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 29 (68) № 1 2018

Частина 2

Київ
2018

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 редекційної колегії:

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

Горбовий Артур Юліанович – 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 № 8 від 29.03.2018 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)

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

ISSN 1606-3721

© Таврійський національний університет ім. В.І. Вернадського, 2018

ЗМІСТ

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

Паньков Д.В., Кишенько В.Д., Шаруда С.С.
АВТОМАТИЗОВАНЕ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ПРОДУКЦІЇ
ХЛІБОПЕКАРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА НА ОСНОВІ ПРИНЦИПІВ КВАЛІМЕТРІЇ..... **1**

Парталян А.С., Чумаченко С.М.
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛІННЯ
ЕКОЛОГІЧНОЮ БЕЗПЕКОЮ ВІЙСЬКОВИХ ОБ'ЄКТІВ..... **7**

Репін М.В.
ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ СТРАТЕГІЧНОГО ПЛАНУВАННЯ ДЛЯ РОЗРОБЛЕННЯ
ПРОФІЛАКТИЧНИХ ЗАХОДІВ ІЗ ОХОРОНИ ПРАЦІ..... **13**

Стенин А.А., Пасько В.П., Шитикова И.Г., Лемешко В.А.
ПОСТРОЕНИЕ ПРЕДМЕТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ
СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ СИТУАЦИОННОГО ТИПА..... **17**

Степанець О.В., Маріяш Ю.І.
АВТОНАЛАШТУВАННЯ ПІД-РЕГУЛЯТОРА НА МІНІМУМ ІНТЕГРАЛЬНОГО ЗВАЖЕНОГО
В ЧАСІ МОДУЛЬНОГО КРИТЕРІЮ ЯКОСТІ РОБОТИ..... **23**

Тільняк Ю.Я., Корнага Я.І.
ДІАГНОСТИКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АВТОМОБІЛІВ
ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ..... **29**

Фомін О.О.
МЕТОД ПОБУДОВИ ПРОСТОРУ ДІАГНОСТИЧНИХ ОЗНАК
НА ОСНОВІ ІНТЕГРАЛЬНИХ ДИНАМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ..... **35**

Цапар В.С., Жученко О.А.
ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС ПІДТРИМКИ РІШЕНЬ ОПЕРАТОРА СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ
В УМОВАХ ДІЇ ВИПАДКОВИХ ЗБУРЕНЬ..... **40**

Чекурін В.Ф., Химко О.М.
МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ВИЯВЛЕННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЇ ВИТОКІВ
У МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДАХ..... **44**

Shumylyak L.M., Zhikharevich V. V., Ostapov S.E.
SYSTEM PARAMETERS INVESTIGATION FOR STEFAN PROBLEM SOLVING
BY THE CONTINUOUS ASYNCHRONOUS CELLULAR AUTOMATA METHOD..... **50**

ЕНЕРГЕТИКА

Абдулін М.З., Сірий О.А.
ДОСЛІДЖЕННЯ СТАЛОСТІ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ
У СТРУМЕНЕВО-НІШЕВІЙ СИСТЕМІ СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА..... **55**

Беляев В.К., Паненко Е.Н.
МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ
ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ ПОД РАБОЧИМ НАПРЯЖЕНИЕМ..... **61**

Бунько В.Я.
АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ
З ПЕРЕВАЖНО ІНДУКТИВНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ..... **67**

Велит І.А.
ВПЛИВ СКЛАДУ АМАЛЬГАМИ НАТРІЙ-ЦЕЗІЙ-РТУТЬ
НА СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАТРІЄВИХ ЛАМП ВИСОКОГО ТИСКУ
ДЛЯ УМОВ ТЕПЛИЧНОГО ГОСПОДАРСТВА..... **72**

Максимов М.В., Брунеткин А.И., Максименко А.А., Лысюк О.В.
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
СОСТАВА СМЕСИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ
КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩИХ ГАЗОВ СЖИГАЕМОГО ТОПЛИВА..... **77**

Пантелеева И.В.
СОСТОЯНИЕ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ НА ОСНОВЕ БИОТЕХНОЛОГИЙ..... **85**

Петров С.В., Забулонов Ю.Л., Т. Яшар Катирджы оглу
СИСТЕМА ПЛАЗМЕННОЙ ПОДСВЕТКИ
НИЗКОРЕАКЦИОННЫХ ТОПЛИВ ДЛЯ ТЕПЛОАГРЕГАТОВ..... **91**

Розен В.П., Великий С.С., Реуцький М.О.
ФОРМУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ
РЕЖИМІВ РОБОТИ ВОДОВІДЛИВНИХ УСТАНОВОК
НА ГІРНИЧОВИДОБУВНОМУ ПІДПРИЄМСТВІ..... **101**

Савченко Н.П., Третьяк А.В., Шевченко С.Ю.
МАХОВИК ПЕРЕМЕННОГО МОМЕНТА ИНЕРЦИИ
С ДИСБАЛАНСНЫМИ ГРУЗАМИ..... **107**

РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

Василишин В.Я.
ПРАКТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ
ВПЛИВУ КРУТНОГО МОМЕНТУ НА ОПІР ВТОМИ
РІЗЬОВИХ З'ЄДНАНЬ ТРУБ НАФТОВОГО СОРТАМЕНТУ..... **111**

Гого В.Б., Сироватченко В.О., Михайлов О.І.
РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И СРЕДСТВ КОМПЛЕКСНОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ОБЕСПЫЛИВАНИЯ
И ОХЛАЖДЕНИЯ РУДНИЧНОГО ВОЗДУХА..... **116**

Загриценко А.Н.
ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОСНОВА ВОДОРЕГУЛИРОВАНИЯ ПРИ ВЕДЕНИИ ГОРНЫХ РАБОТ
В СЛОЖНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ЗАПАДНОГО ДОНБАССА..... **122**

Нагорний В.П., Денисюк І.І., Юшицина Я.О.
ОБРОБЛЕННЯ ВУГЛЕВОДНЕВИХ ПЛАСТІВ
АМПЛІТУДНО МОДУЛЬОВАНИМИ ХВИЛЯМИ..... **128**

Слободянюк В.К., Письменный А.В.
РАЗРАБОТКА РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ЭКСКАВАТОРНО-ПЛУЖНОЙ ТЕХНОЛОГИИ
ОТВАЛЬНЫХ РАБОТ ПРИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ..... **133**

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Зінченко Н.Ю., Сімурова Н.В., Попова І.В.
ДОСЛІДЖЕННЯ В'ЯЗКОСТІ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ ІНУЛІНУ..... **138**

Колєгова А.С., Трохименко Г.Г., Гомеля М.Д.
ВИВЧЕННЯ ІОНООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ ВИЛУЧЕННЯ ІОНІВ МІДІ ТА ЦИНКУ
НА КАТІОНІТІ КУ-2-8 ТА ЕЛЕКТРОХІМІЧНЕ РОЗДІЛЕННЯ РЕГЕНЕРАЦІЙНИХ РОЗЧИНІВ
У СИСТЕМІ CU-ZN..... **142**

Кричковська Л.В., Дубоносов В.Л.
ОТРИМАННЯ ТОНКИХ ПЛІВОК МЕТОДОМ
ДУАЛЬНОГО РОЗПИЛЮВАННЯ ТА ЇХ ДОСЛІДЖЕННЯ..... **148**

Малишев В.В., Габ А.І., Косенко В.А., Смірнов Ю.І.
ЕЛЕКТРООСАДЖЕННЯ ПОКРИВІВ ТИТАНУ
ПОСТІЙНИМ ТА ІМПУЛЬСНИМ СТРУМОМ
НА ВУГЛЕЦЕВІ СТАЛІ З ГАЛОГЕНІДНИХ РОЗПЛАВІВ..... **153**

Малишев В.В., Шахнін Д.Б., Терещенко О.Я., Ускова Н.М.
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОВІДНОВЛЕННЯ ІОНІВ ГАДОЛІНІЮ
В ГАЛОГЕНІДНИХ РОЗПЛАВАХ..... **159**

Малышев В.В., Шахнин Д.Б., Косенко В.А., Смирнов В.И.
ЭЛЕКТРОВОССТАНОВЛЕНИЕ КОМПЛЕКСОВ ВОЛЬФРАМА
И ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЕ ВОЛЬФРАМА В ХЛОРИДНОМ РАСПЛАВЕ..... **165**

Онищенко В.О., Стороженко Д.О., Сененко Н.Б., Бунякіна Н.В.
ЗАСІБ КИСЛОТНИЙ ДЛЯ МИТТЯ ТА ДЕЗІНФЕКЦІЇ ДОЇЛЬНИХ АПАРАТІВ
МЕТОДОМ БЕЗРОЗБІРНОЇ ЦИРКУЛЯЦІЙНОЇ МИЙКИ..... **170**

Сабадаш В.В.
ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД У ПОЛІ ДІЇ НАДВИСОКОЧАСТОТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ..... **176**

Ускова Н.Н., Габ А.И., Малышев В.В., Бинг Ли
ПОВЫШЕНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ТИТАНА НАНЕСЕНИЕМ ВОЛЬФРАМОВЫХ
ГАЛЬВАНОПОКРЫТИЙ ИЗ ВОЛЬФРАМАТНО-ПИРОСУЛЬФАТНЫХ РАСПЛАВОВ..... **180**

Фролова Л.А., Анисимова Л.Б.
ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ГОМОГЕННОГО ОСАЖДЕНИЯ
ПРИ УТИЛИЗАЦИИ ТРАВИЛЬНЫХ РАСТВОРОВ..... **186**

Шуриберко М.М., Гомеля М.Д., Шаблій Т.О.
ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РЕАГЕНТІВ
ДЛЯ СТАБІЛІЗАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ ВОДИ..... **191**

CONTENTS

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND AUTOMATION

Pankov D.V., Kyshenko V.D., Sharuda S.S.
AUTOMATED QUALITY MANAGEMENT OF BAKERY PRODUCTION
ON THE BASIS OF PRINCIPLES OF QUALIMETRY **1**

Partalian A.S., Chumachenko S.M.
INFORMATION TECHNOLOGY IN MANAGEMENT PROBLEMS
ENVIRONMENTAL SAFETY MILITARY OBJECTS **7**

Repin M.V.
APPLYING OF STRATEGIC PLANNING METHODS
FOR DEVELOPMENT OF PREVENTIVE MEASURES FOR LABOR PROTECTION **13**

Stenyn A.A., Pasko V.P., Shytykova Y.H., Lemeshko V.A.
THE CONSTRUCTION OF SUBJECT-ORIENTED INTELLIGENT DECISION
SUPPORT SYSTEMS OF A SITUATIONAL TYPE **17**

Stepanets O.V., Mariiash Yu.I.
AUTO-TUNING METHOD OF THE PID CONTROLLER BASED
ON THE MINIMUM OF INTEGRAL TIME WEIGHTED ABSOLUTE ERROR **23**

Tilniak Yu.Ia., Kornaha Ya.I.
DIAGNOSTICS OF THE TECHNICAL STATE
OF AUTOMOBILES USING THE NEURAL NETWORK. **29**

Fomin O.O.
METHOD FOR DIAGNOSTIC FEATURES SPACE CONSTRUCTION USING
INTEGRAL DYNAMIC MODELS **35**

Tsapar V.S., Zhuchenko O.A.
SOFTWARE SUPPORT SOLUTIONS OF THE WINDSCREEN OPERATOR
IN THE CONDITIONS OF ACTION OF ACCIDENTAL DAMAGES **40**

Chekurin V.F., Khymko O.M.
MODELING OF THE SYSTEM FOR LEAK DETECTION
AND IDENTIFICATION IN LONG DISTANCE PIPELINES **44**

Shumylyak L.M., Zhikharevich V. V., Ostapov S.E.
SYSTEM PARAMETERS INVESTIGATION FOR STEFAN PROBLEM SOLVING
BY THE CONTINUOUS ASYNCHRONOUS CELLULAR AUTOMATA METHOD **50**

POWER ENGINEERING

Abdulin M.Z., Siryi O.A.
STABILITY ANALYSIS OF COMBUSTION ACTION
IN THE JET-NICHE SYSTEM OF BURNING FUEL **55**

Beliaev V.K., Panenko E.N.
METHOD OF DETERMINING THE DIELECTRIC PARAMETERS OF INSULATION
AT MEASUREMENTS BY MONITORING SYSTEM UNDER WORKING VOLTAGE **61**

Bunko V.Ya.
ANALYSIS OF RESEARCH AND DETERMINATION OF INDICATORS
OF ELECTRIC ENERGY QUALITY WITH PRIORLY INDUCTIVE LOAD **67**

Velyt I.A.
THE INFLUENCE OF THE COMPOSITION OF SODUIM-CESIUM-MERCURY AMALGAM ON
SPECTRAL CHARACTERICTICS OF HIGH PRESSURE SODIUM LAMPS FOR GREENHOUSES .. **72**

Maksymov M.V., Brunetkyn A.Y., Maksymenko A.A., Lysiuk O.V.
MATHEMATICAL MODEL OF DETERMINATION OF COMPOSITION OF MIXTURE
OF HYDROCARBONIC ACID-CONTAINING GASES OF COMBUSED FUEL **77**

Panteleeva Y.V.
DEVELOPMENT OF ENERGY STATUS ON THE BASIS OF BIOGEOTECHNOLOGIES **85**

Petrov S.V., Zabulonov Yu.L., T. Yashar Katyrdzhy ohlu
PLASMA LIGHTING SYSTEM OF LOW-REACTIVE FUELS
FOR HEAT-GENERATING SETS **91**

Rozen V.P., Velykyi S.S., Reutskyi M.O.
FORMATION OF ENERGY-EFFICIENT MODES OF WORKING
OF WATER-RESISTANT INSTALLATIONS ON MINE-ENTERPRISE ENTERPRISES **101**

Savchenko N.P., Tretiak A.V., Shevchenko S.Yu.
FLYWHEEL OF THE VARIABLE MOMENT OF INERTIA WITH DISBALANCED CARGOES **107**

RESOURCE DEVELOPMENT

Vasylyshyn V.Ya.
PRACTICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION
OF THE INFLUENCE OF THE CURRENT MOMENT
ON THE OPTIMUM OF ROTARY CONNECTIONS OF THE OIL SECTOR PIPE **111**

Gogo V.B., Syrovatchenko V.O., Mykhailov O.I.
DEVELOPMENT OF THE THEORY AND MEANS
OF INTEGRATED HYDRAULIC SPRAYING AND COOLING OF MUNICIPAL AIR..... **116**

Zahrytsenko A.N.
PARAMETRIC BASIS OF WATER REGULATION DURING MINE OPEARATION
IN COMPLEX HYDRODYNAMIC CONDITIONS OF WESTERN DONBASS **122**

Nahornyi V.P., Denysiuk I.I., Yushytsyna Ya.O.
PROCESSING THE HYDROCARBON STRATA
BY AMPLITUDE MODULATED WAVES **128**

Slobodianiuk V.K., Pysmennyi A.V.
DEVELOPMENT OF RESOURCE-SAVING EXCAVATOR-PLOW
TECHNOLOGY OF PUMPING AT A RAILWAY TRANSPORT **133**

CHEMICAL TECHNOLOGY

Zinchenko N.Yu., Simurova N.V., Popova I.V.
THE STUDY OF VISCOSITY OF AQUEOUS INULIN SOLUTIONS **138**

Koliehova A.S., Trokhymenko H.H., Homelia M.D.
THE STUDY OF ION-EXCHANGE PROCESSES OF EXTRACTING COPPER
AND ZINC IONS BY THE CATION EXCHANGER KU-2-8 AND THE ELECTROCHEMICAL
SEPARATION OF REGENERATION SOLUTIONS IN THE CU-ZN SYSTEM **142**

Krychkovska L.V., Dubonosov V.L.
THE PRODUCTION OF THIN FILMS BY THE DUAL-SPUTTERING
METHOD AND THEIR INVESTIGATION **148**

Malyshev V.V., Hab A.I., Kosenko V.A., Smirnov Yu.I.
ELECTRODEPOSITION OF TITANIUM COATINGS
BY CONSTANT AND PULSE CURRENT ON CARBON STEAL FROM HALIDE MELTS **153**

Malyshev V.V., Shakhnin D.B., Tereshchenko O.Ya., Uskova N.M.
STUDY OF GADOLINIUM IONS ELECTROREDUCTION IN HALIDE MELTS **159**

Malyshev V.V., Shakhnyn D.B., Kosenko V.A., Smyrnov V.Y.
ELECTROREDUCTION OF TUNGSTEN COMPLEXES
AND TUNGSTEN ELECTROREDUCTION IN CHLORIDE MELT **165**

Onyshchenko V.O., Storozhenko D.O., Senenko N.B., Buniakina N.V.
ACID COMPOSITION FOR WASHING AND DISINFECTION
OF MAILKNG MACHINES BY THE CIP-CLEANING PRINCIPLE **170**

Sabadash V.V.
WASTEWATER TREATMENT IN THE FIELD
OF MICROWAVE RADIATION **176**

Uskova N.N., Hab A.Y., Malyshev V.V., Bynh Ly
INCREASING OF TITANIUM CORROSION RESISTANCE
BY TUNGSTEN COATINGS DEPOSITION FROM TUNGSTATE-PYROSULFATE MELTS **180**

Frolova L.A., Anysymova L.B.
PHASE TRANSFORMATIONS UNDER CONDITIONS
BY HOMOGENEOUS PRECIPITATION WITH UTILIZATION OF PICKLE LIQUORS..... **186**

Shuryberko M.M., Homelia M.D., Shablii T.O.
RESERCH AND EVALUATION OF REAGENT EFFICIENCY
FOR STABILIZING WATER TREATMENT **191**

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 681.513.54:664.64.016

Паньков Д.В.
Національний університет харчових технологій

Кишенько В.Д.
Національний університет харчових технологій

Шаруда С.С.
Національний університет харчових технологій

АВТОМАТИЗОВАНЕ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ПРОДУКЦІЇ ХЛІБОПЕКАРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА НА ОСНОВІ ПРИНЦИПІВ КВАЛІМЕТРІЇ

У статті досліджуються методи підвищення якості хлібопекарської продукції на всіх стадіях виробництва та її атестації для реалізації споживачам за допомогою інтегрованої автоматизованої системи управління якістю продукції, в якій використані сучасні методи комп'ютерної кваліметрії.

Ключові слова: *хлібопекарське виробництво, управління якістю, автоматизована система, комп'ютерна кваліметрія.*

Постановка проблеми. Комп'ютерні системи моніторингу та управління технологічними процесами стають предметом розумових зусиль фахівців у різних сферах виробничої діяльності. Оцінка якісного рівня продукції, комп'ютерна діагностика ведення технологічних процесів, комп'ютерні управляючі комплекси виробничих і бізнес-процесів, кваліметричні оціночно-інформаційні системи у сфері дії ергатичних і біотехнологічних систем, автоматизовані системи експертизи якості багатокомпонентних і композитних сполук тощо – приклади різних напрямів комп'ютеризації виробництва. Вихід на інтелектуальний рівень комп'ютерних кваліметричних технологій визначає необхідність нового етапу узагальнення методології кваліметрії, створення можливостей усвідомленого, наукового підходу в справі розроблення різного типу кваліметричних комп'ютерних систем, зокрема й експертних. Щодо сфери харчової промисловості, хлібопекарського виробництва також, така систематизуюча і методологічна робота вимагає подальшого узагальнення методології кваліметрії та механізмів її трансформації до конкретних ситуацій оцінювання й систематизації оціночних завдань в управлінні хлібопекарським виробництвом, серед яких: завдання і ситуації оцінювання якості сировини, напівфабрикатів, готової продукції, ведення технологічних процесів на всіх стадіях виробництва, механізми атестації, сертифікації у сфері збуту хлібобулочних виробів.

Аналіз досліджень і публікацій. У наш час накопичений певний досвід створення комп'ютерних кваліметричних систем на базі непараметричної статистики; оцінки якості й ефективності ергатичних систем на основі застосування спеціально розроблених «структурних мов» і теорії марківських і напівмарківських процесів [1], оцінки якості біотехнічних систем із застосуванням арсеналу нечіткої кваліметрії [2]. Окремі аспекти управління якістю продукції висвітлено в працях закордонних і вітчизняних науковців: О. Томіліна [3], В. Новікова [4], В. Оскольського [5], А. Макеєнка [6], В. Літинської

[7], К. Кутаха [8], Г. Зайкіної [9], Н. Голомші [10], В. Артиша [11], А. Краснова [12] та ін. Однак недостатньо дослідженими залишаються чинники впливу на формування якості хлібопекарської продукції та шляхи вдосконалення технологічних процесів виробництва хлібобулочних виробів.

Постановка завдання. Мета статті – систематизувати чинники впливу на формування якості хлібопекарської продукції та обґрунтувати шляхи підвищення ефективності інтелектуального управління якістю на хлібокомбінаті. Якість як об'ємна, складна й універсальна категорія має багато особливостей і аспектів. Управління якістю в хлібопекарському виробництві потрібно розглядати як процес цілеспрямованих дій у системі хлібокомбінату для виявлення, забезпечення і підтримки необхідного заданого рівня якості хлібопекарської продукції, що виробляється. Автоматизована система управління якістю на хлібокомбінаті характеризується як сукупність взаємопов'язаних елементів автоматизованої системи якості, взаємодіючих за допомогою інформаційних і матеріально-технічних засобів. Цими основними елементами є завдання, функції, організаційні структури управління, методи управління тощо, взаємодія яких забезпечує виробництво хлібопекарської продукції відповідного рівня якості. Одержанню високих результатів через впровадження автоматизованої системи управління якістю на кожній стадії виробництва передує добре організована робота: визначення потреб споживача; формування завдань на кожній стадії виробництва у сфері якості; визначення та постачання ресурсів, необхідних для досягнення заданого рівня у сфері якості; застосування методів, за допомогою яких буде визначено ефективність і результативність кожного процесу виробництва; визначення засобів для усунення невідповідностей.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для успішної роботи підприємств на сучасному ринку наявність у них системи якості, що відповідає стандартам ISO серії 9000 [13], і сертифіката на неї може бути не зовсім достатньою, але необхідною умовою. Все частіше впроваджується система «тотального управління якістю» (Total Quality Management – TQM), яка є результатом поєднання східної та західної концепції щодо управління якістю продукції. Ця система загального управління, за якої політика управління якістю продукції, її забезпечення та підвищення мають велике значення в системі управління підприємством. Складовими елементами системи TQM є планування, аналіз оцінювання та контроль якості продукції, а також керування завданнями та вимогами [3]. Методичною основою є «петля якості». Петля якості – це концептуальна модель взаємозалежних видів діяльності, що впливають на якість на різних стадіях виробництва від визначення потреб до оцінки їх задоволення. Схематично «петля якості» зображена на рис.1.

Динамічність вимог до якості на кожній стадії виробництва хлібопекарської продукції зумовлює

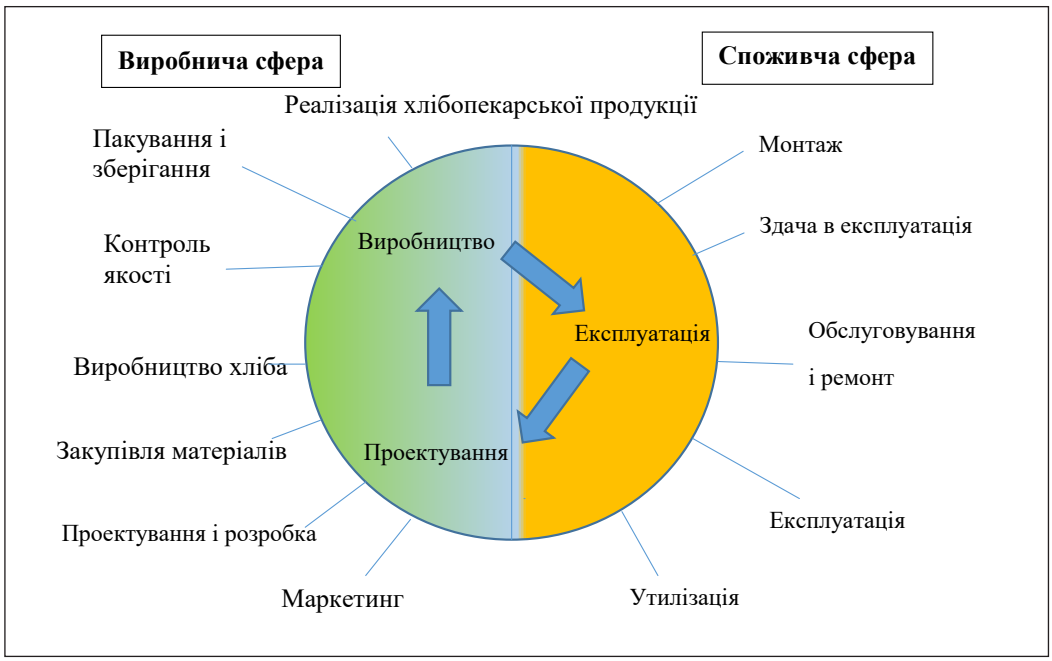


Рис. 1. «Петля якості» – етапи забезпечення якості хлібопекарської продукції

необхідність впровадження системного підходу до управління якістю як такого, що дозволяє враховувати взаємозв'язки між суб'єктами й об'єктами управління якістю, забезпечувати цілеспрямований вплив на характеристики продукції на кожній стадії виробництва та рівень якості. Тому актуальним завданням є обґрунтування структури автоматизованої системи управління якістю продукції на хлібокомбінаті для забезпечення виконання нею функціонального призначення [14]. Впровадження в хлібопекарське виробництво інтегрованих систем управління якістю на кожній стадії виготовлення дозволяє підвищити якість продукції, конкурентоспроможність підприємства завдяки застосуванню системного і процесного підходів до автоматизованого управління підприємством. Інтегровану автоматизовану систему управління якістю продукції на кожній стадії виробництва варто розглядати як сукупність основних підсистем, які впливають на загальну ефективність системи і спрямовані на підвищення якості хлібопекарської продукції (рис. 2).

Інтегрована автоматизована система управління якістю продукції на хлібокомбінаті є

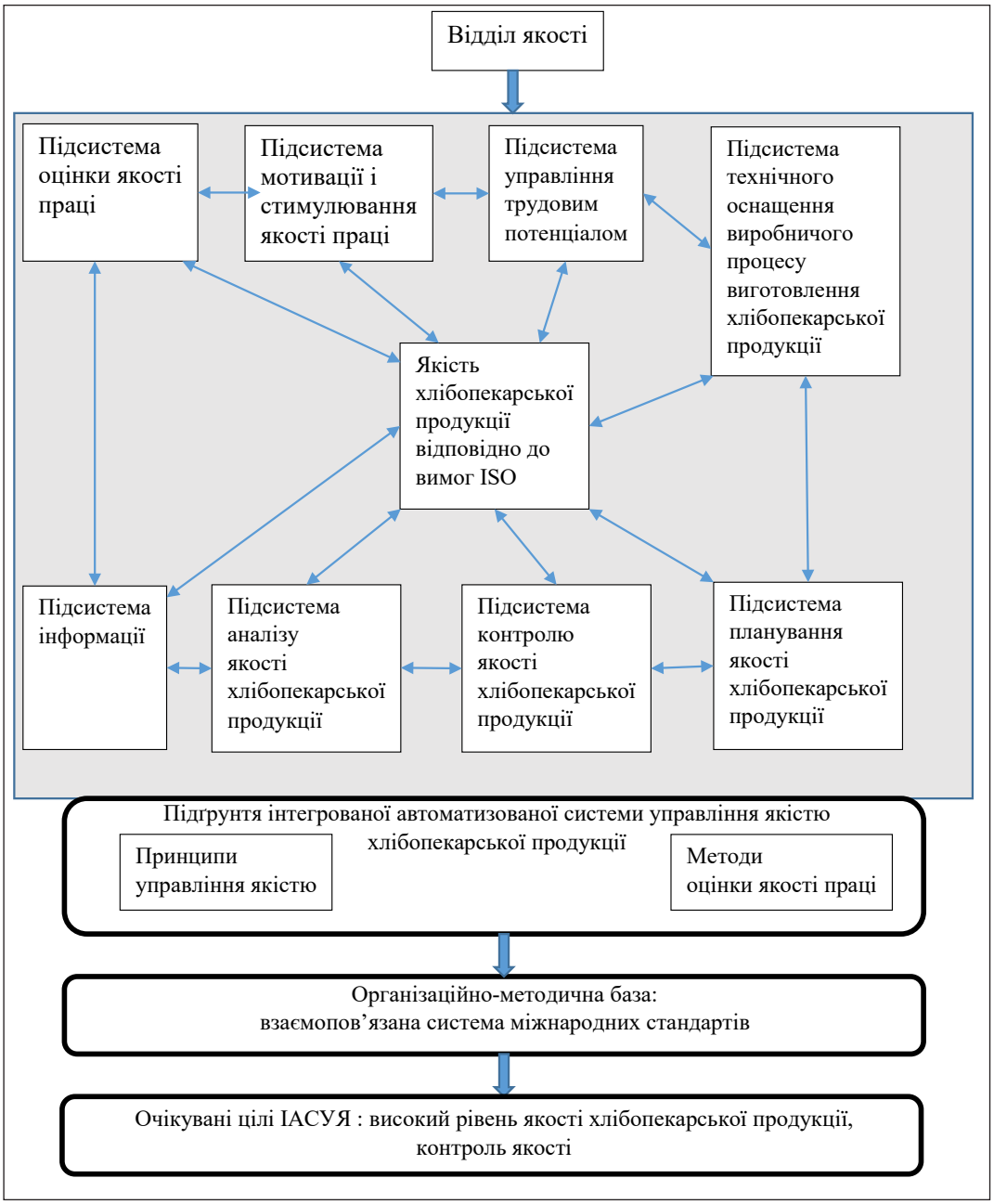


Рис. 2. Інтегрована автоматизована система управління якістю хлібопекарської продукції

автоматизованою системою, що об'єднує підсистеми управління якістю на кожній стадії виробництва. Основою є методи вимірювання якості праці та принципи управління якістю продукції на кожній стадії виробництва, які є базовими згідно з міжнародними стандартами ISO 9000:2009. Кожна підсистема, що охоплює ту чи іншу сферу управління якістю хлібопекарської продукції, покликана вирішувати поставленні задачі щодо формування якості праці та підвищення якості продукції. Доцільно виділяти такі підсистеми управління якістю на хлібокомбінаті, як: планування якості, формування та стимулювання якості праці, технічного оснащення виробничого процесу виготовлення продукції, інформації, контролю якості продукції, аналізу й оцінки якості праці та продукції.

