні вищої освіти». Спеціальні (фахові, предметні) компетентності, згідно з [3], – це «компетентності, що залежать від предметної сфери та є важливими для успішної професійної діяльності за певною спеціальністю».

До сфер компетентності судноводія, відповідно до [1; 4–5], слід віднести «планування й забезпечення завантаження, розміщення, кріплення і розвантаження вантажів, а також поводження з ними під час рейсу» та «контроль над посадкою, остійністю і напруженнями в корпусі» (2.1 Plan and ensure safe loading, stowage, securing, care during

voyage and unloading of cargoes. 3.1 Control trim, stability and stress).

Таким чином, загальною оцінкою підготовки фахівця морської галузі стає компетентність, яку курсант має продемонструвати після закінчення зазначеного вищенавчального курсу. Спеціальними компетентностями, які опановуються у дисципліні «Теорія та будова судна», є:

- планування й забезпечення завантаження, розміщення, кріплення і розвантаження вантажів, а також збереження їх під час рейсу;
- оцінка виявлених дефектів і пошкоджень у вантажних приміщеннях, на люкових кришках і в баластних танках та прийняття відповідних рішень;
- контроль над посадкою, остійністю і напруженнями в корпусі судна;
- нагляд за завантаженням, розміщенням, кріпленням і розвантаженням вантажів, а також збереження їх під час рейсу;
- перевірка і повідомлення про дефекти та ушкодження вантажних приміщень, люкових закриттів і баластних танків;
- підтримання судна у морехідному стані.

Зважаючи на даний перелік спеціальних компетентностей судноводія, досить актуальною для викладача спеціального морського навчального закладу є проблема побудови дисципліни «Теорія та будова судна» так, щоб курс носив більше прикладний характер, аніж теоретичний, відповідав світовим тенденціям неперервного професійного розвитку морського фахівця, а саме Continuing Professional Development (CPD) [6], та мав єдиний практичний і прикладний стрижень побудови, яким у даному разі виступає вантажний план судна.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підготовка бакалаврів із галузі знань 27 «Транспорт» спеціальності 271 «Річковий та морський транспорт» спеціалізації «Судноводіння» з дисципліни «Теорія та будова судна» тісно пов'язана з проведенням розрахунків зі статички судна щодо визначення площ, обмежених кривими лініями, – перетинів корпусу судна, областей, лімітованих кривою діаграми статичної остійності, а також об'ємів, обмежених криволінійними поверхнями, – об'ємної водотоннажності, об'ємів, занурених у воду, тощо.

Ще в минулому столітті класичний курс теорії та будови судна зазвичай ґрунтувався на фундаментальних працях відомих морських фахівців, таких як А.М. Крилов, В.Г. Сизов, Б.В. Бекенський, О.І. Максимаджи та ін. Курсанти спеціальних морських навчальних закладів отримували добру ґрунтовну підготовку, але здебільшого наявні теоретичні знання застосовувалися ними на практиці невпевнено, з труднощами.

Так, автори типових спеціалізованих навчальних посібників рекомендують для виконання даних розрахунків застосовувати такі методи наближеного

інтегрування, як правила трапецій та Чебишева [7–9]. Однак у закордонній практиці, крім вищезгаданих методів, пропонується використання таких правил чисельного інтегрування, як правила Сімпсона [10].

Постановка завдання. Власний викладацький досвід свідчить про недостатній рівень математичної підготовки сучасних курсантів, тому метою статті є порівняльний аналіз двох розповсюджених методів наближених розрахунків – трапецій та Сімпсона – за такими критеріями, як швидкість, зручність, точність, зрозумілість і доступність для курсантів морських навчальних закладів під час формування сфери компетентності судноводія.

Виклад основного матеріалу дослідження. Сутність висунутих критеріїв порівняння двох методів полягає у такому:

- «зручність», яку можна оцінити за простотою та легкістю використання методу;
- «швидкість», що оцінюється за кількістю розрахункових ітерацій під час застосування того чи іншого методу;
- «точність», яку можна оцінити за відотною похибкою між значеннями площі, обчисленої за інтегрування функції, отриманої шляхом інтерполяції ступеневим поліномом n -го порядку та площі розрахованої наближеним інтегруванням за розглядуваним методом.

Далі доцільно навести коротку характеристику аналізованих методів. Отже, розглянемо область A , обмежену кривою $y = f(x)$ і віссю x на ділянці $[a, b]$ довжиною L , площу якої можна представити визначним інтегралом $S_A = \int_a^b f(x) dx$. Оскільки аналітичний вираз кривої $y = f(x)$ невідомий, тому необхідно застосувати наближені методи розрахунків.

За методом трапецій (рис. 1) довжина L розбивається на n рівних часток і з точок ділення встановлюються перпендикуляри – ординати, довжина яких $y_0, y_1, y_2, \dots, y_{n-1}, y_n$. Довжина отриманої одиничної ділянки $h = L/n$.

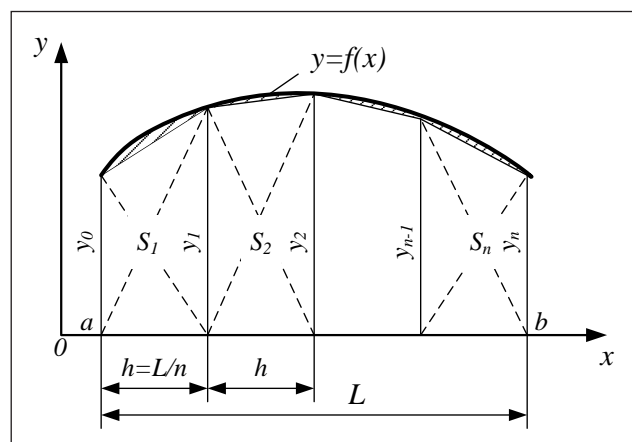


Рис. 1. Графічне представлення ординат під час визначення площі криволінійної фігури за правилом трапецій

Площа фігури, таким чином, розбилася на площини, обмежені з боків ординатами, знизу – відрізком h , а зверху – ділянкою кривої, яку з достатнім ступенем точності можна замінити прямою лінією, що перетворює площини на трапеції [7–9]. Тому площа всієї фігури A дорівнює сумі площ окремих трапецій s_i :

$$S_A = \int_a^b f(x)dx \approx \sum_{i=1}^n s_i = s_1 + s_2 + \dots + s_{n-1} + s_n = h \cdot \left(y_0 + y_1 + y_2 + \dots + y_{n-1} + y_n - \frac{y_0 + y_n}{2} \right) = h \cdot \left(\sum_{i=0}^n y_i - \varepsilon \right) \quad (1)$$

де

$$s_1 = \frac{y_0 + y_1}{2} \cdot h, \quad s_2 = \frac{y_1 + y_2}{2} \cdot h, \dots, \quad s_n = \frac{y_{n-1} + y_n}{2} \cdot h$$

– площі отриманих трапецій;

$$\sum_{i=0}^n y_i = y_0 + y_1 + y_2 + \dots + y_{n-1} + y_n \text{ – сума ординат;}$$

$$\varepsilon = \frac{y_0 + y_n}{2} \text{ – поправка.}$$

Правила Сімпсона [7; 10] базуються на заміні кривої $f(x)$ параболою k -ступеня. У статті судна знайшли застосування два правила Сімпсона (рис. 2). Перше правило полягає у використанні параболи другого ступеня і розділенні ділянки інтегрування на парну кількість рівних інтервалів h . Розрахункова формула для обчислення площі криволінійної фігури має вигляд:

$$S_A = \int_a^b f(x)dx \approx \frac{1}{3} \cdot h \cdot [f(x_0) + 4 \cdot f(x_1) + 2 \cdot f(x_2) + \dots + 2 \cdot f(x_{n-2}) + 4 \cdot f(x_{n-1}) + f(x_n)] = \frac{1}{3} \cdot h \cdot \Sigma_1, \quad (2)$$

де Σ_1 – сума добутоків множників Сімпсона (SM1) на відповідні ординати $y_1, y_2, \dots, y_{n-1}, y_n$; SM1 = (1, 4, 2, ..., 2, 4, 1).

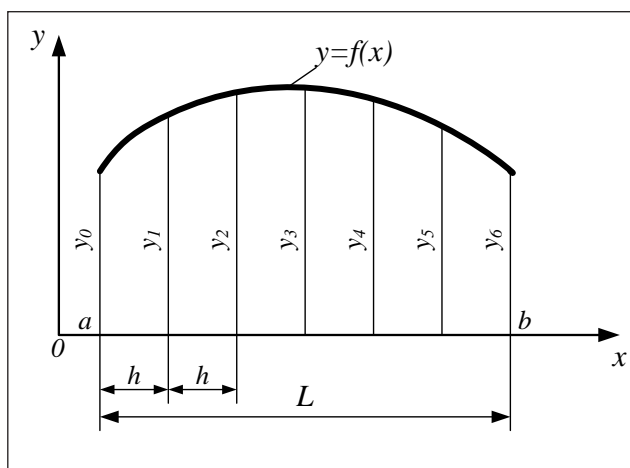


Рис. 2. Графічне представлення даних під час визначення площі криволінійної фігури за правилами Сімпсона (за $n = 6$)

$$S_A = \frac{h}{3} \cdot [y_0 + 4 \cdot y_1 + 2 \cdot y_2 + 4 \cdot y_3 + 2 \cdot y_4 + 4 \cdot y_5 + y_6]$$

(за першим правилом Сімпсона)

або

$$S_A = \frac{3}{8} \cdot h \cdot [y_0 + 3 \cdot y_1 + 3 \cdot y_2 + 2 \cdot y_3 + 3 \cdot y_4 + 3 \cdot y_5 + y_6]$$

(за другим правилом Сімпсона)

Друге правило основане на використанні параболи третього ступеня і розділенні ділянки інтегрування на число n , кратне 3:

$$S_A = \int_a^b f(x)dx \approx \frac{3}{8} \cdot h \cdot [f(x_0) + 3 \cdot f(x_1) + 3 \cdot f(x_2) + 2 \cdot f(x_3) + \dots + 3 \cdot f(x_{n-2}) + 3 \cdot f(x_{n-1}) + f(x_n)] = \frac{3}{8} \cdot h \cdot [y_0 + 3 \cdot y_1 + 3 \cdot y_2 + 2 \cdot y_3 + \dots + 3 \cdot y_{n-2} + 3 \cdot y_{n-1} + y_n] = \frac{3}{8} \cdot h \cdot \Sigma_2, \quad (3)$$

де Σ_2 – сума добутоків множників Сімпсона (SM_2) на відповідні ординати $y_1, y_2, \dots, y_{n-1}, y_n$; $SM_2 = (1, 3, 3, 2, \dots, 3, 3, 1)$.

Отже, порівняння методів за зручністю використання вказує, що застосування методу трапецій потребує уявного розділення криволінійної фігури на певну кількість трапецій і знаходження площі кожної з них. За правилами Сімпсона на противагу правилу трапецій необхідно лише розділення інтервалу інтегрування на парну кількість ділянок (або кратне 3). Тому за критерієм зручності перевагу мають правила Сімпсона.

Що стосується швидкості виконання розрахунків, то, розглянувши приклад поділення L на $n = 6$ рівних часток, можна зробити такі висновки. Під час обчислення площі S_A методом трапецій необхідно здійснити 23 розрахункові ітерації, а саме знайти площі шести трапецій (на визначення кожної припадає три ітерації) та виконати п'ять операцій додавання. Однак під час знаходження площі S_A , наприклад за першим правилом Сімпсона за тих же умов ($n = 6$), необхідно виконати лише 13 розрахункових ітерацій – провести помноження ординат на певні множники Сімпсона і підсумувати їх (11 ітерацій), а потім помножити знайдену суму на довжину інтервалу h , розділене на 3 (дві ітерації). Таким чином, виконання розрахунків із застосуванням правил Сімпсона потребує меншої кількості часу.

Для оцінювання точності розрахунків за порівнювальними методами доцільно розглянути обчислення площі криволінійної фігури, обмеженої кривою діаграми статичної остійності, побудованої під час складання вантажного плану для суховантажу ARMONIA (табл. 1) в умовах переходу Бейрут – Бердянськ із вантажем бавовни в кипах ($m = 4535$ т).

ARMONIA (номер IMO – 9134804) – багатопільове судно [11], яке призначене для перевезення широкого спектру вантажів, а саме: дерева, контейнерів, будівельних матеріалів, важких і навалювальних вантажів тощо. Розглядуваний суховантаж має дедвейт за літньою вантажною

маркою 20 101 т та основні розміри 149×23,1 м (length overall × breadth extreme). Різні умови експлуатації даного типу судна визначають його складну для побудови конструкцію. Конструкцією судна передбачаються потужні крани, які можуть використовуватися одночасно, що дає можливість перевозити вантажі в ті порти, де портові крани відсутні.

Розрахунки площі проводяться для перевірки остійності судна за критеріями остійності ІМО. Дані для побудови діаграми статичної остійності зведено в табл. 1.

Відомо, що для повного визначення стану остійності судна будують криву – діаграму статичної остійності, що виражає залежність плечей статичної остійності від кута крену судна [7–9]. Дана діаграма, побудована для досліджуваного судна ARMONIA, має вигляд кривої з яскраво вираженим максимумом та представлена на рис. 3.

Опрацювання експериментальних даних проводилося в програмі Mathcad. Використання функції інтерполяції та проведення апроксимації ступеневим поліномом 5-го порядку дало змогу отримати регресійну залежність плеча відновлювального моменту від кута крену:

$$GZ(\theta) = 5.585 \cdot \theta^5 - 7.876 \cdot \theta^4 - 4.064 \cdot \theta^3 + 6.035 \cdot \theta^2 + 1.53 \cdot \theta + 8.225 \cdot 10^{-4} \quad (4)$$

Коефіцієнт кореляції становить 0,999.

Точність знаходження площі, обмеженої кривою діаграми статичної остійності, може бути встановлена шляхом порівняння чисельних значень, отриманих під час інтегрування функції $GZ(\theta)$ та обчислення з використанням правил трапецій та Сімпсона. Результати розрахунків зведено в табл. 2.

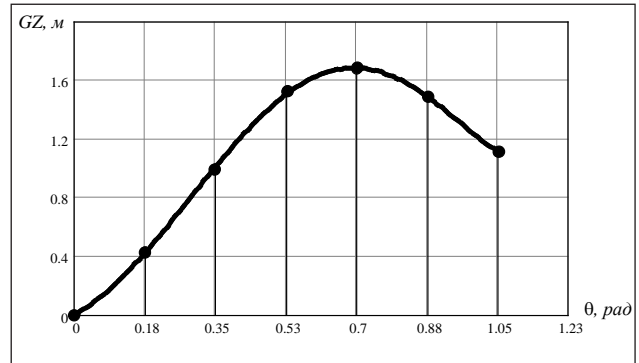


Рис. 3. Діаграма статичної остійності судна ARMONIA, рейс Бейрут – Бердянськ, вантаж – бавовна в кипах

Таблиця 1

Розрахунок плечей статичної та динамічної остійності на відхід

	$\theta, ^\circ$	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
	$\theta, \text{рад}$	0	0.175	0.35	0.525	0.7	0.875	1.05
$\sin\theta$		0	0.17	0.34	0.5	0.64	0.77	0.87
$KG \times \sin\theta$		0	1.5	3.00	4.42	5.66	6.81	7.69
KN		0	1.93	4.00	5.90	7.33	8.3	8.80
$GZ = KN - KG \times \sin\theta$		0	0.43	1.00	1.52	1.67	1.49	1.11
Інтегральна сума		0	0.43	1.86	4.38	7.57	10.73	13.33
Плече динамічної остійності		0	0.036	0.16	0.37	0.64	0.91	1.13

Примітка: θ – кут крену; GZ – плече відновлювального моменту (або плече статичної остійності), м; KN – плече форми, м; $KG \times \sin\theta$ – плече ваги, м; KG – підвищення центру ваги судна над основною площиною, м.

Таблиця 2

Результати порівняльного аналізу точності методів наближених розрахунків

	Інтегрування функції $GZ(\theta)$	Правила трапецій	Правила Сімпсона
Площа криволінійної фігури за $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$	$S_{icm} = \int_0^{1.05} GZ(\theta)d\theta = 1.175$	$S_1 = 1.166$	$S_2 = 1.179$
Абсолютна похибка	–	$\Delta_1 = S_1 - S_{icm} \approx 9 \times 10^{-3}$	$\Delta_2 = S_2 - S_{icm} \approx 4 \times 10^{-3}$
Відносна похибка	–	$\delta_1 = \left(\frac{\Delta_1}{S_{icm}}\right) \cdot 100 = 0.741\%$	$\delta_2 = \left(\frac{\Delta_2}{S_{icm}}\right) \cdot 100 = 0.326\%$

Примітка: за істинне прийнято значення площі, розрахованої інтегруванням $GZ(\theta)$.

Використання правил Сімпсона для визначення площі криволінійної фігури забезпечує більшу точність, ніж правила трапецій, за рівної кількості ординат. У цілому правила Сімпсона під час формування змісту й викладання дисципліни «Теорія та будова судна» можуть бути застосовані для знаходження площ і об'ємів, обмежених відповідно кривими лініями та криволінійними поверхнями, а саме: визначення площ ватерліній та положення центру флотації; розрахунку піднесення центру величини над основною площиною; визначення водотоннажності судна для будь-якого осідання судна; визначення площі фігури, обмеженої кривою діаграми статичної остійності, для встановлення остійності судна за критеріями ІМО та побудови діаграми динамічної остійності.

Висновки. Отримані результати виконаного авторами дослідження повністю розкривають його мету. Так, проведений порівняльний аналіз двох найрозповсюджених методів наближених розрахунків – трапецій та Сімпсона – вказує, що за висунутими критеріями оцінювання правила

Сімпсона є більш простими та зрозумілими для засвоєння курсантами. Крім того, вони є вдвічі точнішими за правила трапецій.

Однозначно під час опанування курсантами дисципліни «Теорія та будова судна» та надалі у морській практиці слід застосовувати як метод наближених розрахунків саме правила Сімпсона, які значно заощаджуватимуть час.

Авторами статті на прикладі вибору оптимального методу наближених розрахунків показано, що під час формування сфери компетентності судноводія у навчальному процесі, а також розв'язання ним типової задачі – складання вантажного плану судна – побудова дисципліни «Теорія та будова судна» має носити виключно прикладний характер. Тобто курсанти мають чітко розуміти й уміти легко та з упевненістю застосовувати отримані теоретичні знання в майбутній професійній діяльності, тому в подальшому авторами вибрано як пріоритетні дослідження у сфері застосування математичних методів обчислення та інформаційних технологій для розв'язання фахових задач судноводія.

Список літератури:

1. International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers / IMO. London : Ashford Press, 2011. 450 p.
2. Про вищу освіту : Закон України від 1 липня 2014 р. № 1556-VII. URL: <http://zakon.rada.gov.ua> (дата звернення: 27.03.2019).
3. Балуба І., Бахрушин В., Бойко Г. Методичні рекомендації щодо розроблення стандартів вищої освіти. Київ : МОН України, 2016. 29 с.
4. Model Course 7.01 Master and Chief Mate / IMO. London : Ashford Press, 2014. 352 p.
5. Model Course 7.03 Officer in charge of a navigational watch / IMO. London : Ashford Press, 2014. 274 p.
6. Continuing Professional Development (CPD). London, 2019. URL: <http://www.nautinst.org> (дата звернення: 27.03.2019).
7. Справочник по теории корабля : в 3-х т. / под ред. Я.И. Войткунского. Ленинград : Судостроение, 1985. Т. 2. 440 с.
8. Горячев А.М., Подругин Е.М. Устройство и основы теории морских судов. Ленинград : Судостроение, 1971. 326 с.
9. Дорогостайский Д.В., Жученко М.М., Мальцев Н.Я. Теория и устройство судна. Ленинград : Судостроение, 1976. 413 с.
10. Derrett D.R. Ship Stability for Masters and Mates. Oxford : Elsevier Butterworth-Heinemann, 2006. 534 p.
11. ARMONIA. Vessel Particulars. London, 2019. URL: <https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:753835/mmsi:636013060/vessel:ARMONIA> (дата звернення: 27.03.2019).

АНАЛИЗ ПРИМЕНЯЕМЫХ МЕТОДОВ ПРИБЛИЖЕННЫХ РАСЧЕТОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СФЕРЫ КОМПЕТЕНТНОСТИ СУДОВОДИТЕЛЯ

В статье освещена основная проблема построения дисциплины «Теория и устройство судна» с точки зрения прикладного характера и соответствия современным мировым тенденциям непрерывного профессионального развития морского специалиста. В связи с этим в качестве примера проведен анализ используемых методов приближенных расчетов при формировании сферы компетентности судоводителя. Акцентируется внимание на единственном практическом стержне построения указанной дисциплины – грузовом плане судна, который в будущей профессиональной деятельности будет выполняться судоводителем. Уделено значительное внимание сравнению двух методов приближенных расчетов – трапеций и Симпсона – по таким критериям, как скорость, удобство, точность, ясность и доступность для курсантов. Для оценки точности расчетов по сравнительным

методам рассмотрены вычисления площади криволинейной фигуры, ограниченной кривой диаграммы статической остойчивости, построенной при составлении грузового плана для реального сухогруза. Обработка экспериментальных данных выполнена в программе Mathcad.

Ключевые слова: приближенные расчеты, компетентность, судоводитель, статика судна, остойчивость, диаграмма статической остойчивости.

THE APPLICABLE METHODS OF APPROXIMATE CALCULATIONS ANALYSIS FOR THE SPHERE NAVIGATOR COMPETENCE FORMATION

The article highlights the basic problem of constructing discipline «Ship's theory and design» in terms of the nature of the application and compliance with modern world trends of continuous professional development of marine specialist. In this regard, an example was taken and an analysis of the methods used for approximate calculations in the formation of the navigator's competence was carried out. The attention is focused on the unique practical basis for the construction of the specified discipline – the ship's cargo plan, which in the future professional activity will be made by the navigator. In the article considerable attention is paid to the comparison of the two methods – trapezes and Simpson according to criteria such as speed, convenience, accuracy, clarity and accessibility for cadets. For estimating the accuracy of calculations by comparative methods, the calculation of the area of the curvilinear figure, limited by the curve of the static stability diagram, constructed during the making of the cargo plan for the real dry cargo ship was considered. Experimental data processing was done in the Mathcad program.

Key words: approximate calculations, competence, navigator, ship's static, stability, static stability diagram.

УДК 628.5

Тирон-Воробьёва Н.Б.

Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія»

Романовская О.Р.

Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія»

Данилян А.Г.

Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія»

БАЛЛАСТНЫЕ ВОДЫ: БЕЗОПАСНОСТЬ ИЛИ УГРОЗА МОРСКИХ СУДОВ

В статье подробно приведены основные аспекты, касающиеся балластировки морских судов, новые требования Международной морской организации (Конвенция) с сопоставлением устаревших требований с новыми, введено понятие «система управления балластными водами» с более ужесточённой аргументацией, касающейся количественного и размерного роста хищных инвазий в морской воде. Предложена схема (метод) очистки балластных вод. Новшество предложенной методики состоит в упразднении из общепринятых схем более дорогих устройств (удешевление), применении реагентов, увеличивающих, помимо срока службы действующей установки, улучшение очистки балластных вод.

Ключевые слова: балластные воды, безопасность, угроза морских судов, инвазии, заборная вода, моллюски.

Постановка проблемы. В прошлом, на протяжении тысячелетий, многочисленные водные виды свободно перемещались по Мировому океану естественным путём – при помощи океанических течений, изменении климатических условий, поверхностных ветров над океаном или просто будучи прикрепленными к плавающим брёвнам и т.п. Единственным барьером на пути их распространения были естественные биологические и природные факторы: температура, солёность воды, суша и природные хищники. Деятельность человека в значительной степени способствовала процессу распространения этих биологических видов. Это происходило с тех пор, как водные растения и животные начали «ездить» на корпусах и оборудовании судов, в особенности с 80-х гг. XIX в. – с тех пор, когда корабли впервые стали использовать в качестве балласта воду (наряду с твёрдым балластом, например, песком или камнями) [1].

Технология перевозки грузов морским транспортом предусматривает наличие на борту судна определённого количества заборной воды (от нескольких сотен литров до более чем ста тысяч тонн, в зависимости от типа судна и его размера). Это необходимо для того, чтобы при отсутствии на борту груза, обеспечить остойчивость судна и его посадку, а также достаточное заглубление винта и руля судна, необходимое для

их эффективного использования. Таким образом, достигается обеспечение управляемости судна и его безопасности. Некоторые типы судов (например, контейнеровозы) требуют постоянного наличия достаточно больших количеств балласта для регулировки посадки судна (крена и дифферента) в процессе рейса. Распределение балласта внутри судна зависит от его конструкции, размеров, а также прочности судна.

Естественно, в заборной воде могут содержаться различные живые существа – от бактерий и мелких водорослей до моллюсков, медуз и даже небольших рыб, то есть всё, что может проникнуть на судно через заборники балластной воды и насосную систему. Кроме того, в заборной воде, используемой в качестве балласта, могут содержаться вредные для человека или природной среды водные организмы. По приблизительным оценкам ежедневно во всём мире может транспортироваться с балластной водой не менее 7000, а то и 10 000 различных видов морских живых существ.

Эти живые существа попадают на борт судна в порту выгрузки, путешествуют вместе с судном за многие тысячи морских миль и сбрасываются за борт в порту погрузки. Как правило, такие организмы сохраняют способность к жизнедеятельности даже после продолжительных морских переходов. Сброс балласта, содержа-

шего чужеродные для этого района организмы, наносит ущерб рыболовству, местным кораллам, аквакультурным фермам и другим сферам деятельности, и даже может стать причиной возникновения инфекций. Следует отметить, что вредными могут являться в данных обстоятельствах не только возбудители инфекций или, например, хищные рыбы, но и вполне мирные в своей нормальной среде обитания существа [2].

Стремительно возрастающая интенсивность морского судоходства за последние 10 лет обострила эту проблему до предела. Сегодня водяной балласт считается главным фактором, ответственным за перемещение ежедневно не менее 7000, а то и 10 000 различных биологических видов морских микробов, растений и животных по всей планете. Это признано одной из четырёх главных угроз для Мирового океана.

Три другие:

- наземные источники загрязнения моря;
- чрезмерный отлов рыбы и других промысловых живых организмов моря;
- физическое загрязнение или разрушение морской среды обитания.

Эти вторжения за последние 50 лет резко увеличились, как по своей частоте и размерам, так и по наносимому ущербу. Это происходит в значительной степени из-за увеличения объёма морских перевозок, количества водяного балласта, перевозимого по Мировому океану судами, а также увеличения скорости судов, что способствует лучшему выживанию транспортируемых водных биологических видов. Суда перевозят свыше 97% всех транспортируемых по миру товаров. Подсчитано, что каждый год примерно 91 000 судов перевозят по миру в качестве балласта около 10 млрд тонн воды. Каждое судно, в зависимости от его размеров и назначения, может нести в себе от нескольких сотен литров до более 130 000 т водяного балласта. В процессе принятия водяного балласта и последующего его сброса в новых природных условиях некоторые водные биологические виды способны основывать новые популяции за пределами их естественного обитания и потенциально угрожать естественным биологическим видам этой территории, а также причинять большой ущерб окружающей среде, создавать угрозу человеку и во многих случаях подрывать экономику.

За последнее десятилетие международное морское сообщество при содействии Международной морской организации (ИМО) предприняло ряд шагов, направленных на преодоление этой

проблемы (что пока оказалось невозможным), или попытки минимизировать возможный риск. Важным фактором, отличающим агрессивные морские биологические виды от всех остальных форм загрязнения Мирового океана, является то, что как только они обосновываются на новом месте, избавиться от этих чужеродных пришельцев уже невозможно. Ещё одним важным фактором выступает то, что сегодня не существует эффективного решения этой проблемы. Однако существуют способы сведения к минимуму указанного риска при помощи лучшего управления водяным балластом [3].

Суда проектируются и строятся для того, чтобы, двигаясь по воде, перевозить грузы. Соответственно, если судно движется без груза, либо выгрузило часть своего груза в одном порту и продолжает маршрут к следующему порту, для того чтобы обеспечить оперативную эффективность и безопасность судну, необходимо брать на борт какой-либо балласт. Это включает поддержание достаточной осадки судна в воде для обеспечения нормальной работы гребного винта и руля, а также избежания оголения носовой части судна и избыточных напряжений и деформаций корпуса судна, особенно в условиях сильного волнения, которое потенциально может стать причиной поломки корпуса и/или потопления судна.

Несмотря на то, что количество водяного балласта, носимого различными судами, очень отличается, принято считать, что объём водяного балласта не имеет значения, т. к. исследования показали, что даже в 1 м³ балластной воды может содержаться до 50 000 разновидностей зоопланктона или 10 млн клеток фитопланктона, которые потенциально могут акклиматизироваться и стать вредными видами в другой части планеты. Следовательно, очевидно, что:

- 1) суда играют важную роль в развитии мировой торговли;
- 2) суда должны использовать водяной балласт для обеспечения эффективной и безопасной работы;
- 3) водяной балласт может быть потенциальным средством перемещения вредных водных организмов и патогенов.

Судовой балласт может быть загрязнен нефтепродуктами, может быть превышена предельно допустимая концентрация общего железа или взвешенных веществ в результате несоблюдения установленных правил балластировки и невыполнения требований к эксплуатации балластных танков. Все это может привести к

таким непоправимым негативным последствиям для морской среды, как биологические инвазии чужеродных типов (поглощающих нативные) организмов и загрязнение экосистем Мирового океана [4].

Транспортировка чужеродных морских организмов на морских судах является не только большой биологической проблемой, но и проблемой безопасности мореплавания, рыболовства и рыбоводства, сельского хозяйства, а, в конечном счете, огромной экономической и экологической проблемой.

Постановка задания. Целью статьи является исследование противоречивости аргументированных примеров положительного/отрицательного воздействия балластной (забортной) воды на морских судах, следствием которых служит достаточно серьёзная сложившаяся проблематика безопасности мореплавания в целом, включающая аспекты экологии, экономики, технологичности, здравоохранения.

Изложение основного материала исследования. Балластные воды – вода со взвешенным в ней органическим и минеральным веществом, принятая на борт судна для контроля дифферента, крена, осадки, остойчивости или напряжений судна.

Конвенцией введено понятие «управление балластными водами», означающее различные процессы (механические, физические, химические, биологические и др.) для удаления, обезвреживания опасных организмов в балластных водах и осадках или предотвращения их приема или сброса; суда, находящиеся в эксплуатации, в обязательном порядке должны оснащаться системами управления балластными водами, осуществляющими их обезвреживание [5]. Положения Конвенции, о которой известила Международная морская организация (ИМО), распространяются на все суда, которые имеют право плавания под флагом стороны, за исключением судов, которые не спроектированы или не построены для перевозки балластных вод, или эксплуатируются в водах под юрисдикцией этой стороны, если не решено иное.

Стандарты управления балластными водами, в частности правило D1, предписывают замену балласта в открытом море над глубинами не менее 200 м и на расстоянии не менее 200 миль от берега с эффективностью замены балластных вод, составляющей не меньше 95% объёма. Смена балласта в открытом море рассматривается как временная мера. Окончательная цель состоит в том, чтобы

создать безопасные, эффективные и экономные системы обеззараживания балластной воды для устранения экологической угрозы. Значения показателей необходимого качества обезвреживания представлены правилом D2, согласно которому после процедур обезвреживания в 1 м³ воды должно содержаться менее 10 жизнеспособных организмов, минимальный диаметр которых равен или превышает 50 мкм, а средняя численность организмов, минимальный диаметр которых находится в интервале 10–50 мкм, должна быть меньше значения 10 жизнеспособных организмов на 1 см³. Кроме того, предъявляются соответствующие требования к численности микроорганизмов бактериальной природы [6].

Надо признать, что повышенные требования к очистке балластных вод ведут к удорожанию морских и речных перевозок, резко увеличивается ставка фрахта перевозимой тонны груза. В связи с этим сегодня остро стоит задача повышения качества очистки и снижения ее стоимости.

Нами предлагается собственная схема очистки балластных вод со значительным снижением затрат на эту операцию (удешевление процесса). Предлагаемая очистка балластных вод по заданной схеме предполагает забор последних производить по приложению D-1. Забор балластной воды по приложению D-1 (200 миль от берега и с глубины 200 м), обеспечивает данной блок-схеме надежную и качественную очистку.

Предлагается заменить используемый жидкий хлор в качестве обеззараживания гипохлоритом, который не имеет вредного воздействия на окружающую среду, животный и водный мир. Для уничтожения моллюсков в балластных танках можно использовать предложенный нами реагент – хелат железа (ион Fe⁺⁺, «упакованный» в оболочку-лиганд из остатков слабых органических кислот) с лигандом формулы (RNON=O), который прошёл испытания по борьбе с моллюсками и показал хорошие результаты, ранее не будучи используемым для очистки балластных вод. Этот препарат был приготовлен целевым назначением для борьбы с вредителями растений (современное высокоэффективное микроудобрение). Хелат железа представляет собой растворимый комплекс железа, натрия и хелатирующего агента, например, такого как этилендиаминтетраацетат (ЭДТА), или других, которые используются, чтобы сделать железо растворимым в воде. Хелат железа применяется в сельском хозяйстве, и железо должно находиться в водорастворимой форме, чтобы быть доступным для растений [7].

Хелаты железа (как железные удобрения) – соединения органических веществ с железом, которые не поглощаются почвой и легко усваиваются растениями. В сельском хозяйстве применяют комплекс железа с диэтилэнтриаминпентауксусной (Fe-ДТПО) и полиэтиленполиамин-полиуксусной (Fe-ПППО) кислотами. Это растворы тёмно-коричневого цвета плотностью 1–1,3 г/см³. В препарате Fe-ДТПО антихлорозина содержится не менее 10%, а в Fe-ПППО – не менее 7% железного комплекса. Железные удобрения используют преимущественно для внекорневой подкормки, поскольку в почве минеральные формы железа быстро связываются в малодоступные для растений соединения. На щелочных почвах хелаты железа образуют устойчивые, но растворимые и усваиваемые растениями соединения. И широкое внесение хелатов в почву ограничивается высокой их стоимостью. Поэтому железные удобрения применяют для внекорневой подкормки – 0,5–1% раствор железного купороса или 0,15–0,5% раствор железного комплекса.

Главное преимущество хелатов перед используемыми ранее формами – это то, что растениями они усваиваются намного эффективнее (90% против обычных 30–40%) и проще, ведь никакие неусвояемые/малоусвояемые соединения в ходе этого процесса не образуются.

Мы акцентируем внимание на высоком преобладании свойств (химический контроль, например, слизи и улиток) хелатов по сравнению с другими более общими ядовитыми веществами, которые используются для борьбы с такими вредителями, так как его токсичность более точна по отношению к моллюскам.

Обработанная реагентами балластная вода поступает через фильтр грубой очистки на

балластный насос, который через регулятор потока подает воду в камеру УФ, где доза УФ-излучения должна быть не менее 300 МДж/см², что обеспечит надёжное обеззараживание воды. Далее вода поступает на саморазгружающийся фильтр со степенью очистки до 50 мкм и удаляется за борт.

Выводы. Фактически сложившаяся ситуация на морских судах при балластировке достаточно плачевная, в связи с постоянным ростом и преобладанием в балластных водах не только хищных инвазий, но и новых опасных нативных видов. Помимо этого, проблема замены балласта в открытом океаническом пространстве не разрешает очевидных предшествующих проблем (сертификация, новые требования к существующим судам, их реконструкции, последующие нововведения).

С другой стороны, без балласта на морских судах не обойтись. Это основной «каркас» для судов – достаточный крен, остойчивость, дифферент. Так сказать, сложившаяся безопасность морских судов в процессе их эксплуатации.

Предлагаемый нами способ (метод очистки) состоит в том, что открываются новые возможности наряду с удешевлением процесса очистки балластных вод посредством упразднения из общепринятых схем дорогостоящих устройств (электромагнитного блока, озоновой составляющей, дорогостоящих фильтров, деаэратора), обеспечивает качественную очистку. Применение предлагаемых реагентов, с одной стороны, улучшает очистку, а, с другой, продлевает срок службы установки за счёт снижения разъедающего воздействие хлора. Саморазгружающийся фильтр постоянно удаляет продукты обеззараживания, чем снижает риск попадания выживших живых существ (инвазий) в обработанную воду, которые со временем погибают в шламовой цистерне.

Список литературы:

1. Конвенция о балластных водах вступила в силу. URL: <http://seafarers.com.ua/ballast-water-management-convention-entered-into-force/13203/>.
2. Балластные воды – серьёзная проблема. URL: <https://maritime-zone.com/news/view/ballastnye-vody-sereznaia-problema>.
3. Системы обработки балластных вод: проблемы и решения. URL: <http://www.morvesti.ru/tems/detail.php?ID=55824>.
4. К вопросу очистки балластных вод от биологических загрязнений на судах рыболовного флота. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21703780>.
5. Система очистки балластных вод. URL: <http://norta.net/ru/catalog/sistema-ochistki-ballastnykh-vod/>.
6. Что делать с балластной конвенцией? URL: <http://mcb.com.ua/news/news.html?1101>.
7. Данилян А.Г., Быковец Н.П., Тирон-Воробьёва Н.П. Новый подход в локализации инвазивных пришельцев в балластных водах морских судов. *Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference*. International Trends in Science and Technology. Warsaw, Poland. 2018. Vol. 2, December 25. С. 10–15.

БАЛАСТНІ ВОДИ: БЕЗПЕКА ЧИ ЗАГРОЗА МОРСЬКИХ СУДЕН

У статті докладно наведено основні аспекти, що стосуються баластування морських суден, нові вимоги Міжнародної морської організації (Конвенція) з порівнянням застарілих вимог із новими, введення поняття «система управління баластними водами» з більш посиленою аргументацією, що стосується кількісного та розмірного зростання хижих інвазій у морській воді. Запропоновано схему (метод) очищення баластових вод. Нововведення запропонованої методики полягає у скасуванні із загальноприйнятих схем більш дорогих пристроїв (здешевлення), застосуванні реагентів, що збільшують, крім терміну служби чинної установки, поліпшення очищення баластових вод.

Ключові слова: баластні води, безпека, загроза морських суден, інвазії, забортна вода, молюски.

BALLAST WATER: SAFETY OR THREAT OF SEA VESSELS

The article details with the main aspects related to the ballasting of vessels; new requirements of the International Maritime Organization (Convention) with comparison of obsolete and new requirements; introduction of the concept of “ballast water management system” with more severe arguments concerning the quantitative and size growth of predatory invasions in sea water. A scheme (method) of ballast water purification is proposed. The innovation of the proposed technique consists of the abolition of the more expensive devices from the standard schemes (cheapening), the using of reagents that increase the lifetime of the existing installation and the improvement of ballast water treatment.

Key words: ballast water, safety, threat of sea vessels, invasions, seawater, mollusks.

БУДІВНИЦТВО

УДК 624.012.45

Азізов Т.Н.

Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини

Миза О.С.

Одеська державна академія будівництва та архітектури

Орлова О.М.

Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини

Нагайчук О.В.

Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини

ГРАНИЦІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДИК НЕЛІНІЙНОГО РОЗРАХУНКУ КОМБІНОВАНИХ БАЛОК І ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ВИКОРИСТАННЯ ТАКИХ БАЛОК У БУДІВНИЦТВІ

Проаналізовано три методики, раніше розроблені авторами, для нелінійного розрахунку кам'яних балок, підсиленіх бічними залізобетонними пластинами. Показано, що точна методика, яка ґрунтується на підході, прийнятому в ДСТУ з розрахунку залізобетонних конструкцій, вимагає великої кількості ітерацій. Крім того, бувають випадки зациклення ітераційного процесу. На прикладі розрахунку конкретної комбінованої балки показані межі застосування трьох методик розрахунку. Показано, що кам'яна частина комбінованої конструкції є елементом, що перешкоджає втраті стійкості плоскої форми згину залізобетонної пластини. Наведено рекомендації щодо використання комбінованих балок в будівництві.

Ключові слова: комбіновані балки, нелінійний розрахунок, діаграма Прандтля, жорсткість, міцність, методика розрахунку.

Аналіз досліджень і постановка завдання. Підсилення кам'яних згинаних елементів за допомогою бічних залізобетонних пластин є досить ефективним методом збільшення жорсткості і несучої здатності кам'яних конструкцій [1; 2]. У роботі [2] показано, що найбільш важливим завданням розрахунку згинаних комбінованих елементів є визначення ступеня участі кам'яного і залізобетонного елементів у сприйнятті навантаження. У цій роботі також показано, що за певного кроку і діаметру анкерів, що зв'язують залізобетонні бічні пластини з кам'яною частиною комбінованої конструкції, цю конструкцію можна вважати монолітною, в перерізі якої розташовано два матеріали з різними характеристиками. Розрахунок монолітної конструкції за наявності в ній двох різних матеріалів з урахуванням нелінійних властивостей матеріалів і утворення тріщин при-

свячені роботи [3; 6]. Ці розрахунки ґрунтуються на підході, прийнятому у нормативних документах [4; 5; 7] під час розрахунку залізобетонних згинальних конструкцій з використанням гіпотези плоских перерізів. Наведені точна методика з використанням повних діаграм матеріалів, наближена та інженерна методики. Однак в цих роботах не наведені недоліки методик і порівняння розрахунків за різними методиками, а також не розглянуті межі застосування кожної з методик.

У зв'язку зі вищевказаним **метою цієї статті** є аналіз переваг і недоліків кожної з методик, порівняння результатів розрахунків за цими методиками і аналіз меж застосування кожної з них, а також пропозиції щодо використання комбінованих конструкцій у будівництві.

Виклад основного матеріалу. 1. Порівняння розрахунків за різними методиками. У роботах [3; 6]

наведені три різні методики розрахунку комбінованих балок. Перша методика – найбільш точна методика, в якій використовуються повні діаграми матеріалів, з яких складена комбінована балка. Друга методика розроблена з метою спрощення точної методики. При цьому прийнятий підхід з використанням діаграми Прандтля для обох матеріалів, з яких складена комбінована балка. Третя методика – інженерна для розрахунку несучої здатності комбінованого елемента. При цьому вважається що напруження в арматурі, розташованій найближче до розтягнутої грані елемента, дорівнює розрахунковому опору. Розрахунок за першою методикою, яка ґрунтується на передумовах [4; 5], є найбільш точною методикою розрахунку міцності і деформативності залізобетонних елементів. Проте, як показали численні розрахунки, ця методика має свої недоліки, пов'язані передусім з численними ітераціями. Досить часто трапляється також зациклення ітераційного процесу. Виходом з такої ситуації є зміна кроку збільшення деформації стиснутої грані бетону або зменшення деформації розтягнутої грані. Однак під час обчислення прогинів слід визначити кривизни в різних точках по довжині балки, причому зробити це в автоматичному режимі. Тоді в програмі слід заздалегідь задати кроки зміни деформацій на стиснутій і розтягнутій гранях елемента. Однак в різних точках по довжині прольоту балки в разі зациклення довелося б по-різному змінювати згадані кроки змін деформацій. Це створює чималі труднощі при вирішенні практичних задач. Розраховувати ж в окремій програмі кривизну в кожній конкретній точці балки, а потім значення цих кривизн підставляти в іншу програму для розрахунку прогинів, є досить незручною і громіздкою процедурою. Для усунення вищенаведених недоліків і з метою спрощення розрахунків і розглянуто другу (наближену) методику визначення жорсткості комбінованого елемента з використанням діаграми Прандтля.

Для перевірки точності і можливості застосування розрахунків за точною і наближеною методиками проведемо порівняння розрахунків конструкції за цими методиками. Нехай є комбінована балка, що складається з газобетонної частини шириною перерізу 200 мм і залізобетонними пластинами з обох сторін товщиною 40 мм (загальна їх товщина умовно дорівнює 80 мм). Висота балки 300 мм, проліт 1 500 мм. Розрахункові опори шарів $f_{ck,prism1}=2.22$ МПа; $f_{ck,prism2}=11$ МПа; Модулі деформацій $E_{b1}=1250$ МПа; $E_{b2}=20000$ МПа; Розрахункові опори на розтягнення $f_{ct1}=0.31$ МПа; $f_{ct2}=1.1$ МПа; $\varepsilon_{bu,1}=0.00317$;

$\varepsilon_{bu,2}=0.00317$; $\varepsilon_{c,1}=0.00317$; $\varepsilon_{c,2}=0.001776$; $\varepsilon_{c,2}=0.00055$ (позначення прийняті за [4; 5]).

Будемо змінювати величину деформацій в крайній стислій фібрі елемента за допомогою ділення максимальної деформації ε_{bu} на коефіцієнт n_ε .

У таблиці 1 наведені дані розрахунку за трьома методиками: за програмою на основі точної методики; за програмою на основі методики з використанням діаграми Прандтля і за програмою на основі інженерної методики. Усі програми розроблені авторами і написані на мові Pascal на основі методик, розроблених в [3; 6]. Величини, що розраховуються: момент, що сприймається перерізом M_{int} (кН·м); кривизна в перерізі $1/\rho$ ($\times 10^{-5}$); напруження в основній арматурі σ_s (МПа); кількість ітерацій j_{max} .

Як видно з таблиці 1, під час прагнення прийняти таку величину ε_b , щоб напруження в арматурі були близькі до розрахункового опору, програма, яка ґрунтується на точній методиці, зациклюється. Дані таблиці свідчать також про хороший збіг результатів за наближеними методиками з точною у відповідних діапазонах. Похибка за різними методиками приведена в таблиці 2 (дані взяті з таблиці 1).

Аналіз таблиць 1 і 2 показує, що під час розрахунку за методикою з використанням діаграми Прандтля похибка визначення кривизни в перерізі не перевищує 7%, причому менша похибка відповідає меншим напруженням в арматурі, велика – великим, тобто напруженням, близьким до граничних. З огляду на те, що під час визначення прогинів за експлуатаційних навантажень напруження в арматурі зазвичай далекі від граничних, то для визначення деформацій комбінованих елементів цілком достатньо використання наближеної методики з використанням діаграми Прандтля, але з урахуванням різних характеристик матеріалів шарів конструкції (кам'яної частини і залізобетонної пластини), як запропоновано авторами цієї статті у роботах [3; 6].

Несучу спроможність перетину, судячи з таблиці 2, значно легше і з достатньою точністю можна визначити за інженерною методикою, наведеною в [6]. Похибка за напружень в арматурі, близьких до розрахункового опору, не перевищує 2%. Навіть під час врахування зміцнення арматури за напружень в ній, що перевищують розрахунковий опір, похибка порівняно з точною методикою не перевищує 5%. Крім того (що має дуже важливе значення), похибка кривизни в перерізі за напружень в арматурі, близьких до розрахунко-

вого опору, визначеної за інженерною методикою, знаходиться в межах 3%. Тобто можна з упевненістю стверджувати, що для визначення несучої спроможності перерізу і кривизни за максимального навантаження можна використовувати інженерну методику, яка, як показано вище, має суттєву перевагу порівняно з точною з точки зору практичної відсутності ітерацій.