Мета управління якістю хлібопекарської продукції полягає в такому виборі оптимальних значень окремих, узагальнених характеристик і інтегральних показників із відповідних допустимих множин, щоб критерій якості системи загалом мав найкраще значення. Водночас за ієрархічним принципом окремі характеристики безпосередньо входять як керовані параметри в узагальнені, узагальнені – як керовані параметри в інтегральні, а інтегральні – як керовані параметри входять в критерій якості функціонування системи загалом. Множини значень вагових коефіцієнтів окремих характеристик, значень самих характеристик визначаються за результатами кваліметричних експертиз.

У результаті анкетування експертів проведено ранжування за важливістю показників хлібопекарського виробництва та ступенем їхнього впливу на якість напівфабрикатів і продукції.

Обробка експертних даних проводилася за допомогою багатомірного шкалування, ідея якого полягає в тому, щоб виробити порядок («шкалу») наступності характеристик, який більш точно відображає результати ранжування показників експертами. Позитивним моментом багатомірного шкалування [15] є підсилення типу даних: якщо початкові оцінки мали порядкові властивості, то кінцеві шкали вже є інтервальними, тобто за рангового оцінювання «властивість А важливіша за властивість Б», а на основі побудови шкал є можливість сказати про те, що «властивість А важливіша за властивість Б на стільки-то одиниць».

Багатомірне шкалування дозволяє здійснити пошук та інтерпретацію «латентних» (прихованих) змінних, що дає можливість пояснити схожість між об'єктами, які задаються точками в просторі ознак. Основна задача методу багатомірного шкалування полягає в тому, щоб зменшити число чинників, що характеризують змінювання виробничих процесів під час управління ними (зменшення розмірності). Використання даного методу дозволяє проводити змістовний аналіз набору чинників, щоб визначити оцінку близькості та відмінності різних варіантів розвитку ситуацій [15].

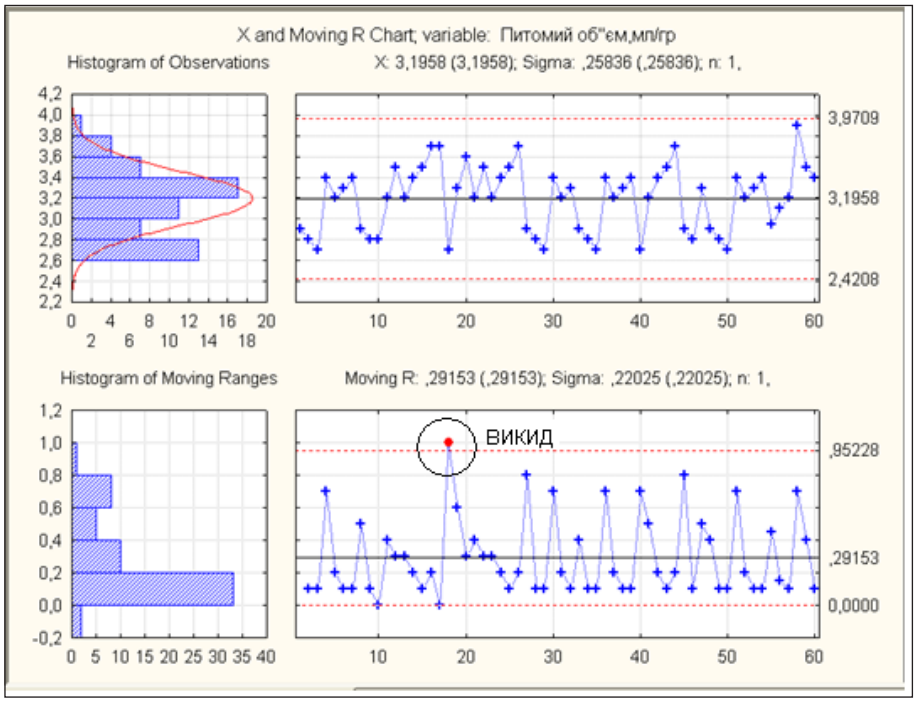


Рис. 3. Карти контролю якості готового продукту В. Шухарта

З використанням принципів кваліметрії були отримані комплексні показники оцінки якості продукції ($К_1 – К_8$).

Стадія підготовки сировини:

$$К_1 = 0,263\ Ф_б + 0,109\ ВПЗ_б + 0,245\ Н^{АП}_{стисн.} + 0,185\ К_{сир.кл.} + + 0,078\ Г_б + 0,12\ К_б. \quad (1)$$

Стадія дозування сировини:

$$К_2 = 0,446\rho_{др.} + 0,387\rho_{с.р.} + 0,167\ W_б. \quad (2)$$

Стадія замісу опари:

$$К_3 = 0,098\ W_{оп} + 0,113\rho_{оп} + 0,145\eta_{оп} + 0,276\ Ф_б + 0,11\rho_{др} + + 0,08\rho_{с.р} + 0,178\ W_б. \quad (3)$$

Стадія бродіння опари:

$$К_4 = 0,098\ W_{оп} + 0,113\rho_{оп} + 0,11G_{др.} + 0,086\eta_{оп} + 0,133\ Ф_б + 0,102\rho_{др.} + 0,08\rho_{с.р.} + 0,096\ W_б + 0,086\ ПС_{др.} + 0,063\ Г_б + 0,33\ К_б. \quad (4)$$

Стадія замісу тіста:

$$К_5 = 0,098\ W_т + 0,348I_{з.т.} + 0,145\eta_т + 0,163\ С_{з.т.} + 0,11\ ВПЗ_{б.} + 0,136\ W_б. \quad (5)$$

Стадія бродіння тіста:

$$К_6 = 0,98\ А_{п.т.} + 0,158\ I_{з.т.} + 0,086\ G_б + 0,096\ Ф_б + 0,102t_т + 0,079\ ПС_{оп} + + 0,017р\ Н_{оп} + 0,107\ К_{оп} + 0,096\ W_т + 0,161\ Г_б. \quad (6)$$

Стадія вистоювання тістових заготовок:

$$К_7 = 0,201\ ПС_{т.з.} + 0,213\ Ф_{т.з.} + 0,158\tau_{вист.} + 0,143\ П_{т.з.} + 0,095\ t_{ш.в.} + 0,087\ W_{ш.в.} + 0,065m_{т.з.} + 0,038\eta_т. \quad (7)$$

Стадія випікання хліба:

$$К_8 = 0,176\ П_х + 0,183\ К_х + 0,165\ Ф_х + 0,142\ W_х + 0,211t_{ц.м.} + 0,036\ Н_{в.пр} + 0,087\tau_{вип.}, \quad (8)$$

де $Ф_б$ – сила борошна, од. приладу; $ВПЗ_б$ – водопоглинаюча здатність борошна, $см^3/100$ г; $Н^{АП}_{стисн.}$ – якість клейковини, од. пенетрометра; $К_{сир.кл.}$ – кількість сирої клейковини, % до маси борошна; $Г_б$ – газоутворююча здатність борошна, $см^3\ CO_2/100$ г; $К_б$ – кислотність борошна, град.; $\rho_{др}$ – густина рідких дріжджів, $г/м^3$; $\rho_{др}$ – густина соляного розчину, $г/м^3$; $W_б$ – вологість борошна, %; $W_{оп}$ – вологість опари, %; $\rho_{оп}$ – густина опари, $г/м^3$; $\eta_{оп}$ – реологічні властивості опари; $G_{др.}$ – кількість дріжджів, г; $ПС_{др.}$ – підйомна сила дріжджів, хв.; $W_т$ – вологість тіста, %; $I_{з.т.}$ – інтенсивність замісу тіста; $\eta_т$ – реологічні властивості тіста; $С_{з.т.}$ – спосіб замісу тіста; $А_{п.т.}$ – питома робота замісу тіста, кДж/кг; $G_б$ – витрати борошна, кг; $t_т$ – температура тіста, $^0С$; $ПС_{оп}$ – підйомна сила опари, хв.; $рН_{оп}$ – активна кислотність опари, од. рН; $К_{оп}$ – титрована кислотність, град; $ПС_{т.з.}$ – підйомна сила тістової заготовки, мм; $Ф_{т.з.}$ – формоутримуюча здатність тістової заготовки (H : D); $\tau_{вист.}$ – тривалість вистоювання тістових заготовок, хв.; $П_{т.з.}$ – пористість тістової заготовки, %; $t_{ш.в.}$ – температура в шафі вистоювання, $^0С$; $W_{ш.в.}$ – вологість у шафі вистоювання, %; $m_{т.з.}$ – маса тістової заготовки, гр.; $П_х$ – пористість хліба, %; $К_х$ – кислотність хліба, град; $Ф_х$ – формостійкість подового хліба (H : D); $W_х$ – вологість хліба, %; $t_{ц.м.}$ – температура центра м'якуша, $^0С$; $Н_{в.пр}$ – відносна пружність м'якуша, %; $\tau_{вип.}$ – тривалість випікання тістових заготовок, хв.

Якість функціонування виробничих процесів оцінювалася статистичними методами контрольних карт Шухарта. За допомогою контрольних карт можна: перевіряти стабільність технологічних процесів, тримати на заданому рівні значення певних характеристик, своєчасно реагувати на небажану зміну перебігу технологічного процесу, перевіряти ефективність управляючих дій [16].

Статистичні методи, запропоновані В. Шухартом, дозволяють зосередити зусилля не на тому, як знайти і вилучити неякісний продукт до його відвантаження покупцю, а на тому, як збільшити вихід готових виробів найкращої якості. В. Шухарт запропонував класифікувати відхилення показника якості за двома видами: випадкові, зумовлені зазвичай великою кількістю різних випадкових чинників (коливання температури, вологості тощо), і невипадкові, викликані особливими причинами (наявність високої похибки вимірювального приладу, невідповідністю сировини технічним умовам тощо). В. Шухарт запропонував за допомогою контрольних карт виявляти невипадкові відхилення і, як результат, особливі причини, що найбільше впливають на перебіг технологічних процесів.

Ефективність роботи створеної системи оцінювалася за допомогою карт контролю якості (рис. 3).

На X-карті відкладено середні значення вибірки даних для характеристики питомого об'єму готового продукту, оскільки відхилення відсутні, то технологічний процес проходив нормально.

Викид на R-карті говорить про вихід характеристики за мінімаксні значення. Отже, були допущені помилки під час управління технологічним процесом.

Висновки. У результаті дослідження встановлено, що однією з основних закономірностей управління якістю хлібопекарської продукції є залежність якості від безперервності контролю на всіх напрямах: вхідного контролю якості сировини, напівфабрикатів; контролю технологічного процесу виробництва; контролю готової продукції; контролю реалізації продукції після виходу її з виробництва. Для підвищення ефективності управління якості на хлібопекарському підприємстві необхідно використовувати систему управління якістю TQM, яка дозволить вирішувати проблемні питання комплексно.

Список літератури:

1. Губинский А. Надежность и качество функционирования эргатических систем. СПб., 2006. 320 с.
2. Феоктистова Н. Модели количественного оценивания качества продовольственных товаров: монография. KG, 2012. 158 с.
3. Томілін О. Впровадження системи управління якістю продукції на підприємствах. Наукові праці Полтавської держ. аграр. акад. Серія «Екон. науки». 2012. Вип. 1. Т. 2. С. 312–316. URL: http://www.pdaa.edu.ua/sites/default/files/nppdaa/4.2/312.pdf.
4. Новіков В. Система управління безпечністю харчових продуктів. Застосування методології «життєвих циклів». Стандартизація, сертифікація, якість. 2008. № 2. С. 50–52.
5. Оскольський В. Екологічно чисте виробництво: економічні та організаційні аспекти управління якістю продукції. Економіка України. 2013. № 11. С. 4–12.
6. Макеєнко А. Управління якістю і конкурентоспроможністю в аграрному секторі економіки країни. Агросвіт. 2013. № 12. С. 51–54.
7. Літинська В. Досвід з котролю якості та безпеки харчових продуктів. Стандартизація, сертифікація, якість. 2008. № 4. С. 59–63.
8. Кутах К. Впровадження системи управління якістю продукції на підприємствах. Технологический аудит и резервы производства. 2014. № 5. Т. 1. URL: http://cyberleninka.ru/article/n/vprovadzhennya-sistemi-upravlinnya-yakistyuproduktsiyi-na-pidpriemstvah (дата звернення: 05.11.2014).
9. Зайкіна Г. Удосконалення системи управління якістю і конкурентоспроможністю продукції підприємства. Агросвіт. 2014. № 11. С. 28–32.
10. Голомша Н. Економічна ефективність запровадження систем управління якістю в підприємстві. Економіка АПК. 2013. № 2. С. 71–76.
11. Артиш В. Формування менеджменту якості підприємств із виробництва органічної продукції. Економіка АПК. 2013. № 2. С. 68–71.
12. Информационные технологии пищевых производств в условиях неопределенности. Системный анализ, управление и прогнозирование с элементами компьютерного моделирования: монография / А. Краснов, О. Большаков, О. Красуля, Т. Шленская; под редакцией А. Краснова, О. Красули. М.: ВНИИМП, 2001. 497с.
13. ДСТУ ISO 9001:2015. Системи управління якістю. Вимоги (ISO 9001:2015, IDT). К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 22 с.
14. Орлов П. Впровадження систем управління якістю: стан, проблеми, перспективи. Стандартизація, сертифікація, якість. 2013. № 6. С. 59–63.
15. Халафян А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных. 3-е изд. М.: 000 «Бином-Пресс», 2007. 512 с.

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ ХЛЕБОПЕКАРНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПОВ КВАЛИМЕТРИИ

В статье исследуются методы повышения качества хлебопекарной продукции на всех стадиях производства и аттестации для реализации потребителям с помощью интегрированной автоматизированной системы управления качеством продукции, в которой использованы современные методы компьютерной квалиметрии.

Ключевые слова: *хлебопекарное производство, управление качеством, автоматизированная система, компьютерная квалиметрия.*

AUTOMATED QUALITY MANAGEMENT OF BAKERY PRODUCTION ON THE BASIS OF PRINCIPLES OF QUALIMETRY

The article explores methods of improving the quality of bakery products at all stages of production and certification for sale to consumers with the help of an integrated automated product quality management system that uses modern methods of computer qualimetry.

Key words: *bakery production, quality management, automated system, computer qualimetry.*

УДК 504.05+504.054.2:574

Парталян А.С.
Управління екологічної безпеки та протимінної діяльності
Міністерства оборони України

Чумаченко С.М.
ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища
Національної академії наук України»

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНОЮ БЕЗПЕКОЮ ВІЙСЬКОВИХ ОБ'ЄКТІВ

У статті розглянуто концептуальні питання розроблення інформаційно-аналітичної системи управління екологічною безпекою для військових об'єктів та перспективи її використання в Збройних силах України.

Ключові слова: *інформаційно-аналітична система, екологічна безпека, військовий об'єкт.*

Постановка проблеми. Сьогодні стан екологічної безпеки в Збройних силах України [1], особливо в умовах військового конфлікту на Сході держави, свідчить про наявність актуальної проблеми управління станом навколишнього середовища в місцях дислокації військових об'єктів (далі – ВО).

На сучасному етапі оцінка екологічного стану ВО ґрунтується на системі експертних оцінок начальників служб екологічної безпеки, які здебільшого не мають відповідної підготовки та не забезпечені спеціальним обладнанням.

У сучасній системі екологічного моніторингу ВО відсутній постійний обмін інформацією. Вона надається лише за запитом від верхнього за ієрархією рівня або в разі виникнення надзвичайної ситуації екологічного характеру. За таких умов у разі виникнення надзвичайних ситуацій екологічного характеру, бойових дій або терористичних актів із застосуванням різного роду небезпечних речовин можливості начальників служб екологічної безпеки вкрай обмежені.

Це, у свою чергу, потребує створення інформаційно-аналітичних систем управління екологічною безпекою на ВО, що дозволить оперативно вирішувати питання в системі моніторингу й управління екологічними ризиками, зокрема, розвитку їхнього інформаційно-аналітичного складника. Комплексний підхід до вирішення питань підвищення рівня екологічної безпеки із застосуванням інформаційних технологій у Збройних силах України варто розглядати як необхідне підґрунтя для подальшого розвитку природоохоронної діяльності і формування їхнього зеленого іміджу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед робіт видатних вітчизняних учених у галузі розроблення новітніх підходів до управління екологічною та техногенною безпекою, оцінки екологічних загроз і ризиків варто зазначити праці М.М. Биченка, Є.О. Яковлєва і С.П. Іванюти [2], П.Г. Білова, А.Б. Качинського й інших. Управління екологічною безпекою військових об'єктів і екологічний моніторинг воєнно-техногенного навантаження як самостійні напрями екологічної безпеки військової діяльності було розвинуто в роботах І.С. Романченка, А.І. Сбітнєва, С.М. Чумаченка [3–6], О.І. Лисенка [7] та інших.

У країнах, що входять до блоку НАТО, поширений системний підхід, який під час оцінювання життєвого циклу різних техноприродних систем спирається на поняття екологічного балансу [8]. Під час реєстрації екологічних даних військовий об'єкт розглядається як відкрита ієрархічна військово-технічна система, яка має техногенні чинники впливу на навколишнє середовище і перетворює матеріальні й енергетичні ресурси на корисну дію за своїм призначенням, та виділяє протягом свого життєвого циклу в навколишнє середовище відходи і стічну воду.

Постановка завдання. Метою публікації є розроблення концептуальних підходів до інформаційно-аналітичної системи управління екологічною безпекою військових об'єктів із застосуванням WEB-порталу й оцінка можливості її впровадження в Збройних силах України в сучасних умовах.

Виклад основного матеріалу дослідження. Технології впровадження нових засобів збору й обробки екологічної інформації з метою

розроблення управлінських заходів дозволяють перейти до втілення екологічної парадигми розвитку військового сектора держави в умовах сучасних цивілізаційних викликів.

Інформаційно-аналітична система управління екологічною безпекою військового об'єкта – це апаратно-програмна система спостережень, ідентифікації, контролю стану екологічних систем, розташованих на території ВО, а також локальної екосистеми прилеглої території загалом у складі регіональної екосистеми з метою прогнозування розвитку природно-техногенних процесів на ВО під впливом заходів військової діяльності та підтримки ухвалення рішення щодо управління якістю навколишнього природного середовища (далі – НПС) (рис. 1).

Завданнями управління екологічною безпекою ВО є:

1. Виявлення та реєстрація джерел воєнно-техногенного навантаження, що пов'язані з діяльністю ВО, а також джерел іншого походження, розташованих у межах районів дислокації ВО й у безпосередній близькості від них.

2. Встановлення масштабів та інтенсивності екологічно несприятливих та небезпечних чинників впливу в межах районів дислокації, і насамперед на функціональних об'єктах.

3. Ідентифікація поточного екологічного стану всієї території та ВО.

4. Вивчення здатності екосистеми ВО до самовідновлення.

5. З'ясування екологічного стану ВО без антропогенного впливу воєнно-техногенної діяльності – його «еталонного» стану.

6. Виявлення найбільш забруднених зон ВО для можливості зонування щодо ступеня забрудненості території з метою проведення подальших реабілітаційних робіт.

7. Визначення параметрів процесів міграції екологічно небезпечних речовин: на території ВО; з території ВО за його межі; із-за меж ВО на його територію.

8. Моніторинг ВО як елемента соціо-еколого-економічної системи.

Під час вирішення задач управління екологічною безпекою ВО в Збройних силах України

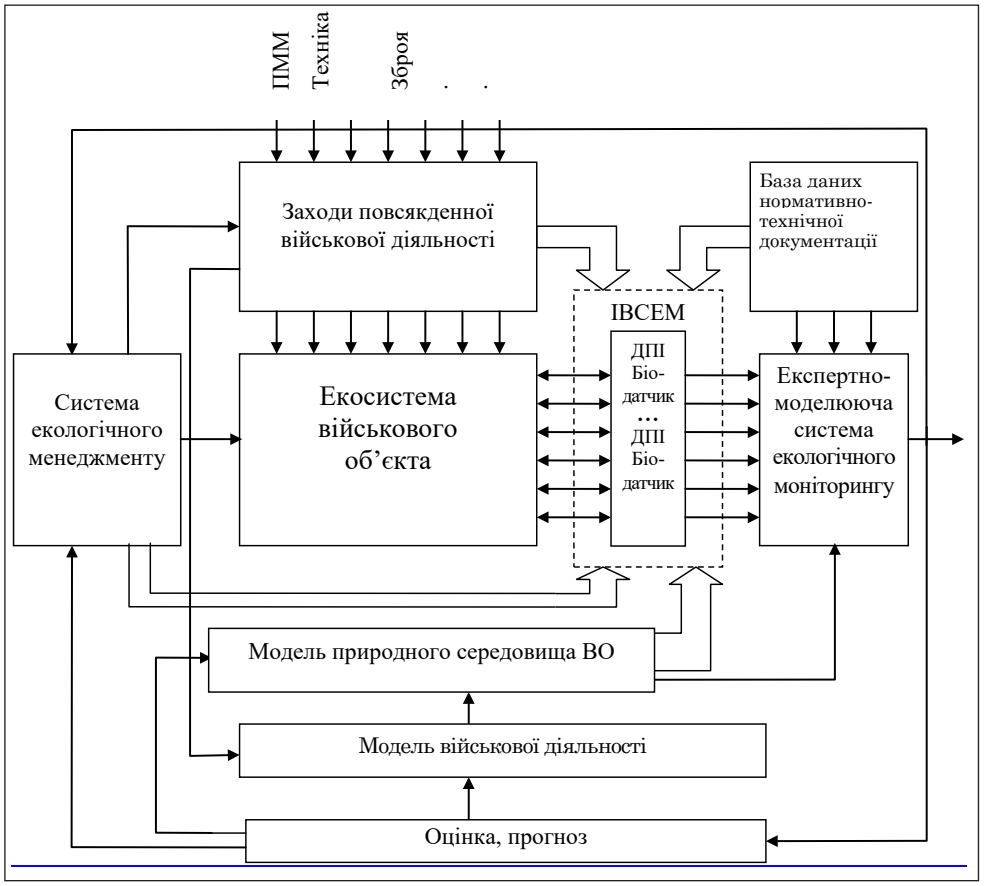


Рис. 1. Структурна схема інформаційно-аналітичної системи управління екологічною безпекою на ВО, ІВСЕМ – інформаційно-вимірювальна система екологічного моніторингу

використовуються такі функції екологічної інформації:

– регулююча − спрямована на управління станом навколишнього середовища для досягнення заданої мети – підтримання екологічної безпеки ВО на належному рівні. До неї належать накази, вказівки, директиви, екологічні норми та стандарти, правила, інструкції, керівництва тощо;

– інформуюча – характеризує стан навколишнього середовища, відхилення його від заданих екологічних стандартів і норм, наявні порушення екологічної безпеки ВО. До неї відносять доповіді, донесення, повідомлення тощо;

– обліково-статистична − «зелені звіти» про стан навколишнього середовища і стан екологічної безпеки ВО;

– оперативно-технічна − характеризує показники роботи служби екологічної безпеки;

– економічна – надає фінансові звіти про екологічні платежі та штрафи за порушення екологічного законодавства України;

– контрольна – цілеспрямовано запитувана інформація, що призначена для перевірки параметрів функціонування системи управління станом навколишнього середовища ВО.

Оперативність системи управління екологічною безпекою в даний час відстає від стану і розвитку екологічної ситуації в Збройних силах України.

Наявні у світовій практиці підходи до побудови інформаційно-аналітичних систем можна класифікувати залежно від новітніх концепцій аналізу й збереження даних [5]:

– відповідних інструментів побудови банку даних (технології побудови сховищ даних – Data Warehouse);

– відповідних інструментів аналітичної обробки даних (технології OLAP, ROLAP, OLTP);

– відповідних інструментів інтелектуального аналізу даних (технології Data Mining).

Якщо ми говоримо про необхідність побудови гармонійної інформаційно-аналітичної системи управління екологічною безпекою ВО, то зрозуміло, що для її ефективної роботи необхідно побудувати ієрархічну архітектуру на основі наявної структури служби екологічної безпеки, яка б ефективно підтримувала кропітку повсякденну діяльність офіцерів, відповідальних за стан довкілля, зі збору і документування даних на нижньому ієрархічному рівні (рівень окремого ВО).

Однак для відповідного аналітичного аналізу ситуації й ухвалення рішень (аналіз екологічних ризиків, ухвалення науково обґрунтованих управлінських рішень щодо управління станом НПС) необхідно мати більші об’єми інформації, які не можуть бути зібрані тільки у відповідній паспортній базі даних за ВО і можуть бути отримані з баз

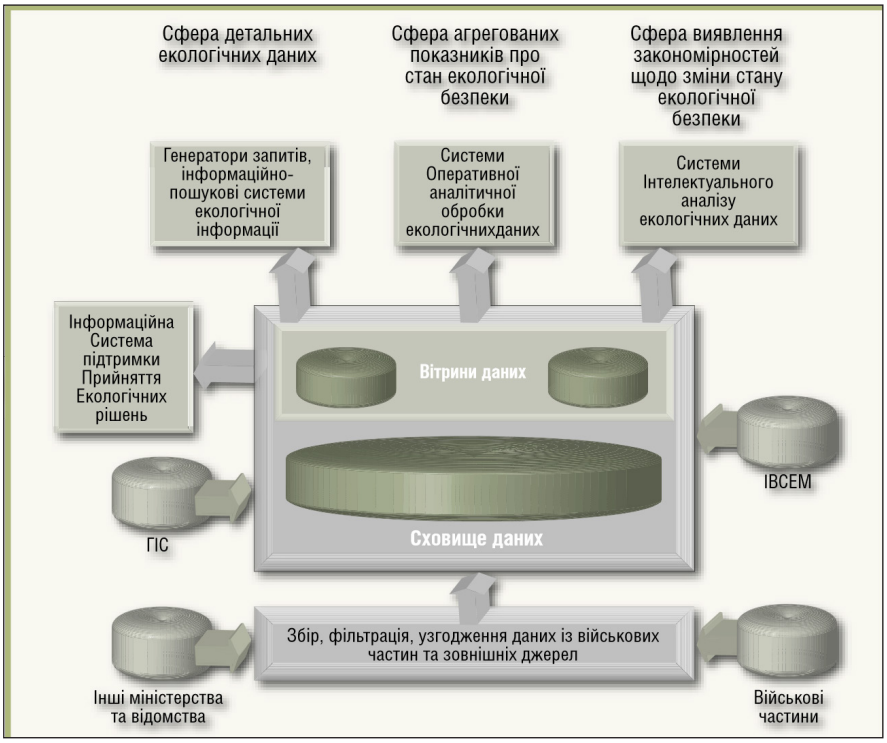


Рис. 2. Загальна архітектура інформаційно-аналітичного забезпечення системи управління екологічною безпекою в Збройних силах України

даних та інформаційно-аналітичних систем інших міністерств і відомств.

Отже, постає питання про проектування відповідного інформаційного сховища даних для збирання необхідної інформації.

Однак останнім часом у зв'язку з нарощуванням вимог до розроблення сховищ даних для ієрархічної аналітичної обробки інформації все більшої популярності набуває багатовимірний підхід під час проектування архітектури бази даних.

На наш погляд, варто бути реалістами в тому, що на даний момент повноцінне запровадження багатовимірних систем управління базами даних (далі – БСУБД) поки що неможливе в Збройних силах України через необхідність великих фінансових коштів для закупівлі відповідного високотехнологічного обладнання та програмних продуктів. Однак реалізація на нижніх ланках ієрархічної системи управління станом навколишнього середовища на базі реляційних систем управління базами даних (далі – РСУБД) реальна вже зараз, тому що вона може бути побудована на основі застосування доступних програмних продуктів і відпрацьованих реляційних технологій.

Як показує багаторічний досвід, під час розроблення інформаційно-аналітичної системи управління екологічною безпекою (далі – ІАСУЕБ) виникає низка типових труднощів:

– складність опису предметної області (досить велика кількість функцій розроблюваної системи, процесів, елементів даних вектора екологічного стану параметрів НПС і складні взаємозв'язки між ними), що потребує ретельного моделювання й аналізу екологічних даних і процесів;

– наявність сукупності тісно взаємодіючих компонентів (підсистем) ІАСУЕБ, що мають свої локальні задачі і цілі функціонування (наприклад, традиційних додатків, пов'язаних з обробкою транзакцій і вирішенням регламентних задач (автоматизований екологічний паспорт військової частини, підсистема екологічного моніторингу), і додатків аналітичної обробки (підтримки ухвалення рішень (автоматизоване робоче місце офіцера, відповідального за екологічну безпеку)), що використовують нерегламентовані запити до екологічних даних великого обсягу;

– відсутність прямих аналогів ІАСУЕБ, що обмежує можливість використання яких-небудь типових проектних рішень і прикладних систем;

– необхідність інтеграції наявних і заново розроблених додатків ІАСУЕБ;

– функціонування ІАСУЕБ у неоднорідному середовищі на декількох апаратних платформах;

– обмеження величини проекту ІАСУЕБ, обумовлене масштабами фінансування Міністерства оборони України і різним ступенем готовності окремих його підрозділів до впровадження ІАСУЕБ.

Однак, незважаючи на наявні труднощі, розглянемо можливий варіант загальної архітектури інформаційно-аналітичної системи управління екологічною безпекою для ВО.

Завдяки сучасному рівню розвитку апаратних і програмних засобів стало можливим ведення баз даних оперативної інформації на всіх рівнях керування станом навколишнього середовища. У процесі військової діяльності окремі військові частини, з'єднання, оперативні командування, органи державної влади і самоуправління, Міністерство оборони України й інші міністерства і відомства нагромадили великі обсяги даних. Вони мають великі потенційні можливості щодо добування корисної аналітичної екологічної інформації, на основі якої можна виявляти приховані тенденції, будувати екологічну стратегію управління станом навколишнього середовища та знаходити нові оптимальні рішення.

Варто також наголосити на тому, що екологічна інформація в системі ІАСУЕБ повинна підтримуватися актуальною завдяки постійному екологічному моніторингу стану НПС у місцях розташування ВО. Водночас велике значення ми надаємо системі екологічного моніторингу військових об'єктів, яка не включає у свої функції управління станом навколишнього середовища, але є джерелом необхідної оперативної інформації для ухвалення екологічно значущих рішень. Одним із компонентів системи екологічного моніторингу є інформаційно-вимірювальна система екологічного моніторингу (далі – ІВСЕМ) навколишнього середовища.

Зрозуміло, що без використання геоінформаційних (далі – ГІС) технологій говорити про ефективність екологічного оцінювання стану навколишнього середовища в районах розташування ВО на сучасному рівні неможливо. Тому необхідно передбачити зв'язок ІАСУЕБ із розвинутою ГІС, що дає можливість використання геопросторової інформації за допомогою віддалених запитів за дпомогою Інтернет- чи Інтранет-технологій. Це стає особливо актуальним, коли прогнозується стан довкілля в разі виникнення непередбачених викидів і скидів шкідливих речовин, оцінюються екологічні ризики, розраховуються санітарно-захисні зони та здійснюється екологічне зонування ВО, що мають великі площі (військові полігони, аеродроми, військово-морські бази).

Повна архітектура інформаційно-аналітичної системи екологічної безпеки Збройних сил України, побудована на основі ефективної концепції сховища даних, показана на рис. 2.

У конкретних реалізаціях окремі компоненти цієї схеми можуть бути відсутніми. Наведена архітектура пояснює місце і роль різних технологій обробки екологічних даних.

Забезпечення підтримки ухвалення управлінських рішень в ІАСУЕБ на основі накопичених даних може виконуватися в трьох базових сферах.

1. Сфера деталізованих екологічних даних про стан ВО. Ця область системи націлена на пошук відповідної екологічної інформації.

Інформаційно-пошукові системи, що забезпечують інтерфейс кінцевого користувача в задачах пошуку деталізованої екологічної інформації, можуть використовуватися як надбудова як над окремими базами даних (далі – БД) транзакційних систем, так і над загальним сховищем даних.

2. Сфера агрегованих показників екологічного стану ВО.

Комплексний погляд на зібрану в сховищі даних екологічну інформацію, її узагальнення й агрегацію, гіперкубічне представлення і багатовимірний аналіз є задачами систем оперативної аналітичної обробки даних (OLAP). Тут можна орієнтуватися на спеціальні багатовимірні СУБД чи залишатися в межах реляційних технологій. У такому разі агрегація екологічної інформації може проводитися оперативно в процесі сканування деталізованих таблиць реляційної БД.

3. Сфера виявлення закономірностей щодо зміни екологічного стану ВО.

Без підтримки хронології екологічних даних не можна говорити про вирішення задач прогнозування й аналізу екологічних тенденцій. Але найбільш критичними є питання, що пов'язані з узгодженням екологічних даних.

У військовій організації питання про узгодженість екологічних даних у різних інформаційних системах стоїть надзвичайно гостро. І нерідко командир стикається із ситуацією, коли на ті самі питання різні системи можуть дати і дають різну відповідь. Це може бути пов'язано з несинхронністю моментів модифікації даних, відмінностями в трактуванні однакових екологічних подій, понять і даних, зі зміною семантики екологічних даних у процесі розвитку предметної області, елементарними помилками під час уведення й оброблення даних, частковою втратою окремих фрагментів архівів. Очевидно, що врахувати і заздалегідь визначити алгоритми розв'язання всіх можливих колізій мало ймовірно. До того ж це неможливо зробити в оперативному режимі, динамічно, безпосередньо в процесі формування відповіді на запит.

Висновки. Отже, розроблення концептуальних засад інформаційно-аналітичної системи управління екологічною безпекою військового об'єкта на основі сучасних інформаційних технологій дозволить підняти на новий рівень екологічну безпеку в Збройних силах України.

Результатом оцінки екологічного стану ВО буде чисельне значення системоутворюючих показників стану НПС. Запропонована концептуальна схема проектування архітектури баз даних «ІАСУСНС» Збройних сил України є наочною й ефективною. Водночас за допомогою програм Erwin та Microsoft Visio забезпечується можливість зворотного конструювання на рівні логічної моделі, тобто відновлення структури наявних баз даних, одержання їх наочного представлення, а також можливість вибору іншої платформи систем управління базами даних.

Розширені можливості програм Erwin та Microsoft Visio дозволяють під час створення структурної схеми моделі вносити опис сутностей, атрибутів і відношень, визначати області дійсних значень, використовувати ієрархічні відношення.

Список літератури:

1. Чумаченко С.М. Данилюк С.Л. Результати оцінювання впливу воєнних дій на довкілля на Сході України із застосуванням індексно-індикаторного підходу. Збірник наукових праць ЦНДІ ЗС України. Київ. 2016. № 1 (75). С. 55–62.

2. Биченок М.М. Яковлєв Є.О., Іванюта С.П. Ризики життєдіяльності у природно-техногенному середовищі: монографія. Київ: Інститут проблем національної безпеки Ради національної безпеки і оборони України, 2008. 160 с.

3. Романченко І.С., Сбітнєв А.І., Чумаченко С.М., Слободяник В.А. Методологічні підходи до побудови бази даних для системи управління станом навколишнього середовища в Збройних силах України. Журнал Наука і оборона. Київ. 2003. № 3. С. 50–56.

4. Романченко І.С., Сбітнєв А.І., Чумаченко С.М. Методи прогнозування екологічного стану навколишнього середовища військових об'єктів. Журнал Наука і оборона. Київ. 2004. № 4. С. 44–53.

5. Романченко І.С., Сбітнєв А.І., Чумаченко С.М. Проектування бази даних для системи моніторингу навколишнього середовища в Збройних силах України Журнал Наука і оборона. Київ. 2004. № 1. С. 47–53.

6. Романченко І.С., Сбітнєв А.І., Бутенко С.Г. Екологічне забезпечення військ: монографія. Київ: Національна академія оборони України, 2003. 274 с.

7. Лисенко О.І., Чумаченко С.М., Турейчук А.М. Математичні моделі, метод і методика оцінки та прогнозування стану наземних екологічних систем, ускладнених техногенним навантаженням. Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка. Київ. 2006. № 44. С. 186–212.

8. Environmental Management Systems in the Military Sector. Final Report of the Pilot Study Group. CCMS, 2000. 114 p.

9. Система управления окружающей средой Оборонительных сил Дании. Руководство по разработке процедур. Копенгаген: Главное командование Оборонительных сил Дании. 2000. 115 с.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ВОЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

В статье рассмотрены концептуальные вопросы разработки информационно-аналитической системы управления экологической безопасностью для военных объектов и перспективы ее использования в Вооруженных силах Украины.

Ключевые слова: *информационно-аналитическая система, экологическая безопасность, военный объект.*

INFORMATION TECHNOLOGY IN MANAGEMENT PROBLEMS ENVIRONMENTAL SAFETY MILITARY OBJECTS

The article deals with the conceptual issues of the development of the information-analytical system of environmental safety management for military objects and the prospects for its use in the Armed Forces of Ukraine.

Key words: *information-analytical system, ecological safety, military object.*

УДК 331.45

Репін М.В.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ СТРАТЕГІЧНОГО ПЛАНУВАННЯ ДЛЯ РОЗРОБЛЕННЯ ПРОФІЛАКТИЧНИХ ЗАХОДІВ ІЗ ОХОРОНИ ПРАЦІ

У статті розглянуто ситуацію, що склалася у сфері охорони праці на підприємствах та, зокрема, щодо планування профілактичних заходів зі зниження рівня травматизму та професійної захворюваності. Змістовно описано такий метод стратегічного планування, як метод SWOT-аналізу. Проаналізовано сутність застосування цього методу, що полягає у визначенні довгострокових цілей та задач, оцінці шансів на успіх та можливих загроз, розподіленні ресурсів, необхідних для досягнення визначених цілей. Запропоновано методичні підходи до планування профілактичних заходів із охорони праці з використанням процедур SWOT-аналізу.

Ключові слова: *охорона праці, стратегічне планування, SWOT-аналіз.*

Постановка проблеми. Ситуація, що склалася зі станом охорони праці в Україні, потребує вироблення нових концептуальних підходів, які відповідають реаліям сьогодення. Реалізація конституційних прав працюючих на належні безпечні та здорові умови праці здійснюється в умовах, коли на підприємствах фактично не функціонує система управління охороною праці.

Профілактичні заходи зі зниження рівня травматизму та професійної захворюваності неістотно враховують вимоги міжнародних стандартів у сфері охорони праці, рекомендації Міжнародної організації праці [1; 2], особливо в частині системного підходу до створення системи управління охорони праці, підготовки національних оглядів із охорони праці, розробки національних програм із охорони праці, що мають за мету впровадження культури охорони праці на кожному підприємстві.

Сьогодні на передній план висуваються такі задачі, як створення сучасних систем управління охороною праці, включаючи управління професійними ризиками, адаптація їх до сучасних умов ведення бізнесу та нових потреб розвитку економіки, приведення законодавчої та нормативної бази у сфері охорони праці у відповідність до міжнародних вимог. З'явилися нові ризики, пов'язані із застосуванням нових технологій, включаючи біотехнології, нанотехнології, наноматеріали. Здійснюється реорганізація робочого процесу, з'являються нові форми зайнятості населення. Все це сприяє підвищенню рівня стресу, психологічних розладів у працюючих. Вирішити вищезазначені проблеми комплексно можна за допомогою методів стратегічного планування, таких як: метод соціально-економічного аналізу, економіко-математичні методи та моделі, балансовий метод, метод SWOT-аналізу та ін. Нині у стратегічному управлінні підприємством набув поширення метод SWOT-аналізу.

Постановка завдання. Метою статті є демонстрація можливостей системного підходу до розроблення профілактичних заходів із охорони праці за допомогою SWOT-аналізу. Такий підхід дозволяє визначити довгострокові цілі та задачі, оцінити шанси на успіх та можливі загрози, розподілити ресурси, необхідні для досягнення цих цілей.

Виклад основного матеріалу дослідження. Назва методу, що розглядається, є абревіатурою початкових літер англійських слів: Strengths (сильні сторони), Weaknesses (слабкі сторони), Opportunities (можливості), Threats (загрози). Стосовно системи управління охорони праці (далі – система) SWOT-аналіз означає аналіз сильних та слабких сторін даної системи, а також аналіз можливостей та загроз із боку навколишнього середовища щодо самої системи охорони праці. Технічну сторону використання методу SWOT-аналізу у стратегічному плануванні розвитку підприємства (організації, фірми) викладено в працях низки вчених [3–5]. Однак стосовно сфери охорони праці у плануванні профілактичних заходів такий

підхід розглядається тільки у постановочному плані. Приклади використання такого підходу для вирішення проблем охорони праці у вітчизняній практиці автору невідомі. Тому сформулюємо основні методичні підходи до планування профілактичних заходів із охорони праці з використанням основних принципів SWOT-аналізу.

Процедура планування для випадку, що розглядається, повинна починатися зі збору та аналізу інформації про стан охорони праці в країні. У якості такої можуть бути офіційні статистичні дані державних установ, прогнозні та програмні документи соціально-економічного розвитку країни на запланований період, законодавчі та нормативні акти у сфері охорони праці, інші довідкові інформаційні матеріали з охорони та гігієни праці.

Суттєву роль у даному питанні могли б відіграти національні огляди з охорони праці, що відповідало б рекомендаціям Міжнародної організації праці, але, на жаль, практика їх розробки та розгляду спільно із соціальними партнерами поки що в країні відсутня.

Процедура проведення SWOT-аналізу в загальному вигляді зводиться до заповнення базової матриці (табл. 1), у якій відображаються виявлені в процесі аналізу фактори внутрішнього та зовнішнього середовищ. До факторів внутрішнього середовища належать сильні та слабкі сторони самої системи охорони праці, а до факторів зовнішнього середовища – можливості (сприятливі обставини) та загрози (події з несприятливим впливом), які знаходяться поза зоною контролю системи охорони праці.

Таблиця 1

Базова матриця SWOT-аналізу

Фактори	**Позитивні**	**Негативні**
Внутрішні	Сильні сторони: $S_1, S_2, ..., S_n$	*Слабкі сторони:* $W_1, W_2, ..., W_m$
Зовнішні	$O_1, O_2, ..., O_k$	*Загрози:* $T_1, T_2, ..., T_l$

Виявлення вищезазначених факторів, їх формулювання, а за необхідності ранжування за рівнем значимості, здійснюється експертним шляхом. Ступінь узгодженості оцінок експертів перевіряється за допомогою коефіцієнту конкордації Кендалла [6].

У якості прикладу виконаного аналізу можна назвати такі фактори для сфери охорони праці:

– *сильні сторони* – наявність законодавчої та нормативної бази з охорони праці, а також правової основи, економічного механізму та організаційної структури соціального страхування громадян від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання; наявність компетентних органів із охорони праці; наявність спеціалізованих технічних, медичних та наукових організацій, які займаються питаннями охорони праці; наявність соціальних партерів у діяльності, пов'язаній із охороною праці; міжнародна співпраця і т. д.

– *слабкі сторони* – застарілість нормативної бази; брак кваліфікованих кадрів; відсутність систематичного моніторингу умов праці на робочих місцях; фактичне припинення функціонування системи медицини праці на виробництві; низька культура безпеки праці на виробництві; фінансова незабезпеченість вирішення проблем охорони праці; слабка інвестиційно-інноваційна політика в сфері охорони праці і т. д.

– *можливості* – посилення мотивації роботодавців і працівників до охорони праці; зміцнення соціального партнерства у солідарній відповідальності за стан охорони праці; наявність перспектив розвитку нових технологій; потреба в реорганізації та вдосконаленні системи державного управління охороною праці; необхідність вдосконалення законодавчої та нормативної бази з охорони праці; модернізація системи навчання з питань охорони праці і т. д.

– *загрози* – нестабільність соціально-економічної ситуації в країні; незавершеність державного реформування центральних органів виконавчої влади; зменшення обсягів фінансування профілактичних заходів із охорони праці; збільшення оподаткування підприємств; зростання інтелектуальних та нервово-емоційних навантажень на працівників; збільшення в економіці країни частки малих і середніх підприємств, а також уразливих категорій працюючих (жінок, мігрантів); поява нових ризиків у впровадженні нових технологій, матеріалів, нових умов праці та форм зайнятості і т. д.

Практика проведення SWOT-аналізу показує, що зі всіх списків сильних та слабких сторін, можливостей та загроз зовнішнього середовища необхідно вибирати найбільш важливі фактори. Під час подальшого аналізу рекомендується обмежитися їх кількістю не більше 10 факторів для кожного списку.

Існують різноманітні процедури з виявлення взаємозв'язків між факторами внутрішнього та зовнішнього середовищ та визначення основних напрямів розвитку системи. На погляд автора, перспективною є процедура, яка об'єднує визна-

чення кількісних оцінок взаємозв'язків зазначених факторів та вибір напрямів розвитку системи. Для цього формуємо матрицю (табл. 2), у яку, поряд із проранжируваними факторами зовнішнього та внутрішнього середовища, заносяться визначені експертним шляхом: ймовірності появи (P_i) можливостей та загроз, коефіцієнти впливу (K_i) зовнішніх факторів на систему, оцінка інтенсивності дії (I_j) сильних та слабких сторін.

Під час побудови матриці застосована т. зв. «дихотомічна процедура», за якої елементи матриці утворюють «дихотомічні пари» – пари ознак, які взаємовиключають одна одну, що дозволяє знизити ентропію взаємодії зовнішнього та внутрішнього середовищ за рахунок упорядкування процесу розгляду варіантів взаємозв'язків їх факторів. Іншими словами, за допомогою даної матриці формуються 4 групи парних стратегій:

SO («сильні сторони – можливості») – стратегії, що будуються на сильних сторонах системи з метою отримання переваг із нових можливостей;

ST («сильні сторони – загрози») – стратегії, що будуються на сильних сторонах системи з метою протистояння загрозам, які з'являються;

WO («слабкі сторони – можливості») – стратегії, пов'язані зі спробами мінімізувати слабкі сторони системи з метою отримання переваг із можливостей, що з'явилися;

WT («слабкі сторони – загрози») – стратегії, пов'язані зі спробами мінімізувати як слабкі сторони системи, так і зовнішні загрози, що з'явилися.

Виходячи з вищесказаного, експертним методом визначаються та проставляються у відповідних клітинках кореляційної матриці оцінки впливу (в балах) факторів сильних та слабких сторін системи на використання нових можливостей (α_{ij}, γ_{ij}), що з'явилися, або на захист (мінімізацію дії) від зовнішніх загроз (β_{ij}, θ_{ij}).

Підсумкова матриця, яка за формою збігається з наведеною на табл. 2, містить, з урахуванням думки всіх експертів, які беруть участь у процедурі SWOT-аналізу, оцінки, які розраховуються за формулами:

$$\begin{cases} A_{ij} = I_j \cdot P_i \cdot K_i \cdot \alpha_{ij} & - \text{для квадранта SO} \\ A_{ij} = I_j \cdot P_i \cdot K_i \cdot \beta_{ij} & - \text{для квадранта ST} \\ A_{ij} = I_j \cdot P_i \cdot K_i \cdot \gamma_{ij} & - \text{для квадранта WO} \\ A_{ij} = I_j \cdot P_i \cdot K_i \cdot \theta_{ij} & - \text{для квадранта WT} \end{cases}$$

Таким чином, розгляд впливу сильних та слабких сторін системи здійснюється за всією сукупністю можливостей та загроз зовнішнього середовища, що з'являються.

Аналіз даних підсумкової матриці дозволяє визначити стратегічні напрями розвитку системи, для чого будується матриця парних стратегій

Таблиця 2

Кореляційна матриця SWOT-аналізу

Фактори	**Інтенсивність дії, I_j**	**Можливості**				**Загрози**			
		O_1	O_2	…	O_k	T_1	T_2	…	T_l
Ймовірність появи, P_i		P_1			P_k				P_l
Коефіцієнт впливу, K_i		K_1			K_k				K_l
Сильні сторони: S_1		α_{11}				β_{11}			
S_2									
⋮									
S_n					α_{nk}				β_{nl}
Слабкі сторони: W_1		γ_{11}				θ_{11}			
W_2									
⋮									
W_m					γ_{mk}				θ_{ml}

(табл. 3). З цією метою, виходячи з величини експертних оцінок A_{ij}, для кожної зони підсумкової матриці вибираються свої основні стратегії, яким експерти віддали найбільшу перевагу.

Таблиця 3

Матриця парних стратегій

Сильні сторони – можливості $S_i O_i$	Сильні сторони – загрози $S_i T_i$
Слабкі сторони – можливості $W_j O_i$	Слабкі сторони – загрози $W_j T_i$

Кількість парних стратегій у кожній зоні може бути різною. Однак стрижнем будь-якого стратегічного плану має бути його базова стратегія, що відповідає цілям його розробки.

Визначення стратегічних напрямів розвитку системи завершується розробкою плану дій, основу якого складає формулювання генеральної та часткових цілей, встановлення зв'язків між ними та засобами їх досягнення. Для цього доцільно застосувати процедуру побудови «дерева цілей» та «дерева рішень».

Висновки. Викладені у статті методичні підходи до планування профілактичних заходів із охорони праці з використанням процедур SWOT-аналізу дозволяють визначити стратегічні напрямки основної діяльності системи управління охороною праці на підприємстві. Метод SWOT-аналізу не нав'язує готові рішення, а озброює знаннями спеціалістів, які займаються стратегічним плануванням, сутність якого полягає у виявленні в потенціалі системи сильних та слабких сторін, загроз зі сторони зовнішнього середовища, а також встановленні нових можливостей, які надаються системі зовнішнім середовищем. Метод передбачає не тільки визначення перспективних пріоритетних напрямів розвитку системи, але й підвищення зацікавленості всіх учасників цього процесу в його реалізації.

Список літератури:

1. ДСТУ ГОСТ 12.0.230:2008. Система стандартів безпеки праці. Системи управління охороною праці. Загальні вимоги. Київ, 2008. 23 с.
2. Конвенція МОП № 187. Конвенція про основи, що сприяють безпеці та гігієні праці, 2006.
3. Боумен К. Основы стратегического менеджмента. Москва, 1997. 175 с.
4. Виханский О.С., Наумов А.И. Менеджмент: учебник. Москва, 2006. 670 с.
5. Немцов В.Д., Довгань Л.Є. Стратегічний менеджмент: навч. посіб. Київ, 2001. 560 с.
6. Литвак Б.Г.Экспертные технологии в управлении. Москва, 2004. 398 с.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ СТРАТЕГИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ОХРАНЕ ТРУДА

В статье рассмотрена ситуация, которая сложилась в сфере охраны труда на предприятиях и, в частности, относительно планирования профилактических мероприятий по снижению уровня травматизма и профессиональной заболеваемости. Содержательно описан такой метод стратегического планирования, как метод SWOT-анализа. Проанализирована сущность применения этого метода, которая заключается в определении долгосрочных целей и задач, оценке шансов на успех и возможных угроз, распределении ресурсов, необходимых для достижения поставленных целей. Предложены методические подходы к планированию профилактических мероприятий по охране труда с использованием процедур SWOT-анализа.

Ключевые слова: *охрана труда, стратегическое планирование, SWOT-анализ.*

APPLYING OF STRATEGIC PLANNING METHODS FOR DEVELOPMENT OF PREVENTIVE MEASURES FOR LABOR PROTECTION

Today, the issue of planning preventive measures to reduce the level of injuries and occupational diseases in Ukrainian enterprises is given insufficient attention. This is confirmed by official statistics, the analysis of which shows a significant excess of the level of injuries and occupational diseases in comparison with European countries. To solve the existing problem, it was suggested to use methods of strategic planning, in particular, the method of SWOT-analysis. The article describes in detail the method of SWOT-analysis and proposed a methodology for planning preventive measures for labor protection based on this method.

Key words: *labor protection, strategic planning, SWOT-analysis.*

УДК 519.21.681

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

Пасько В.П.
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Шитикова И.Г.
Институт телекоммуникаций и глобального информационного пространства
Национальной академии наук Украины

Лемешко В.А.
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

ПОСТРОЕНИЕ ПРЕДМЕТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ СИТУАЦИОННОГО ТИПА

В данной работе предлагается построить предметно-ориентированную интеллектуальную систему поддержки принятия решений на основе технологии мультиагентных систем и методологии ситуационного управления. Построенная таким образом интеллектуальная система поддержки принятия решений обеспечивает в диалоге с экспертом автоматизированную настройку на исследуемую предметную область путем ввода в систему основных понятий, атрибутов, их возможных значений, связей между ними, а также типов возможных ситуаций, характерных процессов, и интерактивное взаимодействие с пользователем в процессе ее функционирования. При этом модель процесса принятия решений задается в виде совокупности ситуаций.

Ключевые слова: *инновационный программный продукт, мультиагентная система, база знаний предметной области, нечеткая ситуационная сеть, интеллектуальная система поддержки принятия решений, индуктивный вывод семантических решений.*

Общая характеристика процесса принятия решений в интеллектуальной системе поддержки принятия решений. Принятие решения в большинстве случаев заключается в генерации возможных альтернативных решений, их оценке и выборе лучшего варианта. В сложных и ответственных моментах лицо, принимающее решение (далее – ЛПР), обращается к опытным и знающим людям (экспертам).

В частности, при выборе варианта решения в процессе разработки инновационного программного продукта (далее – ИПП) приходится учитывать большое число неопределенных и противоречивых факторов. Неопределенность является неотъемлемой частью процессов принятия решений при разработке ИПП, и неопределенности в конкретной предметной области можно разделить на три класса [1; 2]:

– неопределенность, связанная с неполнотой знаний о проблеме, по которой должно быть принято решение;

– неопределенность, связанная с невозможностью полного учета реакции окружающей среды (рынок спроса, текущая ситуация в предметной области и т. д.);

– неопределенность, связанная с неправильным пониманием тактических и стратегической целей создания ЛПР конкретного ИПП.

Процесс принятия решений может протекать по двум основным схемам: интуитивно-эмпирической

(основанной на сравнении проблемной ситуации с ранее встречавшимися схожими ситуациями) и формально-эвристической (основанной на построении и исследовании модели проблемной для данной конкретной предметной области ситуации).

Противоречивость возникает из-за неоднозначности оценки ситуаций, ошибки в выборе приоритетов, что, в конечном итоге, сильно осложняет принятие решений. Исследования показывают, что ЛПР без дополнительной аналитической поддержки, как правило, используют упрощенные, а иногда и противоречивые правила выбора решения. В этом случае наиболее эффективным инструментом принятия потенциально лучшего решения являются интеллектуальные системы поддержки принятия решений (далее – ИСППР). Основными функциями таких систем являются [3; 4]: оказание помощи ЛПР при анализе исходной информации (оценке сложившейся обстановки и ограничений, накладываемых внешней средой); выявление и ранжирование приоритетов, учет неопределенности в оценках ЛПР и формирование его предпочтений; генерация возможных решений (формирование списка альтернатив); оценка возможных альтернатив, исходя из предпочтений ЛПР, и ограничение, накладываемое внешней средой; анализ возможных последствий принимаемых решений; выбор потенциально лучшего варианта решения на каждом этапе (в каждой ситуации).

Процедура принятия решений с помощью ИСППР представляет собой циклический процесс взаимодействия человека и компьютера (рис. 1) и включает фазы анализа и постановки задачи, фазы поиска и оптимизации альтернативных решений, реализуемых с помощью компьютера.