2. Застосування розроблених методик під час проектування. Межі застосовності різних методик розрахунку. Вище ми показали, що розроблені наближені методики з одного боку сут-

тєво спрощують розрахунок, з іншого – мають достатню точність, що дозволяє рекомендувати їх в практичному проектуванні. Відзначимо також факт, що тому, що кам'яні балки (стіни, рандбалки тощо) в основному закріплені в перекриттях, а також поперечними стінами, то їх згином в поперечному напрямку і крученням можна нехтувати. Крім того, якщо посилення кам'яної балки (наприклад, стіни) проводиться влаштуванням залізобетонних пластин з двох бічних сторін, то переріз виходить симетричним і ефект поперечного згину і крутіння відсутній взагалі. Тому

Таблиця 1

Дані розрахунків за різними методиками

№	n_c	Точна методика				За діагр. Прандтля			Інженерна методика		
		M_{int}	l/ρ	σ_s	j_{max}	M_{int}	l/ρ	σ_s	M_{int}	l/ρ	σ_s
1	2	15.15	43.27	530.8	190	Не порівнюється, тому що розрахунок за цією методикою передбачає, що напруги в арматурі менше розрахункових опорів			14.40	48.8	530.8
2	2.89	14.22	20.14	506.8	79				13.87	20.53	506.8
3	3	14.14	18.82	505.5	98				13.83	19.01	505.5
4	3.3	13.91	15.2	501.8	150				13.68	14.69	501.8
5	3.4	13.83	14.52	501.2	55				13.65	13.99	501.2
6	3.5 ÷ 3.7	За даних величин n_c програма зациклюється навіть за $j_{max} > 30\,000$ ітерацій									
7	3.8	12.65	12.2	455.5	135	10.74	11.33	411.2	Не порівнюється, тому що інженерна методика передбачає розрахунок за напружень в арматурі, рівних або більших за розрахункові опори		
8	4	12.13	11.61	434.0	116	10.42	10.86	395.5			
9	5	9.88	9.28	346.6	94	9.06	8.94	329.3			
10	6	8.14	7.54	279,0	128	7.88	7.5	276.8			
11	7	6.86	6.26	228.7	95	6.76	6.43	237,3			
12	8	6.00	5.48	200.2	81	5.91	5.62	207.6			

Таблиця 2

Похибка розрахунків за різними методиками
а) порівняння точної методики з інженерною методикою

№ варіанти	σ_s	M_{int} (КНм)			l/ρ (*10 ⁻⁵)		
		точна (Nln)	Інженерна. (Ing)	nln / ing	точна (Nln)	Інженерна. (Ing)	nln / ing
1	530.8	15.15	14.40	1.05	43.27	48.8	0.886
2	506.8	14.23	13.87	1.02	20.14	20.53	0.981
3	505.5	14.14	13.83	1.02	18.82	19.01	0.990
4	501.8	13.91	13.68	1.016	15.20	14.69	1.034
5	501.2	13.83	13.65	1.013	14.52	13.99	1.037

б) порівняння точної методики з методикою на основі діаграми Прандтля

№ варіанти	n_c	σ_s	M_{int} (КН·м)			l/ρ (*10 ⁻⁵)		
			точна (Nln)	За діагр. Прандтля (prandtl)	nln / prandtl	точна (Nln)	За діагр. Прандтля (prandtl)	nln / prandtl
7	3.8	455.5	12.65	10.74	1.17	12.2	11.33	1.076
8	4	434	12.13	10.42	1.16	11.61	10.86	1.069
9	5	346.6	9.88	9.06	1.09	9.28	8.94	1.038
10	6	279,0	8.14	7.88	1.03	7.54	7.5	1.005
11	7	228.7	6.86	6.76	1.01	6.26	6.43	0.973
12	8	200.2	6.00	5.91	1.01	5.48	5.62	0.975

розрахунок таких конструкцій можна проводити за методиками, наведеними вище. Якщо ж комбінована балка має тільки одну бічну підсилюючу пластину, має досить великий проліт і не закріплена від крутіння (що на практиці зустрічається досить рідко), то розрахунок слід проводити з урахуванням крутіння.

У роботах [1; 2] показано, що під час розрахунку спільної роботи бічної залізобетонної пластини з кам'яною частиною за збільшення жорсткості анкерів, що зв'язують кам'яну балку із залізобетонною пластиною, жорсткість комбінованої конструкції прагне до жорсткості монолітної, що складається з двох шарів. Якщо розрахунком за [1; 2] встановлена певна жорсткість анкерів з певним кроком, зменшення якого не тягне за собою збільшення сумарної жорсткості комбінованого елемента, то конструкцію можна вважати монолітною і її деформації і несучу здатність визначати за методиками нелінійного розрахунку, наведеними у табл. 1.

Зазначимо ще один вельми важливий фактор на користь використання бічних залізобетонних пластин в якості підсилення кам'яних згинальних елементів. Як показують розрахунки за наведеними вище методиками, основне навантаження в комбінованому згинальному елементі сприймають залізобетонні пластини. Однак через досить малу ширину перерізу (товщину) пластини, її самостійна робота на згин була б малоімовірною, тому що така балка з вузьким поперечним перерізом за дуже малих навантажень втратила б стійкість і зруйнувалася. У нашому ж випадку кам'яна частина комбінованої конструкції не стільки «підсилює» залізобетонну з точки зору сприйняття частки згинального моменту, скільки є елементом, що перешкоджає втраті стійкості залізобетонної пластини. І теоретичні, і експериментальні дослідження авторів показали, що армована залізобетонна пластина працює як самостійна балка, під час руйнування якої напруження в арматурі досягають межі текучості, а стиснута зона бетону руйнується. Іншими словами, тонка залізобетонна пластина працює як звичайна балка і її можна розраховувати за всіма правилами проектування залізобетонних згинальних елементів без будь-якої корекції на розрахунок стійкості. Таким чином, комбінована конструкція, що складається з односторонньої або двосторонньої залізобетонної пластини і кам'яної конструкції, є досить надійним згинальним елементом.

В коротких комбінованих елементах утворюється практично одна тріщина, яка ділить елемент на два блоки. І такий випадок найбільш часто

зустрічається на практиці. Однак для узагальнення слід розглянути випадок некороткого комбінованого елемента. В цьому випадку комбінована балка під час сприйняття поперечного навантаження буде розділена на кілька блоків, відокремлених між собою нормальними тріщинами (рис. 1).

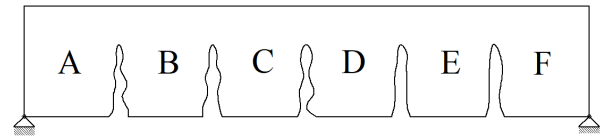


Рис. 1. До розрахунку комбінованих елементів за $L \gg h$

Розрахунок такої конструкції рекомендується проводити в такому порядку.

1. Попередньо для суцільного елемента за методиками [1; 2] визначаємо зусилля в в'язях, які об'єднують кам'яну і залізобетонну частини конструкції.

2. Далі кожен з частин розраховуємо як балку, до якої прикладені зовнішні сили, і зусилля в зв'язках, отримані з рішення попередньої задачі.

3. За відомою методикою розрахунку кам'яних і залізобетонних елементів визначаємо місця утворення нормальних тріщин.

4. У перетинах з тріщинами визначаємо кривизну елемента за однією з методик [3; 6] (див. таблицю 1).

5. Знову розраховуємо комбіновану конструкцію за [1] з тією різницею, що жорсткість кожної балки тепер є ступінчастою (внаслідок наявності тріщин).

6. Маючи зусилля в в'язях в кожному з блоків, відокремлених тріщинами (блоки А ... F на рис. 1), визначаємо еквівалентну жорсткість умовно монолітної конструкції з використанням виразу:

$$J_{ekv} = \frac{(k-1) * EJ_1}{E_2}, \quad (1)$$

де EJ_1 – жорсткість першої (залізобетонної) балки, E_2 – модуль пружності другої (кам'яної) балки; k – коефіцієнт посилення, якій показує, наскільки посилюється балка 1 завдяки «допомозі» балки 2. Він визначається за результатами розрахунків за [1; 2].

Після цього визначаємо еквівалентну ширину підсилюючої балки (даної ділянки) за формулою:

$$b_{ekv} = 12 * J_{ekv} \sqrt[3]{h} \quad (2)$$

Жорсткість умовно суцільної посиленої балки (даної ділянки) можна представити як $EJ = EJ_2 + E_2 * J_{ekv}$.

7. Знаючи жорсткість блоків між тріщинами, визначаємо кривизну за відомою формулою опору

матеріалів як відношення згинального моменту до жорсткості.

8. Маючи набір кривизн для перетинів в тріщинах і між тріщинами, визначаємо прогини балки з використанням інтеграла Мора або правила Верещагіна.

9. Несучу здатність в перерізі з максимальним моментом визначаємо за однією з методик табл. 1.

3. Перемички з легкобетонних блоків, посилені бічними залізобетонними пластинами. Залізобетонні перемички мають досить низькі теплозахисні властивості. Їх використання в будинках, стіни яких влаштовують з легкого бетону (газобетон, пінобетон), не є раціональним. У зв'язку з цим в будинках з легкобетонних блоків передбачають різні конструктивні заходи, включаючи використання лоткових елементів з легкого бетону, в які вкладається арматура і заливається важкий бетон (рис. 2). Як показує практика будівництва, така конструкція перемички має ряд недоліків. По-перше, її теплозахисні властивості все одно залишаються значно нижчими, ніж сама стіна з легкого бетону, бо товщина легкого бетону мала (див. рис. 2); по-друге, захисний шар лоткових елементів відламується під час внутрішнього оздоблення (кріплення карнизів тощо).



Рис. 2. Загальний вигляд влаштування перемички з використанням лоткового блоку

На відміну від використання залізобетонних перемичок, а також замість перемичок, показаних на рис. 2, пропонується використання перемичок з газобетонних або пінобетонних блоків (з тих самих, з яких влаштовують стіни теплого дому), підсилені бічними залізобетонними пластинами.

На рис. 3 показана схема перемички з газобетонних блоків, підсилені бічними залізобетонними пластинами. На цьому рисунку наведено два варіанти влаштування перемички. Перший варіант – перемичка з одного ряду газобетонних блоків з бічними залізобетонними пластинами

з двох сторін. При цьому товщина перемички дорівнює товщині стіни, віконний отвір якої перекривається. За другим варіантом передбачено дві перемички з односторонніми залізобетонними пластинами. При цьому пластини розташовані з зовнішніх сторін перемичок. Перевага другого варіанту перемичок полягає в тому, що влаштування односторонньої бічної пластини не потребує опалубки. Крім того, маса однієї частини перемички мала, що дозволяє її монтувати вручну.

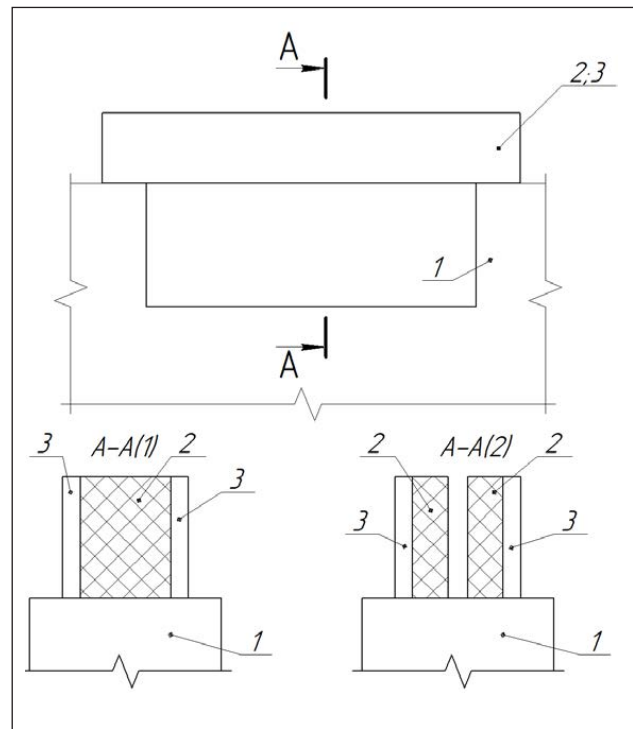


Рис. 3. Схема пропонуваної легкобетонної перемички з бічними залізобетонними пластинами: а) один ряд блоків з двома бічними пластинами; б) два ряди блоків з односторонніми пластинами
1 – вертикальна частина віконного отвору;
2 – газобетонний блок; 3 – залізобетонна пластина

Економічна доцільність використання пропонуваніх перемичок з бічними залізобетонними пластинами полягає в тому, що віконний чи дверний отвір перекривається тим же самим матеріалом, що і стіна. При цьому на бокову поверхню блоків кріпиться сітка, укладаються робочі стрижні арматури і бокова поверхня просто штукатуриться. Потреба в використанні стандартних залізобетонних перемичок відпадає. Влаштування перемички не потребує ані додаткового устаткування, ані додаткових матеріалів, ані додаткових монтажних пристосувань. Монтаж перемички можна робити вручну, тому що її вага мала. Так, маса однієї перемички з односторонньою бічною пластиною (див. рис. 3) прольотом 1.5 м (з блоків

товщиною і висотою 200 мм та товщиною залізо-бетонної пластини 25 мм) складає біля 40 кг.

4. Висновки.

Порівняння результатів розрахунку за точною методикою, яка ґрунтується на підході, прийнятому у ДСТУ з розрахунку залізобетонних конструкцій, з наближеною методикою з використанням діаграми Прандтля показало достатню для практичних розрахунків точність наближеної методики. Інженерна методика розрахунку міцності комбінованих балок може бути використана без застосування комп'ютерної техніки, але

при цьому також має достатню для практичних розрахунків точність. Кам'яна частина комбінованої конструкції є елементом, що перешкоджає втраті стійкості плоскої форми згину залізобетонної пластини. У статті показано, що застосування бічних залізобетонних пластин у згинальних кам'яних елементах може бути зручним і економічним.

В перспективі передбачається розроблення робочої документації з виготовлення комбінованих балок для практичного використання в будівництві.

Список літератури:

1. Азизов Т.Н. К расчету каменных элементов, усиленных односторонней железобетонной обоймой. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Вип. 61. 2016. С. 3–8.
2. Азизов Т.Н., Мыза А.С. Каменные балки, усиленные односторонней железобетонной обоймой. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Вип. 32. 2016. С. 428–435.
3. Азизов Т.Н., Мыза А.С. Учет нелинейных свойств материалов изгибаемых каменных элементов, усиленных железобетонными пластинами. *Sciences of Europe*. 2016. Vol 1. № 8. P. 69–74.
4. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Київ, 2011. 71 с.
5. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. Київ, 2011. 110 с.
6. Azizov T.N., Myza A.S. Engineering method of calculation stone elements, reinforced concrete reinforced side plates. *Sciences of Europe*. 2017. Vol 1. № 12. P. 35–41.
7. Kochkarev, D., Galinska, T., Tkachuk, O. Normal sections calculation of bending reinforced concrete and fiber concrete element. *International Journal of Engineering and Technology*. 2018. Vol. 7(3). P. 176–182.

ГРАНИЦЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИК НЕЛИНЕЙНОГО РАСЧЕТА КОМБИНИРОВАННЫХ БАЛОК И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ТАКИХ БАЛОК В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Проанализированы три методики, ранее разработанные авторами, для нелинейного расчета каменных балок, усиленных боковыми железобетонными пластинами. Показано, что точная методика, основанная на подходе, принятом в ДСТУ по расчету железобетонных конструкций, требует большого количества итераций. Кроме того, бывают случаи заклинивания итерационного процесса. На примере расчета конкретной комбинированной балки показаны границы применения трех методик расчета. Показано, что каменная часть комбинированной конструкции является элементом, препятствующим потере устойчивости плоской формы изгиба железобетонной пластины. Приведены рекомендации по использованию комбинированных балок в строительстве.

Ключевые слова: комбинированные балки, нелинейный расчет, диаграмма Прандтля, жесткость, прочность, методика расчета.

THE BOUNDS OF NON-LINEAR CALCULATION OF THE COMBINED BEAMS TECHNIQUES APPLICATION AND PROPOSALS OF THEIR USAGE IN ENGINEERING

Analyzed three techniques previously developed by the authors, for the nonlinear analysis of stone beams, reinforced concrete side plates. It is shown that the exact method based on the approach adopted in the State Standard for the calculation of reinforced concrete structures, requires a large number of iterations. In addition, there are cases of loops of the iterative process. In a specific example of calculating the combination beam boundary application showing three calculation methods. It is shown that part of the stone composite structure is an element that prevents buckling flat shape bending concrete plate. The recommendations for the use of composite beams in construction.

Key words: combined beams, non-linear calculation, Prandtl diagram, rigidity, strength, calculation method.

ГЕОДЕЗІЯ

УДК 332.3.003.12

Міхно П.Б.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

АПРІОРНЕ РАНЖУВАННЯ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ПОРУШЕНИХ ЗЕМЕЛЬ

Розглянуто порядок експертного оцінювання порушених земель. Встановлено, що планувати раціональне використання порушених земель із застосуванням експертного підходу можна або безпосередньо оцінюючи можливі альтернативні варіанти використання, або оцінюючи зв'язки між факторами проблеми. Запропоновано формувати елементи матриць парних порівнянь як відношення абсолютних оцінок факторів. Запропоновано механізм кількісного оцінювання узгодженості суджень експертів. Для обробки результатів експертного опитування і визначення ступеня узгодженості експертних суджень застосовано метод апріорного ранжування, коефіцієнт конкордації і критерій Пірсона.

Ключові слова: експертні оцінки, апріорне ранжування, ранг, порушені землі, коефіцієнт конкордації, критерій Пірсона.

Постановка проблеми. Одним із результатів промислового освоєння природних та природно-антропогенних ландшафтів є утворення порушених земель. Зокрема, в процесі експлуатації родовищ корисних копалин формуються техногенні форми рельєфу зі штучно зміненою геологічною будовою та гідрологічним режимом території. Після вичерпання корисної промислової функції порушені землі потребують відновлення своїх втрачених властивостей або набуття нових, що забезпечить їх придатність до господарського використання [1, с. 115].

З точки зору територіального планування однією із важливих проблем рекультивациі є вибір найкращого напрямку. Можливі напрями рекультивациі визначаються категоріями земель за цільовим призначенням відповідно до Земельного кодексу України [2, ст. 19]. Вибір напрямку рекультивациі у проектах рекультивациі переважно визначається одним або декількома факторами без урахування можливого впливу інших факторів. Наприклад, фактор правосуб'єктності зумовлює необхідність повернення земель землевласнику після рекультивациі у тому стані та виді використання, що передували порушенню. Управлінський фактор планування землекористувань переважаючого типу на територіях масштабних гірничих розробок визначає вибір напрямку рекультивациі, аналогічного для порушених земель, подібних за характеристиками та зональними умовами. За переважання технологічного фактору напрям рекультивациі визна-

чається особливостями гірничодобувних робіт, формами, параметрами утвореного техногенного рельєфу, складом гірських порід.

Подібний підхід, що передбачає вибір напряму рекультивациі на підставі врахування впливу лише одного фактору, що вважається проектувальником найбільш суттєвим і визначальним за наявних умов, хоча і є простим і зручним для проектування, проте не дозволяє приймати всебічно обґрунтовані рішення. Важливість таких рішень зумовлюється тим, що напрям рекультивациі і вид після-промислового використання порушених земель своєю чергою визначають обсяги та ефективність інших рішень, прийнятих у проекті землеустрою щодо рекультивациі порушених земель. Тому для зменшення ваги суб'єктивного складника та особистих уподобань у рішеннях проектувальника в умовах неповної, неточної і невизначеної інформації доцільно науковими методами оцінювати можливі альтернативи, фактори впливу та критерії оптимальності.

Закони України «Про стратегічну екологічну оцінку» [3, ст. 2] та «Про оцінку впливу на довкілля» [4, ст. 3] передбачають обов'язковість виконання екологічної оцінки документів державного планування, містобудівної, землевпорядної документації (у т. ч. проектів рекультивациі) стосовно можливого впливу на навколишнє середовище від реалізації відповідних проектів і програм. В контексті положень нового екологічного законодавства для оцінювання доцільності різних

видів і напрямів відновлення порушених земель за різних регіональних і локальних умов доцільним є залучення експертів. Таке оцінювання можуть здійснювати експерти, залучені до стратегічної екологічної оцінки проекту. При цьому для прийняття більш обґрунтованого і зваженого рішення доцільно оцінювати взаємодію факторів, що впливають на прийняття рішень, а не лише порівнювати альтернативні варіанти використання. Це дозволить отримувати більш обґрунтовані судження експертів стосовно кожного із можливих видів і напрямів подальшого використання порушених земель.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанню застосування експертних методів аналізу для розв'язання проблем вибору та розподілу ресурсів присвячені наукові дослідження у різних сферах діяльності. При оцінюванні досліджуваної проблеми для прийняття рішення надійні результати надають методи, що базуються на математичній обробці експертних суджень з аналізу проблеми. Це методи експертних оцінок (індивідуальні, колективні), апріорного ранжування, парних порівнянь, аналізу ієрархій, нечіткого логічного висновку та інші, які пропонують різні механізми прийняття рішення на підставі оцінки відносної важливості критеріїв вибору та переваг альтернатив.

Методи експертних оцінок полягають у прийнятті рішень на підставі проведення експертами логічного аналізу проблеми та формалізованої обробки експертних оцінок [5, с. 19].

Ранжування передбачає [6] впорядкування факторів, показників, параметрів за значимістю в розвитку досліджуваного процесу або об'єктів за їх рейтингом і здійснюється шляхом розташування у порядку убывання значимості, внеску або зменшення рейтингу. Значимість або рейтинг кожного фактору оцінюється за величиною рангу. Зазвичай ранжування здійснюють з метою видалення некомпетентних, несуттєвих або неважливих експертних оцінок або зменшення їх впливу у прийнятті рішення.

Метод парних порівнянь часто використовують для підвищення достовірності і точності експертного опитування. В результаті обробки матриць парних порівнянь отримують агреговані оцінки альтернатив. Методами агрегування експертних оцінок [7, с. 86] є методи: сум елементів рядків матриць, середнього геометричного, нормалізації елементів стовпців, комбінаторний метод, власного вектора та інші.

Порівняльна оцінка методів багатокритеріального аналізу за певними ознаками, позитивними

і негативними особливостями виконана у статті [8, с. 117]. Виділено велику суб'єктивність результатів усіх таких методів. У цій роботі також запропоновано алгоритми врахування компетентностей експертів за відповідним коефіцієнтом, агрегування експертних оцінок експертів різних експертних груп та визначення їх узгодженості при розв'язанні завдань раціонального вибору.

Ефективність методів комплексно визначається інтуїцією, обізнаністю експертів щодо сутності досліджуваної проблеми, закономірностей прояву явищ та процесів за різних умов, фаховістю, теоретичним та практичним досвідом роботи у відповідній сфері, відсутністю персональної зацікавленості експертів у альтернативних варіантах, взаємною незалежністю експертів, узгодженістю суджень усіх експертів.

Постановка завдання. Метою статті є розробка алгоритму встановлення узгодженості результатів оцінювання відносної доцільності різних напрямів і видів подальшого використання порушених земель на загальнодержавному і регіональному рівнях.

Виклад основного матеріалу дослідження. Узагальнено застосування експертних методів передбачає змістовне формулювання мети дослідження, кількісного та якісного складу групи експертів (однієї або декількох), складання анкети, проведення опитування, узагальнення, статистичний аналіз і математичну обробку експертних даних.

Методика планування раціонального використання порушених земель [9, с. 10] включає розроблення загальної ієрархічної моделі проблеми (рис. 1) та її аналіз у інваріантній та спеціальній частинах.