Современные ИСППР основаны на применении специализированных информационных хранилищ (Data Warehouse) и технологий OLAP (On-Line Analytical Processing) – оперативного анализа данных. Основное назначение OLAP-технологий – динамический многомерный анализ данных с использованием эффективного инструмента интеллектуального анализа данных (Data Mining), моделирование и прогнозирование [5].

Анализ путей построения предметно-ориентированных ИСППР ситуационного типа. Разработка предметно-ориентированных ИСППР идет по двум основным направлениям: ИСППР на основе распределенного искусственного интеллекта и ИСППР на основе сценариев.

ИСППР на основе распределенного искусственного интеллекта строятся на базе мультиагентных систем (далее – МАС), основанных на правилах и рассуждениях на основе прецедентов. В них каждый агент рассматривается как система (нераспределенная), основанная на знаниях с добавлением компонентов, обеспечивающих безопасность, мобильность, качество обслуживания, взаимодействие с другими агентами, сетевыми ресурсами и пользователями. Данные ИСППР характеризуются скоординированным интеллектуальным поведением в сообществе интеллектуальных агентов. ИСППР на основе распределенного искусственного интеллекта рассматриваются как наиболее многообещающие ИСППР. Исследования в этом направлении в настоящее время идут по пути интенсивных теоретических исследований и прикладных разработок. Например, в [6] дано описание основных принципов создания интегрированных интеллектуальных систем компьютеризации инженерной деятельности на базе концепции МАС распределенного искусственного интеллекта [7].

МАС на основе сценариев ориентированы на использование в больших компьютерных сетях с большим разнообразием представляемого сервиса. Агенты данного класса систем разрабатываются с помощью языков сценариев, таких как Tcl, JavaLanguage и др. Эти языки ориентированы на реализацию асинхронного процесса и удаленное исполнение приложений, инициируемых электронной почтой. Разрабатываемые здесь технологии должны поддерживать мобильность агента. Нужно отметить, что МАС на основе сценариев рассматриваются как основной подход для реализации мобильной телекоммуникации через компьютерные сети общего пользования с помощью переносных компьютеров.

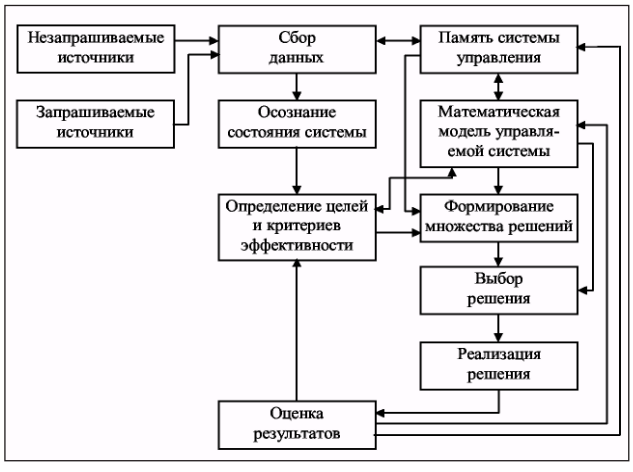


Рис. 1. Общая схема процедуры принятия решений в ИСППР

Таким образом, МАС можно рассматривать как совокупность взаимосвязанных программных модулей (агентов), являющихся фрагментами знаний, доступных другим агентам. Это, другими словами, некие «программные роботы», удовлетворяющие различные информационные и вычислительные потребности конечных пользователей. Они координируют свои знания, цели, умения и планы при решении проблем, т. е. являются некими программно-исполнительными устройствами. В данной работе предлагается строить предметно-ориентированную ИСППР на основе технологии МАС и методологии ситуационного управления [8].

Постановка задачи. Пусть текущая ситуация, сложившаяся в процессе разработки ИПП предметной области, описывается в виде нечёткой ситуации следующего вида:

$$S_{TEK} = \left\{ M_{S_i}(x_i) \,/\, x_i \right\}, x_i \in X \,, \qquad (1)$$

где: $M_{S_i}(x_i)$ – функция принадлежности лингвистической переменной xi, характеризующей текущую ситуацию S_{TEK} .

Поскольку каждой лингвистической переменной x_i соответствует j-й терм из множества термов базы знаний, то формулу (1) можно записать в виде:

$$S_i = \left\{ M_{M_{S_i}(x_i)}(T_j^i) \,/\, T_j^i \right\}, j = \overline{1, M}; i = \overline{1, N}; x_i \in X \,, \qquad (2)$$

где: T_j^i – j-й терм i-й лингвистической переменной.

Для определение текущего состояния процесса разработки ИПП необходимо сравнить данную нечёткую ситуацию с каждой нечёткой ситуацией из некоторого набора существующих в базе знаний данной предметной области ситуаций $S = (S_1, \ \dots \ , S_K)$.

В качестве меры для определения степени близости нечёткой ситуации S_{TEK} и $S_k(k = \overline{1, K})$ из модели знаний можно использовать:

– степень нечёткого включения нечёткой ситуации STEK в нечёткую ситуацию S_k ;

– степень нечёткого равенства S_{TEK} и S_k ;

– степень нечёткой общности S_{TEK} и S_k .

Задаваясь одной из выбранных мер близости, можем задать некоторые нечёткие отношения между ситуациями, не только по отношению к текущей S_{TEK} , но и между существующими в базе знаний данной предметной области.

С точки зрения разработки ИПП в предметно-ориентированной области, наиболее удобной мерой близости можно считать степень нечёткого включения ситуации, которая характеризуется некоторым порогом включения, определяемым разработчиком, исходя из условий, в которых протекает разработка ИПП. Порог включения определяется, как и функции принадлежности, в нормированном диапазоне [0, 1] следующим образом:

$$t_{вкл.} \in [\alpha_{\min}, 1] \,, \qquad (3)$$

где $\alpha_{\min}$ – нижняя граница диапазона степени включения, обычно $\alpha_{\min} = 0.6 \div 0.7$

В этом случае можем говорить о том, насколько нечёткие признаки текущей ситуации STEK нечётко включаются в нечёткие значения соответствующих признаков ситуации $S_k(k = 1, K)$ [2; 6].

Далее для существующей базы знаний данной предметной области и условий работы ИПП в различных режимах эксплуатации формируем типовые «штатные» ситуации, для которых на основе экспертных методов детально разработаны управляющие воздействия. При этом возможный переход от одной «штатной» ситуации к другой осуществляется с помощью некоторого решения. При этом каждому возможному решению определяется степень предпочтения данного решения $y_{kl}\ (S_k, R_{kl})$. Таким образом можно построить нечёткую ситуационную сеть (рис. 2), на которой видны возможные переходы от одной «штатной» ситуации к другой и степень предпочтения этих переходов.

Как база знаний данной предметной области, так и ситуационная сеть носят эволюционный характер и периодически обновляются при появлении новой «штатной» ситуации (фактически это отработанный экспертами вариант возникшей «нештатной» ситуации) и с новыми требованиями к ИПП. Построенная на основе базы знаний данной предметной области нечёткая ситуационная сеть представляет собой нечёткий ориентированный граф, вершины которого соответствуют существующим «штатным» нечётким ситуациям, дуги взвешены возможными решениями, необходимыми для перехода по ситуациям, и степенями предпочтения этих решений.

Таким образом, задача построения предметно-ориентированных ИСППР ситуационного типа может быть решена на основе нечёткой ситуационной сети с использованием технологии мультиагентных систем (МАС).

Структура, состав модулей и работа предметно-ориентированных ИСППР ситуационного типа. На рис. 3 представлена структура и состав модулей ИСППР на основе технологии МАС и методологии ситуационного управления. Методология ситуационного управления используется в двух контурах – контуре организации управления (адаптация структуры системы) и контуре функционирования [9].

При создании ИСППР ситуационного типа должны быть реализованы принципы целевой направленности системы, оценки (распознаваемости) ситуаций, обоснования решений, открытости системы, интегрального представления видов информации, адаптивности. ИСППР должна включать инструментальный и прикладной программные комплексы [6; 9].

С учетом специфики предметной области в ИСППР должны быть сформулированы требования к модели представления знаний по системе понятий, адекватности содержания и соответствия формулируемых знаний исследуемым процессам и пригодности для выполнения требуемых действий. Целостное описание ситуации экспертом обеспечивается при наличии полного набора характеризующих эту ситуацию показателей. Наиболее удобной и надежной формой для предоставления исходных экспертных знаний являются прецедентные пары «информационное описание ситуаций» – «вывод по ситуации», которые получаются в ходе заблаговременного анализа экспертом возможных ситуаций, либо в ходе практического анализа, по оценке конкретной ситуации. Для учета множества факторов исходный набор показателей разбивается на фрагменты, которые объединяют в своем составе показатели, образующие относительно самостоятельную смысловую группу. Задача оценки ситуации разбивается на ряд частных задач. Решения, формируемые частными задачами, составляют показатели более высокой степени обобщения, которые служат исходными данными для частных задач следующего уровня иерархии и т. д. Такой процесс декомпозиции общей задачи оценки приводит к образованию многоуровневой иерархии связанных по входу – выходу частных задач, а ее решение позволяет сформировать систему решений по отдельным аспектам и общее решение о степени соответствия сложившейся ситуации целям управления [9].

Каждая задача (подзадача) в принятой трактовке представляет из себя совокупность функциональных зависимостей, описывающих исходную ситуацию и решение по ситуации. С использованием подсистемы логического вывода обобщенной оценки ситуации и формирование объяснений строятся правила и пополняется база знаний. Решение прикладной задачи осуществляется путем применения правил из базы знаний к данным о текущей ситуации.

Решения о ситуации формируются путем логико-аналитической обработки данных о ситуации в целом и частных случаях ситуаций в данной предметной области. Причем полагается, что по ситуациям, характерным для данной предметной области («штатные ситуации»), эти данные предварительно формируются информационными источниками на основе добываемой ими первичной информации о состоянии и деятельности объектов наблюдения (показатели и массив подтверждающих их сведений).

Для выявления закономерностей процесса формирования выводов о ситуации используются методы индуктивного обобщения качественной информации. Индуктивный вывод является логическим процессом для синтеза рациональных семантических решений. Формальное представление процедуры принятия решения при оценке ситуации имеет вид: действующие признаки, множество наборов их значений – множество ситуаций – отображение этого множества в множество решений.

ИСППР обеспечивает в диалоге с экспертом автоматизированную настройку на исследуемую предметную область путем ввода в систему основных понятий, атрибутов, их возможных значений, связей между ними, а также типов возможных ситуаций, характерных процессов и интерактивное взаимодействие с пользователем в процессе ее функционирования. Модель процесса задается в виде совокупности ситуаций.

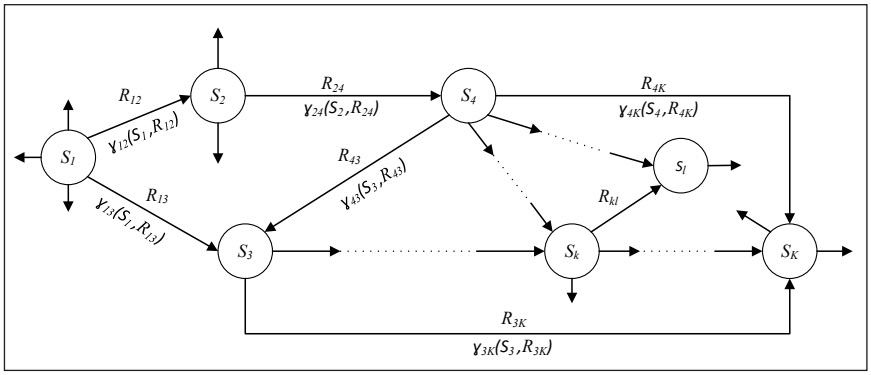


Рис. 2. Нечеткая ситуационная сеть

Ситуация представляется совокупностью событий. Событие означает установление определенного значения или достижения некоторой границы значения одного или нескольких атрибутов объекта (объектов). Таким образом, событие характеризуется изменением состояния одного или нескольких объектов. Возможная последовательность протекания процессов задается их последовательностью и отношением предусловия между ситуациями. Отношение предусловия означает, что обязательным условием возникновения ситуации является не только наступление характеризующих ее событий, но наступление одной или нескольких задаваемых в отношении предусловия ситуаций. Формирование информационных сообщений имитирует процесс сбора от внешних источников (операторов системы или автоматических датчиков) сообщений об изменениях исследуемой проблемной области.

При моделировании процесса прогнозирования механизм логического вывода запускается автоматически через установленные промежутки времени. Сопоставляя заданные модели процессов с поступающими информационными сообщениями, он осуществляет выдачу рекомендаций в реальном времени пользователю о реально происходящих процессах. Получаемая информация дает объективную оценку происходящих процессов и позволяет осуществлять прогнозирование их протекания и осуществлять контроль выполнения задаваемых управляющих воздействий [4; 9].

В системе принятия решений по ситуации используется два вида технологий выводов – на логических правилах и суждениях по прецедентам.

Выводы. Настоящая статья посвящена вопросу дальнейшего развития прикладной концепции ситуационного управления. За основу принята методология мультиагентных систем, составляющих современную тенденцию в области новых информационных технологий. Использование предметно-ориентированной технологии построения нечеткой ситуационной сети позволяет резко расширить воз-

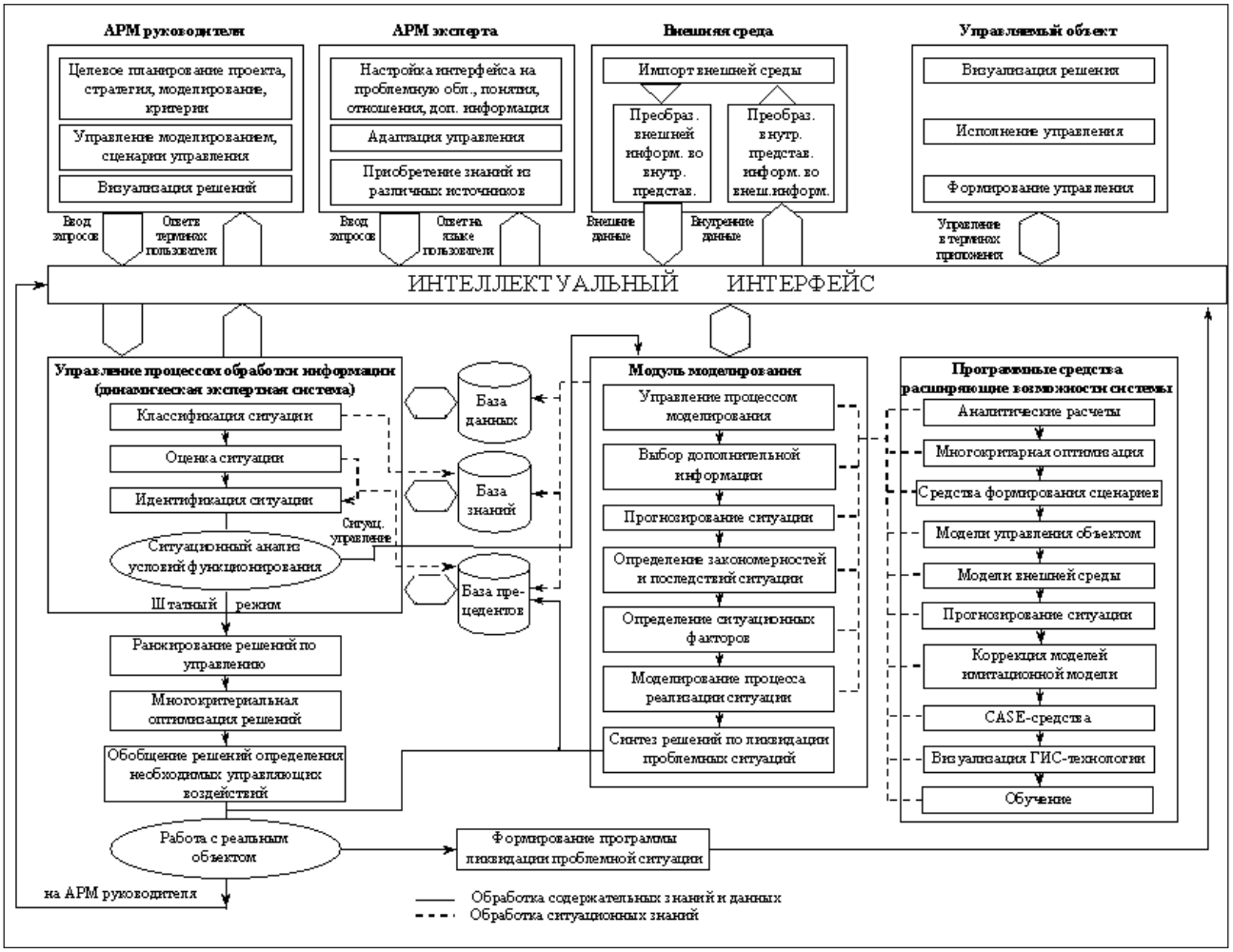


Рис. 3. Структура и состав модулей ИСППР

можности выбора и принятия эффективных решений за счет разнообразия схем возможных оптимальных в смысле выбранных критериев переходов в нечеткой ситуационной сети и ее постоянной эволюции. В системе принятия решений по ситуации используется два вида технологий выводов – на логических правилах и суждениях по прецедентам. Алгоритм распознавания сравнивает описание распознаваемой текущей ситуации с таблицей «штатных» ситуаций и принимает решение о степени ее новизны. Решение выносится на основе вычисления степени близости распознаваемой текущей ситуации к одной из существующих «штатных» ситуаций. При несовпадении текущая ситуация обрабатывается, переводится в разряд «штатных» и вводится в нечеткую ситуационную сеть.

Список литературы:

1. Борисов А.Н. Модели принятия решений на основе лингвистической переменной. Рига, 1982. 256 с.
2. Борисов А.Н. Принятие решений на основе нечетких моделей: Примеры использования. Рига, 1990. 184 с.
3. Коростелев Д.А. Система поддержки принятия решений «ИГЛА». Москва: ВНТИЦ, 2007. № 50200701348
4. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка решений. Серия «Информатизация России на пороге XXI века». Москва, 1988. 376 с.
5. Барсегян А.А., Куприянов М.С., Степаненко В.В., Холод И.И. Технология анализа данных. Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP: учеб. пособ. Санкт-Петербург, 2007. 384 с.
6. Геловани В.А., Башлыков А.А., Бритков В.Б., Вязилов Е.Д. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений в нештатных ситуациях с использованием информации о состоянии природной среды. Москва: Едиториал УРСС, 2015. 304 с.
7. Тарасов В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. Москва: Эдиториал УРСС, 2002. 352 с.
8. Поспелов Д.А. Ситуационное управление. Теория и практика. Москва: Наука, 1986. 284 с.
9. Чекинов Г.П., Чекинов С.Г. Применение технологии многоагентных систем для интеллектуальной поддержки принятия решений (ИППР). Сетевой электронный научный журнал «Системотехника». 2003. № 1.

ПОБУДОВА ПРЕДМЕТНО-ОРІЄНТОВАНИХ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ СИТУАЦІЙНОГО ТИПУ

У даній роботі пропонується будувати предметно-орієнтовану інтелектуальну систему підтримки прийняття рішень на основі технології багатоагентних системі методології ситуаційного управління. Побудована таким чином інтелектуальна система підтримки прийняття рішень забезпечує в діалозі із експертом автоматизоване налаштування на досліджувану предметну область шляхом введення в систему основних понять, атрибутів, їх можливих значень, зв'язків між ними, а також типів можливих ситуацій, характерних процесів, та інтерактивну взаємодію з користувачем у процесі її функціонування. Модель процесу прийняття рішень задається у вигляді сукупності ситуацій.

Ключові слова: *інноваційний програмний продукт, мультиагентна система, база знань предметної області, нечітка ситуаційна мережа, інтелектуальна система підтримки прийняття рішень, індуктивний висновок семантичних рішень.*

THE CONSTRUCTION OF SUBJECT-ORIENTED INTELLIGENT DECISION SUPPORT SYSTEMS OF A SITUATIONAL TYPE

This article is devoted to the further development of the applied concept of situational management. The methodology is based on multi-agent systems, which constitute the current trend in the field of new information technologies. The use of object-oriented technology for constructing a fuzzy situation network makes it possible to dramatically expand the possibilities for choosing and making effective decisions due to the diversity of schemes of possible transitions in the fuzzy situation network optimal in the sense of the selected criteria and its constant evolution. In the decision-making system on the situation, two types of output technologies are used – on logical rules and judgments based on precedents. The recognition algorithm compares the description of the recognized current situation with the table of "regular" situations and makes a decision about the degree of its novelty. The decision is made on the basis of calculating the degree of proximity of the recognized current situation to one of the existing "regular" situations. If there is a mismatch, the current situation is processed, transferred to the "regular" category and entered into an unclear situational network.

Key words: *innovative software product, multi-agent system, knowledge base of the domain, fuzzy situation network, intelligent decision support system, inductive derivation of semantic solutions.*

УДК 681.5.013

Степанець О.В.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Маріяш Ю.І.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АВТОНАЛАШТУВАННЯ ПІД-РЕГУЛЯТОРА НА МІНІМУМ ІНТЕГРАЛЬНОГО ЗВАЖЕНОГО В ЧАСІ МОДУЛЬНОГО КРИТЕРІЮ ЯКОСТІ РОБОТИ

У статті пропонується методика автоматичного налаштування параметрів ПІД-регулятора, що забезпечують мінімум ITAE. Обґрунтовано доцільність автоналаштування ПІД-регуляторів. Проаналізовано існуючі методи автоналаштування. Наведені отримані залежності параметрів ПІД-регулятора від властивостей об'єкта керування та результати моделювання замкнутої системи автоматичного регулювання. Проводяться порівняльні дослідження із існуючим методом налаштування.

Ключові слова: *автоналаштування, ITAE, ідентифікація, релейний експеримент, метод налаштування, ПІД-регулятор.*

Постановка проблеми. Коректне налаштування автоматичних регуляторів для забезпечення вимог технологічних процесів є однією з ключових процедур пуско-налагоджувальних робіт. Її результат прямо впливає на якість продукції, що випускається, чи на протікання процесів. Основний парк автоматичних регуляторів – близько 90% [1, с. 1261] – реалізують пропорційно-інтегрально-диференційний (далі – ПІД) закон регулювання. 30% з них налаштовані неправильно [2, с. 8]. Так, у багатьох ПІД-контролерах диференціальна складова частина вимкнена тільки тому, що її важко правильно налаштувати. Це пов'язано з недостатньо глибокими знаннями динаміки процесу регулювання та теорії автоматичного керування персоналу, що здійснює пусконалагоджувальні роботи. Результат – некоректні параметри налаштування, що призводить до зниження ефективності управління технологічними процесами та ККД установки в цілому. Тому великі зусилля дослідників концентруються на пошуку способів мінімізації впливу людського фактору в процесі налаштування регуляторів – алгоритмів автоматичного пошуку оптимальних параметрів регулятора.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Переважна більшість способів автоматичного налаштування використовують три принципово важливих етапи: ідентифікація, розрахунок параметрів регулятора, введення значень отриманих параметрів у регулятор [3, с. 88; 4, с. 298; 5, с. 2].

У роботах [4, с. 299; 6, с. 31] наведено методи автоналаштування, в основі алгоритму яких лежить аналітична модель, отримана з перехідної характеристики об'єкта управління. Використання аналітичних моделей потребує прийняття ряду припущень, наприклад, об'єкт описується моделлю першого або другого порядку, не враховується нелінійність об'єкта, зокрема завжди присутня нелінійність типу «обмеження», затримка в системі є транспортною, відсутність похибок диференціювання. Внаслідок прийнятих припущень з'являється похибка ідентифікації, а тому налаштування регулятора не можна вважати оптимальними. Автоналаштування параметрів регулятора, яке базується на отримані аналітичної моделі за допомогою зняття перехідної характеристики, реалізовано у ПІД-контролерах фірми Honeywell UDC6000 [11, с. 554, 4, с. 316].

Іншим способом виконання ідентифікації є отримання частотної характеристики об'єкта з використанням релейного експерименту. Даний метод ідентифікації є найбільш розповсюдженим для автоналаштування ПІД-регулятора [1, с. 1263; 4, с. 51; 7, с. 910], в його основі лежить режим

автоколивань у системі. Переваги даного методу ідентифікації – отримання частотних характеристик об'єкта будь-якого порядку та простота реалізації. Існують твердження, що застосування режиму автоколивань є небезпечними для технологічних процесів і їх потрібно уникати [5, с. 5]. Під час проведення експериментів потрібно обмежити амплітуду автоколивань, тоді даний режим є настільки ж безпечним, як і будь-який інший тестовий сигнал.

Також існує велика кількість комерційних програмних засобів настройки регуляторів [8, с. 41]. Типова система для настройки ПІД-регулятора складається з комп'ютера зі спеціалізованим програмним забезпеченням під керуванням операційної системи Windows, комплекту модулів вводу-виводу і сполучних кабелів. Об'єкт включається в контур регулювання, система налаштовується бажаним способом, потім отримані коефіцієнти регулятора записуються в ПІД-контролер. Завдяки зручному для користувача інтерфейсу, значній продуктивності комп'ютера і відсутності обмежень на алгоритми ідентифікації системи, вдається отримати параметри регулятора, близькі до оптимальних.

Постановка завдання. Для розробки методу автоналаштування ПІД-регулятора потрібно вирішити такі задачі:

1. обрати типову структуру моделі об'єкта керування та межі зміни її параметрів, що характеризують область застосування методу;
2. отримати аналітичні залежності оптимальних параметрів налаштування ПІД-регулятора від ключових точок перехідного процесу для обраного методу ідентифікації;
3. перевірити результати роботи запропонованого методу на типовому об'єкті керування.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для досліджень було обрано стандартну структуру ПІД-регулятора, згідно з рекомендаціями ISA [10, с. 206].

Процедура моделювання виконувалася у середовищі Matlab Simulink. Було обрано алгоритм вирішення рівнянь ode23s (stiff/mod. Rosenbrock) зі зміною величиною кроку (verible-step). Абсолютна і відносна точність розрахунків – 0,001.

За основу практичної реалізації автоналаштування взято метод Åstrøm-Hägglund's Relay [4, с. 302]. Цей метод автоналаштування параме-

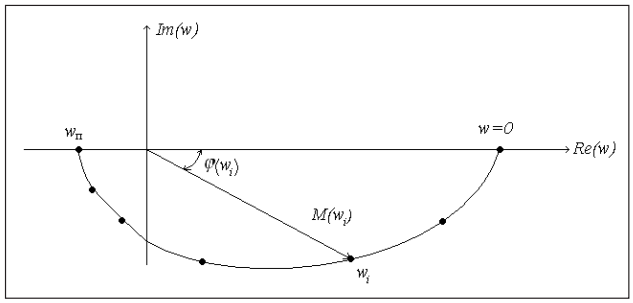


Рис. 1. Годограф АФХ системи із домінуючими аперіодичними властивостями

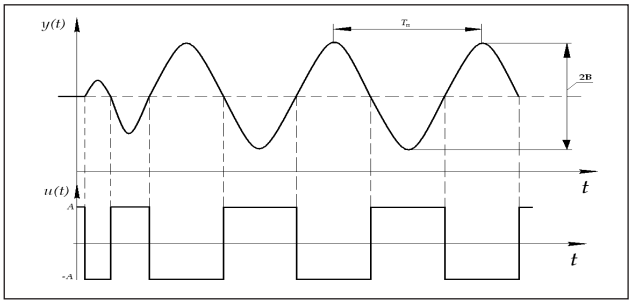


Рис. 2. Графіки експерименту з отримання точки годографа АФХ на частоті ωп

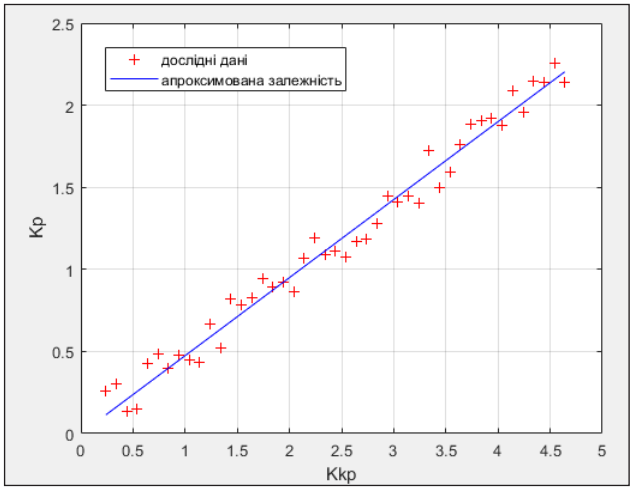


Рис. 3. Залежність коефіцієнта підсилення регулятора K_p від критичної точки $K^{KP}{}_p$

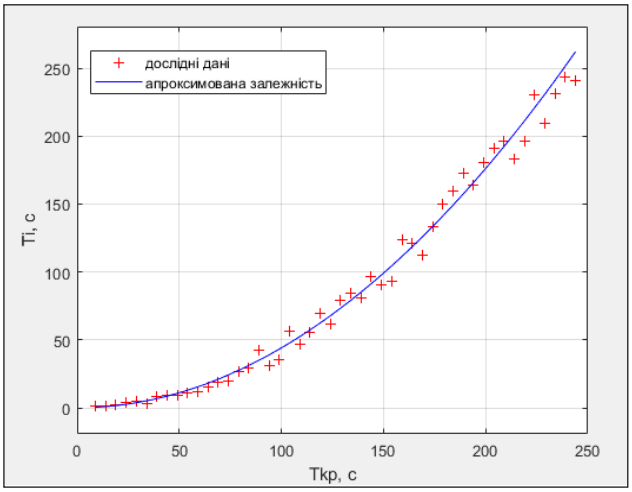


Рис. 4. Залежність сталої часу інтегрування регулятора T_i від критичної точки T^{KP}

трів ПІД-регулятора базується на дослідженні та обробці частотної характеристики об'єкта. Його суть полягає в тому, що динамічна система із домінуючими аперіодичними властивостями має властивість пропускати через себе гармонічні коливання з частотою ω<ωзр (ωзр – частота зрізу) без зміни їх частоти, амплітуда та кут зсуву фаз вихідного сигналу залежить від частоти вхідного сигналу (рис. 1). Таким чином, на відміну від перехідних та імпульсних характеристик, які характеризують поведінку динамічної ланки в області частот, близьких до нуля, частотні характеристики описують властивості динамічної ланки в діапазоні частот, для яких проводяться дослідження.