Така модель структурно складається з ієрархічних рівнів та зв'язків між ними. Вона містить цілі та розташовані на відповідних рівнях фактори впливу, які зумовлюють прийняття рішень для досягнення цілі. Зв'язки між факторами ієрархічних рівнів відображені лініями. Фактори певного рівня ієрархії r знаходяться під впливом факторів нижчого рівня $r+1$. При цьому фактори, що розташовані на одному рівні, є відносно незалежними.

На кожному рівні r моделі шляхом незалежного анкетування групи експертів виконується порівняльне оцінювання впливу факторів цього рівня на фактори суміжного вищого рівня $r-1$. Перелік питань у анкетах формується з орієнтацією на отримання цільової відповіді анкетування та подальшу статистичну обробку його результа-

тів за алгоритмом методу аналізу ієрархій (МАІ) [10, с. 49].

Очевидно, що результативність такого анкетування залежить від професійного рівня експертів та психологічних аспектів сприйняття ними поставлених в анкетуванні питань [11, с. 115]. У разі значної розбіжності позицій експертів отримані результати анкетування є непридатними для подальшої статистичної обробки.

Збільшення кількості експертів дозволить зменшити вплив помилкових або необгрунтованих експертних суджень на адекватність середніх експертних оцінок реальному стану досліджуваної проблеми.

Незважаючи на широке застосування МАІ та його переваги у вирішенні слабоструктурованих проблем, цей метод має недолік, що полягає у складності для експертів попарного порівняння значної кількості факторів, статистична узгодженість якого встановлюється лише після завершення математичної обробки експертних суджень в МАІ.

Аналіз ієрархії (рис. 1) за алгоритмом МАІ потребує виконання експертами 492 попарних порівнянь, зведених до 16 квадратних обернено симетричних матриць. Така кількість не лише досить обтяжлива для експертів, але і не усуває

можливої наявності похибок несумісності в експертних оцінках. При цьому узгодженість попарних порівнянь за алгоритмом МАІ встановлюється лише після завершення їх аналізу і отримання пріоритетів факторів. Можливий недопустимий ступінь узгодженості в такому разі зведе всю виконану експертами роботу нанівець. Якщо перед експертами формулювати завдання встановлення лише власної ваги (оцінки) кожного фактору, тоді попарні порівняння факторів формуються у матриці як відношення оцінок цих факторів.

Кількість оцінок у такому разі становить 156, що зменшує трудомісткість роботи експертів більше ніж у 3 рази.

Тому зазначений недолік МАІ пропонується усунути шляхом встановлення власної ваги (абсолютної оцінки) кожного фактора і виконання перевірки узгодженості експертних суджень безпосередньо після опитування експертів за допомогою апріорного ранжування (трансформування оцінок у ранги). Ступінь збігу думок експертів та статистичну значущість анкетування доцільно оцінювати за коефіцієнтом конкордації і χ -критерієм Пірсона.

Враховуючи можливу невідповідність кількості оцінюваних факторів і кількості оцінок, кожна оцінка експерта виражається числом нату-

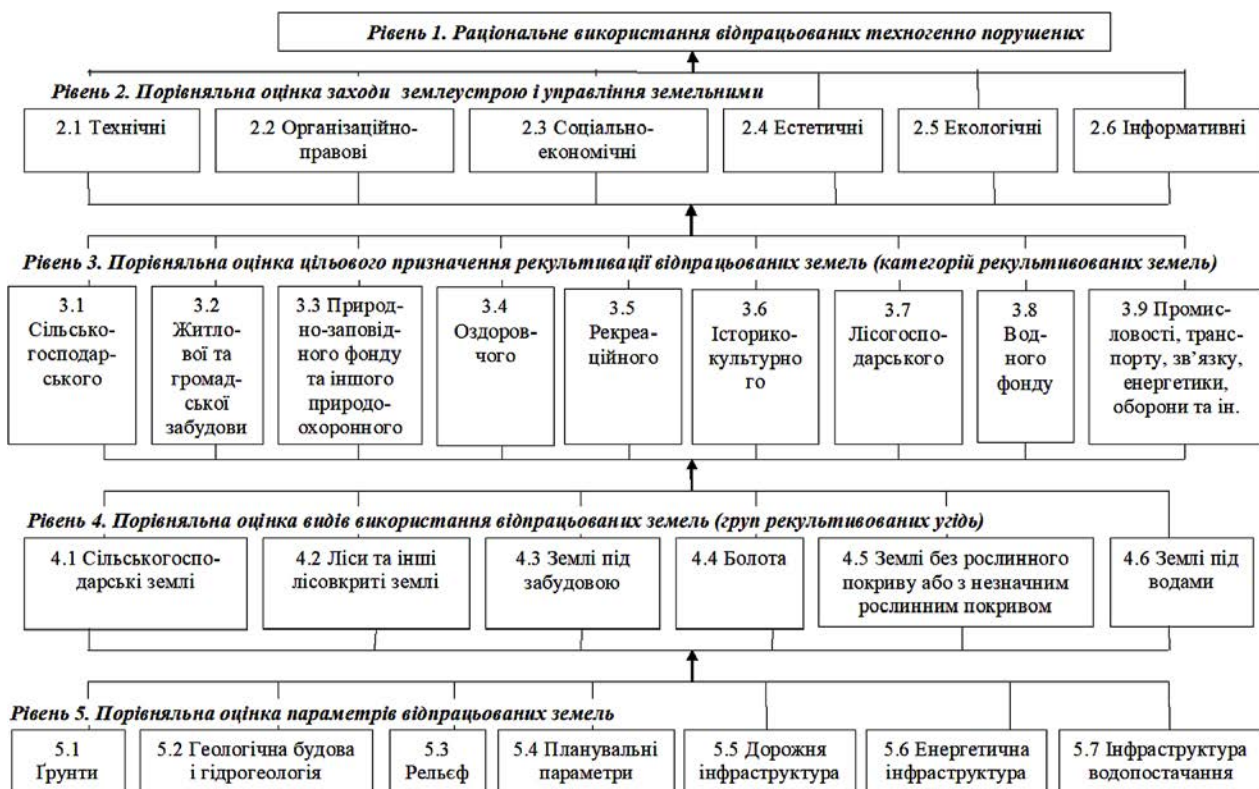


Рис. 1. Загальна ієрархічна модель факторів планування раціонального використання порушених земель

рального ряду $1, \dots, n$. Найвищій оцінці відповідає число 1, найменшій – число n . Якщо всі оцінки різні, то відповідні числа натурального ряду є рангами оцінок експерта. Якщо серед оцінок експерта є однакові, то таким оцінкам призначається однаковий ранг, рівний середньому арифметичному серед відповідних чисел натурального ряду.

Коефіцієнт конкордації визначається за формулою [6]:

$$W = \frac{S}{\frac{1}{12} \cdot l^2 \cdot (n^3 - n) - \frac{1}{12} l \sum_{j=1}^l T_j}, \quad (1)$$

де l – кількість експертів у анкетуванні; n – кількість ранжованих величин; T_j – поправка на співпадіння рангів у j -того експерта.

Поправка на співпадіння рангів визначається за формулою:

$$T_j = \sum_{p=1}^z (t_{jp}^3 - t_{jp}), \quad (2)$$

де z – кількість груп з однаковими рангами у j -того експерта; t_{jp} – кількість факторів у групі p .

Сума квадратів відхилень загальних рангів S обчислюється за формулою:

$$S = \sum_{i=1}^n (\Delta_i)^2, \quad (3)$$

$$\text{де } \Delta_i = \sum_{j=1}^l c_{ij} - R_c, \quad c_{ij}$$

– ранг i -го фактора у j -го експерта; R_c – середній сумарний ранг,

$$R_c = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l c_{ij}}{n}.$$

Статистична значимість отриманого коефіцієнту конкордації перевіряється критерієм Пірсона, який обчислюється за формулою:

$$\chi^2 = \frac{S}{\frac{1}{12} l \cdot n(n+1) - \frac{1}{12} \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^l T_j}. \quad (4)$$

Якщо отримане значення критерію Пірсона перевищує його табличне значення $\chi_{табл.}^2$ для бажаного рівня вірогідності: $\chi^2 \geq \chi_{табл.}^2$, то це свідчить про збіг думок експертів стосовно визначених у анкетуванні питань.

У якості шкали оцінювання застосована 9-ти бальна шкала [10, с. 53]. За такою шкалою фактори оцінюються цілими числами від «0» до «9», що виражають їх пріоритетність. Оцінка «0» позначає відсутність впливу, а оцінки від «1» до «9» – ступені поступового збільшення впливу від слабкої переваги до повної (абсолютної) переваги за вербальною шкалою.

Приклад анкети, за якою експерти оцінюють усі зв'язки ієрархічної моделі (рис. 1), наведено у табл. 1.

Експертами є компетентні спеціалісти у сфері землеустрою, управління земельними ресурсами та містобудування, які мають достатній науково-практичний досвід у розв'язанні питань, пов'язаних із досліджуваною проблемою, компетентність яких сумнівів не викликає і судження яких можна вважати рівнозначними.

Для кожної із груп заходів землеустрою експертами оцінюється її відносна важливість при плануванні освоєння порушених земель.

Більша відносна важливість певної категорії рекультивованих земель, враховуючи потенційну ефективність використання при впровадженні відповідних заходів землеустрою, зумовлює більшу оцінку цієї категорії.

Більшу оцінку під час порівняння груп угідь одержує та група, використання якої у складі певної категорії земель може забезпечити досягнення більшого економічного, екологічного чи соціального ефекту. Окремі угіддя при оцінюванні можна вважати рівнозначними у складі відповідних груп. Враховуючи малу ймовірність і доцільність природоохоронного призначення при відновленні порушених земель у землі без рослинного покриву, землі під забудовою або сільськогосподарські землі (відповідно до складу земель за Земельним кодексом України [2, ст. 44]), такі групи угідь відносно зазначеної категорії земель отримали оцінки «0». Наслідком аналогічних міркувань експертів є оцінки інших факторів на інших рівнях моделі (табл. 1).

Приклад оформлення результатів ранжування експертних оцінок наведено у табл. 2.

Значення критерію Пірсона перевищують його табличні значення (для кількості ступенів свободи $f = k - 1$ (k – кількість ранжованих величин на відповідному ієрархічному рівні) і рівня значущості 5%), а значення коефіцієнту конкордації значно більші ніж 0 і близькі до 1 (табл. 2). Це свідчить про достатньо високий ступінь узгодженості експертних суджень.

Висновки. Узагальнено прийняття рішення являє собою вибір найкращого варіанту рішення із множини можливих альтернатив. У плануванні раціонального використання порушених земель для усунення суб'єктивності особистих уподобань проектувальника вибір раціонального напрямку рекультивації і виду подальшого використання порушених земель доцільно здійснювати на підставі математичної обробки експертних оцінок альтернатив і критеріїв вибору. У зв'язку із цим запропоновано алгоритм експертного оцінювання та узгодження експертних суджень.

Встановлено недолік МАІ, який полягає у складності для експертів попарного порівняння значної кількості факторів, статична узгодженість якого встановлюється лише після завершення математичної обробки експертних суджень за алгоритмом МАІ. Уникнути цього недоліку дозволить формування елементів матриць парних порівнянь як відношень абсолютних оцінок факторів. Встановлено, що таке

формування матриць парних порівнянь відносно традиційного оцінювання факторів ієрархічної моделі дозволить зменшити роботу експертів приблизно у три рази.

Таким чином, застосування апіорного ранжування дає можливість перевіряти узгодженість експертних суджень одразу після анкетування, а не лише після математичної обробки експертних оцінок за МАІ.

Таблиця 1

Бланк анкети експертного опитування

Рівень	Питання	Оцінки факторів								
2	Оцініть групи заходів землеустрою за ступенем відносної важливості для раціонального використання порушених земель	1	-	-	-	-	-	-	-	-
	2.1 Технічні	5	-	-	-	-	-	-	-	-
	2.2 Організаційно-правові	6	-	-	-	-	-	-	-	-
	2.3 Соціально-економічні	4	-	-	-	-	-	-	-	-
	2.4 Естетичні	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	2.5 Екологічні	8	-	-	-	-	-	-	-	-
	2.6 Інформативні	2	-	-	-	-	-	-	-	-
3	Оцініть цільове призначення рекультивациі відносно важливості застосування заходів землеустрою	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	-	-	-
	3.1 Сільськогосподарського призначення	9	9	9	0	6	9	-	-	-
	3.2 Житлової та громадської забудови	3	4	4	0	3	5	-	-	-
	3.3 Природно-заповідного фонду та ін. призначення природоохоронного	3	3	2	6	8	3	-	-	-
	3.4 Оздоровчого призначення	2	2	2	4	4	3	-	-	-
	3.5 Рекреаційного призначення	3	2	3	8	4	3	-	-	-
	3.6 Історико-культурного призначення	2	1	1	3	1	1	-	-	-
	3.7 Лісогосподарського призначення	7	7	8	0	7	6	-	-	-
	3.8 Водного фонду	5	6	6	0	7	6	-	-	-
	3.9 Промисловості, транспорту, зв'язку, енергетики, оборони та ін. призначення	2	4	2	0	5	4	-	-	-
4	Оцініть рекультивовані угіддя за доцільністю відновлення порушених земель із визначеним цільовим призначенням	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9
	4.1 Сільськогосподарські землі	9	2	0	0	0	0	2	2	1
	4.2 Ліси та інші лісовкриті землі	1	0	9	9	8	0	9	0	2
	4.3 Землі під забудовою	0	9	0	2	2	6	1	1	8
	4.4 Болота	0	0	2	0	0	0	2	2	1
	4.5 Землі без рослинного покриву	1	0	0	0	3	4	1	3	1
	4.6 Землі під водами	1	0	7	6	5	0	2	9	4
5	Оцініть параметри порушених земель за ступенем впливу на вибір виду рекультивованих угідь	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	-	-	-
	5.1 Ґрунти	9	8	2	9	4	4	-	-	-
	5.2 Геологічна будова і гідрогеологія	6	7	8	7	3	4	-	-	-
	5.3 Рельєф	5	6	7	3	2	3	-	-	-
	5.4 Планувальні параметри	4	4	3	2	7	3	-	-	-
	5.5 Дорожня інфраструктура	1	3	3	2	6	3	-	-	-
	5.6 Енергетична інфраструктура	1	1	5	1	1	1	-	-	-
	5.7 Інфраструктура водопостачання і водовідведення	4	3	5	4	1	9	-	-	-

**Результати ранжування рекультивованих угідь за доцільністю
відновлення порушених земель у землі водного фонду**

Групи угідь	Експерти										Результати ранжування				
	1		2		3		4		5		$\sum_{j=1}^m c_{ij}$	Δ_i	Δ_i^2	Середня оцінка	Середній ранг
	Експертні оцінки та їх ранги														
	оцінка a_{ij}	ранг c_{ij}	оцінка a_{ij}	ранг c_{ij}	оцінка a_{ij}	ранг c_{ij}	оцінка a_{ij}	ранг c_{ij}	оцінка a_{ij}	ранг c_{ij}					
СгЗем	2	3,5	2	3,5	3	3	1	4,5	3	2,5	17	2	4	2	3,5
ЛЗем	0	–	0	–	0	–	0	–	0	–	–	–	–	0	–
ЗемЗ	1	5	1	5	1	5	1	4,5	1	4,5	24	9	81	1	4,8
Б	2	3,5	2	3,5	2	4	2	3	1	4,5	18,5	3,5	12,25	1,8	3,6
ЗемБРП	3	2	3	2	4	2	3	2	3	2,5	10,5	-4,5	20,25	3,2	2,1
ЗемПВ	9	1	9	1	9	1	9	1	9	1	5	-10	100	9	1
<i>Результати</i>	$R_c = 15, \sum T_j = 30, S = 217,5, W = 0,916, \chi^2 = 18,32, \chi^2_{\text{табл}} = 11,09$														

Примітка: СгЗем – сільськогосподарські землі; ЛЗем – ліси та інші лісовкриті землі; ЗемЗ – землі під забудовою; Б – болота; ЗемБРП – землі без рослинного покриття; ЗемПВ – землі під водами.

Список літератури:

1. Терехов Є.В. Управління цільовим призначенням порушених відкритими гірничими розробками земель в аспекті сталого розвитку техногенних місцевостей. *Economics Bulletin*. 2014. № 1. С. 114–126.
2. Земельний кодекс України. Закон від 25.10.2001 № 2768-III // База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14> (дата звернення 15.01.2019).
3. Закон України «Про стратегічну екологічну оцінку» від 20.03.2018 № 2354-VIII. База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2354-19> (дата звернення 15.01.2019).
4. Закон України «Про оцінку впливу на довкілля» від 23.05.2017 № 2059-VIII // База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19> (дата звернення 15.01.2019).
5. Блюмин С.Л., Шуйкова І.А. Модели и методы принятия решений в условиях неопределенности. Липецк : ЛЭГИ, 2001. 138 с.
6. Тарасов Р.В., Макарова Л.В., Бахтулова К.М. Оценка значимости факторов методом априорного ранжирования. Современные научные исследования и инновации. 2014. № 4. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2014/04/33181> (дата звернення 15.01.2019).
7. Циганок В.В. Визначення ефективності методів агрегації експертних оцінок при використанні парних порівнянь. Реєстрація, зберігання і обробка даних. 2009. Т. 11. № 2. С. 83–89.
8. Калініна І.О., Гожий О.П., Мусенко Г.О. Врахування компетентності експертів у методах багатокритеріального аналізу в задачах раціонального вибору. *Наукові праці. Комп'ютерні технології*. Випуск 179. Том 191. 2012. С. 116–123.
9. Міхно П.Б. Методичні засади планування раціонального використання порушених земель : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.24.04 «Кадастр і моніторинг земель». Київ, 2017. 21 с.
10. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. Москва : Радио и связь, 1993. 320 с.
11. Міхно П.Б. Особливості експертного підходу до проблеми планування раціонального відновлення порушених земель. International Multidisciplinary Conference «Science and Technology of the Present Time: Priority Development Directions of Ukraine and Poland» Wolomin, Republic of Poland. 2018. Vol. 6. Pp. 114–116.

АПРИОРНОЕ РАНЖИРОВАНИЕ ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ

Рассмотрен порядок экспертного оценивания нарушенных земель. Установлено, что планировать рациональное использование нарушенных земель можно или непосредственно оценивая возможные альтернативные варианты использования, или оценивая связи между факторами проблемы. Предложено формировать элементы матриц парных сравнений как отношения абсолютных оценок факторов. Предложен механизм количественной оценки согласованности суждений экспертов. Для обработки результатов экспертного опроса и определения степени согласованности экспертных суждений применены метод априорного ранжирования, коэффициент конкордации и критерий Пирсона.

Ключевые слова: экспертные оценки, априорное ранжирование, ранг, нарушенные земли, коэффициент конкордации, критерий Пирсона.

APRIORI RANKING FOR ASSESSMENT OF DISTURBED LANDS

The grounds and procedure for expert assessment of disturbed lands are considered. It has been established that can be planed rational use of disturbed lands either directly by assessing possible alternative uses, or by assessing the connections between the factors of the problem. It is proposed to form the elements of the matrix of pairwise comparisons as a attitude of absolute assessments of factors. A mechanism for quantifying the degree of consistency of expert judgments is proposed. To process the results of the expert survey and determine the degree of consistency of expert judgments, a priori ranking method, a concordance factor and Pearson's criterion are applied.

Key words: *expert assessments, priori ranking, rank, disturbed lands, concordance factor, Pearson's criterion.*

Поморцева О.Є.

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

ТРИВИМІРНИЙ КАДАСТР НЕРУХОМОСТІ: ПРОБЛЕМИ ТА РІШЕННЯ

У статті описується одна з нагальних для України проблем, а саме створення тривимірного кадастру нерухомості. Ринок нерухомості стає все більш різноманітним за складом, це ускладнює зберігання повної і достовірної інформації, яка описує ці об'єкти. Поділ власності за вертикаллю відзначити на двовимірній карті неможливо, здійснити будь-які види аналізу також. Використання геоінформаційних систем дозволить об'єднати традиційні операції під час роботи з базами даних з перевагами повноцінної візуалізації і просторового аналізу. А моделювання об'єктів нерухомості за допомогою так званих «тіл» дозволить проводити повноцінний аналіз та розрахунки на міцність.

Ключові слова: кадастр нерухомості, геоінформаційна система, атрибутивні дані, тривимірна модель, просторовий аналіз.

Постановка проблеми. Кадастровий облік нерухомості та державна реєстрація прав на нерухоме майно і договорів у будь-якій державі є одними з основних показників сучасного ринку нерухомості і в сукупності представляють собою інститут обліково-реєстраційної системи нерухомості [1].

Розвиток ринку нерухомості неможливий без повної і достовірної інформації, яка описує ці об'єкти. Опис об'єктів нерухомості необхідний для створення ефективної системи обліку нерухомого майна і подальшої його реєстрації. Будь-яка діяльність в сфері ведення кадастру неможлива без використання інформації, яка описує нерухомість і надає їй унікальні характеристики, які дозволяють відрізнити її від аналогічних об'єктів.

Практичну значимість при цьому мають дані, представлені в систематизованому і зручному вигляді для багаторазового використання. З огляду на постійно зростаючі обсяги операцій з нерухомістю необхідний сумісний розвиток системи інформаційного забезпечення кадастрового обліку нерухомості та державної реєстрації прав власників. Поєднання в єдине ціле інституційних, інформаційних, технічних, економічних, правових та організаційних заходів відображає комплексний підхід до реалізації процесів державного кадастрового обліку нерухомості та реєстрації прав. Соціальна та економічна значимість обліково-реєстраційних процесів зумовлена фіскальною, інвентаризаційною та обліковою функціями нерухомості [2].

Однією з найважливіших умов ефективного управління нерухомістю є прийнята в країні система реєстрації нерухомого майна та угод з ним. Діюча система встановлює ступінь захисту прав і законних інтересів громадян і організацій, а також

виконання бюджету держави та його суб'єктів за рахунок оподаткування. Під нерухомістю в економічному вигляді слід розуміти такі об'єкти, які не можуть бути переміщені людиною. До нерухомості за походженням належать земельні ділянки, ділянки надр і все, що міцно пов'язане із землею, тобто об'єкти, переміщення яких без збитку для них неможливе, в тому числі будівлі, споруди, об'єкти незавершеного будівництва. Під об'єктом нерухомості слід розуміти, по-перше, підприємство в цілому як майновий комплекс, а по-друге, земельну ділянку, невіддільною частиною якої можуть бути:

- будівлі (споруди);
- інженерні споруди і мережі;
- елементи господарського, транспортного та інженерного забезпечення;
- водні об'єкти;
- багаторічні насадження.

В даній статті піде мова про перші три об'єкти нерухомості, а саме про ті проблеми, які пов'язані з двовимірним представленням цих об'єктів у всіх наявних на даний момент в Україні реєстрах нерухомості.

Аналіз останніх досліджень. На даний момент в нашій країні основою кадастрової реєстрації є двовимірна проекція. Це викликає масу протиріч і неточностей, особливо останнім часом – в століття нових технологій і інформаційного буму. У двовимірній проекції, яка на даний момент є основою, відсутня підземна інфраструктура, а також конструкції над поверхнею. Прикладами таких об'єктів є залізниці, транспортні системи і телекомунікаційні мережі.

На даний момент об'єкти, розташовані за однією і тією ж адресою, можна ідентифікувати. Якщо

наземне спорудження належить одному власникові, а підземне іншому – юридично складно встановити наявність прав власності на конкретний об'єкт. Поділ власності за вертикаллю зазначити на карті неможливо. Об'ємні зображення об'єктів з технічними вимірами вирішували б такі протиріччя, а тривимірна кадастрова карта дозволила б точно встановити права власника.