У реалізованому методі автоналаштування проводиться визначення точки годографа амплітудно-фазової характеристики (далі – АФХ) динамічного об'єкта на частоті ωπ. Для цього зі сталого режиму подають вхідний тестовий сигнал заданої амплітуди (А) у будь-який бік. Після помітного відхилення вихідного сигналу від початкового сталого значення виконують перемикання вхідного сигналу на величину 2А у протилежному напрямку (рис. 2). Наступні перемикання вхідного сигналу виконують у ті моменти часу, коли вихідний сигнал перетинає уявну лінію свого початкового значення.

Внаслідок проведення експерименту визначаються критичні точки: $K^{KP}{}_p$ та T^{KP}. Якщо розмах прямокутних імпульсів на вході об'єкта дорівнює $2A$, то амплітуда першої гармоніки на виході об'єкта – $4A/\neq$. Для визначення значення $K^{KP}{}_p$ використовується формула (1):

$$K^{KP}{}_p = \frac{4A}{\pi B}, \qquad (1)$$

де A – амплітуда імпульсів реле;

B – амплітуда гармонічних коливань на виході;

T^{KP} – чисельно дорівнює періоду гармонічних коливань у секундах.

Наступним етапом виконання автоналаштування є розрахунок параметрів налаштування ПІД-регулятора. Для розрахунку цих параметрів застосовуються експрес-методи [11, с. 554; 8, с. 45], що використовують типові прості інтегральні критерії.

У якості цільової функції запропонованого методу налаштування було використано інтегральний показник абсолютного розбалансу, зважений у часі (Integral of the time weighted absolute error – ITAE):

$$ITAE = \int_0^{t_p} t \cdot |e(t)|\, dt \qquad (2)$$

Якість процесу регулювання під час використання ITAE визначається розбалансом, зваженим у часі. У даному показнику мінімізується вплив початку процесу регулювання, коли відхилення від уставки є досить великим, а більша увага приділяється розбалансу, що зберігається з часом. Тому ITAE є показовим критерієм та використовується у багатьох методах налаштування регуляторів, оскільки приводить до більш сталих та надійних перехідних процесів [9, с. 210].

У процесі розробки експрес-методу, що забезпечує мінімум ITAE (2), було виконано моделювання системи автоматичного регулювання з ПІД-регулятором. Математична модель об'єкта дослідження описується інерційною ланкою першого порядку з транспортним запізненням (3):

$$W_{об}(s) = \frac{K_{об}}{T_{об}s + 1} e^{-\tau_{об}s} \qquad (3)$$

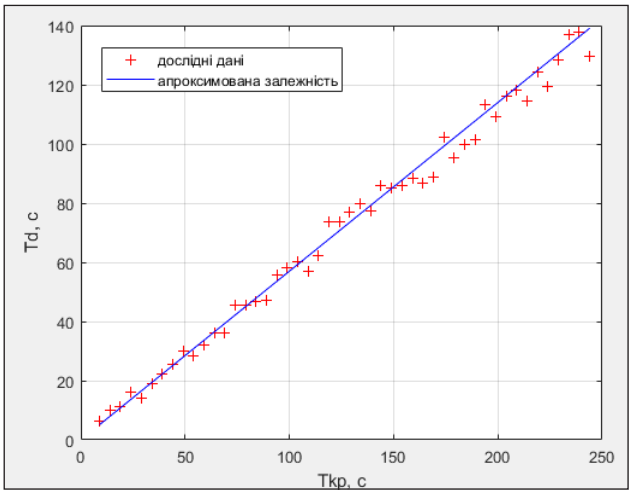


Рис. 5. Залежність сталої часу диференціювання регулятора T_d від критичної точки T^{KP}

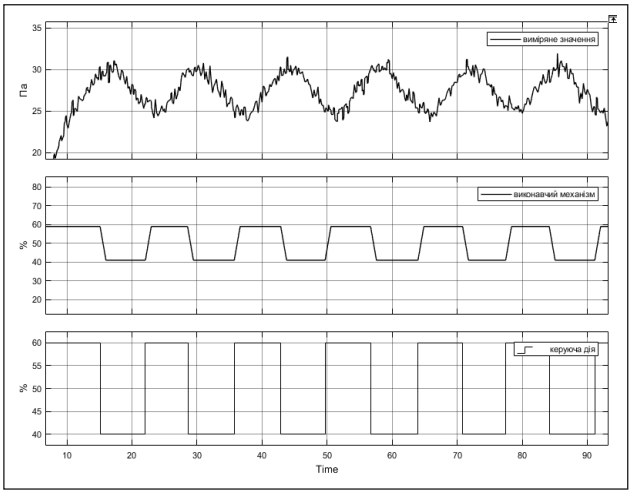


Рис. 6. Перехідні процеси автоналаштування ПІД-регулятора системи автоматичного регулювання розрідження в топці котлоагрегату

Параметри налаштування ПІД-регулятора було знайдено за допомогою модифікованого методу Ньютона. Цільова функція – ITAE. Масив дослідних даних було отримано шляхом варіації динамічних властивостей об'єкта $\left(K_{об} \in [0.05...10]; T_{об} \in [2...500]; \tau_{об} \in [0...100]\right)$. Для кожного варіанту визначалися критичні точки (K^{KP}_{p}, T^{KP}) й оптимальні параметри налаштування ПІД-регулятора.

Внаслідок моделювання було отримано залежності параметрів налаштування регулятора, що забезпечують мінімум ITAE, від критичних точок K^{KP}_{p} та T^{KP} (рис. 3–5).

Отримані масиви дослідних даних (рис. 3–5) апроксимовані залежностями (4) параметрів налаштування ПІД-регулятора від критичних точок:

$$\begin{cases} K_p = 0.46 \cdot K^{KP}_{p}, \\ T_i = 0.0045 \cdot \left(T^{KP}\right)^2 + 0.3 \cdot T^{KP}, \\ T_d = 0.57 \cdot T^{KP}. \end{cases} \quad (4)$$

Середня квадратична похибка апроксимації не перевищує 3%, що є прийнятним для практичного застосування.

Перевірку якості роботи методу налаштування виконаємо на прикладі типового для теплоенергетики об'єкта – котлоагрегата, а саме контура регулювання розрідження в топці котла. Наявність незначного розрідження у верхній топці котла потрібне для забезпечення стійкості полум'я у зоні горіння, виведення димових газів із котла. Проблеми регулювання розрідження в топці котла – наявність високочастотних шумів при вимірах, зовнішнього збурення, зміна витрати повітря та внутрішнього збурення, порушення газоповітряного режиму. Об'єкт керування за каналом «частота обертів димососа – розрідження у топці котла» має передавальну функцію [12, с. 241]:

$$W_{об}(s) = \frac{0,55}{5s+1} e^{-2s} \quad (5)$$

Вихід об'єкта керування, тобто показники датчика розрідження, зашумлений із дисперсією високочастотних шумів 0,4664. Це наближає моделювання до реальних умов роботи системи автоматичного керування.

Виконаємо автоналаштування системи автоматичного регулювання розрідження в топці котлоагрегату. Отримані у процесі проведення активного експерименту (рис. 6) критичні точки (6):

$$\begin{cases} K^{KP}_{p} = 4.8, \\ T^{KP} = 14.9[c]. \end{cases} \quad (6)$$

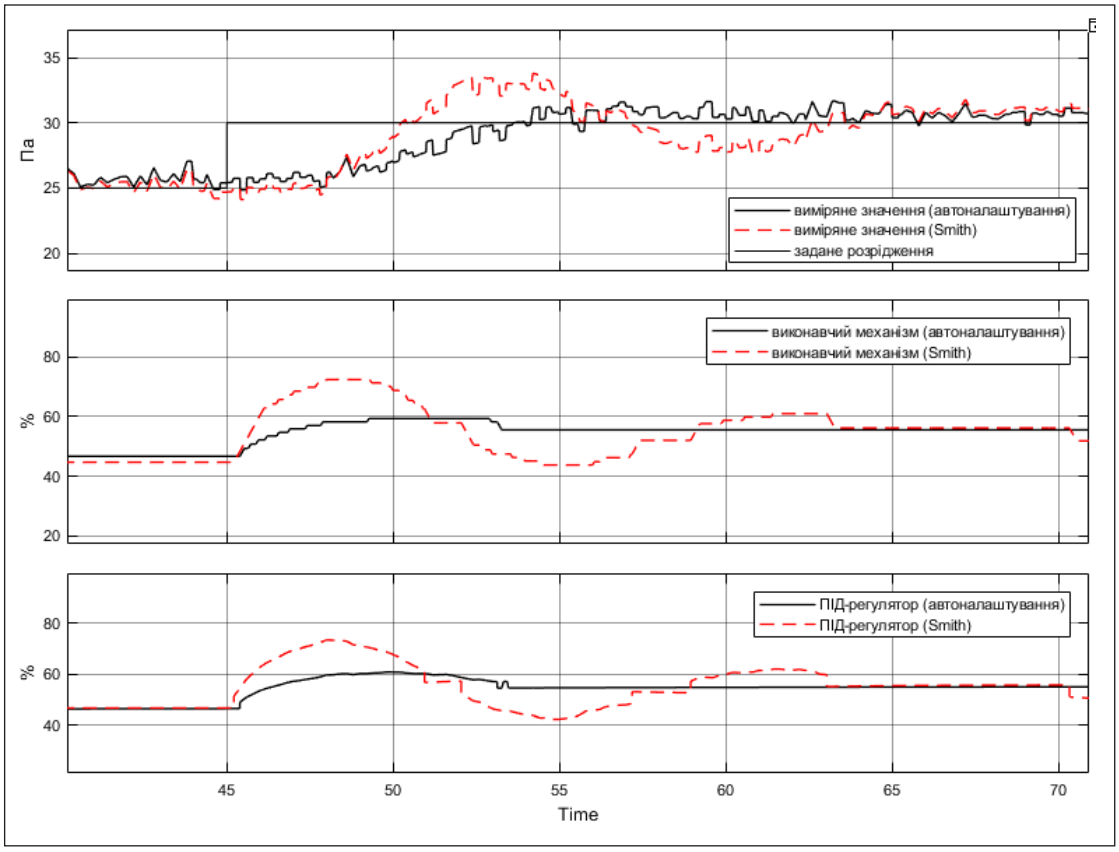


Рис. 7. Перехідні процеси системи автоматичного регулювання розрідження в топці котлоагрегату

Отримані у процесі автоналаштування параметри ПІД-регулятора (7):

$$\begin{cases} K_p = 0.46 \cdot K^{KP}{}_p = 0.46 \cdot 4.8 = 2.2\left[\dfrac{\%}{Па}\right], \\ T_i = 0.0045 \cdot \left(T^{KP}\right)^2 + 0.3 \cdot T^{KP} = \\ = 0.0045 \cdot (14.9)^2 + 0.3 \cdot 14.9 = 5.47[c], \\ T_d = 0.57 \cdot T^{KP} = 2.96[c]. \end{cases} \quad (7)$$

Для порівняння результатів роботи запропонованого методу автоналаштування розрахуємо параметри налаштування ПІД-регулятора (8) за методикою Modified minimum ITAE – Smith [11, с. 93] та промоделюємо замкнену систему автоматичного регулювання.

$$\begin{cases} K_p = \dfrac{0.965}{K_{об}} \cdot \left(\dfrac{T_{об}}{\tau_{об}}\right)^{0.855} = \dfrac{0.965}{0.55} \cdot \left(\dfrac{5}{2}\right)^{0.855} = \\ = 3.84\left[\dfrac{\%}{Па}\right], \\ T_i = 1.26 \cdot T_{об} = 6.3[c], \\ T_d = 0.308 \cdot \tau_{об} = 0.616[c]. \end{cases} \quad (8)$$

ITAE перехідного процесу регулювання розрідження в топці котлоагрегату з параметрами налаштування ПІД-регулятора, отриманими за допомогою автоналаштування, є на $100\% \cdot \left(1 - \dfrac{4976}{6005}\right) \approx 17{,}13\%$ меншим, ніж такий із параметрами, отриманими за допомогою експрес методу Modified minimum ITAE – Smith (рис. 7).

Знайдені за запропонованим методом параметри регулятора забезпечили більш плавне керування виконавчим механізмом.

Незважаючи на наявність автоматичного налаштування, контролер може не дати необхідної якості регулювання з причин, незалежних від якості закладених у нього алгоритмів. Наприклад, об'єкт управління може бути погано спроектований (залежні контури регулювання, велика затримка, високий порядок об'єкта); об'єкт може бути нелінійним; датчики можуть бути розташовані не в тому місці, де потрібно, і мати поганий контакт із об'єктом, рівень перешкод у каналі вимірювання може бути неприпустимо великим; роздільна здатність датчика може бути недостатньо високою; джерело вхідного впливу на об'єкт може мати занадто велику інерційність або гістерезис; можуть бути також помилки в монтажі системи, погане заземлення, обриви провідників та ін. Тому перш, ніж починати автоматичне налаштування, необхідно переконатися у відсутності перелічених проблем.

Висновки. Розроблено метод автоналаштування ПІД-регулятора на інтегральний зважений у часі модульний критерій якості перехідного процесу для інерційного об'єкта із самовирівнюванням. Метод полягає в оцінці ключових точок перехідних процесів у релейному ідентифікаційному експерименті та подальшому застосуванні запропонованих аналітичних залежностей для пошуку оптимального набору параметрів налаштування ПІД-регулятора. Межі застосування методу відповідають більшості типових об'єктів теплової енергетики. Алгоритм пошуку оптимальних налаштувань має потенціал для реалізації в сучасних промислових контролерах у вигляді автоматичної послідовності дій, включаючи ідентифікацію об'єкта, розрахунок параметрів налаштування регулятора та встановлення отриманих значень у ПІД-регулятор.

Порівняльні дослідження з існуючим методом показали 15% покращення результатів та сприятливий вплив на динаміку роботи виконавчого механізму. Запропонований метод автоналаштування параметрів ПІД-регулятора рекомендовано застосовувати для об'єкта, реакція на збурення якого повинна мати аперіодичні властивості.

Список літератури:

1. Bertocco M., Cappellazzo S., Flammini A., Parvis M. A multi-layer architecture for distributed data acquisition. Proceedings of the 19th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. 2002. № 2. P. 1261–1264.

2. Leva A., Cox C., Ruano A. Hands-on PID autotuning: a guide to better utilization. IFAC Professional Brief. 84 p.

3. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации. СТА. 2008. № 1. С. 86–99.

4. Åstrøm K.J., Hägglund's T. Advanced PID control. The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2005. 461 p.

5. Штейнберг Ш.Е., Сережин Л.П., Залуцкий И.Е., Варламов И.Г. Проблемы создания и эксплуатации эффективных систем регулирования. Промышленные АСУ и контролеры. 2004. № 7. С. 1–7.

6. Шубладзе А.М., Гуляев С.В., Шубладзе А.А. Оптимальные автоматически настраивающиеся общепромышленные регуляторы. Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2002. № 10. С. 30–33.

7. Cai W. J., Fang Y., Wang Y. G. Robust closed-loop process identification from step test. Control, Automation, Robotics and Vision Conference (2004, 6–9 December). P. 907–912.

8. Li Y., Ang K.H, Chong G.C.Y. Patents, Software, and Hardware for PID control. An overview and analysis of the current art. IEEE Control Systems Magazine. 2006. P. 41–54.
9. Seborg D.E.,ʃEdgar Th.F.,ʃMellichamp D.A.,ʃDoyle F.J. Process Dynamics and Control. 2016. 512 p.
10. Terrence Blevins, Mark Nixon Control Loop Foundation: batch and continuous processes, 2011. 406 p.
11. O'dwyer A. Handbook Of Pi And Pid Controller Tuning Rules (3rd Edition). World Scientific, 2009. 624 p.
12. Плетнев Г.П. Автоматизированное управление объектами тепловых электростанций. М.: Энергоатомиздат, 1981. 368 с.

АВТОНАСТРОЙКА ПИД-РЕГУЛЯТОРА НА МИНИМУМ ИНТЕГРАЛЬНОГО ВЗВЕШЕННОГО ВО ВРЕМЕНИ МОДУЛЬНОГО КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА РАБОТЫ

В статье предлагается методика автоматической настройки параметров ПИД-регулятора, обеспечивающих минимум ITAE. Обоснована целесообразность автонастройки ПИД-регуляторов. Проанализированы существующие методы автонастройки. Предоставляются полученные зависимости параметров ПИД-регулятора от свойств объекта управления и результаты моделирования замкнутой системы автоматического регулирования. Проводятся сравнительные исследования с существующим методом настройки.

Ключевые слова: *автонастройка, ITAE, идентификация, релейный эксперимент, метод настройки, ПИД-регулятор.*

AUTO-TUNING METHOD OF THE PID CONTROLLER BASED ON THE MINIMUM OF INTEGRAL TIME WEIGHTED ABSOLUTE ERROR

The scientific article proposes a method for automatic adjustment of parameters of the PID-controller, providing a minimum of ITAE. The justification of the expediency of auto-adjustment of PID-regulators is given. An analysis of existing self-adjusting methods is underway. The obtained dependences of the parameters of the PID-regulator on the properties of the control object and the results of the simulation of the closed-loop automatic control system are given. Comparative studies are conducted with the existing setup method.

Key words: *auto-tuning, ITAE, identification, relay experiment, setup method, PID-controller.*

УДК 004.048

Тільняк Ю.Я.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Корнага Я.І.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДІАГНОСТИКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АВТОМОБІЛІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

У статті розглянуті основні механізми і принципи роботи сучасної технічної діагностики автомобілів. Проаналізовано можливості уникнення основних недоліків, що виникають під час діагностики й експлуатації самохідного колісного транспортного засобу. Доведено необхідність впровадження нових технологій для планування і підвищення ефективності технічної експлуатації з описом побудови експертної системи на основі технології з використанням можливостей нейронних мереж як інструменту практичного вирішення прикладних завдань в області діагностування і прогнозування працездатності самохідного колісного транспортного засобу. Обґрунтовано важливість підвищення якості аналізу діагностичної інформації шляхом впровадження штучних нейронних мереж до програми блоку управління.

Ключові слова: *самохідний колісний транспортний засіб, динамічні навантаження, система технічної діагностики, штучні нейронні мережі, електронний блок керування.*

Постановка проблеми. Всі сучасні електронні системи управління, розроблені для управління самохідним колісним транспортним засобом (далі – СКТЗ), обладнані системою самодіагностики, створеною, щоб інформувати водія про несправності. У процесі роботи двигуна на різних режимах (запуск двигуна, прогрів, розгін і гальмування, холостий хід) безперервно йде зчитування показань декількох десятків датчиків. У цей час реєструються як дискретні сигнали, так і динамічні.

СКТЗ – це сукупність як простих, так і досить складних елементів, і, хоча більшість помилок виникає через з'єднання (роз'єми), які просто забули з'єднати під час поточного ремонту, або через пошкодження електропроводки, іноді виникають ситуації, що вимагають детальної діагностики за різних умов роботи двигуна для встановлення точної причини виникнення помилки.

Сигнал про помилку системою діагностики кодується і зберігається в довготривалій пам'яті для подальшої розшифровки фахівцем на станції технічного обслуговування (СТО), який, підключившись до наявного на блоці управління роз'єму, зчитує наявні помилки і після розшифровки приймає рішення про подальші дії.

Комп'ютерна діагностика служить для визначення стану СКТЗ і полегшення пошуку несправності, не будучи власне ремонтом СКТЗ. У деяких очевидних випадках на старих СКТЗ, що не обладнані системою діагностики, можна було обійтися без комп'ютерної діагностики, але сьогодні без цієї операції визначення стану систем СКТЗ стає неможливим. Витрачаючи ресурс на повну діагностику, ви будете точно проінформовані про стан вашого СКТЗ на цей момент, але це не дозволить планувати витрати на підтримку авто у справному стані й уникнути непередбачуваних матеріальних витрат у разі наступної помилки.

Аналіз роботи систем діагностики технічного стану СКТЗ виявив ряд недоліків. По-перше, ці системи не враховують динамічного навантаження на робочі органи СКТЗ. По-друге, у розглянутих системах діагностики не виконується одна з головних задач технічного діагностування – прогнозування технічного стану СКТЗ.

Ці недоліки можуть бути усунені, якщо в режимі реального часу, за даними поточних вимірювань критичних параметрів, ідентифікувати динамічні навантаження, відповідні їм динамічні режими роботи і технічний стан СКТЗ. За допомогою експертної бази даних, у якій набрана статистика про

діючі навантаження, а також напрацювання та залишковий ресурс автомобіля і його систем, можна здійснювати прогнозування технічного стану СКТЗ. Ці завдання можуть бути вирішені за рахунок виконання штучних нейронних мереж.

Постановка завдання. На сьогодні, незважаючи на те, що в процесі експлуатації СКТЗ піддається зовнішнім і внутрішнім впливам, які призводять до зміни параметрів технічного засобу в цілому і його окремих елементів, а також на наявність жорстких вимог до надійності, діагностика СКТЗ носить лише фрагментарний і періодичний характер.

Під час проведення діагностування СКТЗ проводяться вимірювання понад тридцять параметрів. Суттєвим є те, що всі вимірювання проводяться в статичному або в динамічному режимі з використанням спеціальних стендів. В умовах реальної експлуатації дорожньої техніки динамічні режими роботи і навантаження відрізнятимуться від стендових. Внаслідок цього виміряні характеристики не будуть достовірними, і за ними не можна прийняти рішення про відповідність параметрів вузлів і систем СКТЗ встановленим технічними вимогам [8, с. 270–271].

Існуючі системи не спираються на машинне навчання і спроможні лише сповіщати про наявність помилки в блоках управління чи механічних елементах. За рахунок використання штучної нейронної мережі сервіс здатний визначити, коли саме несправність стане критичною. Система зможе вказати часовий інтервал, протягом якого це все відбудеться [3, с. 119–126]. Таким чином, актуальною є задача оцінки і прогнозування технічного стану СКТЗ у процесі виконання ним технологічних операцій, тобто в динаміці його роботи.

Метою статті є розробка системи з використанням штучних нейронних мереж у системах технічної діагностики СКТЗ.

Виклад основного матеріалу дослідження. ***Нечіткі нейронні мережі в технічній діагностиці транспортного засобу.*** Аналіз сучасних діагностичних систем СКТЗ свідчить, що існує об'єктивна науково-технічна проблема створення комплексних систем діагностування, побудованих на універсальних принципах, що забезпечують високий рівень достовірності постановки діагнозу, і перспективних щодо масової реалізації як у стаціонарних стендах, так і в системах бортового діагностування. Проектування систем діагностування вимагає створення алгоритму діагнозу і визначення нормативів. Традиційні підходи реалізують ці два етапи окремо, що є їх істотним недоліком. Проте в медицині, економіці досить успішно застосовують діагностичні та експертні системи на основі інтелектуальних методів, таких як нечітка логіка і нейронні мережі.

Широко застосовують системи на базі «м'яких обчислень» – «нечіткої логіки». «М'які обчислення» розглядаються як сукупність обчислювальних методологій, які колективно забезпечують основи для розуміння, конструювання та розвитку інтелектуальних діагностичних систем. У цій сукупності основними компонентами «м'яких обчислень» є нечітка логіка, нейрообчислення, генетичні алгоритми та ймовірні обчислення.

Недолік їх застосування полягає в конструктивно закладеній залежності ефективності системи діагностики від розмірності набору контрольованих параметрів. Система діагностики повинна володіти повнотою, тобто необхідно, щоб для кожного можливого варіанту значень набору контрольованих параметрів існувало відповідне правило. Це означає, що, якщо кожен параметр може прийняти одне з m можливих значень, то загальне число продукційних правил дорівнюватиме $N = m^n$ і швидко зросте зі збільшенням m і n. Також нечітка логіка ефективна за наявності знань у експерта про вплив факторів на цільову функцію, а також невисоких вимог до точності системи [2, с. 11–15].

Внаслідок цих обмежень дані технології знаходять застосування в технічній діагностиці. Для успішного застосування нечіткої логіки її необхідно розглядати в сукупності з нейронними системами. Одна з особливостей нейронних мереж, що уможливлює їх застосування під час діагностування та прогнозування відмов систем СКТЗ, – це здатність до навчання і узагальнення накопичувальних знань. Нейронна мережа має риси штучного інтелекту; натренована на обмеженій множині даних, мережа здатна узагальнювати отриману інформацію і показувати хороші результати на даних, що не використовувалися в процесі навчання [5, с. 68–71]. Характерна особливість мережі полягає в можливості її реалізації із застосуванням технології надвеликого ступеня інтеграції. Штучні нейронні мережі в задачах прогнозування та діагностування об'єкта можуть бути використані в якості підсистеми вибірки і прийняття рішень, що передає діагностичну інформацію інших підсистем (наприклад, автоматизованої паспортної системи управління технологічним процесом) з іншою методологічною основою побудови [1, с. 111–117].

Складність завдання прогнозування відмов систем і елементів СКТЗ зумовлене неможливістю чіткої постановки відповідності змін вхідних і вихідних параметрів, у яких перебуває або до яких прагне об'єкт діагностування. Зокрема, не можна

однозначно визначити всі відмови або стан деталі, за якого значення хоча б одного спеціального параметра характеризує наближення деталі СКТЗ до відмови. Можна виділити безліч станів об'єкта діагностування і спробувати оцінити ступінь впливу кожного інформаційного параметра на ймовірність переходу об'єкта в будь-який із можливих станів. Тому для діагностування необхідно використовувати метод підбору вагових коефіцієнтів – міжнейронних зв'язків на основі навчання і штучних нейронних мереж, функціонування яких засноване на принципах нечіткої логіки, які застосовують для адаптації параметрів методики навчання, так і на основі самоорганізації.

Найважливіша властивість штучних нейронних мереж свідчить про їх великий потенціал у галузі прогнозування відмов і в можливості паралельної обробки інформації усіма нейронами. Завдяки цій здатності, за великої кількості міжнейронних зв'язків, досягається одночасно обробка значного обсягу даних, до яких надходить вимірювальна інформація в реальному масштабі часу [6, с. 104].

У завданнях діагностування і прогнозування нечітка нейронна мережа грає роль універсального апроксиматора функції від декількох змінних, реалізуючи нелінійну функцію

$$Y = F(X),$$

де {X(t)}={X1(t),X2(t),X3(t),...,Xn(t)} – вектори вхідної інформації (поточні виміряні значення діагностичних параметрів);

Y – реалізація векторної функції декількох змінних.

Постановка багатьох завдань діагностування та прогнозування технічного стану об'єкта може бути зведена саме до апроксимаційного подання [4, с. 179–185].

Однією з простих моделей для встановлення діагностичної інформації можуть служити статичні моделі, погоджуючі критерії, що оцінюють стан об'єкта діагностування, з відхиленнями реальних показників можуть відрізнятися у вигляді регресійної моделі дефектів:

$$\begin{cases} \delta A = Wa1 \times X1 + Wa2 \times X2 + ... + Wan \times Xn \\ \delta B = Wb1 \times X1 + Wb2 \times X2 + ... + Wbn \times Xn \end{cases}$$

де $Wa1, Wa2, ..., Wan, Wb1, Wb2, ..., Wbn$ – коефіцієнт впливу (ваговий коефіцієнт).