У мегаполісах забудова давно ведеться вже не тільки на поверхні, але і під землею. Для великих міст останнім часом популярність набирають підземні споруди як розважального і торговельного спрямування, так і підземні гаражі, стоянки, усілякі санітарно-побутові приміщення. Підземні об'єкти, такі як мережі метрополітену, колектори, тунелі, трубопроводи, є найважливішими елементами інфраструктури міст, проте позначена проблема обмежує можливість реєстрації міськими муніципалітетами прав на них і породжує різні майнові суперечки.

Місцезнаходження земельних ділянок фіксується за допомогою внесення в кадастр двовимірних координат їх меж, що дозволяє врахувати їх площу і конфігурацію, однак відомості про, наприклад, рельєф земельної ділянки не можуть бути відображені та враховані, оскільки вертикальна площина в такому разі практично не враховується. Інакше кажучи, сучасний кадастр є плоским, тобто двовимірним (2D). Водночас об'єкти нерухомості, такі як земельні ділянки, будівлі та споруди, є об'єктами просторовими і мають об'єм, який можна виводити на екран в існуючій двовимірній проекції. Чинний двовимірний кадастр не дозволяє чітко побачити лінії електропередач, телевежі, комунікаційні труби і висотні об'єкти, тобто практично неможливо здійснити облік таких об'єктів нерухомості, як дорожні розв'язки, мости і тунелі, багаторівневі комплекси нестандартної форми, з нависаючим другим, третім поверхом, що потрапляють на чужу територію.

На даний час система державного кадастру і реєстрації об'єктів нерухомості заснована на двовимірному поданні об'єктів, включаючи земельні ділянки, будівлі, споруди. Однак існуючий підхід не описує всіх ситуацій в навколишньому тривимірному світі, що за наявного двовимірного підходу викликає проблеми в постановці на кадастровий облік і реєстрації прав для ряду об'єктів, наприклад [3]:

- Труднощі реєстрації та кадастрового обліку багаторівневих комплексів, що включають об'єкти нерухомості, що належать різним власникам. До однієї земельної ділянки, зареєстрованої за однією

адресою, на різних рівнях по висоті можуть належати об'єкти нерухомості, що належать (або використовуються на інших правових підставах) різними фізичними та юридичними особами. Відсутність точних відомостей за вертикального розподілу може привести до конфліктних ситуацій у визначенні прав та майнових спорів.

- Реєстрація та відображення у кадастрі підземних будівель і споруд, розташованих під об'єктами нерухомості (земельними ділянками, будівлями, спорудами) інших власників.

- Реєстрація та кадастровий облік надземних споруд (переходи, мости, транспортні розв'язки).

- Реєстрація та кадастровий облік підземної та надземної інфраструктури, включаючи інженерно-технічні мережі, комунікації (трубопроводи, кабелі силові та комунікаційні).

При цьому об'єкти можуть перетинати безліч земельних ділянок різних власників. Відсутність відомостей про точне розташування таких об'єктів викликає труднощі, наприклад, у разі розподілу ділянок, під час встановлення плати за користування. Зростаюча складність об'єктів інфраструктури і щільна забудованість територій вимагають належної правової реєстрації. Це може бути забезпечено лише обмежено під час використання існуючого 2D кадастру.

Постановка завдання. Головною умовою для створення і переходу до тривимірного кадастру є завершення робіт зі створення чинного на даний момент двовимірного кадастру, який, як відомо, також знаходиться на етапі реформування, а інформаційна наповненість державного кадастру нерухомості все ще залишається дуже низькою, велика кількість об'єктів нерухомості залишаються неврахованими у відповідності з усіма вимогами законодавства. Дана ситуація спонукає до розвитку систем тривимірного реєстру нерухомості. Актуальність проблеми підтверджується все зростаючою складністю площ забудови, підземної та надземної інфраструктури, збільшенням числа операцій з нерухомістю та виникненням майнових інтересів (і приватних, і державних). Впровадження тривимірного підходу в цій галузі дозволять здійснити тривимірні геоінформаційні системи (ГІС), які роблять тривимірний підхід до кадастрового обліку технологічно здійсненим.

Аналіз та вибір необхідного для вирішення цього завдання програмного забезпечення та типу тривимірної моделі для відображення об'єктів нерухомості та інфраструктури дозволить підійти до розв'язання проблем, пов'язаних з двовимірним представленням об'єктів у реєстрі нерухомості.

Основна частина. Для візуального відображення наявної і запланованої ситуації міського середовища треба використовувати тривимірні моделі, які надають змогу відобразити рельєф, параметри будівель і їхнє взаємне розташування. Для створення моделей необхідно використовувати дані аерофотозйомки або лазерного сканування. Для створення повноцінної тривимірної моделі міста необхідні: цифрова модель рельєфу й електронна карта. Тривимірна модель міста, або сцена, включає модель місцевості і моделі наземних об'єктів. Цифрова модель рельєфу може бути текстурована ортофотозображенням, а для конструювання фотореалістичних тривимірних моделей будівель, споруд, дерев, трубопроводів, огорож необхідна інформація про їх координати, яку можна отримати в тому числі і з аеро- та космічних знімків [4].

У зв'язку з цим постає питання вибору типу тривимірних об'єктів, які будуть використовуватися для моделювання та програмного забезпечення, яке дозволить проводити це моделювання. Оскільки передусім необхідно зрозуміти, яка саме інформація повинна бути закріплена за типовим об'єктом міської інфраструктури, вибір програмного забезпечення залишимо на потім. Інформація, що характеризує будь-який об'єкт міського середовища, або атрибутивна інформація, це перш за все адреса, просторові координати, призначення об'єкта, площа, об'єм. Це та інформація, яку можна закріпити за будь-якою тривимірною формою, яка використовується для тривимірного моделювання в сучасному програмному забезпеченні. Але як бути з тими характеристиками об'єкта міської інфраструктури, які хотілося б отримувати від цієї самої форми, з метою подальшого аналізу? Оскільки в даний час в основному для тривимірного моделювання використовуються так звані твердотільні об'єкти або тіла, поверхні і мережі, то вибір будемо вести в межах

цих трьох математичних апаратів, за допомогою яких і створюються тривимірні форми (рис. 1).

Тривимірні об'єкти, створені на основі мереж і поверхонь хоча і можуть реалістично відображати довкілля та дозволяють створювати сцени з урахуванням текстур і матеріалів, проте не дозволяють проводити повноцінний аналіз та розрахунки на міцність. Тому доцільно використовувати для моделювання об'єктів міської інфраструктури, будівель і споруд саме тіла [5]. Досить велика кількість систем автоматизованого проектування (САПР) можуть впоратися з цим завданням. Зокрема САПР AutoCAD дозволяє створювати реалістичні тривимірні об'єкти на основі твердотільного проектування.

Наступне питання, яке виникає в ході розробки тривимірного реєстру нерухомості, – це вибір програмного забезпечення, за допомогою якого можна буде реалізувати це непросте завдання. В ідеалі було б вкрай зручно використовувати для вирішення цього досить непростого та багатокомпонентного завдання один програмний продукт. Але навряд чи це можливо. Крім безпосередньо реалістичного тривимірного відображення оточуючих нас об'єктів нерухомості, необхідно вирішувати досить великий перелік завдань. Насамперед це ідентифікація точного місця розташування об'єкта – тобто мінімум дві координати – X та Y . Як було сказано вище, двох координат вкрай недостатньо для вирішення всіх тих завдань, які необхідні в даний час. Необхідно враховувати також висоту, тобто координату Z . Виходячи з цього, обійтися без використання геоінформаційної системи неможливо. Одна з найпотужніших і використовуваних геоінформаційних систем (ГІС) в даний час – це ArcGis від американського розробника Esri. Один з модулів даної ГІС – це ArcScene, який якраз і призначений для створення тривимірних сцен. Але проблема полягає в тому, що математичний апарат, який використовується

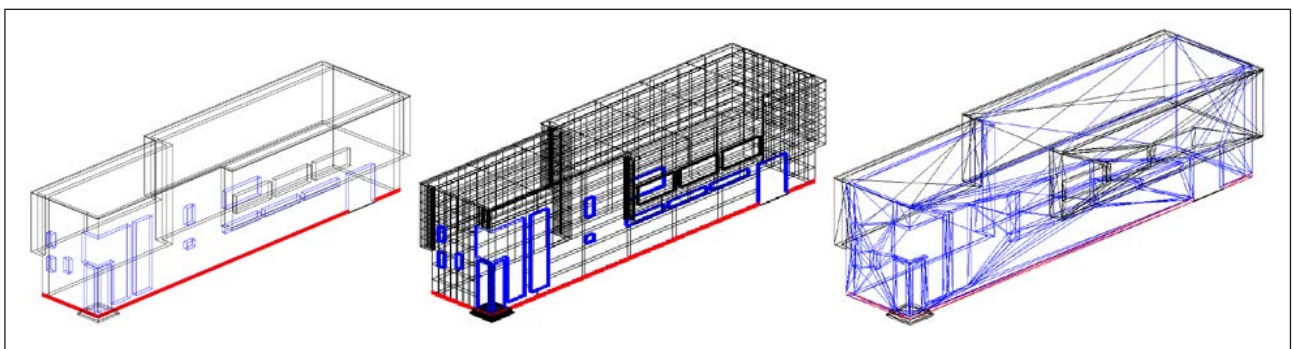


Рис. 1. Подання будівлі за допомогою тіл, поверхонь і мереж

для створення тривимірних об'єктів, працює з поверхнями. Виходить, що реалізувати тривимірний реєстр нерухомості на основі тільки одного програмного продукту не вдасться. Необхідно використовувати зв'язок програмного забезпечення – одне для створення реалістичних тривимірних твердотільних об'єктів нерухомості, інше для зберігання атрибутивної інформації, закріпленої за цими об'єктами і розв'язання різноманітних завдань, пов'язаних з просторовим аналізом і отриманням довідкової документації. Будь-яка ГІС, в тому числі і ArcGIS, в змозі впоратися з цим завданням, тому що дозволяє створювати схему бази даних, в якій ця інформація і буде зберігатися і оброблятися за допомогою запитів (рис. 2).

ArcGIS об'єднує традиційні операції під час роботи з базами даних (запит і статистичний аналіз) з перевагами повноцінної візуалізації і географічного (просторового) аналізу, які надає карта. Ця особливість дає унікальні можливості для застосування ГІС у вирішенні широкого спектру завдань, пов'язаних з аналізом явищ і подій, прогнозуванням їх можливих наслідків, плануванням стратегічних рішень. Необхідність в тривимірних кадастрових картах зумовлена зростаючою складністю споруджуваних об'єктів: багаторівневих комплексів, багатоповерхових будинків. Звідси, як наслідок, на даному етапі розвитку суспільства з'явилася необхідність реєстрації тривимірних прав на нерухомість.

Наприклад, покупець житла зможе викупити не тільки площу, але і вид з вікна квартири, у 3D-реєстр можна внести той об'єм повітря, який відділяють вікна квартири від прилеглого будинку. Забудовник, який планує звести перед будинком власника житла багатоповерховий будинок, повинен буде викупити цей обсяг. Тривимірна модель

дозволить проводити оцінку житла, грунтуючись на ринковій ціні, оскільки зараз об'єкти, що знаходяться поруч, можуть відрізнитися в ціні мало чи не в тисячу разів. У 3D-реєстрі будуть відображені об'ємні моделі нерухомості, що дозволить побачити об'єкти на різних рівнях. Можна буде побачити дорожні розв'язки, тунелі, мости, трубопроводи, лінії метрополітену, інженерно-технічні споруди і комунікації, а також незавершене будівництво і зелені насадження [6]. Природно, дана технологія підвищить якість обліку таких об'єктів, розширить можливості кадастрового обліку, вплине на процеси проектування і планування.

Це дозволить ефективніше приймати управлінські рішення, планувати інвестиції, прискорить процес укладання угод. Найбільш привабливими для інвестування є висотні будівлі комерційного призначення. Використовуючи традиційні методи, сьогодні вже не можна уникнути негативних моментів під час архітектурного планування. Тривимірна модель дозволить за лічені години провести висотну оптимізацію, вирішити питання прокладки додаткових ліній підземних комунікацій, можливість проведення земляних робіт і таким чином надасть можливість всебічної оцінки інвестиційного проекту. Нові методи, що відображають багатопланову модель об'єкта, допоможуть визначити реальну ринкову вартість незавершеного будівництва або виробництва, оцінити будівельну ситуацію, ступінь завершеності будівництва. Визначити варіанти найбільш ефективного використання земельної ділянки, на якій розташований довгобуд. У разі точкової забудови буде не важко вписати майбутній об'єкт в навколишню інфраструктуру, визначити межі нерухомості, що належать іншим особам. Тобто стане

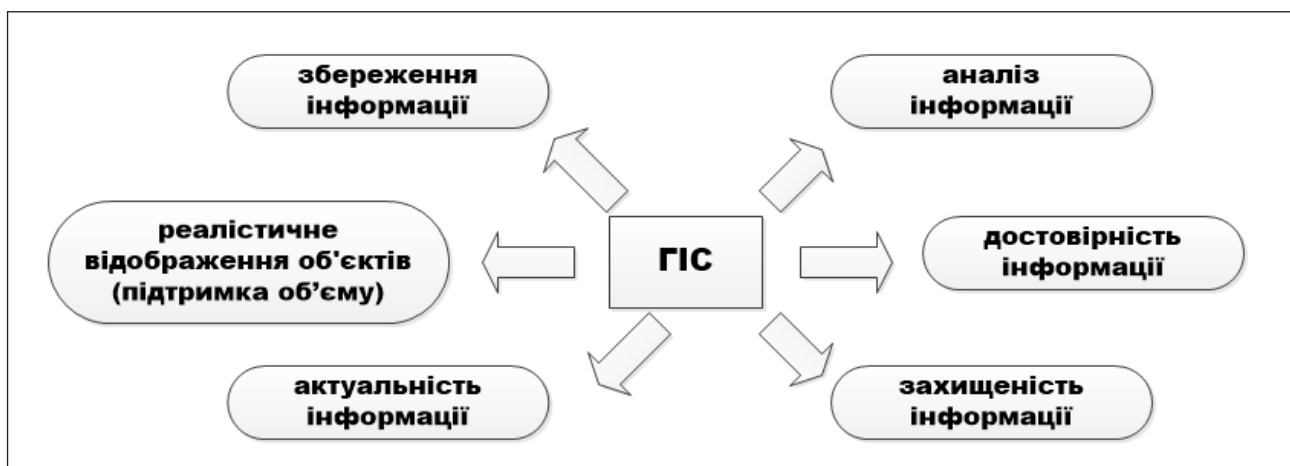


Рис. 2. Схема властивостей ГІС, що використовується для розробки тривимірного кадастру нерухомості

набагато легше виконати проект по реконструкції будівлі, надбудові поверху, а також створенню прибудови до будівлі. Так, в недалекому майбутньому 3D-реєстр стане незамінним інструментом для прийняття бізнес-рішень.

Висновки. Головна мета кадастру полягає в гарантуванні юридичної безпеки нерухомості. Тому кадастр нерухомості повинен гарантувати права власності у всіх вимірах. І тривимірна модель всього комплексу нерухо-

мості сприятиме захисту інтересів всіх сторін цього процесу – бізнесу, державі, громадянам. Тривимірна фотореалістична візуалізація міської інфраструктури за допомогою твердих тіл, виконаних у програмному продукті AutoCAD, і створення 3D-кадастру на базі геоінформаційної системи ArcGis здатні змінити технологію і практику управління містом, міського планування навколишнього середовища, розробки та ведення проектів.

Список літератури:

1. Ігнатенко І.В. Правові засади впровадження тривимірної облікової системи у сфері земельних відносин. *Екологічне право України: система та межі правового регулювання*: матеріали Всеукраїн. наук.-практ. круглого столу. Дніпропетровськ, 2015. С. 142–146.
2. Martin Breunig, Mulhim Al-Doori, Edgar Butwilowski, Paul V. Kuper, Joachim Benner, Karl Heinz Haefele. 3D Geoinformation Science. The Selected Papers of the 3D GeoInfo. 2014. 120 p.
3. Онищенко О. Особливості сучасних земельних відносин в Україні. *Економіка України*. 2001. № 4. С. 56–62.
4. Поморцева О.Є. Використання геоінформаційної системи у проектуванні інфраструктури міста. *Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні методика, інновації та досвід практичного застосування у сфері технічних наук»* м. Люблін, Республіка Польща, 2017. С. 223–226.
5. Поморцева О.Є. Моделювання розташування екологічно небезпечних об'єктів за допомогою геоінформаційних систем. *Вчені записки таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського Серія: Технічні науки*. 2018. Том 29 (68) № 6. С. 222–227.
6. Поморцева О.Є. Використання тривимірного моделювання для покращення благоустрою міста. *Науково-практична конференція, присвячена міжнародному дню ГІС*. Харків, 2018. С. 27–29.

ТРЕХМЕРНЫЙ КАДАСТР НЕДВИЖИМОСТИ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

В статье описывается одна из насущных для Украины проблем, а именно – создание трехмерного кадастра недвижимости. Рынок недвижимости становится все более разнообразен по составу, это усложняет хранение полной и достоверной информации, описывающей эти объекты. Разделение собственности по вертикали отметить на двухмерной карте невозможно, осуществит любые виды анализа также. Использование геоинформационных систем позволит объединить традиционные операции при работе с базами данных с преимуществами полноценной визуализации и пространственного анализа. А моделирование объектов недвижимости с помощью так называемых «тел» позволит проводить полноценный анализ и расчеты на прочность.

Ключевые слова: кадастр недвижимости, геоинформационная система, атрибутивные данные, трехмерная модель, пространственный анализ.

3D CADASTRE REAL ESTATE: PROBLEMS AND SOLUTIONS

The article describes one of the urgent problems for Ukraine. This is a problem creating a three-dimensional real estate cadastre. The real estate market is becoming more diverse in terms of composition, which complicates the storage of complete and reliable information describing the objects. It is impossible to mark the division of property vertically on a two-dimensional map; it is impossible to carry out any kind of analysis. Using geographic information systems will combine traditional operations with databases with the benefits of full-fledged visualization and spatial analysis. Simulation of real estate objects with solid will allow to conduct a full-fledged analysis and calculations of durability.

Key words: real estate cadastre, geographic information system, attribute data, three-dimensional model, spatial analysis.

УДК 625.7:658.14

Ряпухін В.М.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Фоменко Г.Р.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Арсеньєва Н.О.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Синовець О.С.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПІД ЧАС ПАСПОРТИЗАЦІЇ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

Дороги та споруди на них, на які впливають навантаження від автомобілів та природних чинників, з часом зношуються. Виникає потреба встановлення даних про довжину й технічний стан доріг та споруд. Задля цього здійснюються технічний облік доріг та паспортизація. Головна мета паспортизації та технічного обліку автомобільних доріг полягає у збиранні та систематизації даних для раціонального планування та організації робіт з утримання та ремонту доріг, а також управління дорогами, тому використання сучасних геоінформаційних технологій під час паспортизації автомобільних доріг дає можливість отримати об'єктивні дані про стан автомобільних доріг та штучних споруд, що розташовані на них.

Ключові слова: паспортизація та технічний облік автомобільних доріг, геоінформаційні технології, інформаційна база даних, ГІС.

Постановка проблеми. Геоінформаційні технології широко використовуються у багатьох країнах світу для створення географічних інформаційних систем, які дають змогу відтворити значну кількість об'єктів на координато-орієнтованій карті, космічному знімку, аерофотознімку зі змінною масштабу та описом об'єкта, що виводиться в таблицях, графіках, кресленнях, фото та відео. ГІС дає можливість точно встановити місце розташування об'єкта, його розміри, параметри та характеристики, що дає змогу відмовитись від передпроектних пошуків, визначити необхідні обсяги дорожньо-ремонтних робіт. Геоінформаційну систему необхідно зробити базовою для дорожньої галузі, тому потрібно починати впроваджувати її в усіх регіонах України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Впродовж останніх років в Україні розроблено низку нормативно-технічних документів, які встановлюють вимоги щодо виконання робіт з інформаційного забезпечення в дорожній галузі. Стандарти [1–4] декларують вимоги до автоматизованої системи управління дорожньою галуззю та паспортизації автомобільних доріг. Можна відзначити дослідження впровадження ГІС у систему

управління автомобільними дорогами України, здійснені такими науковцями, як Д.О. Павлюк, А.Ю. Тимошук, А.І. Рахуба, Л.Л. Рибіцький, В.В. Сизоненко [5–7]. Їх роботи присвячені проблемам впровадження ГІС в дорожній галузі, вимогам до геоінформаційних технологій щодо вдосконалення процесу управління автомобільними дорогами. У багатьох країнах світу дорожнє господарство як галузь сприймається як природний об'єкт для впровадження геоінформаційних технологій та використання ГІС для супроводу автомобільних доріг на всіх етапах життєвого циклу. Треба відзначити, що ситуація за кордоном відрізняється від вітчизняної кращими умовами. Роботи з інтеграції розрізаних систем почали вестися на початку 2000-х рр. Починаючи стандартизацію дорожніх доріг в окремих країнах, країни Євросоюзу домовилися робити це узгоджено, що привело до старту у 2004 р. проекту EuroRoadS в рамках директиви INSPIRE. Основною метою EuroRoadS стало створення до 2012 р. сумісних між собою та з INSPIRE національних баз даних в EU25+ (теоретично до 40 країн). Саме сумісних баз, тобто мета полягала у створенні не єдиної європейської бази даних, а правил взаємодії

різних баз. Основними задекларованими галузями застосування EuroRoadS є [8; 9]:

- 1) багаторівневе управління експлуатацією автомобільних доріг;
- 2) проектування доріг (стадії ТЕО);
- 3) проектування комплексних транспортних схем міст та регіонів;
- 4) керування транспортними потоками;
- 5) навігаційні автомобільні системи;
- 6) логістика;
- 7) внесок у побудову загальної картографічної основи Європи.

Лідерами в цій непростій справі у світі є Швеція, Норвегія, Фінляндія, Німеччина, Франція, Великобританія, США [8; 9]. У цих країнах існують єдині централізовані бази дорожніх даних та безліч інтегрованих прикладних систем. Україні ж поки ще тільки належить пройти шляхом цих країн.

Постановка завдання. Нині управління мережею автомобільних доріг забезпечують різні інформаційні системи, що функціонують автономно, зокрема СУСП, ЕПАД, АЕСУМ, тому вони частіше не мають зв'язку між собою. Технічні засоби збирання інформації в різних інформаційних системах надають відомості в різних форматах, що викликає деякі складнощі під час їх аналізування в одному програмному комплексі, тому створення єдиної, сучасної, ефективної та працюючої системи управління дорожньою мережею та її контролювання дає можливість підвищити соціально-економічну ефективність автомобільних доріг. Особливу увагу необхідно приділити використанню геоінформаційних технологій під час паспортизації автомобільних доріг.

Виклад основного матеріалу дослідження. Геоінформаційна система автомобільних доріг призначена для технічного обліку та паспортизації, управління експлуатацією та контролювання автомобільних доріг. Сучасні геоінформаційні технології дають можливість створити базу даних картографічної інформації (топографічні та дорожні карти, карти вулиць, кадастрова карта України тощо), користуватись навігацією по карті, оперувати векторними шарами карти, здійснювати просторовий аналіз, адресний пошук, зберігати та відображати комплексну кадастрову інформацію про автодороги (межі земельних ділянок смуг відведення, дорожнє полотно, проїзні частини, укоси тощо), здійснювати автоматизований пошук інформації та детальний перегляд даних про об'єкти дорожньої інфраструктури в режимі суміщення з популярними картографіч-

ними ресурсами, комплексно аналізувати мережу автодоріг та стан дорожнього покриття завдяки включенню до відображення параметрів рівності, міцності, зчеплення проїзної частини, геометричних характеристик автодоріг (кількість смуг для руху, ширина смуги руху, проїзної частини та узбіччя), отримувати оперативну аналітичну та статистичну інформацію щодо дорожньо-транспортних пригод тощо.

Структура геоінформаційної системи дорожньої мережі включає повну картографічну інформацію, кадастрову інформацію про автомобільні дороги, містить паспорт автодороги з можливістю оперативного доступу до сканованих копій документів (державних актів права власності на землю та угод сервітуту, наказів про прийняття автошляхів на баланс, документів про присвоєння дорозі індексу та номера, актів державної комісії) та довідок (довідки про історію будівництва та реконструкцію дороги, довідки про господарське призначення дороги тощо), дані щодо стану дорожнього покриття й транспортних умов (містить технічні характеристики автодороги, зокрема тип покриття, ширину проїзної частини, кількість смуг, наявність розмітки), дані моніторингу та реєстрації дорожньо-транспортних пригод, проведення ремонтів (із зазначенням дати останнього ремонту, відповідальних осіб, фотофіксацією виконаних робіт), інформацію про облік інженерних мереж та споруд, а також управління ними, транспортну інфраструктуру, рекламні носії [9–12].

Ще у 2016 р. було прийнято рішення впровадити в Україні геоінформаційну систему (ГІС), яка є базовою для дорожньої галузі. Нині в дорожній галузі України розроблені всі необхідні стандарти, створена Єдина інформаційна база геоданих автомобільних доріг, розроблена структура збирання, аналізування, зберігання й передачі актуальних даних всім користувачам, підготовлено необхідне програмне забезпечення, програмні та програмно-апаратні комплекси, а головне, успішно завершено експериментальне впровадження [13]. Отже, є всі передумови для впровадження та використання ГІС автомобільних доріг. Розвиток інформаційної бази даних про стан автомобільних доріг дає можливість більш ефективно використовувати ГІС під час паспортизації мережі доріг.

Однак під час створення й розвитку дорожніх ГІС виникають специфічні та дорожні проблеми. Розглянемо деякі з них.

Питання вибору оптимальної моделі даних у дорожньому господарстві стоїть особливо гостро

через складність та різноманіття інформації про дорожні об'єкти. Модель даних ГІС дорожнього господарства повинна забезпечувати підтримку різних типів даних, їх надійне зберігання, сумісність з іншими системами тощо [9–12].

1) Щодо дорожніх ГІС гостро стоїть проблема збирання та оновлення інформації.

2) Дороги та дорожні об'єкти – це дуже складні й дорогі технічні споруди, які вимагають постійного контролювання й обліку їх основних характеристик. Природно, що під час паспортизації, діагностики та здійснення інших робіт накопичується гігантський обсяг різноманітної інформації, яку необхідно систематизувати та аналізувати. Тут велику допомогу повинні надати інформаційні системи, що базуються на сучасних комп'ютерних технологіях.

Нааявність автоматизованої системи збирання та накопичення інформації дає можливість встановити фактичний рівень якості доріг, споруд, дорожнього руху. Система повинна забезпечувати швидке та всебічне збирання інформації про технічний стан доріг та споруд. Система повинна допускати автоматизоване оброблення зібраних даних, накопичення, зберігання й видачу необхідної інформації. В результаті накопичення інформації дорожня служба на різних рівнях повинна мати банк даних про стан доріг та споруд на будь-якій ділянці, а також можливість їх швидкого отримання. Автоматизовані системи збирання та оброблення інформації про стан доріг повинні допускати рішення інженерних та економічних завдань для дорожньої служби, таких як визначення технічного стану (рівня) доріг та споруд на будь-якій ділянці та в будь-який період року, технічний облік та паспортизація доріг, встановлення та прогнозування міжремонтних періодів, оптимальне планування ремонтних робіт, дані про дорожньо-транспортні пригоди, оцінювання безпеки руху на різних ділянках, оцінювання дорожнього руху та пропускної здатності доріг на напружених ділянках. Загалом технічна паспортизація як система складається з двох частин, а саме інформаційно-вимірювальної та інформаційно-пошукової. Один з недоліків більшості систем паспортизації полягає в тому, що вирішується лише друга складова системи, а саме інформаційно-пошукова, а збирання інформації здійснюється традиційними методами. До основних завдань автоматизованої системи технічної паспортизації автомобільних доріг можна віднести обстеження й вимір плану траси, поздовжнього та поперечного профілів, рівності та слизькості

покриття, міцності дорожнього одягу, оцінювання ступеня руйнування покриття, стану земляного полотна та штучних споруд, обстановки дороги та облаштування, вимірювання характеристик транспортного потоку та умов руху, оброблення даних та оцінювання транспортно-експлуатаційного стану доріг і споруд на них, забезпечення галузі вичерпною інформацією про обслуговувані автомобільні дороги з підготовкою довідок на запити, даних щодо статичної звітності, паспортів автомобільних доріг.

Паспортизація та діагностика дорожніх об'єктів завжди були одними з найбільш нагальних проблем. Чинні нормативні документи, технології та дорожні лабораторії істотно застаріли або не відповідають вимогам сучасності. Що й як буде визначатися в результаті паспортизації, точність, достовірність даних, їх оперативна актуалізація складають лише малу частину завдань [7].

Однак існують деякі проблеми інформатизації дорожньо-будівельного комплексу. З основних причин такого стану речей хотілося б відзначити такі:

1) відсутність чіткої централізованої політики та концепції розвитку інформаційних систем (мається на увазі створення єдиного інформаційного простору за рахунок сумісності та взаємодії створюваних об'єктів і процесів);

2) відсутність нормативних та інших документів, що чітко регламентують основні положення створення галузевих інформаційних систем;

3) відсутність розуміння проблем та підтримки розвитку подібних систем в деяких колах управління дорожнім комплексом;

4) недостатній рівень взаємодії дорожників з іншими службами (геодезистами, екологами тощо).

Однак застосування комплексного підходу до впровадження ГІС та сучасних технологій обстеження доріг дасть змогу більш ефективно контролювати мережу автомобільних доріг.

Одним із сучасних методів, який використовується під час паспортизації автомобільних доріг, є впровадження системи глобального позиціонування GPS. GPS є глобальною супутниковою всепогодною системою навігації, що забезпечує можливість цілодобового отримання точних координат і часу. Дані надходять в комп'ютер зі швидкістю 1 раз на секунду. При цьому величина відхилення під час визначення координат кожної наступної точки щодо попередньої не перевищує 1 метра. Таким чином, за даними, отриманими за допомогою GPS, з високою точністю відтворюється реальний маршрут, при цьому зрушення

загалом не перевищує абсолютної похибки. GPS є незамінною системою під час складання електронних схем автомобільних доріг. За допомогою GPS можна наносити на схему автомобільних доріг будь-які ділянки без застосування геодезичних методів, тобто тільки за рахунок проїзду дорогою із системою глобального позиціонування. Програмне забезпечення відображає на екрані комп'ютера місце свого перебування, траєкторію руху, місце розташування дорожніх розв'язок та інженерних споруд. Під час встановлення GPS на пересувну лабораторію робота системи глобального позиціонування проводиться одночасно зі збиранням даних про транспортно-експлуатаційний стан автомобільних доріг. Використання GPS в діагностичній лабораторії підвищує точність «прив'язки» вимірюваних технічних та експлуатаційних параметрів доріг до «місця розташування». Використання GPS є ефективним під час діагностування, інвентаризації та паспортизації доріг, а також під час складання кадастрів земель, займаних дорогами, що зараз є особливо актуальним [14].

Актуальним є використання лазерного сканування споруд та об'єктів. Ця інноваційна технологія дає змогу виміряти, спрогнозувати лінійні об'єкти та споруди чи своєчасно запобігти їх викривленню. Сучасне обладнання й програмне

забезпечення дає змогу не тільки провести точні вимірювання викривлень дорожнього полотна, але й представити їх у трьохвимірній моделі. Лазерне сканування можна застосовувати в процесі паспортизації доріг, оскільки дані, отримані під час сканування наявних об'єктів, поєднуються з тривимірною моделлю проєктованих або модернізованих частин. Отже, виявляються дефекти наявних споруд та об'єктів.

Отже, для забезпечення безвідмовної роботи мережі автомобільних доріг необхідно обов'язково виконувати в повному обсязі паспортизацію та технічний облік мережі автомобільних доріг з використанням ГІС та сучасних технологій пошуку й обстеження доріг.

Висновки. Наявні проблеми впровадження та використання ГІС під час паспортизації автомобільних доріг не завадять подальшому розвитку геоінформаційних технологій в дорожньому комплексі України, оскільки завдяки застосуванню ГІС у дорожній галузі можна буде вирішувати питання оформлення технічних паспортів автомобільних доріг, обліку ДТП та розроблення заходів з безпеки руху, проєктів ремонтних робіт на базі лазерного сканування, землевпорядкування та кадастру доріг, інвентаризації доріг (технічні та кадастрові паспорти), доступу до об'єктивної інформації про стан мережі доріг тощо.

Список літератури:

1. СОУ 42.1-37641918-122:2014 Автомобільні дороги. Вимоги до комплексу робіт з інформаційного забезпечення (зі Зміною № 1) (чинний від 1 лютого 2015 р.). Київ, 2015. 14 с. (Стандарт організації України).
2. СОУ 42.1-37641918-109:2013 Норми часу на супроводження геоінформаційної системи Укравтодору (зі Зміною № 1) (чинний від 5 грудня 2013 р.). Київ, 2016. 34 с. (Стандарт організації України).
3. СОУ 42.1-37641918-063:2016 Геоінформаційна система автомобільних доріг. Вимоги до складу, змісту та застосування (чинний від 1 березня 2016 р.). Київ, 2016. 66 с. (Стандарт організації України).
4. СОУ 42.1-37641918-038:2016 Паспорт автомобільної дороги (чинний від 1 березня 2016 р.). Київ, 2016. 133 с. (Стандарт організації України).
5. Сизоненко В.В., Рибіцький Л.Л. Тенденції розвитку управління дорожнім господарством на основі новітніх світових геоінформаційних технологій. *Дорожня галузь України*. 2008. № 3. С. 62–63.
6. Рибіцький Л.Л., Харченко Г.А. Геоінформаційна система управління автомобільними дорогами України – на допомогу водіям. *Дорожня галузь України*. 2010. № 1. С. 49–52.
7. Тимошук О.Ю., Рахуба О.І. Впровадження геоінформаційних технологій для удосконалення процесу управління автомобільними дорогами. *Автомобільні дороги*. 2015. № 5 (247). С. 44–46.
8. Создание инфраструктуры дорожных данных РФ RusRoadS *Пространственные данные*. 2009. № 3. URL: <http://www.gisa.ru/56676.html>.
9. Дмитриенко В.Е. Геопорталы дорожных организаций в контексте мирового опыта. *САПР и ГИС автомобильных дорог*. 2015. № 2 (5). С. 136–145.
10. Скворцов А.В., Поспелов П.И., Бойков В.Н., Крысин С.П. Геоинформационные системы в дорожном хозяйстве. *Справочная энциклопедия дорожника (СЭД)*. Т. VI. Москва : ФГУП «Информавтодор», 2006. 372 с.
11. Скворцов А.В., Сарычев Д.С. Жизненный цикл проектов автомобильных дорог в контексте информационного моделирования. *САПР и ГИС автомобильных дорог*. 2015. № 1 (4). С. 4–14.
12. Дмитриенко В.Е., Скворцов А.В. Геопортал автомобильных дорог. *САПР и ГИС автомобильных дорог*. 2013. № 1 (1). С. 42–46.

13. Укравтодор на шляху впровадження геоінформаційної системи автомобільних доріг. URL: http://ukravtodor.gov.ua/press/news/ukravtodor_na_shliakhu_vprovadzhennia_heoinformatsiinoi_systemy_avtomobilnykh_dorih.html.

14. Пальчик А.М., Савчук С.О. Використання GPS-технологій при вишукуванні та паспортизації автомобільних доріг. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2013. Вип. 90. С. 12–19.

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПАСПОРТИЗАЦИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Дороги и сооружения на них, на которые влияют нагрузки от автомобилей и природных факторов, со временем изнашиваются. Возникает потребность установления данных о длине и техническом состоянии дорог и сооружений. С этой целью осуществляются технический учет дорог и паспортизация. Главная цель паспортизации и технического учета автомобильных дорог заключается в сборе и систематизации данных для рационального планирования и организации работ по содержанию и ремонту дорог, а также управлению дорогами, поэтому использование современных геоинформационных технологий при паспортизации автомобильных дорог дает возможность получить объективные данные о состоянии автомобильных дорог и искусственных сооружений, расположенных на них.

Ключевые слова: паспортизация и технический учет автомобильных дорог, геоинформационные технологии, информационная база данных, ГИС.

FEATURES OF APPLICATION OF GEOINFORMATION TECHNOLOGIES AT CERTIFICATION OF ROADS

Roads and structure on them, to which loads influence from cars and natural factors, are worn out in due course. There is a need to establish data of length and condition of roads and structures. For this purpose, technical account of roads and certification is implemented. The main purpose of certification and technical accounting of roads is the collection and systematization of data for rational planning and organization of road maintenance and repair works, as well as road management. Therefore, the use of modern geographic information technologies in the certification of roads provides an opportunity to obtain objective data on the state of roads and artificial structures located on them.

Key words: certification and technical accounting of highways, geo-information technologies, information database, GIS.

УДК 378.22

Фоменко Г.Р.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Арсеньєва Н.О.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Саркісян Г.С.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Ємець В.А.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКЕ СТАЖУВАННЯ З ГЕОДЕЗІЇ ТА ЗЕМЛЕУСТРОЮ – ВАЖЛИВА СКЛАДОВА ЧАСТИНА ПІДГОТОВКИ СУЧАСНИХ МАГІСТРІВ

У статті розглядається важливість науково-дослідницького стажування в професійній підготовці магістрів. Магістр повинен мати не тільки фундаментальні знання, а також володіти здатністю до їх реалізації як у науково-дослідницькій, так і в професійній діяльності. Зазначена важливість формування у магістрів дослідницьких компетенцій. У процесі навчання важливим є формування мотивації, що сприяє як самоствердженню, так і досягненню поставленої мети. Науково-дослідницьке стажування передбачає освоєння методів проведення різних етапів науково-дослідницьких робіт, формування навичок і умінь, придбання досвіду самостійної роботи, удосконалення професіоналізму.

Ключові слова: наукові дослідження, стажування, компетентність, мотивація, магістр, навички, уміння.

Постановка проблеми. Підготовка магістрів за спеціальністю «Геодезія та землеустрій» потребує високого рівня їх професійної та науково-дослідної діяльності. Рівень їх підготовки за професійною діяльністю має визначатися не тільки ступенем адаптації у сфері професії, але й готовністю до самостійного розвитку необхідних професійних здобутків, самоосвіти. Опанування магістерської програми спрямоване на розвиток як професійних, так і особистих якостей, дослідницької компетенції у професійній сфері діяльності [1; 2]. Саме дослідницька компетенція як невід’ємна частина професіоналізму дає змогу вирішувати інноваційні задачі. Дослідницька компетенція є складовою частиною у формуванні професійної компетенції [3; 4].

Закріплення та поглиблення знань досягається у процесі проходження магістрантами інноваційно-орієнтованого науково-дослідницького стажування за спеціальністю «Геодезія та землеустрій». Науково-дослідницьке стажування спрямоване на поглиблення теоретичних знань, які отримали студенти, а також придбання практичних навичок. Модернізація сучасної освіти й інноваційні процеси як у науці, так і практиці потребують від випускника принципово нових

компетенцій, які дають йому змогу стати конкурентоздатним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемі підготовки магістрів приділена значна увага. Питаннями модернізації вищої освіти в сучасних умовах займалися В. Андрущенко, О. Глузман, В. Луговий, О. Савченко, О. Сухомлинська, М. Ярмаченко та ін. Керівництво, методологія та планування наукових робіт розглянуті в роботах В. Буряка, Л. Журавської, Н. Калашника, Г. Майбороди та ін. Особливості науково-дослідницьких робіт визначені у роботах О. Микитюк, О. Кравченко, О. Соболева, Т. Койчевої. Питання до науково-дослідної діяльності магістрів розглянуті М. Князян, Л. Голубенко, В. Павловою, В. Ісаченко та ін. Проблеми активізації науково-дослідної діяльності у процесі підготовки магістрів визначені у роботах В. Журавльова, В. Загвязинського, О. Мартиненко, І. Ільсова, Л. Хомич, О. Цокур та ін. Значну роль має відігравати якість підготовки магістрів, що розглянуто Л. Голубенко, А. Кузминським, Л. Кондрашовою, І. Русенак та ін. Важливим у підготовці магістрів є формування професійних компетенцій, що представлено В. Байденко, І. Зимньою, В. Луговим,

А. Хуторським та ін. Питанням підготовки спеціалістів в області геодезії та землепорядкування присвячені роботи І. Дороша, А. Канаша, А. Мартина, А. Третяка та ін. Отже, питанням науково-дослідної підготовки за цією спеціальністю представлена невелика кількість робіт.

Постановка завдання. Мета полягає в визначенні основних напрямів організації і проведення науково-дослідницького стажування магістрів спеціальності «Геодезія і землеустрій».

Виклад основного матеріалу дослідження. Важливою задачею в освіті магістрів є формування дослідницької компетенції як складника в підготовці професіонала. Для досягнення мети і формування умінь магістранти мають володіти знаннями методології наукового дослідження, досвідом діяльності. Дослідницька компетенція магістрантів може вмещувати сукупність знань, умінь, здатність розглядати проблеми і передбачати наукові гіпотези, визначати мету [2; 3; 5]. Такий підхід спрямований на планування діяльності за гіпотезою і метою дослідження, здійснення збору і аналізу отриманої інформації. Це дасть змогу визначити методи організації експериментальних досліджень, їх проведення, якісну обробку та представлення результатів дослідів. На основі цього можна підкреслити, що до основних характеристик дослідницької компетенції магістрантів варто зарахувати сукупність взаємопов'язаних характеристик особистості, здатності його виявлені у вирішенні тієї чи іншої проблеми з позиції наукового підходу: побудова гіпотези, постановка задач згідно з представленою гіпотезою, організація інформаційно-пошукової, дослідно-пошукової діяльності, які підтверджують здатність до науково-професійної діяльності. Водночас дослідницька компетенція є частиною досконалості магістра, мотивації до пізнання способів і шляхів саморозвитку [4; 5].

Формування мотивації магістрів зумовлено особливостями сучасного освітнього процесу, який протікає на фоні активних інновацій як у соціальній, так і в економічній сферах життя суспільства. Це проблема підготовки компетентних, конкурентоздатних фахівців, які мають високу мотивацію, здатних мати особисту відповідальність за виконання поставлених задач [6; 7].

Мотивація науково-дослідницької діяльності являє собою систему факторів, яка включає усі види спонукання: мотиви, потреби, інтереси, прагнення, схильність, мотиваційні установки, які дають змогу забезпечити реалізацію мети цієї діяльності.

Мотивація являє собою динамічний процес психофізіологічного плану і одночасно комплекс факторів, які ініціюють активність магістра, та визначає напрям його діяльності. Під час навчання досягається розвиток інтелекту та бажання само-реалізації [4; 6]. У процесі здійснення діяльності, спрямованої на реалізацію мети, студент відчуває перепони, які потребують їх подолання, і в цій ситуації виникає мотиваційний фактор або необхідність вирішення тієї чи іншої задачі. Наміри і побажання, як мотиваційний стан, періодично змінюють друг друга, реагують на зміни умов їх виконання.

Для мотиваційної сфери особливості велике значення мають стійкість і сила мотивів. Мотивація розрізняється за принципом конкретної діяльності. Наприклад, у рамках навчання у студентів можуть бути як загальні мотиви, так і конкретні, спрямовані на ту чи іншу дисципліну. Щоб діяльність була ефективною, важливо дотримуватись таких умов: велика кількість мотивів у сфері конкретної діяльності, їх розвиток, позитивне ставлення до процесу, стійкість і сила мотиву, визначена послідовність у структурі мотивації.

Навчальна діяльність націлена на трансформацію особистості магістранта та зміну його психології. Якість професійної підготовки магістрів під час науково-дослідницького стажування і становлення його професіоналізму безпосередньо залежить від характеристик його мотивації [5; 6]. До них можна зарахувати пізнавальні, професійні, мотиви творчого досягнення, мотиви особистого престижу, зберігання і підвищення статусу, самореалізації, самоствердження та матеріальні мотиви.

Мотив творчого досягнення є важливим фактором мотивації у магістрантів на шляху до досягнення успішності. Людина потребує досягнень, і виражається це безпосередньо очікуванням успіху. Інші проявлення потреби в досягненнях можна зафіксувати у створенні унікальних приладів, методів та засобів їх створення. Навчальна діяльність містить багато можливостей для магістранта добитися більш високого рівня досягнень [6]. Отже, особистості, які оволоділи розвинутим мотивом творчого досягнення, мають отримати більше задоволення від навчання і докласти ще більше зусиль у процесі професійної науково-дослідницької підготовки.

Необхідно зазначити, що структура і функції науково-дослідницької діяльності визначаються метою підготовки магістрантів. Вони заключаються у поглибленні і розвитку професійних

теоретичних знань, їх використанні на практиці, розвитку у магістрантів навичок організації і проведенні самостійних наукових досліджень, формуванні творчого потенціалу майбутніх дослідників, професіоналів [7].

У науково-дослідній діяльності магістри мають оволодіти професійними компетенціями. Компетентності магістрів геодезії та землеустрою передбачають здатності до реалізації професійних обов'язків:

- володіння науковими поняттями, теоріями і методами, які необхідні для розуміння принципів роботи та функціонального призначення сучасних геодезичних, фотограмметричних приладів та навігаційних систем і їх устаткування;

- володіння основними нормативно-правовими актами та довідковими матеріалами, чинними стандартами, технічними умовами, інструкціями та іншими документами;

- знання технічних характеристик, конструктивних особливостей та правил експлуатації геодезичного, фотограмметричного, навігаційного устаткування та обладнання;

- володіння спеціалізованим програмним забезпеченням та ГІС систем і вміння програмувати професійні задачі;

здатність до впровадження нових технологій із метою підвищення їх ефективності;

- уміння класифікувати та описувати цифрові моделі з використанням аналітичних методів і методів моделювання;

- уміння вибирати методи спеціалізованих задач, критично оцінювати отримані результати;

- уміння використовувати сучасні досягнення науки та передових інформаційних технологій у науково-дослідницькій роботі;

- уміння ставити задачі та вибирати методи досліджень і представляти результати наукових досліджень;

- здатність самостійно виконувати науково-дослідницькі і виробничі розробки з використанням сучасного обладнання, приладів і методів дослідження в області землекористування;

- уміння складати практичні рекомендації з використання результатів наукових дослідів [8; 9].

Під час стажування магістрам необхідне придбання навичок у формуванні таких задач:

- підготовка робочих планів і програм проведення технічних розробок, завдань для виконавців;

- розробка математичних моделей прогнозування, планування і організації використання земельних ресурсів;

- розробка методик автоматизації кадастру нерухомості;

- проектування технологій виконання топографо-геодезичних робіт при землеустрої і кадастрі, ведення кадастру, оцінки земель і об'єктів нерухомості;

- проведення моніторингових досліджень природних і земельних ресурсів, об'єктів нерухомості на основі методів дистанційного зондування і геоінформаційних технологій [9; 10].