Таблицю вагових коефіцієнтів W для кожного конкретного значення X і називають діагностичною матрицею. Необхідно також вирішити питання про оптимальні числові реальні показники, які можуть відрізнятися. З одного боку, чим більше число вимірюваних параметрів, тим вірогідніше визначається технічний стан об'єкта діагностування, і тим більша складність і собівартість системи діагностики в цілому. Таким чином, слід вибирати параметри, які найбільш повно характеризують технічний стан СКТЗ у процесі його експлуатації.

Локалізація дефектів за допомогою діагностичної матриці подібна до роботи системи нейронів, яка отримала назву «персептрон».

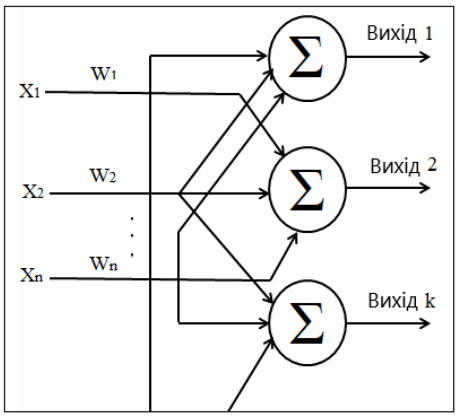


Рис. 1. Одношаровий персептрон з *n* входами і *k* виходами

Кожен нейрон модифікує обчислювальну суму за допомогою активаційної функції у вигляді сигналу наявності або відсутності якої-небудь відмови, або значення хоча б одного спеціального параметра, що характеризує наближення деталі СКТЗ до відмови, а, у разі застосування більш структурованих штучних нейронних мереж, вихідним сигналом може слугувати коефіцієнт ваги нейронної мережі вищого рівня – ймовірність перебування об'єкта діагностування в робочих, граничних, критичних, неробочих станах. Після пред'явлення вхідних сигналів разом із відомим виходом нейронні мережі можуть самостійно налаштовуватися (навчатися) під конкретний об'єкт діагностування для отримання необхідної реакції. Однак організація процесу навчання в кожному конкретному випадку – це складна проблема, яка потребує ретельної обробки [7, с. 124].

Безліч контрольних точок СКТЗ, у якому знімаються його характеристики в різних режимах роботи, може вважатися вектором x (кожен вектор відповідає певному динамічному режиму роботи), що подається на вхід мережі. Залежно від умов роботи, виду несправного елемента і ступеня пошкодження, виходять різні характеристики однієї і тієї ж системи несправності СКТЗ. Як правило, несправність кожного виду пов'язана зі специфічною зміною характеристик автомобіля, властивим тільки цій несправності. Нейрон, який перемагає в конкуренції за певної

комбінації характеристик, представляє згодом або нормальний режим роботи, або певну несправність, дозволяючи тим самим локалізувати її.

Типова схема виявлення несправностей представлена на рис. 2.

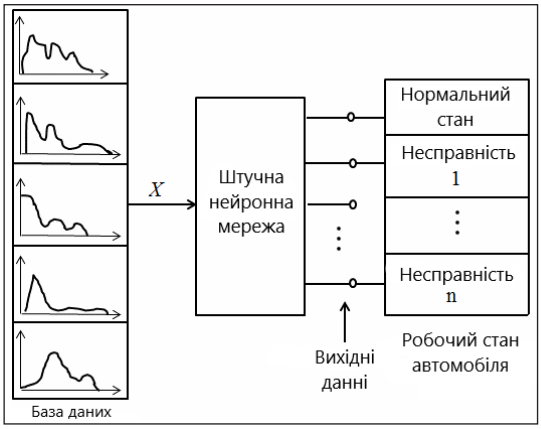


Рис. 2. Схема застосування штучної нейронної мережі для виявлення несправностей у СКТЗ

База даних складається з безлічі характеристик, що відповідають різним нормальним і граничним станам у певних режимах роботи, у яких, як правило, пристрій піддається діагностуванню. Головна умова коректного функціонування системи – диференціація характеристик у різних граничних станах. Якщо дві різні несправності мають ідентичні ознаки, їх розрізнення буде неможливим. Підготовка відповідної бази даних, за якою проводитиметься навчання, а надалі – й експлуатація нечіткої нейронної мережі (власне діагностування несправностей), вимагають проведення таких вимірювань, які однозначно свідчитимуть про фактичний стан СКТЗ. Слід виділити ті фрагменти характеристик, які відрізняються один від одного. Для досягнення цієї мети можуть виконуватися будь-які операції (як лінійні, так і нелінійні) на всій базі даних.

Навчальна вибірка для нейронної мережі під час автомобільної діагностики. Розмір нейронної мережі визначається на основі даних ЕБК та несправностей двигуна СКТЗ. Згідно з попереднім аналізом, виділено нейронну мережу, в якій 17 вузлів і 4 вузли вихідного рівня.

Маємо недостатню кількість вузлів вхідного рівня, що не може належним чином тренувати мережу і визначити раніше досліджені зразки; водночас, велика кількість вузлів потребуватиме більше часу для навчання [10, с. 70–74]. Тому в прихованому шарі маємо оптимальну кількість вузлів. Кількість вузлів прихованого шару потрібно вказувати згідно з рівнянням:

$$n_2 = \sqrt{n_1 + n_3} + a \ .$$

Таблиця 1

Вісім навчальних зразків несправності на основі даних ЕБК для нейронної мережі експертної системи діагностики СКТЗ несправностей

Зразок	1	2	3	4	5	6	7	8
x_1	1	0	1	0	0	0	0	0
x_2	0	1	1	1	0	0	0	0
x_3	0	0	1	1	1	1	1	1
x_4	0	0	0	0	0	0	0	1
x_5	0	0	0	0	1	1	0	0
x_6	0	0	0	0	0	1	0	1
x_7	0	0	0	1	0	1	0	0
x_8	0	0	1	1	0	0	0	0
x_9	0	0	0	0	0	0	0	1
x_{10}	0	0	0	0	1	1	0	1
x_{11}	0	0	0	0	1	1	1	1
x_{12}	1	0	0	0	0	0	0	0
x_{13}	0	0	0	0	0	0	0	1
x_{14}	1	1	0	0	0	0	0	0
x_{15}	0	0	0	0	0	0	1	1
x_{16}	0	0	1	1	0	0	0	0
x_{17}	1	1	0	0	1	1	0	0

xi (i = 1, 2, ..., 17) вказує на несправність явища за ненормальної роботи двигуна

Таблиця 2

Вісім вихідних навчальних зразків ненормальних даних двигуна для експертної системи діагностики несправностей СКТЗ нейронної мережі ВР

Вихідні дані	1	2	3	4	5	6	7	8
y_1	1	1	0	0	0	0	0	0
y_2	0	0	1	0	0	0	0	0
y_3	0	0	0	1	1	1	0	0
y_4	0	0	0	0	0	0	1	1

i (i = 1, 2, 3, 4) вказує на позаштатну роботу двигуна

Таблиця 3

Вихідні дані нейронної мережі у разі введення навчальних зразків

Вихідні дані	y_1	y_2	y_3	y_4
1	1.0009	-0.0004	-0.0011	0.0013
2	1.0010	-0.0028	-0.0005	-0.0011
3	-0.0013	0.9976	0.0019	-0.0011
4	0.0008	1.0012	-0.0027	0.0004
5	0.0030	-0.0079	0.9956	-0.0039
6	-0.0067	0.0071	0.9992	0.0027
7	-0.0081	0.0149	-0.0040	1.0062
8	0.0079	-0.0171	0.0023	0.9950

yi (i = 1, 2, 3, 4) вказує на позаштатну роботу двигуна,

де n_1 – номер вузла вхідного шару;

n_3 – номер вузла вихідного шару;

α – коректне значення, діапазон якого від 1 до 10 [9].

Вибір вибірки нейронної мережі: на підставі діагностики несправностей можна отримати навчальний зразок і вихідний сигнал, як показано в табл. 1 і табл. 2.

У даній експертній системі діагностики несправностей автомобіля, за допомогою нейронної мережі, помилка навчання встановлена 0,001, навчальні зразки вводяться до системної програми, і результати випробувань можуть бути отримані, як показано в табл. 3.

Як можна бачити з табл. 2 і 3, фактичний вихід і необхідні вихідні значення мають відносно хороший ступінь відповідності, тому цей метод діагностики СКТЗ несправностей, заснований на нейронній мережі, має високу точність і надійність.

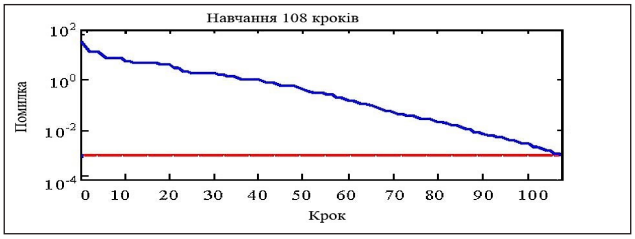


Рис. 3. Зв'язок між помилкою навчання і навчальними епохами під час введення навчальних зразків до системи

Зв'язок між помилкою навчання і етапом навчання показаний на рис. 3. Коли процес навчання досягає 108 кроків, точність похибки відповідає вимозі діагностики несправностей. Крім того, коли змінюється вимога помилки, можна виявити, що крок навчання і час відповідно змінюються. Наприклад, якщо необхідна менша помилка навчання, час навчання буде більшим, що призведе до збільшення кроку навчання.

Висновки. На основі аналізу особливостей експертної системи діагностики несправностей СКТЗ і методів аналізу нейронної мережі розроблена експертна система діагностики несправностей автомобілів. Проведений аналіз алгоритмів роботи нечітких нейронних мереж свідчить про те, що ці мережі, за певних обмежень, з успіхом можуть використовуватися у прогнозуванні технічного стану в бортових діагностичних системах.

Результати показують властивість штучних нейронних мереж та їх великий потенціал у галузі прогнозування відмов, можливості паралельної обробки інформації усіма нейронами. Завдяки цій здатності, за великої кількості навчальної вибірки, досягається збільшення точності в прогнозуванні несправностей СКТЗ.

Під час генерування сигналів ЕБК двигуна було визначено такі переваги використання нейромережевих алгоритмів для вирішення вищезазначених завдань: підвищення ефективності діагностики, простота навчання і донавчання. Обґрунтовано можливість використання штучних нейронних мереж у системах технічної діагностики СКТЗ.

Список літератури:

1. Вікторова О.В., Коваль А.О. Використання «м'яких» обчислень в інтелектуальних інформаційно-вимірювальних системах дорожніх машин. Вестник ХНАДУ, 2011. Вып. 53. С. 111–117.

2. Вікторова О.В. Методика побудови функцій приналежності інформативних параметрів динамічних режимів роботи дорожньої машини. Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2011. № 53. С. 11–15.

3. Жернаков С.В. К вопросу о построении гибридных нейро-нечетких экспертных систем к диагностики и контроля ГТД. Управление в сложных системах. Уфа: УГАТУ, 1999. С. 119–126.

4. Круглова Т.Н. Нечеткий экспертный метод диагностирования технического состояния очистного комбайна. Наукові праці ДонНТУ. 2010. № 18. С. 179–185.

5. Лукіна С.В. Прогностичне моделювання проектних інноваційних рішень по конфігурації засобів оснащення високотехнологічних виробництв. Економіка та держава. 2015. № 8. С. 68–71.

6. Хайкин С. Нейронные сети. М: Издательский дом «Вильямс», 2006. 1104 с.

7. Яковлев С.А. Експертні системи: навч. посіб. СПб.: ГУАП, 2010. 124 с.

8. Jiang H.F., Lu X.D. Electrical ejection engine fault diagnosis expert system based on artificial intelligence. 2004. P. 270–271.

9. Zhang W. Based on expert systems in the automotive engine fault diagnosis application. Master Thesis, Taiyuan University of Technology. Taiyuan. China. 2011. P. 70–75.

10. Zhu Q., Huang A.R., Bao J. Design and implementation of automobile fault diagnosis expert system. Automotive Indus. 2010. P. 70–74.

ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

В статье рассмотрены основные механизмы и принципы работы современной технической диагностики автомобилей. Проанализированы возможности избегания основных недостатков, возникающих при диагностике и эксплуатации самоходного колесного транспортного средства. Показана необходимость внедрения новых технологий для планирования и повышения эффективности технической эксплуатации с описанием построения экспертной системы на основе технологии с использованием возможностей нейронных сетей как инструмента практического решения прикладных задач в области диагностики и прогнозирования работоспособности самоходного колесного транспортного средства. Обоснована важность повышения качества анализа диагностической информации путем внедрения искусственных нейронных сетей в программу блока управления.

Ключевые слова: *самоходное колесное транспортное средство, динамические нагрузки, система технической диагностики, искусственные нейронные сети, электронный блок управления.*

DIAGNOSTICS OF THE TECHNICAL STATE OF AUTOMOBILES USING THE NEURAL NETWORK

The article deals with the main mechanisms and principles of modern technical diagnostics of automobiles. The possibilities of avoiding the main disadvantages that arise during the diagnostics and exploration of a self-propelled wheeled vehicle analyzed. Demonstrated the necessity of introducing new technologies for planning and improving the efficiency of technical operation with the description of constructing an expert system based on technology using the capabilities of neural networks as a tool for practical solution of applied tasks in the field of diagnosing and forecasting the performance of a self-propelled wheeled vehicle. Substantiated the importance of improving the quality of diagnostic information analysis by introducing artificial neural networks into the control unit program.

Key words: *self-propelled wheeled vehicle, dynamic loads, system of technical diagnostics, artificial neural networks, electronic control unit.*

УДК 517.9

Фомін О.О.
Одеський національний політехнічний університет

МЕТОД ПОБУДОВИ ПРОСТОРУ ДІАГНОСТИЧНИХ ОЗНАК НА ОСНОВІ ІНТЕГРАЛЬНИХ ДИНАМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ

Запропоновано удосконалення методу модельної діагностики. Метод засновано на непараметричній ідентифікації динамічних систем у вигляді багатовимірних вагових функцій і побудові на їх основі простору діагностичних ознак. Простір діагностичних ознак будується з використанням моментів різних порядків та вейвлет-перетворень отриманих інтегральних моделей. Проаналізовано ефективність запропонованих просторів діагностичних ознак на основі інтегральних моделей за допомогою імітаційної моделі нелінійного динамічного об'єкта.

Ключові слова: *інтегральні моделі, багатовимірні вагові функції, технічна діагностика, редукція простору ознак, вейвлет-перетворення.*

Постановка проблеми. На сьогодні збільшення складності об'єктів контролю (далі – ОК) при збереженні динамічних та нелінійних властивостей систем, збільшення вимог до точності та об'єктивності рішень порушує проблему розвитку складних обчислювальних систем. Такі системи забезпечують необхідні характеристики процесів управління, діагностування та моніторингу об'єктів різної фізичної природи. Сучасні діагностичні системи будуються на основі нових математичних прийомів [1; 2]. Тому наукова проблема створення, вдосконалення та використання ефективних математичних моделей об'єктів діагностування в загальному випадку залишається не вирішеною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Переважно широко відомі методи технічної діагностики, розроблені на основі реконструкції моделей ОК [3; 4]. Як правило, очікується, що несправності змінюють лише характеристики ОК. Але часто помилки змінюють також структуру об'єкта [5–7]. Наслідки таких дій призводять до використання непараметричних методів ідентифікації для побудови моделей об'єктів на основі експериментальних даних «вхід/вихід».

Для універсального опису ОК невідомої структури доцільно використовувати нелінійні непараметричні динамічні моделі на основі багатовимірних вагових функцій (БВФ) [8; 9], головною особливістю яких є одночасне і компактне урахування нелінійних і динамічних властивостей ОК.

Постановка завдання. Метою цього дослідження є підвищення надійності та якості процедури діагностування стану нелінійного динамічного об'єкта. Як джерело первинних даних про ОК пропонується використовувати первинну модель у вигляді БВФ [10–12], побудовану за допомогою процедури непараметричної ідентифікації. Шляхом параметризації первинної моделі у вигляді БВФ за допомогою обчислення її моментів різних порядків та вейвлет-перетворень будуються сукупності діагностичних ознак.

У роботі запропоновано непараметричні нелінійні динамічні моделі на основі БВФ $w_k(\tau_1,\ldots,\tau_k)$, k=1,2,… [5], інваріантних до форми вхідного сигналу.

Використання моделей на основі БВФ дає змогу розглядати нелінійні та динамічні характеристики ОК. За допомогою цього підходу діагностична процедура стає надійною і універсальною [6].

У цьому разі алгоритм діагностики складається з таких етапів:

1. побудова БВФ на основі даних експерименту «вхід/вихід» у частотній або часовій області [7; 8].

2. побудова набору просторів діагностичних ознак на основі отриманих БВФ;

3. інформаційна оптимізація системи діагностування шляхом пошуку найефективніших просторів діагностичних ознак та їх комбінацій. Класифікатор станів ОК будується у вибраному діагностичному просторі за допомогою методів статистичного розпізнавання [8; 9].

1. Побудова моделі у вигляді багатовимірних вагових функцій

Розглянемо нелінійний динамічний об'єкт. Вхідні та вихідні сигнали з нульовими початковими

умовами $x(t)$ можуть бути представлені у вигляді ряда Вольтерра:

$$y(t) = \int_0^t w_1(\tau)x(t-\tau)d\tau + \int_0^t\int_0^t w_2(\tau_1,\tau_2)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)d\tau_1 d\tau_2 + \\ + \int_0^t\int_0^t\int_0^t w_3(\tau_1,\tau_2,\tau_3)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)x(t-\tau_3)d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3 + \ldots \quad (1)$$

де $w_1(\tau_1)$, $w_2(\tau_1,\tau_2)$, $w_3(\tau_1,\tau_2,\tau_3)$ – БВФ 1ro, 2ro та 3ro порядку; t – поточний час.

Висока точність визначення БВФ досягається за допомогою протишумових методів ідентифікації, запропонованих у роботах [5, 13].

2. Побудова простору діагностичних ознак

Методи параметризації первинної моделі. Застосування запропонованої інтегроступеневої моделі в діагностиці тягне за собою необхідність параметризації БВФ: $\{w_k(t_1,t_2,\ldots,t_k)\}_{k=1,2,\ldots,N} \Rightarrow \mathbf{x}=(x_1,x_2,\ldots,x_n)'$.

Вибір методу параметризації має вирішальний вплив на точність діагностичної моделі та, зрештою, на надійність класифікації станів об'єктів. Зазвичай, як простір діагностичних ознак використовують відліки БВФ 1ro порядку $w_1(t)$ та діагональні перетини БВФ 2ro та 3ro порядку $w_2(t,t)$ та $w_3(t,t,t)$ відповідно до заданої дискретності (V_k, $k=\overline{0,3}$).

У роботі пропонуються альтернативні простори діагностичних ознак, а саме інтегральні характеристики первинної моделі.

1. Моменти БВФ $\mu_r^{(k)}$ різних порядків r, ($r=\overline{0,3}$) ($\mathbf{M}_k$, $k=\overline{0,3}$ – порядок БВФ):

$$\mu_{ij\ldots l}^{(k)} = \int_0^\infty\int_0^\infty\ldots\int_0^\infty \tau_1^i\tau_2^j\ldots\tau_k^l w_k(\tau_1,\tau_2,\ldots,\tau_k)d\tau_1 d\tau_2\ldots d\tau_k, \quad (2)$$

де $i, j, \ldots, l$=0, 1, 2, … моменти порядку r для ядра порядку k, $i+j+\ldots+l=r$ – порядок моменту.

Моменти діагональних перетинів БВФ ($\mathbf{M}_k$), які розглядаються в цій роботі, обчислюються за виразом

$$\mu_r^{(k)} = \int_0^\infty t^r w_k(t,t,\ldots,t)dt, \quad (3).$$

2. Коефіцієнти прямого безперервного вейвлет-перетворення, застосованих до БВФ 1ro порядку (W_1) та діагональних перетинів БВФ 2ro та 3ro порядків (W_2, W_3).

Вейвлет-обробка забезпечує ефективне стиснення сигналу з невеликими втратами інформації. Тому це підвищує інформативність діагностичного простору.

Пряме безперервне вейвлет-перетворення функції $w_n(t-T_1, t-T_2,\ldots, t-T_{n-1}, t)$ визначається розрахунком вейвлет-коефіцієнтів за формулою:

$$C(a,b) = \int_0^\infty w_n(t-T_1, t-T_2,\ldots, t-T_{n-1}, t)a^{-1/2}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)dt, \quad (4)$$

де $\psi(t)$ – функція перетворення; a та b – параметри масштабування та зсуву вейвлетів.

Наведені характеристики є універсальним підходом до побудови простору діагностичних ознак на основі первинної моделі.

Оцінка якості простору діагностичних ознак. Якість побудованого простору ознак (інформативність) визначається на основі максимуму критерію вірогідності вірного визнання TPR застосованого до підмножини X' цілого простору ознак X ($X' \subset X$).

Для навчальної вибірки, яка містить m класів станів ОК, послідовно розраховуються m-1 дискримінантних функцій $d_1(\mathbf{x})$, $d_2(\mathbf{x})$, …, $d_{m-1}(\mathbf{x})$. Функція $d_1(\mathbf{x})$ відокремлює об'єкти 1ro класу від об'єктів m-1 класів, що залишилися; $d_2(\mathbf{x})$ – відокремлює об'єкти 2ro класу від об'єктів m-2 класів, що залишилися; ..., $d_{m-1}(\mathbf{x})$ – відокремлює об'єкти класу m-1 від об'єктів класу m.

Максимальне значення критерію вірогідності вірного визнання описується таким виразом:

$$TRP_{\max} = \max_k\left\{\frac{1}{m-1}\sum_{i=1}^{m-1} TRP_{ik}\right\}, \quad (3)$$

де k – номер за порядком простору діагностичних ознак X' в повному переліку просторів.

Таким чином, під час процедури пошуку серед всіх можливих сполучень ознак для розглянутого діагностичного простору X визначається найбільш цінна комбінація двох, трьох та іншої кількості ознак.

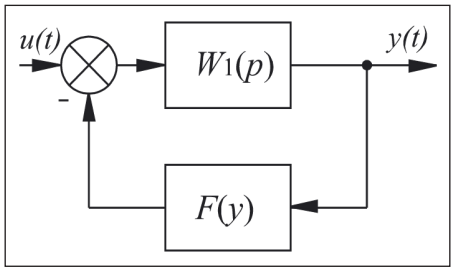


Рис. 1. Імітаційна модель нелінійного динамічного об'єкту

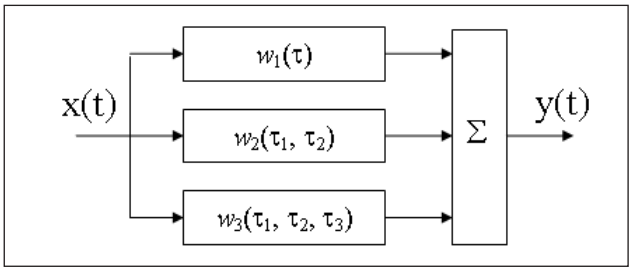


Рис. 2. Структурна схема БВФ 3-го порядку

3. Аналіз якості простору діагностичних ознак на основі інтегральних динамічних моделей

Імітаційна модель об'єкта контроля. У цьому розділі аналізується запропонований метод побудови простору діагностичних ознак на прикладі імітаційної моделі нелінійного динамічного об'єкта.

Імітаційна модель нелінійного динамічного об'єкта (рис. 1) являє собою структуру зі зворотним зв'язком. Блоки імітаційної моделі мають характеристики $W_1(t)=e^{-\alpha t}$ і $F(y)=\beta y^2(t)$. Структурна схема БВФ 3го порядку показана на рис. 2.

Аналітичні вирази БВФ для розглянутої імітаційної моделі нелінійного динамічного об'єкта наведені в [13]:

$$w_1(\tau_1) = e^{-\alpha\tau_1}, \quad (4)$$

$$w_2(t,t) = \frac{\beta}{a}(e^{-2at} - e^{-at}), \quad (5)$$

$$w_3(t,t,t) = 2\left(\frac{\beta}{a}\right)^2 \cdot (e^{-3at} - 2e^{-2at} \quad (6)$$

Формування навчальної та екзаменаційної вибірки. Для діагностики станів ОК використовуються БВФ 1го порядку $w_1(t)$ та діагональних перетини БВФ 2го $w_2(t,t)$ та 3го порядку $w_3(t,t,t)$.

Навчальна та екзаменаційна вибірки з параметрами ОК готуються для об'єктів чотирьох класів (100 об'єктів у кожному класі). Класи утворюються через значення параметрів α і β відповідно до певних правил:

• нормальний режим – клас A. Клас складається з об'єктів із параметрами $\alpha\in[0.95\alpha_n, 1.05\alpha_n]$, $\beta\in[0.95\beta_n, 1.05\beta_n]$, де α_n і β_n – номінальні значення;

• режим несправності – клас B. Клас складається з об'єктів із параметрами $\alpha\in(0.9\alpha_n, 0.95\alpha_n) \cup (1.05\alpha_n, 1.1\alpha_n)$, $\beta\in[0.95\beta_n, 1.05\beta_n]$;

• режим несправності – клас C. Клас складається з об'єктів із параметрами $\alpha\in[0.95\alpha_n, 1.05\alpha_n]$ і $\beta\in(0.9\beta_n, 0.95\beta_n) \cup (1.05\beta_n, 1.1\beta_n)$;

• аварійні режими – клас D. Клас складається з об'єктів із параметрами $\alpha\in(0.9\alpha_n, 0.95\alpha_n) \cup (1.05\alpha_n, 1.1\alpha_n)$, $\beta\in(0.9\beta_n, 0.95\beta_n) \cup (1.05\beta_n, 1.1\beta_n)$.

Оцінки БВФ 1го порядку $w_1(t)$ та діагональних перетинів БВФ БВФ 2го $w_2(t, t)$ та 3го порядку $w_3(t, t, t)$ для згаданих чотирьох класів отримані в процесі комп'ютерного моделювання.

Отримані моделі для всіх класів утворюють ділянки, які перетинаються. У цьому разі для визначення дискримінантних функцій використовується метод максимальної правдоподібності.

На основі тренувальних наборів даних для класів об'єктів A, B, C і D послідовно підраховуються три дискримінантних функції $d_1(\mathbf{x})$, $d_2(\mathbf{x})$ та $d_3(\mathbf{x})$. Функція $d_1(\mathbf{x})$ відокремлює 1й клас об'єктів від об'єктів 2го, 3го і 4го класів B ∪ C ∪ D; $d_2(\mathbf{x})$ – відокремлює об'єкти 2го класу від об'єктів 3го і 4го класів C ∪ D; $d_2(\mathbf{x})$ – відокремлює об'єкти 3го класу від об'єктів 4го класу D.

Далі проаналізовано інформативність різних діагностичних просторів (дискретні відліки БВФ, моменти та коефіцієнти вейвлет-перетворення БВФ).

Формування просторів діагностичних ознак.

Дискретні відліки БВФ. Тренувальна вибірка створюється на основі десяти дискретних значень БВФ 1го порядку (простір $\mathbf{V_1}$), діагональних перетинів БВФ 2го та 3го порядків (простори $\mathbf{V_2}$ та $\mathbf{V_3}$). Дискретні значення БВФ беруться з рівномірним кроком на інтервалі (0, T], де T – час моделювання.

Моменти БВФ. Тренувальна вибірка створюється на основі чотирьох моментів БВФ 1го порядку (простір $\mathbf{M_1}$) та діагональних перетинів БВФ 2го та 3го порядків (простори $\mathbf{M_2}$ та $\mathbf{M_3}$).

Вейвлет-перетворення БВФ. Тренувальний зразок створюється на основі перших десяти коефіцієнтів вейвлет-перетворення ядер Вольтерра 1го порядку (функціональний простір $\mathbf{W_1}$) та діагональних ділянок БВФ 2го та 3го порядків (функціональні простори $\mathbf{W_2}$, $\mathbf{W_3}$ відповідно).

Діагностичні простори формуються повним перебором всіх комбінацій ознак. Найкращі результати оцінки якості *TPR* розглянутих просторів ознак наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Оцінки *TPR* для просторів $\mathbf{V_1}$, $\mathbf{M_1}$, $\mathbf{W_1}$, $\mathbf{V_2}$, $\mathbf{M_2}$, $\mathbf{W_2}$, $\mathbf{V_3}$, $\mathbf{M_3}$, $\mathbf{W_3}$.