Метою науково-дослідницького стажування магістрів є освоєння методик проведення усіх етапів науково-дослідницьких робіт, формування навичок науково-дослідницької діяльності, придбання досвіду для самостійної роботи. Дослідницьке стажування проводиться для ознайомлення з новітніми теоретичними, методологічними і технологічними досягненнями вітчизняної та закордонної науки, сучасними методами наукових досліджень, обробки й інтерпретації експериментальних даних, розширення професійних знань, які вони отримали в процесі навчання, а також формування самостійної наукової роботи [9–11].

Науково-дослідницьке стажування передбачає, що:

- сприятиме основній проблемі за спеціальністю, за якою буде підготовлена дипломна магістерська робота;

- буде актуальним, має наукову новизну і практичну значність;

- базується на сучасних теоретичних, методичних і технологічних досягненнях науки і практики в області геодезії та землеустрою;

- у процесі виконання роботи використано сучасні методи наукових досліджень;

- у роботі використані науково-дослідницькі методичні і практичні розділи згідно з темою дипломної роботи [5; 11; 12].

Під час проходження науково-дослідницького стажування магістри спрямовані на оволодіння:

- здатністю до творчої адаптації під час виконання конкретних задач та їх інноваційних рішень;

- здатністю до аналізу і синтезу, критичному мисленню, узагальненню і прийманню аргументованих рішень;

- узагальненням практичних результатів у роботі і встановленні своїх рішень;

- плануванням експерименту, обробкою отриманих даних та її оцінюванням;

- здатністю до творчого осмислення результатів проведеної роботи і розробка рекомендацій з їх застосування;

- здатністю аналізувати і використовувати сучасні інформаційні технології у вирішенні наукових задач;

- умінням представляти результати досліджень у виді статей, доповідей, патентів на винахід та ін. [12; 13].

Під час науково-дослідницького стажування магістр має оволодіти:

- матеріалами патентних і літературних джерел за темою, що розробляється, з метою використання їх під час виконання дипломної роботи;

- методами дослідження і проведення експериментальних робіт;

- правилами експлуатації дослідницького обладнання;

- методами аналізу й обробки експериментальних даних;

- інформаційними технологіями в наукових дослідженнях, програмним забезпеченням у професійній сфері;

- аналізом, систематизацією та узагальненням науково-технічної інформації за темою дослідження;

- теоретичними та експериментальними дослідженнями в межах поставлених задач;

- аналізом достовірності отриманих результатів;

- порівнянням результатів досліджень об'єкта розробки із вітчизняними та закордонними аналогами;

- аналізом наукової і практичної значності досліджень, які виконуються [12–14].

Підтвердження значності проведеної науково-дослідної роботи може бути підкріплено підготовкою наукової публікації, патенту на винахід та ін. Результати проведених наукових досліджень можуть бути представлені у вигляді доповіді на конференції, публікації статті у журналі. Найбільш поширеним видом наукових публікацій є тези доповідей. Більш значимі наукові результати, які потребують розгорнутої аргументації, публікують у формі наукової статті. Тема наукової публікації має бути конкретною, зосередженою на

особливостях процесу чи явища, його впливу на інші процеси [14; 15].

Наукові конференції проводяться у виші, де навчається магістрант, що дає змогу представити результати дослідів у вигляді тезисів доповіді.

Наукова стаття має представляти завершену, логічну публікацію, що присвячена проблемі досліджень, які виконувались у процесі стажування.

У процесі науково-дослідницької роботи магістранта можуть бути отримані результати, які характеризуються новизною, що дає змогу підготувати заявку на патент на винахід [14; 15]. Винахід визнається патентоздатним, якщо є новим та має винахідницький рівень. Новим є винахід, якщо він не відомий на рівні світової техніки. Рівень техніки визначається за усіма видами відомостей загальнодоступних у країнах світу. Рішення, що заявлене, відповідає критерію «новизна» за умови, якщо до дати пріоритету заявки сутність цього рішення не була розкрита у світових інформаційних системах. Винахід може бути промислово застосованим, якщо він буде використаний у промисловості, сільському господарстві та інших галузях господарства. Важливою складовою частиною є формула винаходу – це стисла характеристика, що відображає технічну сутність винаходу. Завершальним є технічний результат – це очікуваний від використання винаходу позитивний ефект.

Висновки. В результаті проходження науково-дослідного стажування передбачається, що в магістра формуються професійні компетенції: використовувати на практиці уміння і навички в організації дослідницьких і проектних робіт; здатність проявляти ініціативу, відповідальність; здатність до професійної експлуатації сучасного обладнання та приладів; уміння визначати мету проектування, критерії ефективності; участь у впровадженні і супроводженні інформаційних систем і технологій; розробка методів рішення нестандартних задач і нових методів вирішення традиційних задач; здатність формувати нові конкурентоздатні ідеї.

Список літератури:

1. Про вищу освіту : Закон України від 01.07.2014 р. № 1556-VII. Дата оновлення: 28.09.2017. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1556-18/page2> (дата звернення: 25.03.2019).
2. Ефремова Н.Ф. Подходы к оцениванию компетенций в высшем образовании : Учебное пособие. Москва : Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов, 2010. 216 с.
3. Зимняя И.А. Ключевые компетентности как результативно-целевая основа компетентного подхода в образовании. Москва : Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов. 2004. 42 с.
4. Хуторской А.В. Ключевые компетенции как компонент личностно-ориентированной парадигмы образования. *Народное образование*. 2003. № 2. С. 55–61.
5. Зеер Э.Ф., Павлова А.М., Сыманюк Э.Э. Модернизация профессионального образования: компетентностный подход. Москва : МПСИ, 2005. С. 216–219.

6. Хекхаузен Х. Мотивация и деятельность. Санкт-Петербург : Питер. 2003. 860 с.
7. Сухорукова Л.Н., Мирнова М.Н. Формирование профессиональной компетентности магистров в процессе научно-исследовательской практики. *Ярославский педагогический вестник*. 2013. Т. 2. № 1. С. 159–162.
8. Тібілова Л.М., Ступень О.І. Метрологія і методика наукових досліджень у землеустрої : навчальний посібник. Луцьк, 2016. 212 с.
9. Корнілов Л.В., Черняк П.Г. Проблеми і напрями розвитку сучасного землеустрою. *Землевпорядний вісник*. 2004. № 1. С. 14–19.
10. Третьяк А.М., Другак В.М. Методологія та методика наукових досліджень у землевпорядкуванні : навч. посібник. Київ : Аграрна наука. 2005. 300 с.
11. Основи наукових досліджень: Підручник / М.І. Пилипчук та ін. Київ : Знання. 2007. 270 с.
12. Шейко В.М. Організація та методика науково-дослідницької діяльності : Підручник. Київ : Знання, 2008. 310 с.
13. Цехмістрова Г.С. Основи наукових досліджень. Навчальний посібник. Київ : Видавничий дім «Слово». 2003. 240 с.
14. Мигаль В.Д. Теорія і методи наукової творчості : Навчальний посібник. Харків : ВД ІНЖЕК. 2007. 424 с.
15. Крушельницька О.В. Методологія та організація наукових досліджень : Навчальний посібник. Київ : Кондор. 2006. 206 с.

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ СТАЖИРОВКА ПО ГЕОДЕЗИИ И ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВУ – ВАЖНАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ПОДГОТОВКИ СОВРЕМЕННЫХ МАГИСТРОВ

В статье рассматривается важность научно-исследовательской стажировки в профессиональной подготовке магистров. Магистр должен иметь не только фундаментальные знания, а также владеть способностью к их реализации, как в научно-исследовательской, так и в профессиональной деятельности. Отмечена важность формирования у магистров исследовательских компетенций. В процессе обучения важным является формирование мотивации, способствующие как самоутверждению, так и достижению поставленной цели. Научно-исследовательская стажировка предусматривает освоение методов проведения разных этапов научно-исследовательских работ, формирование навыков и умений, приобретение опыта самостоятельной работы, совершенствование профессионализма.

Ключевые слова: научно-исследовательская стажировка, компетентность, мотивация, магистр, навыки, умения.

SCIENTIFIC RESEARCH TRAINING ON GEODESY AND LAND MANAGEMENT – AN IMPORTANT COMPONENT OF TRAINING OF MODERN MASTERS

The article discusses the importance of research internships in the training of masters. The master must have not only fundamental knowledge, but also have the ability to implement them, both in research and professional activities. The importance of the formation of masters of research competencies. In the process of learning, the formation of motivation is important, contributing to both self-assertion and the achievement of the goal. A research internship provides for mastering the methods of conducting different stages of research, developing skills and abilities, gaining independent work experience, and improving professionalism.

Key words: research internship, competence, motivation, master, skills, skills.

ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 534-18

Копитько Ю.С.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОГЛЯД МОЖЛИВИХ ЗАСТОСУВАНЬ АКУСТИЧНИХ МЕТАМАТЕРІАЛІВ

У даній роботі представлений результат огляду робіт в іноземних наукових журналах, що стосуються дослідження та розроблення акустичних метаматеріалів, і сформована хронологія розвитку області знань «Акустичні метаматеріали» до 2018 року (включно). Коротко надана інформація про історію розвитку галузі. Зібрані дані про останні дослідження і досягнення в галузі вивчення акустичних метаматеріалів (коротко – за 2013–2016 рр. і детальніше – за 2017–2018 рр.). Для огляду досягнень за 2017–2018 рр. були обрані роботи, де розглянуті конструкції метаматеріалів мають значні відмінності, або роботи, в яких було запропоновано нові ідеї щодо застосування метаматеріалів, що за структурою є схожими до вже описаних в інших дослідженнях. Коротко наведена оцінка зміни темпу розвитку галузі, наведені перспективи розвитку даної сфери, відмічені лідери в питанні дослідження акустичних метаматеріалів, наведені можливості та перспективи застосування таких матеріалів.

Ключові слова: метаматеріал, акустичний метаматеріал, метаповерхня, суперлінза, акустична лінза.

Постановка проблеми. Теми вивчення та розроблення акустичних метаматеріалів є актуальними на даний момент, про що свідчить стрімко зростаюча кількість публікацій, присвячених цим питанням. Частково це зумовлено широкою сферою застосування таких матеріалів: від фокусування звукових хвиль до звукопоглинання. Іншою перевагою використання акустичних метаматеріалів є можливість створення більш компактних систем для вирішення ряду задач акустики, ніж це було можливо раніше. У даній роботі на прикладах останніх публікацій висвітлені основні напрямки розвитку досліджень та можливості застосування таких метаматеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Огляди публікацій за даною темою [1, с. 1–324; 2, с. 1–352; 3, с. 31–39; 4, с. 43–48] не включають публікації за останні роки, тому є дещо застарілими.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз сучасного стану галузі «метаматеріали», а зокрема «акустичні метаматеріали», для подальших досліджень. Для досягнення мети були окреслені такі завдання: оцінка можливостей розроблення (а саме варіантів реалізації з точки зору структури) та можливих застосувань нових акустичних метаматеріалів.

Виклад основного матеріалу дослідження.

В останні роки спостерігається зростаючий інтерес до збірних конструкцій і композитних матеріалів, які або імітують властивості відомого матеріалу, або мають якісно нові, які не зустрічаються або не можуть бути легкодоступними в природі [5, с. 15].

Метаматеріал – це речовина або штучна структура, властивості якої виходять за рамки звичайних уявлень [6, с. 23].

Перші кроки на шляху до створення метаматеріалів були здійснені ще на початку минулого сторіччя. Поштовхом до розвитку цього питання стала новаторська робота Віктора Веселаго (1967) з електродинаміки ізотропних речовин з одночасно негативними значеннями діелектричної проникності та магнітної проникності [7, с. 2].

Розглянемо детальніше акустичні метаматеріали – штучно створені матеріали, призначені для контролю, направлення та маніпулювання звуковими хвилями, які можуть виникати в газах, рідинах і твердих тілах.

Акустичні метаматеріали були розроблені на основі результатів досліджень метаматеріалів. Дослідження з використанням таких матеріалів почалось у 2000 році (виготовлення і демонстрація звукових кристалів у рідині) [8, с. 1].

Сучасні досягнення в галузі створення і вивчення акустичних метаматеріалів

1. Розглянемо основні досягнення періоду 2013–2016 років.

Одна з перших публікацій інформує нас, що була створена стіна з метаматеріалу, що підсилює звук. Акустичні хвилі в такій стіні можуть проходити через отвори, менші за їх довжину хвилі. Метаматеріали вже були використані, щоб направити світлові хвилі через, здавалося б, непрохідні отвори. Для досягнення такої передачі зі звуком були розтягнуті шматки пластикової плівки через крихітні перфорації в тонкій металевій пластині [9, с. 1].

Пізніше вчені навчилися «закручувати» акустичні хвилі, і було створено звуковий пристрій, який назвали ротатором акустичного поля, для чого використовувалися спеціальні метаматеріали. Учені стверджують, що «їх ротатор звукового поля також можна вважати звуковим плащем-невидимкою, бо він може змушувати акустичні хвилі огинати об'єкти і приховувати їх, наприклад, від акустичного зондування» [10, с. 1].

Також була продемонстрована робота акустичної суперлінзи з від'ємним показником заломлення. Така суперлінза дозволяє реалізувати візуалізації з шириною плями та роздільною здатністю кращими, ніж дифракційна межа [11, с. 77].

Того ж року стало відомо про інший матеріал, що здатний збільшувати роздільну здатність акустичного зображення? – ширококутовий акустичний гіперболічний метаматеріал із паперу та алюмінію [12, с. 1]. Такий матеріал також здатний фокусувати акустичні хвилі та контролювати кути, під якими поширюється звук. Метаматеріал взаємодіє з акустичними хвилями двома різними способами. В одному напрямку він демонструє додатну щільність (аналогічно додатному коефіцієнту заломлення), однак у перпендикулярному напрямку, в аспекті взаємодії зі звуком, демонструє від'ємну щільність. Це змушує акустичні хвилі відхилятися під кутами, які протилежні передбачуваним базовою фізикою. Запропонований метаматеріал може знайти застосування в медичній візуалізації та пристроях неруйнівного контролю [13, с. 1].

Значна частина публікацій, що стосуються розроблення акустичних метаматеріалів, присвячена питанням звукопоглинання. Зокрема, в роботі [14, с. 1] описано акустичну панель із метаматеріалу, що здатна поглинати низькочастотний звук. Дуже тонка структура, виготовлена з метаматеріалу, може повністю поглинути дуже низькі час-

тоти звуку для майже кожного кута падіння, і вона багато в чому перевершує традиційні акустичні моделі, використовувані для даних цілей. Структура групи дозволяє зменшити розміри та масу акустичних систем для поглинання акустичної енергії на дуже низьких частотах [15, с. 1].

Іншим напрямком досліджень є розроблення методів та пошукових способів керування параметрами метаматеріалу. Наприклад, у роботі [16, с. 1] описано акустичний метаматеріал із подвійною негативністю, що керується електромагнітами. Представлений матеріал складається з періодичних мембран і бічних отворів. Напряга і жорсткість періодично розташованих мембран контролюються електромагнітами, що створюють додаткову напругу, і, таким чином, швидкість передачі та фазова швидкість метаматеріалу можуть регулюватися напругою збудження електромагнітів. Показано, що напруга постійного струму 6 В може викликати зсув смуги пропускання з подвійною негативністю на 40% ширини смуги пропускання.

Була присвячена увага і зворотнім ефектам Доплера. Зокрема, в ширококутових акустичних метаматеріалах. У статті [17, с. 1] продемонстровано спосіб проектування довільних ширококутових акустичних метаматеріалів. Ці всеспрямовані акустичні метаматеріали створюються з «флейтоподібними» акустичними метакластерними наборами із сімома подвійними метамолекулами; дані матеріали також долають обмеження ширококутового від'ємного об'ємного модуля і щільності маси, щоб забезпечити область негативної рефракції й зворотні ефекти Доплера.

Структура метаматеріалів може бути найрізноманітнішою, проте окремо слід сказати про метаматеріали, що базуються на резонаторах Гельмгольца. Популярність таких розробок стрімко зростає, що пов'язано з широким спектром можливих призначень та функцій таких структур. Зокрема, в роботі [18, с. 1] розроблено новий тип спрямовуючої відбиваючої поверхні, що складається з масиву резонаторів Гельмгольца. Відбиваюча поверхня дає відмінну фокусну лінію, аналогічну параболічній циліндричній антені, і використовується для формування спрямованого променя звуку. Крім плоских відбиваючих поверхонь, для формування звукового променя можуть використовуватися складні поверхні, такі як опуклі або конформні форми, що полегшує їх застосування в системах звукопідсилення. Тому направляючі відбиваючі поверхні мають перспективи до

застосування в таких областях, як акустична візуалізація, звукова зброя і підводний зв'язок.

Здатність сповільнювати поширення хвиль у матеріалах викликала значний дослідницький інтерес. У роботі [19, с. 1] описана реалізація бездисперсійного повільного поширення акустичної хвилі за допомогою спіральних-структурованих метаматеріалів. За допомогою таких матеріалів тепер можна реалізувати безрозмірне гальмування звуку. Спіральні структуровані метаматеріали з розробленими неоднорідними елементарними комірками можуть перетворювати нормально падаючу плоску хвилю в пучок на заданій параболическій траєкторії, що самозбуджується.

Того ж року була спроектована і чисельно продемонстрована в роботі [20, с. 1] акустична одностороння метаповерхня, яка являє собою плоский акустичний субхвильовий шар, який поводить себе як матеріал із майже безрефлекторною поверхнею з довільною здатністю до хвильового управління для падаючої хвилі (хвиля, що падає з одного боку, при цьому фактично блокує зворотну хвилю). Проілюстрована реалізація мета структури, створеної шляхом об'єднання гібридних структур і лабіринтних структур. Результати роботи можуть надати більше можливостей для маніпуляції звуком і застосовуватися для вдосконалення пристроїв в таких областях, як ультразвукова візуалізація і терапія.

2. Огляд публікацій, присвячених дослідженню та розробленню акустичних метаматеріалів за 2017 рік.

Станом на 2017 рік продовжують активно публікуватися роботи, пов'язані з розробленням акустичних метаматеріалів, що базуються на резонаторах Гельмгольца. Зокрема, було розроблено градієнтну акустичну метаповерхню на основі резонаторів Гельмгольца, щоб вільно маніпулювати звуковим хвильовим фронтом, про що повідомляється в роботі [21, с. 1]. Широка смуга пропускання і висока ефективність передачі досягаються за допомогою акустичної метаповерхні, яка побудована за допомогою серії одиничних осередків для забезпечення бажаного дискретного розподілу акустичної швидкості. Кожна елементарна комірка складається з металевої пластини з чотирма періодично розміщеними резонаторами Гельмгольца і однією щільною. Узгодження імпедансу між метаповерхнею і фоновим середовищем може бути реалізовано шляхом регулювання ширини щілини елементарної комірки. Спроектвана конструкція може бути використана в системах формування зображення, керування променем і акустичних лінзах.

Інше застосування резонаторів Гельмгольца було запропоновано в роботі [22, с. 1], в якій мова йде про створення метадифузорів. Це особливий тип субхвильових звукових дифузорів, які являють собою жорстко закріплені щільні панелі, причому кожна щілина завантажувється масивом резонаторів Гельмгольца. Шляхом настройки геометрії метаматеріалу коефіцієнт відбиття панелі можна налаштувати так, щоб отримати або звичайну фазу відбиття, або помірну чи навіть ідеальну абсорбцію. Можливо контролювати дисперсію акустичних хвиль у щілинах, і просторово-залежний коефіцієнт відбиття може бути адаптований до конкретних функцій із рівномірним перетворенням Фур'є. Акустична енергія може бути розсіяна в інших напрямках, ніж дзеркальна. Було показано, що структури можуть бути оптимізовані для роботи в широкому діапазоні частот, що охоплюють 3 октави. Зокрема, представлено дифузор товщиною 3 см, що працює від 250 до 2000 Гц, товщина панелей становила від 1/46 до 1/20 розрахункової довжини хвилі, тобто приблизно від двадцятої до десятої від товщини традиційних конструкцій.

Тривають дослідження можливостей звукопоглинання за допомогою акустичних метаматеріалів. У роботі [23, с. 1] гібридний метаматеріал пропонується в якості нового класу звукопоглинача, який демонструє чудове широкомугове низькочастотне звукопоглинання, а також відмінну механічну міцність. Застосовуючи теорію мікроперфорованої панелі, встановлено теоретичний метод розрахунку коефіцієнта поглинання звуку цього виду метаматеріалу. Досконале поглинання звуку зустрічається всього в декількох сотнях герц із пропускнуою здатністю двох октав 0,5. Такі акустичні метаматеріали зможуть служити в якості багатофункціональних матеріалів із надзвичайно низькочастотним звукопоглинанням, відмінною міцністю і поглинанням енергії удару.

3. Огляд публікацій за 2018 рік

2018 рік став найпродуктивнішим серед окреслених у роботі років із точки зору дослідження та розроблення акустичних метаматеріалів. Представлена дуже велика кількість робіт, присвячених питанням фокусування звукових хвиль та розробленню акустичних лінз. Продовжуються дослідження звукопоглинання за допомогою акустичних метаматеріалів, а також представлені нові ідеї стосовно варіантів розроблення метаматеріалів із точки зору їх структури.

Було запропоновано новий тип поверхонь на основі акустичних матеріалів – акустичні

метаповерхні. Такі поверхні мають незвичайні функціональні можливості в порівнянні з їх попередником у матеріалознавстві, а саме акустичними метаматеріалами. Метаповерхні являють собою 2D-матеріали із субхвильовою товщиною, які забезпечують новий шлях для маніпулювання звуковими хвилями. У роботі [24, с. 460] окреслена фундаментальна фізика метаповерхонь, описані їх різні концепції і стратегії проектування, обговорюються їх функціональні можливості для контрольованого відбиття, передачі і незвичайного поглинання. Зокрема, описані в загальних рисах основні конструкції акустичних метаповерхонь, у тому числі заснованих на резонатороподібних і мембраноподібних структурах типу Гельмгольца, обговорюються їх застосування, такі як фокусування променя, асиметрична передача і самогнуті промені.

Упродовж року досліджувались і пропонувались нові варіанти реалізацій акустичних лінз. Наприклад, у роботі [25, с. 1] описані можливості акустичної візуалізації з лінзами Люнебурга з метаматеріалу. Лінза Люнебурга являє собою пристрій зі сферично-симетричним градієнтним показником заломлення з унікальними властивостями зображення. Раніше запропоновані акустичні лінзи Люнебурга в основному обмежені двовимірними конструкціями для роботи на частотах від 1 кГц до 7 кГц. У роботі застосовується новий метод проектування для масштабованих метаматеріалів, щоб продемонструвати лінзи Люнебурга для повітряного звуку і ультразвукових хвиль. Виготовлені дві лінзи Люнебурга: ультразвукова версія для 40 кГц і версія для звуку частотою 8 кГц. Якість зображення ультразвукової версії продемонстровано експериментально.

Працюючи над винаходженням нових структур метаматеріалів, вчені часто пропонують неочікувані варіанти. Так, у роботі [26, с. 1] були запропоновані еластичні метаматеріали, що побудовані на принципах кірігамі, для керування довжиною хвилі при згині.

Кірігамі – окремих вид орігамі, в якому дозволяється використання ножиць та розрізання паперу в процесі складання моделі.

Описано новий дизайн еластичного метаматеріалу з анізотропною масовою щільністю для маніпулювання згинальними хвилями в масштабі субхвилі. Тривимірний метаматеріал, натхненний кірігамі, може бути легко виготовлений шляхом розрізання та складання тонкої металевої пластини. За допомогою періодичного прикріплення резонансних структур кірігамі на верхній частині пластини-господаря можна створити пластину з метаматеріалу без будь-якої перфорації, яка погіршує міцність вихідної пластини. Запропонований метаматеріал має переваги конструкції без перфорації і можливість маніпулювання хвилями при згині по довжині хвилі, що може бути дуже корисним для інженерних застосувань, включаючи неруйнівний контроль і моніторинг стану конструкцій.

У роботі [27, с. 1] була запропонована реалізація ультратонкої акустичної лінзи для субхвильового фокусування. У цьому дослідженні повідомляється про першу експериментальну реалізацію ультратонкої субхвильової фокусуючої акустичної лінзи, яка може перевищувати межу дифракції Релея. Вона називається суперколивальною акустичною лінзою (SOAL) і має цікаву особливість, що дозволяє досягти субхвильового фокусування без необхідності працювати в безпосередній близькості від об'єкта, який буде відображатися. Ефективність фокусування SOAL на субхвилі перевіряється експериментально за допомогою системи вимірювання інтенсивності звуку. Із цих вимірів виявлено, що запропонована лінза може забезпечити чудові характеристики фокусування з повною шириною на половині максимуму з ефективністю передачі 26,5%.

Ще один варіант акустичної лінзи представлений у роботі [28, с. 1], в якій мова йде про проектування акустичної суперлінзи з використанням однофазних метаматеріалів із зіркоподібною ґратчастою структурою. Запропоновано однофазну суперлінзу з низькою густиною, яка дозволяє домогтися фокусування звуку за межами дифракційної межі. Моделювання перевіряє ефективне фокусування звуку однофазною суцільною лінзою з просторовим розрішенням приблизно $0,39 \lambda$.

Також активно розробляються нові варіанти застосування резонаторів Гельмгольца для створення метаматеріалів. Зокрема, в роботі [29, с. 1] описано зв'язані резонатори для уловлювання і поглинання звуку. У цьому дослідженні повідомляється про розроблення пристрою захоплення звуку, заснованого на зв'язаних резонаторах Гельмгольца, розміщених у повітряному хвилеводі, які можуть ефективно вирішити проблему витоку хвиль. Показано, що структура зв'язаних резонаторів може генерувати провали у спектрі пропускання за допомогою аналітичної моделі, отриманої з другого закону Ньютона і чисельного аналізу, заснованого на методі кінцевих елементів. Отримана теорія ефективного середовища, яка показує, що зв'язані резонатори викликають від'ємний ефективний об'ємний модуль поблизу

резонансної частоти й індукують плоскі смуги, які призводять до обмеження вхідної хвилі всередині резонаторів. Розраховані спектри пропускання та діаграма смуги з теорії ефективного середовища, які узгоджуються з результатами моделювання. Уловлювання та високе поглинання енергії звукової хвилі демонструється за допомогою розробленого пристрою.

Висновки. Ідея застосування метаматеріалів в акустиці є новою. Активний розвиток цієї сфери спостерігається з 2010-х років. Починаючи з 2016 року зростає кількість наукових публікацій, присвячених акустичним метаматеріалам, що свідчить про зростаючий інтерес та актуальність даної теми.

Найактивніше акустичні метаматеріали досліджують вчені з Китаю. Саме в Китаї створена компанія AMG, яка займається виключно розробленням, дослідженням та застосуванням у різноманітних сферах людської діяльності акустичних метаматеріалів. Компанія регулярно оприлюднює результати частини своїх досягнень у вигляді публікацій.

Оцінюючи кількість праць станом на 2018 рік, спостерігається продовження росту кількості нових імен серед вчених, що зацікавились даною темою, та, відповідно, продовжує зростати кількість публікацій за рік у порівнянні з попередніми роками.

Використання акустичних метаматеріалів може зіграти важливу роль в удосконаленні апаратів ультразвукової медичної діагностики. Іншою сферою застосування може стати маскуваність підводних об'єктів від ехолокаторів, а використання

фокусуючих звукових лінз на основі метаматеріалів може стати простим способом посилення звуку, що надходить від джерела в деяку область, наприклад, у приладах для діагностики слуху людини. Існують праці, присвячені сповільненню розповсюдження звукових хвиль, поглинанию звуку деякої смуги частот.

Багато ідей, що вже реалізовані в оптиці, поки не були адаптовані для акустики, а багато праць ще не знайшли собі застосування. Різноманіття вже розроблених матеріалів свідчить про те, що нам відкрилося широке поле для діяльності, адже для вирішення подібних задач розробляються метаматеріали з використанням найрізноманітніших речовин (алюміній, папір та ін.) та такі, що мають різну структуру. З іншого боку, незначна зміна структури дозволяє використовувати матеріал для вирішення іншої задачі. Активно досліджуються варіанти застосування резонаторів Гельмгольца у складі метаматеріалів, зокрема для створення фокусуючих метаматеріалів. На кафедрі акустики та акустоелектроніки НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» проводяться як теоретичні роботи, присвячені дослідженню таких резонаторів [30, с. 70], так і експериментальні [31, с. 34]. Для подальших досліджень та розроблення були обрані акустичні метаматеріали саме такого типу.

Дана область акустики є перспективною, оскільки такі реалізації можуть дозволити зменшити габарити обладнання, вдосконалити технічні параметри існуючого обладнання (ширина смуги пропускання, роздільна здатність та ін.) або ж створити абсолютно новий пристрій із новими функціями.

Список літератури:

1. Acoustic Metamaterials. Negative Refraction, Imaging, Lensing and Cloaking / Craster R. V., Guenneau S. NY. 2012. 324 p.
2. Frank Pai P. Theory and Design of Acoustic Metamaterials. 2015. 352 p.
3. Haberman M. R., Norris A. N. Acoustic Metamaterials. *Acoustics Today*. 2016. Vol. 12. № 3. P. 31–39.
4. Haberman M., Guild M. Acoustic metamaterials. *Physics Today*. 2016. Vol. 69. № 6. P. 43–48.
5. Engheta N. Metamaterials: Physics and Engineering Exploration. 2006. 440 p.
6. Возианова А.В. Нанофотоника. Часть 1 / ред. А.В. Возианова, М.К. Ходзицкий. Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2013. 94 с.
7. Boardman A. Pioneers in metamaterials: John Pendry and Victor Veselago. *Journal of optics*. 2011. № 2. P. 1–6. DOI : 10.1088/2040-8978/13/2/020401.
8. Acoustic metamaterial. *Wikipedia: the free encyclopedia*. URL : https://en.wikipedia.org/wiki/Acoustic_metamaterial (дата звернення : 18.03.2019).
9. Park J., Lee K., Wright O. et al. Giant Acoustic Concentration by Extraordinary Transmission in Zero-Mass Metamaterials. *Physical Review Letters*. 2013. Vol. 110. № 24. P. 1–5. DOI : 10.1103/PhysRevLett.110.244302.
10. Учёные научились «закручивать» акустические волны, для которых использовались специальные метаматериалы. *Scientific World – научно-информационный журнал*. URL : <http://sci-world.ru/technics/3051-uchenye-nauchilis-zakruchivat-akusticheskie-volny-dlya-kotoryh-ispolzovalis-specialnye-metamaterialy.html> (дата звернення : 20.02.2017).

11. Kaina N., Lemoult F., Fink M. et al. Negative refractive index and acoustic superlens from multiple scattering in single negative metamaterials. *Nature*. 2015. № 7567. P. 77–81.
12. New Metamaterial Manipulates Sound to Improve Acoustic Imaging. *NC STATE NEWS*. URL : <https://news.ncsu.edu/2015/12/jing-hm-acoustic-2015> (дата звернення 18.03.2019).
13. Shen C., Xie Y., Sui N. et al. Broadband Acoustic Hyperbolic Metamaterial. *Physical Review Letters*. 2015. Vol. 115. № 25. P. 1–5. DOI : 10.1103/PhysRevLett.115.254301.
14. Jiménez N., Huang W., Romero-García V. et al. Ultra-thin metamaterial for perfect and omnidirectional sound absorption. *Applied Physics Letters*. 2016. № 12. P.121902. DOI : 10.1063/1.4962328.
15. Acoustic metamaterial panel absorbs low-frequency sound. *PHYSORG*. URL : <https://phys.org/news/2016-09-acoustic-metamaterial-panel-absorbs-low-frequency.html> (дата звернення : 18.03.2019).
16. Chen Z, Xue C, Fan L et al. A tunable acoustic metamaterial with double-negativity driven by electromagnets. *Scientific Reports*. 2016. № 6. P. 30254. DOI : 10.1038/srep30254.
17. Zhai S., Zhao X., Liu S et al. Inverse Doppler Effects in Broadband Acoustic Metamaterials. *Scientific Reports*. 2016. № 6. P. 32388. DOI : 10.1038/srep32388.
18. Kyungjun S, Jedo K, Shin H et al. Directional Reflective Surface Formed via Gradient-Impeding Acoustic Meta-Surfaces. *Scientific Reports*. 2016. № 6. P. 32300. DOI : 10.1038/srep32300.
19. Zhu X, Li K, Zhang P et al. Implementation of dispersion-free slow acoustic wave propagation and phase engineering with helical-structured metamaterials. *Nature Communications*. 2016. № 7. P. 11731. DOI : 10.1038/ncomms11731.
20. Jiang X, Liang B, Yang J et al. Acoustic one-way metasurfaces: Asymmetric Phase Modulation of Sound by Subwavelength Layer. *Scientific Reports*. 2016. № 6. P. 28023. DOI : 10.1038/srep28023.
21. Lan J., Li Y., Xu Y. et al. Manipulation of acoustic wavefront by gradient metasurface based on Helmholtz Resonators. *Scientific Reports*. 2017. № 7. P. 10587. DOI : 10.1038/s41598-017-10781-5.
22. Jimenez, N.; Cox, T.J., Romero-García V. et al. Metadiffusers: Deep-subwavelength sound diffusers. *Scientific Reports*. 2017. № 7. P. 5389. DOI : 10.1038/s41598-017-05710-5.
23. Tang Y., Ren S., Meng H. et al. Hybrid acoustic metamaterial as super absorber for broadband low-frequency sound. *Scientific Reports*. 2017. № 7. P. 43340. DOI : 10.1038/srep43340.
24. Assouar B., Liang B., Wu Y. et al. Acoustic metasurfaces. *Nature Reviews Materials*. 2018. № 3. P. 460–472. DOI : 10.1038/s41578-018-0061-4.
25. Xie Y., Fu Y., Jia Z. et al. Acoustic Imaging with Metamaterial Luneburg Lenses. *Scientific Reports*. 2018. № 8. P. 16188. DOI : 10.1038/s41598-018-34581-7.
26. Zhu R., Yasuda H., Hang G. et al. Kirigami-based Elastic Metamaterials with Anisotropic Mass Density for Subwavelength Flexural Wave Control. *Scientific Reports*. 2018. № 8. P. 483. DOI : 10.1038/s41598-017-18864-z.
27. Hyun J., Kim Y. Doh I. et al. Realization of an ultrathin acoustic lens for subwavelength focusing in the megasonic range. *Scientific Reports*. 2018. № 8. P. 91313. DOI : 10.1038/s41598-018-27312-5.
28. Chen M., Jiang H., Zhang H. et al. Design of an acoustic superlens using single-phase metamaterials with a star-shaped lattice structure. *Scientific Reports*. 2018. № 8. P. 1861. DOI : 10.1038/s41598-018-19374-2.
29. Jahdali R., Wu Y. Coupled Resonators for Sound Trapping and Absorption. *Scientific Reports*. 2018. № 8. P. 13855. DOI : 10.1038/s41598-018-32135-5.
30. Копитько Ю. Розрахунок резонансних частот горлової частини резонатора Гельмольца. *Мікросистеми, електроніка та акустика*. 2018. Т. 23. № 5. С. 70–75. DOI : 10.20535/2523-4455.2018.23.5.147782.
31. Didkovskiy V., Naida S., Zaets V. Experimental study into the Helmholtz resonators' resonance properties over a broad frequency band. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 1. № 5(97). P. 34–39. DOI : 10.15587/1729-4061.2019.155417.

ОБЗОР ВОЗМОЖНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ

В данной работе представлен результат обзора работ в иностранных научных журналах и сформирована хронология развития области знаний «Акустические метаматериалы» до 2018 года (включительно). Собраны данные о последних исследованиях и достижениях в области изучения акустических метаматериалов (кратко за 2013–2016 гг. и подробнее – за 2017–2018 гг.). Коротко приведена оценка изменения темпа развития отрасли, приведены перспективы развития данной сферы. Отмечены лидеры в вопросе исследования акустических метаматериалов. Приведены возможности и перспективы применения таких материалов.

Ключевые слова: метаматериал, акустический метаматериал, метаповерхность, суперлинза, акустическая линза.

THE REVIEW OF POSSIBLE APPLICATIONS OF ACOUSTIC METAMATERIALS

The information about the history of studying metamaterials and about the initiation of the study of acoustic metamaterials is given briefly. The results of the review of works in foreign scientific journals are presented and the chronology of the development of the field of knowledge “Acoustic Metamaterials” until 2018 (inclusive) is formed in this paper. The data on recent research and achievements in the field of study of acoustic metamaterials is collected (shortly for 2013–2016 and in detail for 2016–2018). The short estimate of changes of the pace of development of the industry is given. The prospects for the development of this field are given. The leaders in the study of acoustic metamaterials are noted, the possibilities and prospects for the use of such materials are presented.

Key words: *metamaterial, acoustic metamaterial, metasurface, superlens, acoustic lens.*

Відомості про авторів

Авіна С.І. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри хімічної технології неорганічних речовин, каталізу та екології Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;

Азізов Т.Н. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри техніко-технологічних дисциплін Уманського державного педагогічного університету імені Павла Тичини;

Антоненко А.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри готельно-ресторанного бізнесу Київського університету культури;

Арсеньєва Н.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою Харківського національного автомобільно-дорожнього університету;

Багрова І.В. – інженер I категорії кафедри хімічної технології неорганічних речовин, каталізу та екології Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;

Баламут Н.С. – студент кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;

Баран Н.М. – кандидат технічних наук, науковий співробітник кафедри хімічної технології переробки пластмас Національного університету «Львівська політехніка»;

Беднарська І.С. – аспірант, асистент кафедри теплоенергетичних установок теплових і атомних електростанцій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Безвесільна О.М. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри приладобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Богдан Г.А. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри приладів і систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Васюченко П.В. – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри фізики, електротехніки та електроенергетики Української інженерно-педагогічної академії;

Волошкевич П.П. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри нарисної геометрії та інженерної графіки Національного університету «Львівська політехніка»;

Галкіна Д.В. – магістр кафедри технології молочних, олійно-жирових продуктів і косметики Одеської національної академії харчових технологій;

Гамада В.Р. – аспірант кафедри технології біологічно активних сполук, фармації та біотехнології Національного університету «Львівська політехніка»;

Глушко О.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та технології рослинних полімерів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Гомеля М.Д. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри екології та технології рослинних полімерів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Гончаров Д.С. – аспірант кафедри технології молочних, олійно-жирових продуктів і косметики Одеської національної академії харчових технологій;

Гринь Г.І. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри хімічної технології неорганічних речовин, каталізу та екології Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;

Гриценко О.М. – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічної технології переробки пластмас Національного університету «Львівська політехніка»;

Грищенко І.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри готельно-ресторанного бізнесу Київського університету культури;

- Гусаченко Я.С.** – магістр Київського національного університету культури і мистецтв;
- Данілян А.Г.** – старший викладач кафедри суднових енергетичних установок і систем Дунайського інституту національного університету «Одеська морська академія»;
- Дейнека Д.М.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри хімічної технології неорганічних речовин, каталізу та екології, Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;
- Ємець В.А.** – асистент кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою Харківського національного автомобільно-дорожнього університету;
- Єпіфанова А.С.** – аспірант кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;
- Журавльов Ю.І.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології матеріалів і судоремонту Національного університету «Одеська морська академія»;
- Завальнюк І.П.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри управління судном Херсонської державної морської академії;
- Завальнюк О.П.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики Херсонської державної морської академії;
- Зайков В.П.** – кандидат технічних наук, начальник сектору Науково-дослідного інституту «ШТОРМ»
- Земліна Ю.В.** – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри готельно-ресторанного бізнесу Київського університету культури;
- Зима Ю.С.** – магістр кафедри хімічної технології неорганічних речовин Дніпровського державного технічного університету;
- Іванченко А.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри хімічної технології неорганічних речовин Дніпровського державного технічного університету;
- Кануннікова Н.О.** – аспірант кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;
- Карабут Н.О.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри моделювання та програмного забезпечення Криворізького національного університету;
- Колб Ю.І.** – аспірант кафедри технології біологічно активних сполук, фармації та біотехнології Національного університету «Львівська політехніка»;
- Кондратюк Н.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри харчових технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;
- Конечна Р.Т.** – доцент кафедри технології біологічно активних сполук, фармації та біотехнології Національного університету «Львівська політехніка»;
- Копитько Ю.С.** – аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;
- Коропченко С.П.** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу інженерно-технічних досліджень Інституту луб'яних культур Національної академії аграрних наук України;
- Котляр Є.О.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології молочних, олійно-жирових продуктів і косметики Одеської національної академії харчових технологій;
- Куделько С.Ю.** – магістр кафедри технології молочних, олійно-жирових продуктів і косметики Одеської національної академії харчових технологій;
- Кузьменко А.С.** – старший викладач кафедри електромеханіки Криворізького національного університету;
- Ларичева Л.П.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічної технології неорганічних речовин Дніпровського державного технічного університету;
- Лещенко С.А.** – кандидат технічних наук, професор кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;
- Луговська О.А.** – асистент кафедри експертизи харчових продуктів Національного університету харчових технологій;

- Макушина Т.В.** – економіст Інженерного інституту Запорізького національного університету;
- Мандригель О.В.** – магістр Київського університету культури;
- Маркова Н.Б.** – старший науковий співробітник кафедри фізичної хімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;
- Мельник О.Є.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту Криворізького національного університету;
- Метеньканич М.М.** – студент кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;
- Мещеряков В.І.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформатики Одеського державного екологічного університету;
- Миза О.С.** – викладач кафедри залізобетонних конструкцій і транспортних споруд Одеської державної академії будівництва та архітектури;
- Михайленко О.Ю.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту Криворізького національного університету;
- Михайлова Є.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри природоохоронних технологій, екології та безпеки життєдіяльності Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця;
- Міхно П.Б.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри геодезії, землевпорядкування та кадастру Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського;
- Мороз М.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри охорони праці та навколишнього середовища Українського державного університету залізничного транспорту;
- Мосейко Ю.В.** – кандидат педагогічних наук, доцент Інженерного інституту Запорізького національного університету;
- Нагайчук О.В.** – викладач кафедри техніко-технологічних дисциплін Уманського державного педагогічного університету імені Павла Тичини;
- Нестеренко В.Б.** – капітан далекого плавання, старший викладач кафедри управління судном Херсонської державної морської академії;
- Ніколаєва В.Г.** – студентка кафедри органічних і фармацевтичних технологій Одеського національного політехнічного університету;
- Новіков В.П.** – професор кафедри технології біологічно активних сполук, фармації та біотехнології Національного університету «Львівська політехніка»;
- Орлова О.М.** – викладач кафедри техніко-технологічних дисциплін Уманського державного педагогічного університету імені Павла Тичини;
- Панова В.О.** – асистент Інженерного інституту Запорізького національного університету;
- Панфілов М.О.** – магістр кафедри технології молочних, олійно-жирових продуктів і косметики Одеської національної академії харчових технологій;
- Паращин Ж.Д.** – доцент кафедри технології біологічно активних сполук, фармації та біотехнології Національного університету «Львівська політехніка»;
- Пасс О.В.** – аспірант кафедри хімічної технології неорганічних речовин Дніпровського державного технічного університету;
- Петраченко Д.О.** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу інженерно-технічних досліджень Інституту луб'яних культур Національної академії аграрних наук України;
- Пивоваров Є.П.** – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри технології харчування Харківського державного університету харчування та торгівлі;
- Побережний М.В.** – аспірант кафедри екології та технології рослинних полімерів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;
- Поморцева О.Є.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри земельного адміністрування та ГІС Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова;
- Похмурська А.В.** – аспірант кафедри хімічної технології переробки пластмас Національного університету «Львівська політехніка»;

Приходько К.О. – викладач кафедри готельно-ресторанного та туристичного бізнесу Київського національного університету культури і мистецтв;

Пушкарьов Ю.М. – кандидат технічних наук, доцент, кафедри органічних і фармацевтичних технологій Одеського національного політехнічного університету;

Радецька О.Й. – студент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Радовенчик Я.В. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри екології та технології рослинних полімерів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Репін М.В. – кандидат технічних наук Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Риндюк Д.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплоенергетичних установок теплових і атомних електростанцій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Романовська О.Р. – старший викладач кафедри гуманітарних дисциплін Дунайського інституту національного університету «Одеська морська академія»;

Руденко Д.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри фізики, електротехніки та електроенергетики Української інженерно-педагогічної академії;

Румянцев В.Р. – кандидат технічних наук, доцент Інженерного інституту Запорізького національного університету;

Ряпухін В.М. – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою Харківського національного автомобільно-дорожнього університету;

Сазонов А.Ю. – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій імені професора Б.Б. Самотокіна Житомирського державного технологічного університету;

Саркісян Г.С. – асистент кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою Харківського національного автомобільно-дорожнього університету;

Семешко О.Я. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник науково-дослідного сектору Херсонського національного технічного університету;

Синовець О.С. – асистент кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою Харківського національного автомобільно-дорожнього університету;

Скрипніченко Д.М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології молочних, олійно-жирових продуктів і косметики Одеської національної академії харчових технологій;

Слободянюк В.К. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри відкритих гірничих робіт Криворізького національного університету;

Соболєв В.О. – кандидат хімічних наук, член-кореспондент Української академії наук, доцент кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Степанова Т.М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології харчування Сумського національного аграрного університету;

Тарасов В.К. – кандидат технічних наук, доцент Інженерного інституту Запорізького національного університету;

Тверда О.Я. – кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Тірон-Воробйова Н.Б. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри загальнонаукових дисциплін Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія»;

Ткаченко Н.А. – доктор технічних наук, професор кафедри технології молочних, олійно-жирових продуктів і косметики Одеської національної академії харчових технологій;

Ткачук К.К. – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Трус І.М. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри екології та технології рослинних полімерів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Филиппова М.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Фоменко Г.Р. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою Харківського національного автомобільно-дорожнього університету;

Черепанська І.Ю. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій імені професора Б.Б. Самотокаїна Житомирського державного технологічного університету;

Черненко Я.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічної технології неорганічних речовин Дніпровського державного технічного університету;

Чернушенко О.О. – кандидат хімічних наук, доцент кафедри харчових технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

Шелешей Т.В. – асистент кафедри теплоенергетичних установок теплових і атомних електростанцій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», старший викладач кафедри загально-інженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Школьнікова Т.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри загальної та неорганічної хімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;

Штефан В.В. – кандидат технічних наук, професор кафедри технічної електрохімії, завідувач аспірантури Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;

Щокін В.П. – доктор технічних наук, професор кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту Криворізького національного університету.

НОТАТКИ

Науковий журнал

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Серія: Технічні науки

Том 30 (69) № 2 2019

Частина 2

Коректура • *Н. Пирог*

Комп'ютерна верстка • *Н. Кузнєцова*

Адреса редакції:

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

м. Київ, вул. Івана Кудрі, 33

Електронна пошта: editor@tech.vernadskyjournals.in.ua

Сторінка журналу: www.tech.vernadskyjournals.in.ua

Формат 60x84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 20,27. Ум.-друк. арк. 27,21. Зам. № 0519/112

Підписано до друку 31.05.2019. Наклад 150 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

73021, м. Херсон, вул. Паровозна, 46-а, офіс 105

Телефон +38 (0552) 39 95 80

E-mail: mailbox@helvetica.com.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 6424 від 04.10.2018 р.