Простір ознак	Інформативні ознаки	TPR
V1	x_1, x_2, x_3, x_7	0.84
$\mathbf{M_1}$	x_1, x_2, x_3, x_4	0.83
$\mathbf{W_1}$	x_1, x_2, x_3, x_4	0.86
$\mathbf{V_2}$	x_1, x_2, x_3, x_4	0.95
$\mathbf{M_2}$	x_1, x_2, x_3, x_4	0.95
$\mathbf{W_2}$	x_1, x_2, x_3, x_4	0.96
$\mathbf{V_3}$	x_1, x_2, x_3, x_4	0.95
$\mathbf{M_3}$	x_1, x_2, x_3, x_4	0.94
$\mathbf{W_3}$	x_1, x_2, x_3, x_4	0.96

4. Стійкість діагностичних ознак до спотворення оцінок багатовимірних вагових функцій

Розглянуто задачу аналізу надійності інформативних просторів ознак $\mathbf{V}_i$, $\mathbf{M}_i$, $\mathbf{W}_i$, $i=\overline{1,3}$ в умовах дії шумів при оцінці БВФ. Для цього завдання створено навчальні вибірки на основі БВФ 1го порядку та діагональних перетинів БВФ 2го та 3го порядку з додаванням шуму 1%, 3%, 5%, 10% від екстремумів БВФ. Результати аналізу надійності розглянутих просторів ознак наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Оцінки *TPR* для просторів V_1, M_1, W_1, V_2, M_2, W_2, V_3, M_3, W_3 при дії шуму

Простір ознак	Інформативні ознаки	*TPR* при рівені шуму, %				
		0	1	3	5	*10*
$\mathbf{V}_1$	x_1, x_2, x_3, x_7	0.84	0.83	0.77	0.75	0.71
$\mathbf{M}_1$	x_1, x_2, x_3, x_4	0.83	0.80	0.80	0.80	0.76
$\mathbf{W}_1$	x_1, x_2, x_3, x_4	0.86	0.84	0.83	0.82	0.81
$\mathbf{V}_2$	x_1, x_2, x_3, x_4	0.95	0.93	0.91	0.87	0.80
$\mathbf{M}_2$	x_1, x_2, x_3, x_4	0.95	0.93	0.93	0.91	0.90
$\mathbf{W}_2$	x_1, x_2, x_3, x_4	0.96	0.94	0.93	0.93	0.92
$\mathbf{V}_3$	x_1, x_2, x_3, x_4	0.95	0.92	0.90	0.85	0.79
$\mathbf{M}_3$	x_1, x_2, x_3, x_4	0.94	0.93	0.92	0.91	0.89
$\mathbf{W}_3$	x_1, x_2, x_3, x_4	0.96	0.94	0.93	0.92	0.92

Результати порівняльного аналізу надійності просторів ознак для БВФ 2го порядку показані на рис. 3.

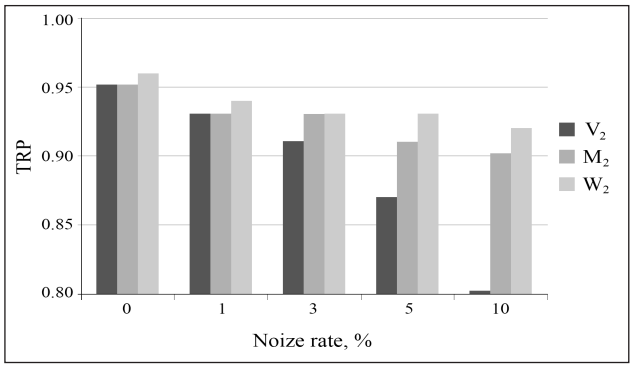


Рис. 3. Оцінка якості просторів ознак V_2, M_2, W_2 при дії шуму

Графік чітко демонструє зміну надійності діагнозу залежності від рівня шуму для розглянутих діагностичних просторів. Найбільш стійкі до шумів простори діагностичних ознак отримані на основі діагональних перетинів БВФ 2го і 3го порядків – $\mathbf{M}_2$, $\mathbf{W}_2$. При цьому ознаки простору $\mathbf{W}_2$, на відміну від $\mathbf{M}_2$, забезпечує надійність як при малих, так і великих шумах.

Висновки. У роботі запропоновано універсальний підхід до побудови просторів діагностичних ознак нелінійних динамічних об'єктів. Метод розроблено на основі отримання інформації про об'єкт управління з використанням непараметричної ідентифікації моделі у вигляді багатомірних вагових функцій. На основі отриманої моделі побудовано ефективні простори діагностичних ознак як набір моментів та коефіцієнтів вейвлет-перетворення багатомірних вагових функцій.

Доведено ефективність запропонованого методу побудови простору діагностичних ознак на основі інтегральних динамічних моделей на прикладі імітаційної моделі нелінійного динамічного об'єкта.

Запропонований метод побудови діагностичних просторів забезпечує ефективне стиснення при невеликих втратах інформації. Найбільш інформативними та завадостійкими просторами для тестового об'єкта контролю є моменти та коефіцієнти вейвлет-перетворення багатомірних вагових функцій 2го порядку.

Список літератури:

1. Korbicz J. & Kościelny J.M., (eds). Modeling, Diagnostics and Process Control: Implementation in the DiaSter System. Springer: Berlin, 2010.

2. Mrugalski M., Korbicz J. Robust fault diagnosis via parameter identification of dynamical systems. European Control Conference, ECC 2009. 2014.

3. Simani S., Fantuzzi C., Dynamic system identification and model-based fault diagnosis of an industrial gas turbine prototype. Mechatronics. Volume 16, Issue 6, July 2006, P. 341–363.

4. Pazera, M., Korbicz, J, A process fault estimation strategy for non-linear dynamic systems. Journal of Physics: Conf. Series 783. 2017.

5. Tang, H., Liao, Y. H., Cao, J. Y., Xie, H. Fault Diagnosis Approach Based on Volterra Models. Mechanical Systems and Signal Processing. 2010. Vol. 24, pp. 1099–1113.

6. Fomin A., Pavlenko V. Construction of diagnostic features space using Volterra kernels moments. Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), 2015 20th International Conference: 24–27 Aug. 2015 Miedzyzdroje, Poland. P. 1022–1027.

7. Chen W., Khan A., Abid M., Ding S. Integrated design of observer based fault detection for a class of uncertain nonlinear systems. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science. 2011. 21(3). P. 423–430.

8. Pavlenko V., Fomin O., Ilyin V. Technology for Data Acquisition in Diagnosis Processes By Means of the Identification Using Models Volterra. Proc. of the 5th IEEE Int. Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2009), Rende (Cosenza), Italy, 2009. P. 327–332.

9. Hao Tang, Liao Y.H., Cao J.Y., Hang Xie. Fault diagnosis approach based on Volterra models. Mechanical Systems and Signal Processing. May 2010. Volume 24, Issue 4. P. 1099–1113.

10. Mazzaferri, J., Ledesma, S., Iemmi, C. Multiple feature extraction by using simultaneous wavelet transforms. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. 2003. Volume 5, Number 4. P. 1464–4258.

11. Favier G., Kibangou A.Y., Bouilloc T. Nonlinear system modeling and identification using Volterra-PARAFAC models. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, Wiley, 2012, 26 (1). P. 30–53.

12. Iwaniec J. AASRI Procedia. Sensitivity analysis of an identification method dedicated to nonlinear systems working under operational loads. Journal of theoretical and applied mechanics. 2011. Volume 4. P. 419–438.

13. Fomin O., Medvedev A., Pavlenko V. Technology of Intelligent Diagnostics Based onVolterra Kernels Moments. Proceedings of the 2015 IEEE 8th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS). Warsaw. 2015. Volume 2. P. 796–801.

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ПРОСТРАНСТВА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Предложен усовершенствованный метод модельной диагностики. Метод основан на непараметрической идентификации динамических систем в виде многомерных весовых функций и построении на их основе пространства диагностических признаков. Пространство диагностических признак строится с использованием моментов разных порядков и вейвлет-преобразований полученной интегральной модели. Проанализирована эффективность предложенных пространств диагностических признаков на основе интегральной модели с помощью имитационной модели нелинейного динамического объекта.

Ключевые слова: *интегральные модели, многомерные весовые функции, техническая диагностика, редукция пространства признаков, вейвлет-преобразования.*

METHOD FOR DIAGNOSTIC FEATURES SPACE CONSTRUCTION USING INTEGRAL DYNAMIC MODELS

It is proposed an improved method of model diagnostics. The method is based on the nonparametric identification of dynamic systems in the form of multidimensional weight functions and the construction a diagnostic features space on their basis. The diagnostic features space is constructed using the moments of different orders and wavelet transformations of the obtained integral model. The effectiveness of the proposed diagnostic features spaces based on an integral model is analyzed using the simulation model of a nonlinear dynamic object.

Key words: *integral models, multidimensional weight functions, technical diagnostics, reduction of feature space, wavelet transform.*

УДК 681.51:666.11

Цапар В.С.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Жученко О.А.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС ПІДТРИМКИ РІШЕНЬ ОПЕРАТОРА СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ В УМОВАХ ДІЇ ВИПАДКОВИХ ЗБУРЕНЬ

Розроблена структура схема та програмне забезпечення автоматичної системи підтримки рішень оператора скловарної печі в умовах дії випадкових збурень. Сформована експертна база даних правил нечіткої системи у складних виробничих ситуаціях. Передбачена можливість навчання нечіткої системи. Наведена модель нечіткої системи в Simulink. Наведені приклади роботи діалогового вікна розробленої експертної системи.

Ключові слова: *скловарна піч, система автоматизації, нечітка система, база даних, експертна система.*

Постановка проблеми. З точки зору керування, скловарна піч є дуже складним технологічним об'єктом. Ця складність зумовлена наведеними нижче обставинами.

У процесі роботи скловарна піч піддається дії численних збурень, які змінюються як повільно (число Редокса, склад шихти, кількість та якісний склад доданого склобою тощо), так і швидко (локальні зміни температури та тиску, зміни аеродинамічних потоків у результаті переключення пальників тощо).

Визначальним режимом роботи скловарної печі є тепловий режим, але його стабілізація не означає забезпечення потрібних техніко-економічних показників виробництва та якості готової продукції. Це пояснюється як діючими збуреннями, так і необхідністю технологічного переоснащення виробництва в умовах переходу на інший вид продукції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сучасному етапі є різні підходи до розробки системи керування скловарною піччю з використанням інформаційних технологій. Одним із найпростіших є створення систем керування на базі SCADA-систем. Використання останніх дає змогу забезпечити роботу оператора максимальною інформацією про хід процесу. Зокрема, у роботі [1, с. 663] мова йде про систему збору та обробки інформації щодо температурного режиму скловарної печі, з формуванням відповідного керуючого впливу, проте ця система не має зворотного зв'язку з якості отримуваної продукції, відповідно, може використовуватись як допоміжна під час керування процесом скловаріння. Робота [2, с. 462] описує підхід до створення системи керування скловарною піччю на базі нечітких регуляторів, цей підхід значно спрощує саму процедуру синтезу системи керування, проте необхідні вичерпні дані від авторитетних експертів, котрі б забезпечували повну інформацію з урахуванням даних щодо якості готової продукції.

Постановка завдання. Названі вище обставини зумовлюють потребу розробки програмного комплексу підтримки рішень оператора скловарної печі в умовах дії випадкових збурень.

Виклад основного матеріалу дослідження. При керуванні складними об'єктами, зокрема скловарною піччю, доволі часто виникають ситуації, коли ідеальне дотримання заданого теплового режиму не завжди дає змогу отримувати якісну продукцію. Для того, щоб уникнути таких ситуацій, необхідно забезпечити змогу керувати тепловим режимом скловарної печі з урахуванням показників якості. Основними показниками якості, які регламентовані державним стандартом, є кількість бульбашок та свиль у готовій продукції. Утворення бульбашок та свиль у готовій про-

дукції часто є результатом процесів, котрі здатен проаналізувати тільки досвідчений технолог.

Як свідчить багаторічний досвід експлуатації скловарних печей, у реальних умовах виробництва при стаціонарних режимах роботи, коли заданий технологічний режим дотримується повністю, у результаті можна отримати брак. Це означає, що для реагування на таку ситуацію вплив системи керування на процес скловаріння має додатково оцінюватись технологом [3, с. 83].

Розв'язання цієї задачі покладається на систему підтримки прийняття рішень у процесі керування температурним режимом скловарної печі, схема якої наведена на рисунку 1.

Згідно з наведеною схемою, адаптація бази правил нечіткої системи керування може відбуватися двома способами: вручну та автоматично.

В автоматичному режимі на основі відомих результатів керування скловарною піччю, за використання критеріїв оцінювання ефективності керування, відбувається коригування бази правил відповідно до технологічної ситуації, що склалася. Критерії оцінювання ефективності керування можуть формуватися як статистичні гіпотези з подальшою їх перевіркою відомими статистичними методами [4, с. 154].

У ручному режимі пропонується використовувати систему, структурна схема якої представлена на рис. 2.

У цю систему входять такі блоки:

1. Інтерфейс користувача, через який реалізується діалоговий режим між користувачем та базою знань (користувач відповідає на пропозиції експертної системи щодо змін у технологічному процесі). Приклади роботи інтерфейсу користувача наведені на рис. 3.

2. Модуль збору вхідної інформації – цей модуль збирає дані з температурних датчиків, що знаходяться всередині печі, а також дані, які стосуються якості склотари (кількість бульбашок та свиль), що вносяться в систему керування в лабораторії.

Таблиця 1

База знань експертної системи

$N_б$, шт	$N_с$, шт	T_1, °C	$T_{кв}$, °C	$T_д$, °C	Рекомендація
≤8	2…3	1400	1500	850	підвищення витрати палива на перший пальник на 8%
9…14	≤1	1500	1400	800	підвищення витрати палива на другий пальник на 5%
9…14	2…3	1400	1400	800	підвищення витрати палива на 1 і 3 пальники на 4 і 5% відповідно
>14	2…3	1400	1200…1400	600…800	підвищення витрати палива на 1 пальник на 10%
9…14	>3	1200…1400	1200…1400	600…800	підвищення витрати палива на другий пальник на 15%
>14	>3	1200…1400	1200…1400	600…800	зменшення тиску у печі на 5%

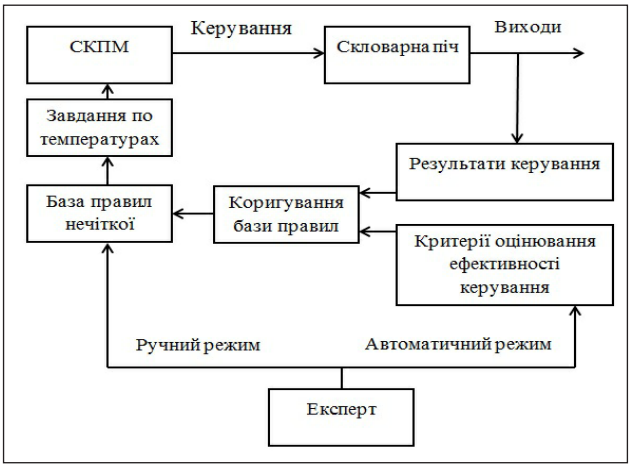


Рис. 1. Структурна схема системи керування

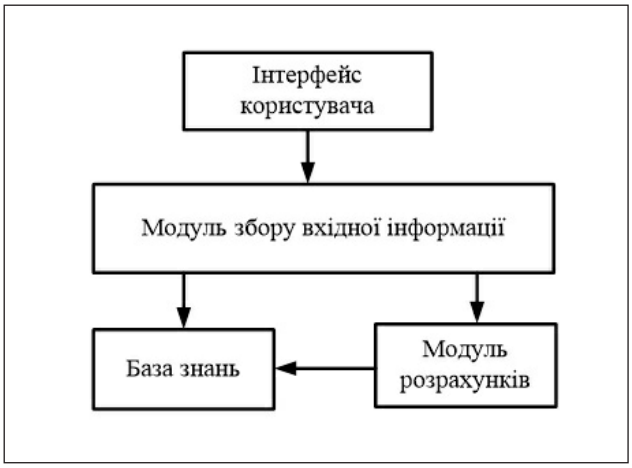


Рис. 2. Структурна схема системи у ручному режимі

3. Модуль розрахунків – програмний модуль, що виконує необхідні розрахунки, які потрібні для визначення зміни контрольованого параметру (наприклад витрати палива) для досягнення потрібного приросту температур.

4. База знань – сукупність знань про показники технологічного процесу та рекомендації при тому чи іншому тепловому режимі, що записана у формі, зрозумілій користувачу та експерту. Складається на основі довідкової літератури цієї предметної області та знань (досвіду) експерта. Частина бази знань наведена у таблиці 1.

Джерелами інформації для оновлення бази знань є система збору інформації від установлених датчиків чи результатів іспитів устаткування, а також від ручного вводу результатів про якість кінцевої продукції. Цю інформацію можна отримати від сучасних систем збору інформації SCADA-systems (Supervisory Control and Data Acquisition System). Переваги такої системи полягають у тому, що вона дає змогу об'єднати усі необхідні функції АСУТП скловарною піччю в одне ціле, має уніфікований доступ до бази знань та змогу отримувати необхідну інформація про об'єкт із будь-якого робочого місця завдяки застосуванню WEB-технологій.

Із метою забезпечення заданого теплового режиму скловарної печі застосовується система керування з прогнозуючою моделлю (СКПМ). Управління з прогнозуючими моделями особливо доцільне при управлінні системами з багатьма входами та виходами (MIMO-системи), що містять тісні взаємозв'язки та в яких потрібно враховувати численні обмеження. Так, при управлінні

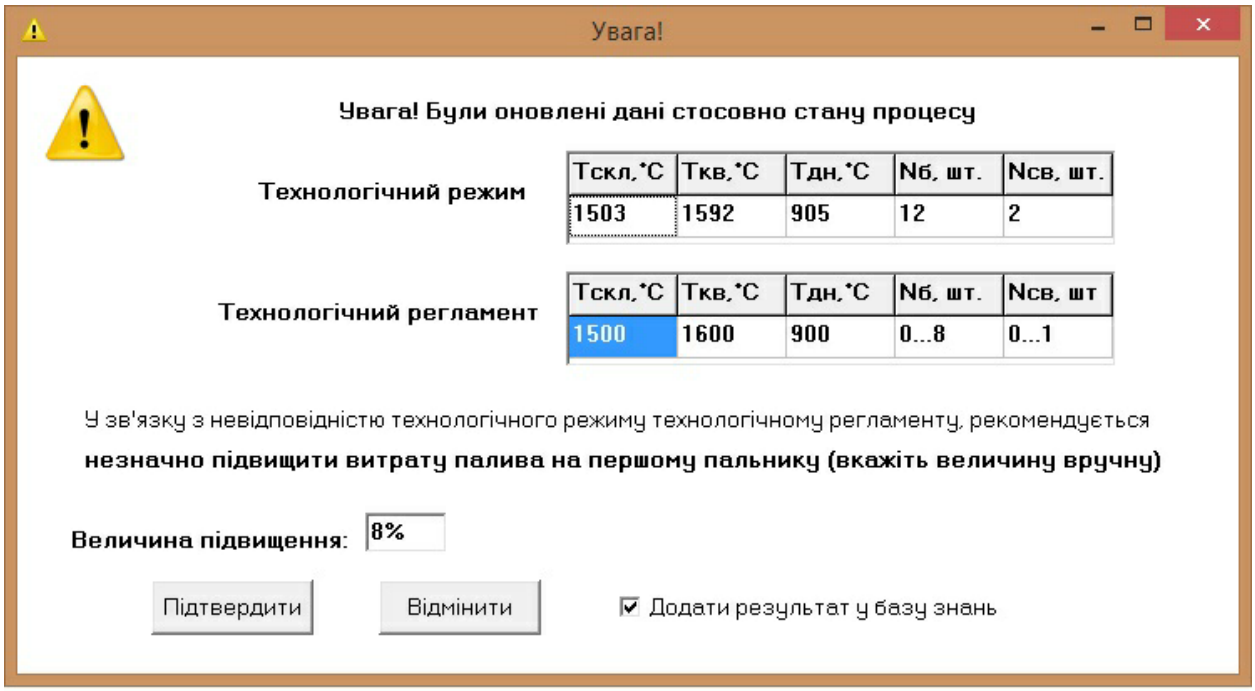


Рис. 3. Приклад роботи інтерфейсу користувача

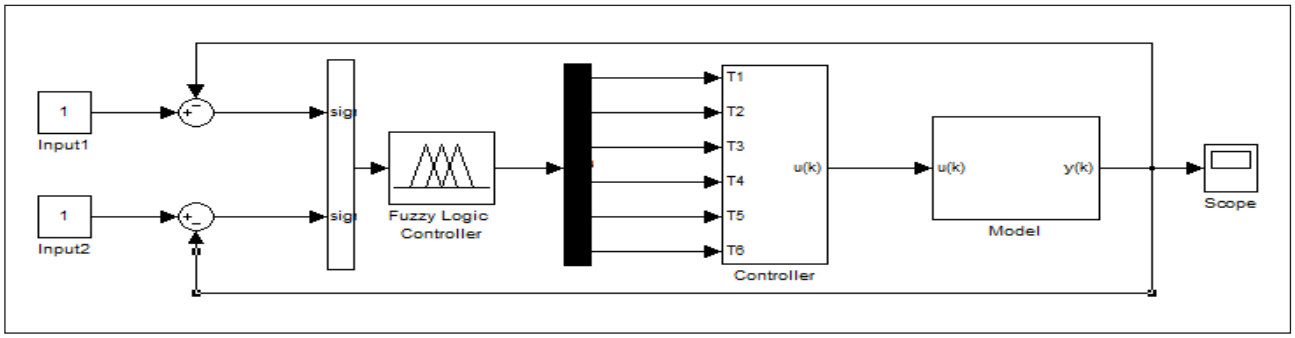


Рис. 4. Схема системи що складається із СКПМ та нечіткої системи в Simulink

скловарною піччю зміни витрати палива та потужності додаткового електричного нагріву впливають як на температуру в гарячих точках, так і на температуру під насипом шихти. На кожному k-му такті регулятор із прогнозуючою моделлю робить пошук таких майбутніх змін витрати палива та потужності додаткового електричного нагріву, які б призвели до потрібних змін температур. У процесі пошуку регулятор також враховує обмеження.

Оскільки на оперативному рівні системи керування скловарною піччю знаходиться система керування з прогнозуючою моделлю, завданням для якої є вектор температур у певних точках скловарної печі, то цілком логічно постає задача для нечіткої системи керування – нечітка система, отримуючи на вході дані по кількості бульбашок та свиль, на виході має формувати вектор температур, котрий, враховуючи технологічний регламент, стане завданням для СКПМ.

Для реалізації цього підходу у програмному пакеті MATLAB за допомогою Fuzzy Logic Toolbox було створено систему нечіткого висновку.

У середовищі Simulink була змодельована система, що реалізує систему керування, котра включає в себе СКПМ та нечітку систему. Систему зображено на рисунку 4.

Нечітке керування засноване не стільки на використанні аналітичних або теоретичних моделей, скільки на практичному застосуванні знань кваліфікованих фахівців, представлених у формі лінгвістичних баз правил. Нечітке керування ефективне у разі недетермінованості параметрів об'єктів, коли існує певний досвід експертів з управління та налаштування автоматизованої системи регулювання (АСР). Теорія нечіткої логіки дає змогу використовувати знання фахівців-наладчиків із метою поліпшення процесів управління та надання рекомендацій (супервізорний режим) із налаштування типових регуляторів.

Висновки. Побудована нечітка система керування якісними характеристиками готової продукції, результатом роботи якої є формування вектора завдань для СКПМ.

Розроблені структура та програмне забезпечення експертної системи, задачами якої є формування керуючих дій та адаптація бази правил нечіткої системи у складних виробничих ситуаціях. Наведені приклади роботи діалогового вікна розробленої експертної системи.

Список літератури:

1. Халабузарь Т.А., Куценко В.П. Автоматизированная система управления температурой в стекловаренной печи. Системный анализ и управление организационными и техническими объектами. 2013. С. 663–668.

2. Han X., Chen J. The research of glass furnace commutation control system which is based on fuzzy neural network. Applied mechanics and materials. 2014. № 462. P. 510–513.

3. Цапар В.С., Арсеничев А.Л. Разработка иерархической системы управления стекловаренной печью. Автоматизація технологічних та бізнес-процесів. 2015. № 7. Ч. 1. С. 83–86.

4. Шорохова И.С., Кисляк Н.В., Мариев О.С. Статистические методы анализа. Екатеринбург, 2015. 300 с.

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ПОДДЕРЖКИ РЕШЕНИЙ ОПЕРАТОРА СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Разработаны структура схемы и программное обеспечение автоматической системы поддержки решений оператора стекловаренной печи в условиях действия случайных возмущений. Сформирована экспертная база данных правил нечеткой системы в сложных производственных ситуациях. Предусмотрена возможность обучения нечеткой системы. Приведены модель нечеткой системы в Simulink и примеры работы диалогового окна разработанной экспертной системы.

Ключевые слова: *стекловарная печь, система автоматизации, нечеткая система, база данных, экспертная система.*

SOFTWARE SUPPORT SOLUTIONS OF THE WINDSCREEN OPERATOR IN THE CONDITIONS OF ACTION OF ACCIDENTAL DAMAGES

The structure structure and software of the automatic system of support of solutions of the glass furnace operator in the conditions of the action of random perturbations are developed. The expert database of rules of the fuzzy system in complex production situations is formed. The possibility of studying the fuzzy system is foreseen. The model of fuzzy system in Simulink is presented. The examples of the work of the dialog of the developed expert system are given.

Key words: *glass furnace automation system, fuzzy system, database, expert system.*

УДК 004.9:681.5

Чекурін В.Ф.
Інститут прикладних проблем механіки і математики імені Я.С. Підстригача
Національної академії наук України

Химко О.М.
Національний університет «Львівська політехніка»

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ВИЯВЛЕННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЇ ВИТОКІВ У МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДАХ

Розроблено структуру та алгоритм функціонування системи виявлення витоків із магістральних газопроводів. Робота системи базується на раніше запропонованих авторами математичних моделях та методах. Вхідними даними для неї є результати моніторингу газодинамічних параметрів потоків у трубопроводі за стаціонарних режимів експлуатації. Запропонована система розглядається як складова чистина комп'ютеризованої системи управління газотранспортними системами, збудованої на засадах MES. Результати роботи можна використати під час створення таких систем.

Ключові слова: *програмно-технічні рішення, автоматизація управління виробництвом, виявлення та ідентифікація витоків, алгоритмічні методи, обчислювальний моніторинг.*

Постановка проблеми. Неконтрольована розгерметизація трубопроводу створює аварійно-небезпечні ситуації, екологічні загрози і може призводити до значних економічних втрат. Порушення суцільності трубопроводів і зумовлені ними витоки можуть спричиняти: наскрізні дефекти тіла труби, які виникають внаслідок корозійних процесів, розриви нитки трубопроводу, зумовлені тектонічними процесами чи господарською діяльністю, несанкціоноване приєднання відводів до трубопроводів тощо. Щоб знизити рівень загроз, пов'язаних із витоками флюїдів із трубопроводів, використовують системи виявлення витоків (СВВ). Їхнє застосування в деяких країнах регламентують спеціальні нормативні документи. У США це рекомендації Американського інститут нафти API 1130 [4]. У ФРН застосовують норми "Technische Regeln für Fernleitungen" (TRFL) [5].

Проблема виявлення витоків із магістральних газопроводів актуальна і для української газотранспортної системи (ГТС) [3; 4]. Тому розроблення комп'ютеризованих систем для виявлення та ідентифікації витоків із магістральних газопроводів має важливе наукове і практичне значення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існує кілька підходів вирішення цієї проблеми. Останнім часом інтенсивно розвиваються методи, які базуються на аналізі змін фізичних параметрів флюїду всередині трубопроводу. Серед них варто виокремити методи обчислювального моніторингу, які базуються на неперервному вимірюванні параметрів потоку флюїду в трубі з метою виявлення інформативних ознак, які свідчать про наявність витоку [5]. Основним складником СВВ, які базуються на таких методах, є програмне забезпечення, що реалізує алгоритм відбору даних та виявлення в них інформативних ознак на фоні шумів, які супроводжують нормальне функціонування транспортної магістралі, та сигналів, спричинених чинниками, які не пов'язані із розгерметизацією. Тобто СВВ такого типу являють собою так звані Software Intensive System. До цього класу належать, зокрема, СВВ, які базуються на методах моделювання перехідних процесів у реальному часі RTTM (англ. Real Time Transient Modeling) [6].

Відомі світові компанії, такі як Argosy Technologies, Krone, PSI, Siemens, пропонують готові програмно-технічні рішення для виявлення й ідентифікації виток флюїдів із трубопроводів, які використовують методи обчислювального моніторингу. Проте їхня вартість занадто висока. До того ж, ці рішення не враховують реалій української газотранспортної системи, а їхня адаптація до наших умов, як і подальший супровід, вимагає значних додаткових затрат. Оскільки компанії виробники, як правило, не розкривають деталей реалізації цих систем, існує суспільний запит на

розроблення теоретичних засад, математичного апарату, принципів функціонування, структури й алгоритмів роботи систем виявлення витоків із магістральних газопроводів. Все це дасть змогу створювати такі системи ab initio (лат. «від початку») власними силами, враховуючи в технічному завданні специфічні властивості української ГТС, її актуальний стан та перспективи розвитку.

У статті [7] запропоновані математична модель, методи та алгоритми, сформульовані та чисельно досліджені відповідні обернені задачі для виявлення та ідентифікації витоків із магістральних трубопроводів за даними моніторингу, отриманими за стаціонарних режимів їхньої експлуатації.

Постановка завдання. Метою роботи є розроблення на цій основі архітектури і алгоритмів функціонування СВВ як складника комп'ютеризованої системи управління (КСУ) газотранспортними системами, створеної на засадах MES (Manufacturing Execution Systems).

Виклад основного матеріалу дослідження.

Теоретичні засади функціонування СВВ. Згідно з методом, розробленим у статті [7], виявлення та ідентифікація витоків базується на даних моніторингу тиску P та температури T газу в трубі, а також температури T_{amb} середовища, в якому вона прокладена, на вході та виході газопроводу та ще у кількох точках вздовж його траси (рис. 1).

Дані моніторингу цих параметрів, отримані за стаціонарних режимів функціонування газопроводу, використовуються як вхідні для обернених задачі виявлення витоку, визначення місця розгерметизації та оцінки його інтенсивності (рис. 2).

Математичні методи, які використовуються у цьому підході, базуються на нелінійній моделі динаміки газу у трубі, яка містить рівняння неперервності, балансу імпульсу та нелінійне рівняння стану для газових сумішей. Для випадку стаціонарного потоку ця модель зведена до нелінійного диференціального рівняння першого порядку [8]. Для виявлення витоку, визначення місця розгерметизації трубопроводу та оцінки інтенсивності витоку запропоновані варіаційні формулювання відповідних обернених задач. Для розв'язування цих задач розроблені ітераційні алгоритми, які базуються на методі Ньютона [9, с. 262] та чисельному розв'язуванні двох крайових задач для нелінійного диференціального рівняння. Крайові умови для цих задач формулюються із використанням даних моніторингу. Для розв'язування цих задач використовуються алгоритми, які базуються на методах Рунге-Кутти [9, с. 439].

Аналіз предметної області. Як бачимо, функціонування системи базується на даних моніторингу газодинамічних процесів у трубі. Ці дані можуть використовувати також і різні підсистеми, які входять до складу комп'ютеризованої системи управління (КСУ) ГТС, наприклад, підсистеми моделювання режимів роботи ГТС, оптимізації її конфігурації чи режимів експлуатації компресорних станцій тощо. Тож, СВВ доцільно створювати як складову частину КСУ ГТС. Тому важливо визначити місце СВВ у структурі КСУ ГТС і її взаємодію з іншими підсистемами КСУ.

Архітектура і функціональність КСУ ГТС, досліджувалися, зокрема, у публікаціях [10–13]. У статтях [12; 13] запропоновано створювати такі системи на засадах MES за методологією, представленою стандартом ANSI/ISA-95 (ISO/IEC-62264). Аналіз функціональності КСУ ГТС проведений у

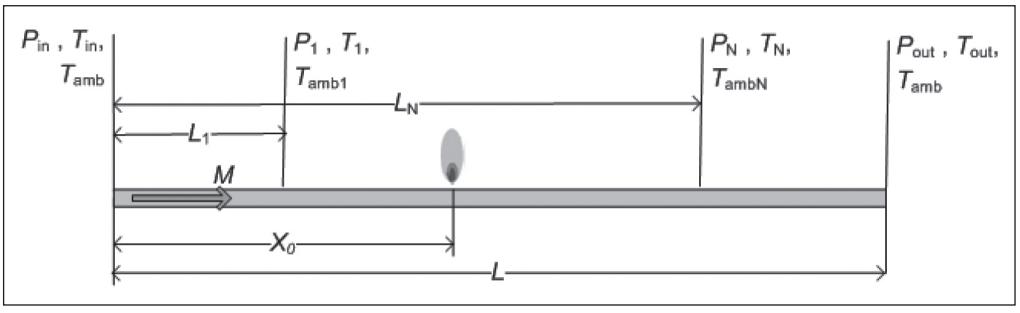


Рис. 1. Схема газопроводу з витоком

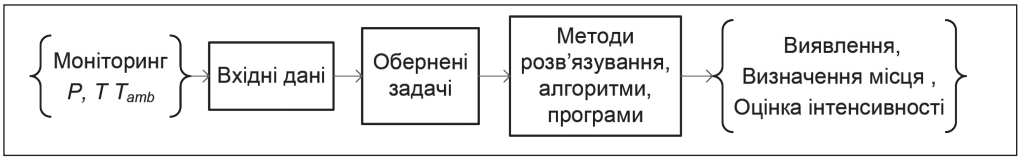


Рис. 2. Загальна схема реалізації методу

статті [10], визначає чотири основні функції управління, які спрямовані на бізнес процеси, інформаційні процеси, забезпечення транспортування газу та експлуатацію споруд ГТС (рис. 3).

На схемі рис. 3 показано місце у структурі функцій управління ГТС для функцій виявлення та ідентифікації витоків. Як випливає з цього рисунку, СВВ входить до складу системи управління транспортуванням газу (СУТГ), яка є невід'ємною частиною КСУ ГТС. Функції СУТГ в організаційній структурі ГТС виконує диспетчерське управління. Згідно з відомою моделлю PERA функціональної ієрархії виробничих підприємств [14] ці функції належать до третього рівня (оперативного) управління. На рис. 4 ця модель показана у застосуванні до управлінні ГТС, в частині її діяльності в забезпеченні транспортування газу.

Концепція MES-систем була створена для автоматизації управління на оперативному рівні.

Нульовий рівень моделі PERA визначає технологічні процеси, які реалізуються використанням технологічного обладнання ГТС.

Перший рівень моделі відповідає за безпосереднє керування фізичними процесами та первинний контроль їхніх параметрів. Тут діють сенсори й актуатори. Інформаційні процеси тут протікають у реальному часі фізичних процесів – їхні параметри змінюються на часових періодах порядку секунд і менших.

Другий рівень відповідає за контроль і моніторинг параметрів фізичних процесів нульового рівня, роботу технологічного обладнання, стану довкілля тощо. Для цього він використовує сигнали, які надходять із першого сенсорного рівня. Процеси другого рівня характеризуються проміжками порядку годин, хвилин, секунд і меншими.

Третій рівень є проміжним між нижніми рівнями та рівнем бізнес-планування та логістики. Тривалості процесів на цьому рівні визначаються днями, робочими змінами, годинами, хвилинами і секундами.

Четвертий рівень функціональної ієрархії (рівень бізнес-логістики та планування) охоплює управління комерційними процесами, які визначають виробничу діяльність усього підприємства.

Загальна структура програмно-апаратного комплексу КСУ ГТС розглянута у статті [13].

Структура СВВ та алгоритм її функціонування. СВВ, як зазначалося, діє на третьому

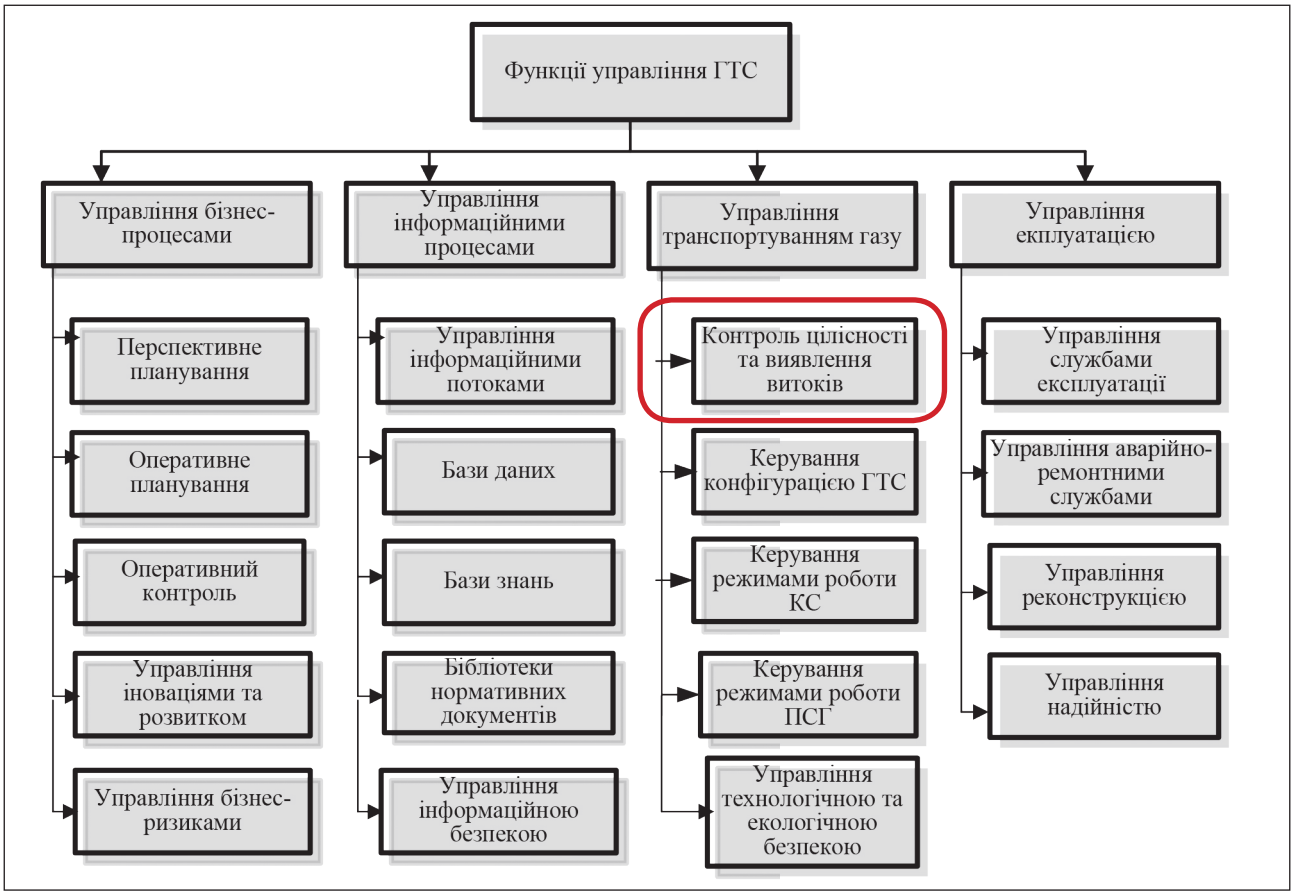


Рис. 3. Функції КСУ ГТС

рівні моделі PERA як складова частина системи управління транспортуванням газу. Результати моніторингу інформативних параметрів для СВВ формуються на першому та другому рівнях. СВВ отримує їх із другого рівня (наприклад від SCADA системи), використовуючи комунікаційні мережі другого та третього рівнів. На цій основі система формує вхідні дані для обернених задач. За необхідності отримує необхідну інформацію з баз даних інформаційної системи, використовуючи мережу третього рівня, отже, створює цифрову модель цих задач і здійснює відповідні обчислення. Результати обчислень система передає мережею третього рівня до баз даних інформаційної системи. Тут доступ до цієї інформації можуть отримати суб'єкти третього та четвертого рівнів. Таким чином, СВВ використовує інформаційні ресурси та комунікаційні канали КСУ ГТС.

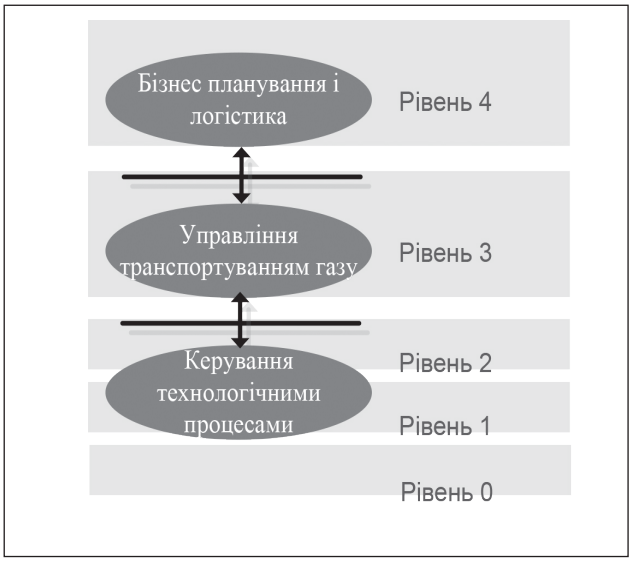


Рис. 4. Модель PERA ієрархії управління ГТС

Основними елементами СВВ (рис. 5) є системи відбору даних, виявлення витоків, визначення місця витоку та система ідентифікації параметрів моделі. До складу СВВ входять також система аудиту з журналом та система інформування. СВВ взаємодіє із SCADA системою ГТС, базами даних структурних елементів ГТС і параметрів математичної моделі. Система ідентифікації параметрів моделі використовує дані моніторингу для уточнення значень параметрів математичної моделі, які можуть змінюватися в процесі експлуатації ГТС.

На основі отриманих даних (рис. 6) СВВ здійснює чисельну реалізацію цих задач і приймає рішення щодо наявності чи відсутності витоку на контрольованій ділянці. Інформації про прийняте рішення передається у систему аудиту і фіксується у відповідному журналі, захищеному від модифікації, та в систему інформування. Інформація про виявлену подію разом із необхідними даними передається в систему визначення місця витоку. У разі виявлення розгерметизації ця система формулює задачу визначення місця витоку для ділянки, в якій виявлено розгерметизацію, розв'язує. Результат розв'язування цієї задачі, який містить координату місця витоку, його інтенсивність та точності, з якими ці дані були встановлені, передається в бази даних інформаційної системи та в систему інформування.

Зібрані у кожному циклі дані і результати розрахунків, проведених підсистемами виявлення, визначення місця витоку, передаються у підсистему ідентифікації параметрів. На цій основі вона формулює обернені задачі визначення параметрів моделі, які можуть змінюватися в процесі експлуатації ГТС. Це термодинамічні властивості транспортованого газу, гідравлічні опори труб та місцеві опори, коефіцієнти теплообміну газу з довкіллям тощо. Результати розв'язування цих задач передаються в базу даних параметрів математичної моделі і використовуються у подальших циклах роботи СВВ.

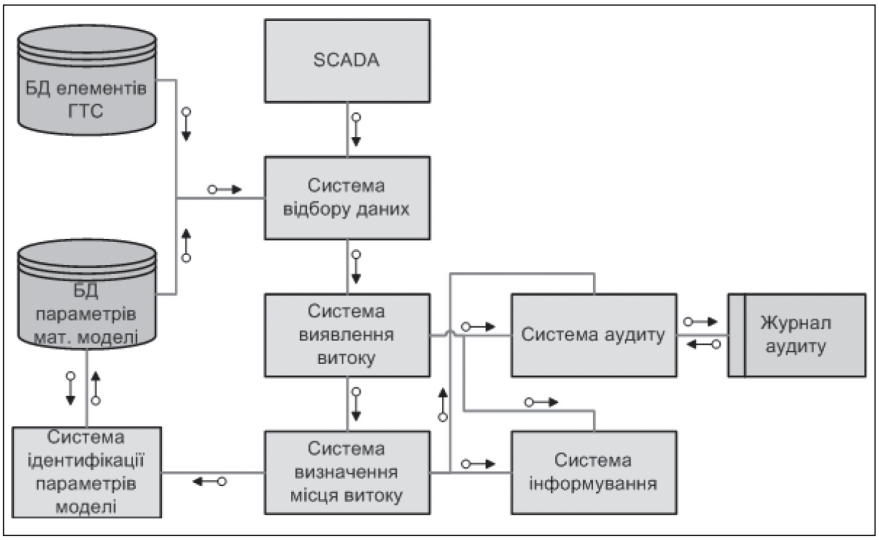


Рис. 5. Структура СВВ

Висновки. Запропонована структурна модель та алгоритм роботи СВВ, яка реалізує запропоновані раніше підходи та математичний апарат для розв'язування задач виявлення

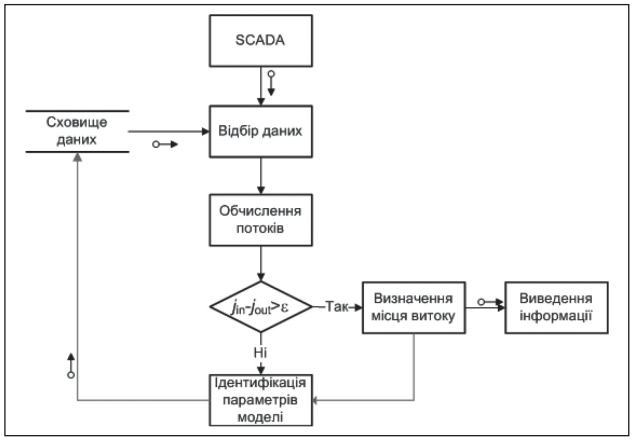


Рис. 6. Спрощений алгоритм роботи СВВ

витоків із магістральних газопроводів у стаціонарних режимах експлуатації.

СВВ варто розробляти як підсистему системи управління транспортуванням газу – невід'ємної частини КСУ ГТС. СУТГ діє на третьому рівні управління (згідно з моделлю функціонально ієрархії PERA), її доцільно створювати як MES систему, використовуючи міжнародні стандарти. Це дасть змогу зберегти наявні системи автоматизації другого та четвертого рівнів управління.

Впровадження в ГТС України СВВ такого типу дасть змогу значно підвищити рівень екологічної безпеки, знизити ризики виникнення аварійних ситуацій, викликаних неконтрольованою розгерметизацією магістральних газопроводів, та можливі економічні втрати. До того ж, використання СВВ у трубопровідному транспорті відповідає сучасним міжнародним вимогам екологічної безпеки.

У подальших дослідженнях варто розглянути методи виявлення витоків у нестаціонарних режимах роботи газопроводів.

Список літератури:

1. API 1130 Computational Pipeline Monitoring for Liquid Pipelines. URL: https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/002/api.1130.2002.pdf (дата звернення 25.01.2018).

2. Technische Regel für Rohrfernleitungen. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Technische_Regel_fur_Rohrfernleitungen (дата звернення 25.01.1918).

3. Вакалюк Я.І., Карпаш О.М. Вибір методу визначення місць витоків газу з підземних газопроводів. Методи та прилади контролю якості. 2013. № 1 (30). С. 55–63.

4. Яворський А.В., Карпаш О.М,. Рибіцький І.В. Підходи до виявлення витоків газу з лінійної частини магістральних газопроводів у зонах геодинамічного ризику. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2011. № 1(38). С. 113–119.

5. Murvay P.-S., Silea I. A survey on gas leak detection and localization techniques. Journal of Loss Prevention in the Process Industry. 2012. 25. Pp. 966–973.

6. Geiger G. State-of-the-Art in Leak Detection and Localization. Transportation, Distribution and Sewer Networks – a Gateway to New Market Opportunities: proceedings of Pipeline Technology 2006 Conference, (Hannover, Germany, 25 April 2006). URL: http://www.pipeline-conference.com/sites/ default/files/papers/ 321_Geiger.pdf. (дата звернення 25.01.1918).

7. Чекурін В., Химко О. Математичні моделі для ідентифікації витоку в довгому газопроводі. Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. 2017. Вип. 25. С. 157–169.

8. Чекурін В.Ф. Математична модель перехідних процесів перенесення маси й імпульсу в довгому газопроводі. Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. 2010. № 11. С. 210–219.

9. Амосов А.А., Дубинский Ю.А., Копченова Н.П. Вычислительные методы для инженеров: учеб. пособие. Москва: Высшая школа. 1994. 544 с.

10. Чекурін В.Ф., Притула М.Г., Химко О.М. Структура та функції інтегрованого програмно-технічного комплексу для автоматизації управління газотранспортною системою. Вісник НУ «Львівська політехніка». Серія «Автоматика, вимірювання та керування». 2013. № 774. С. 51–60.

11. Чекурін В., Притула М., Химко О. Моделювання архітектури та функціональності програмно-технічного комплексу для автоматизації управління магістральними газопроводами. Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. 2013. № 18. С. 209–218.

13. Чекурін В.Ф., Притула М.Г., Химко О.М. Методологія MES і комп'ютеризація управління ГТС. Вісник НУ «Львівська політехніка». Серія «Комп'ютерні системи та мережі». 2014. № 806. 275–283.

13. Притула М.Г., Химко О.М., Чекурін В.Ф. Методологія побудови комп'ютеризованих систем управління виробничими підприємствами з використанням MES. Нафтогазова галузь України. 2015. № 1. С. 31–36.

12. Пономарьов Ю.В., Притула М.Г., Химко О.М., Чекурін В.Ф. Автоматизація управління ГТС: стан та перспективи розвитку з використанням MES. Нафтогазова галузь України. 2015. № 5. С. 40–45.

14. Bernus P., Nemes L. A framework to define a generic enterprise reference architecture and methodology. Computer Integrated Manufacturing Systems. 1996. Vol. 9(3). Pp. 179–191.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ

И ИДЕНТИФИКАЦИИ УТЕЧЕК В МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ

Разработаны структура и алгоритм функционирования системы обнаружения утечек в магистральных газопроводах. Работа системы базируется на ранее предложенных авторами математических моделях и методах. В качестве входных данных для нее используются результаты мониторинга газодинамических параметров потоков в трубопроводе при стационарных режимах эксплуатации. Система рассматривается как составная часть компьютеризированной системы управления газотранспортными системами, созданной с использованием методологии MES. Результаты работы могут найти применение при создании таких систем.

Ключевые слова: *программно-технические комплексы, автоматизация управления производством, обнаружение и идентификация утечек, алгоритмические методы, вычислительный мониторинг.*

MODELING OF THE SYSTEM FOR LEAK DETECTION AND IDENTIFICATION IN LONG DISTANCE PIPELINES

Structure and operation algorithm of a system for leaks detection and location in gas mains have been developed. Operation of the system is based on mathematical model and methods previously proposed by the authors. Results of monitoring of gas-dynamic parameters of flows in the pipeline at stationary mode of operation are used as the input data for the system. The system is considered as an essential part of a computerized system for management by gas transmission systems, built on MES principles. The obtained results can be utilized at development of such systems.

Key words: *software-hardware solutions, manufacturing execution systems, leak detection and identification, algorithmic methods, computational monitoring.*

UDC 004.942; 536.2

Shumylyak L.M.
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

Zhikharevich V. V.
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

Ostapov S.E.
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

SYSTEM PARAMETERS INVESTIGATION FOR STEFAN PROBLEM SOLVING BY THE CONTINUOUS ASYNCHRONOUS CELLULAR AUTOMATA METHOD

The main object of this work is to construct a cellular automaton (CA) model of heat conductivity processes with first order phase transitions. The paper discusses main approaches and general methodology for development of cellular automata models. The studies were conducted on the example of cellular automata to model moving phase boundary problems for freezing of moist soil, the process of band Bi2Te3 growing and changing forms of solidification front. It is shown that the CA models can be an alternative to the use of classical differential equations. It is proven that the model as a system of cellular automata is quite a convenient tool for the study of nonlinear heat transfer problems, despite the simplicity of its description, and may describe very complex system behaviour.

Key words: *first order phase transition, cellular automata, thermal conductivity, Stefan problem, zone growing.*

Introduction

The matter of solving heat conductivity problems is quite important, especially for cases with non-linear parameters of materials. For the majority of these problems, a numerical solution is a common approach. But when it comes to systems with complex boundary conditions or phase transitions of the substance, the computational complexity makes us look for alternative methods. Cellular automata algorithm easily describes such complex systems.

1. Related works

In recent years, alternative approaches to numerical methods for problems of heat conductivity and diffusion are widely used. Cellular automata algorithms are quite successfully used [1, p. 58; 2, p. 497] for this purpose. It should be noted that discrete models are used in most cases for calculation of diffusion processes [3, p. 1019], and continuous models of cellular automata [4, p. 127; 5, p. 266] are used to approximate heat transfer processes.

A lot of attention of researchers in the field of solid state physics is directed towards the study of problem of structural parameters of real materials with different physical nature and different spatial dimensions. In such cases, it makes sense to use modelling techniques that easily describe complexity of system geometry [1, p. 69]. Cellular automata simulation has this property. The purpose of this paper is to develop a model of continuous cellular automata and use it to describe the processes of heat conductivity complicated by a first order phase transition.

2. Cellular Automata Model Description

The description of systems with complex boundary conditions or phase transition is in many cases difficult. This is due to the fact that a numerical solution of this problem is quite difficult to obtain because of the large number of calculations.

An example is the problem of describing such complex phenomena as evolution and self-organization, diffusion and thermal conductivity. Let us consider the last process, complicating it by first order phase transition. This task belongs to the class of so-called Stefan problems.

Mathematical formulation of Stefan problem for a three-dimensional case is:

$$\frac{\partial T_S(x, y, z, t)}{\partial t} = a_S \Delta T_S(x, y, z, t)\ a_S = \frac{k_S}{c_S \rho_S}, \qquad (1)$$

$$\frac{\partial T_L(x,y,z,t)}{\partial t} = a_L \Delta T_L(x,y,z,t),\ a_L = \frac{k_L}{c_L \rho_L}, \quad (2)$$

$$\left| k_S \nabla T_S(x,y,z,t) - k_L \nabla T_L(x,y,z,t) \right| = \left| H_f \rho_{(L/S)} \frac{d\xi}{dt} \right|, \quad (3)$$

where $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$;– the Laplace operator; $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$ – the Hamiltonian operator; T_S and T_L, a_S and a_L, k_S and k_L, c_S and c_L, ρ_S and ρ_L – accordingly: temperature, thermal diffusivity, thermal conductivity, specific heat capacity, specific density of the solid and liquid phases; Hf – latent heat of fusion; ξ – coordinate of the interface of two phases. Specific density symbol $\rho_{(L/S)}$ on the right side of equation (3) means that the corresponding value of liquid /solid phase is selected depending on the direction of the phase transition – crystallisation /melting.

Heat conduction, described by the equation (1)-(3) may be modelled by cellular automata method. But for organizations quantitative calculations it is necessary to answer the question how much you should make cellular automata interactions for the resulting temperature distribution could be considered as solution of the problem in time t.

The essence of modeling of heat conduction using cellular automata is as follows. We partition the sample into a plurality of identical the same way interconnected cells. All cells form the so-called lattice cellular automaton. Lattices may be of different dimensions (the one-, two-or three-dimensional array), depending on the dimension of the modelled system.

In the case of modeling complex phenomena involving phase transitions or other changes, the contents of the cells of cellular automata field may be a single linear array of certain characteristics of the cell which, in turn, except temperature (for modeling thermal conductivity) and concentration (for diffusion processes) may contain some other parameters, such as the index of the state of matter, the internal energy and the like.

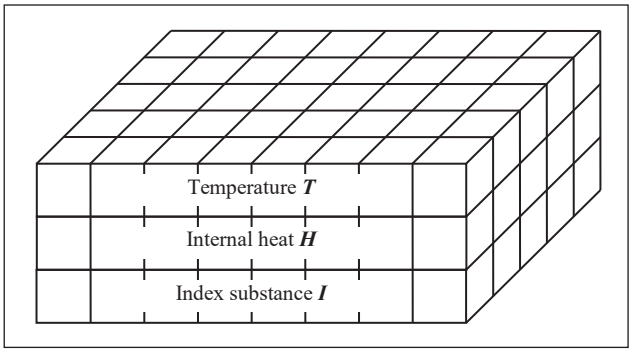


Fig. 1. Structure of the cellular automata field for a two-dimensional model

Consider, for clarity, two-dimensional field CA (Fig. 1), which contains three layers: 1 – temperature of T cells, 2 – H internal heat, which takes into account in the modeling of phase transitions, 3 – index substance I (or states of matter, such as monocrystal, polycrystal, melt) which is taken into account when selecting the values of the coefficients of thermal conductivity, specific heat and density in the corresponding point of the system. The cell contents of the field can make the real continuous values.

Area of the cell is determined by the dimension of the field of cellular automata, in accordance with the geometrical dimensions of the fragment of the simulated system.

Cellular automata can be realized in different ways. In this paper we use asynchronous scheme of interactions of cellular automata, providing cyclic execution of three typical steps:

1. Some cell $i = 1$ with integer coordinates x_1, y_1 is selected randomly on a cellular automata field.

2. A neighbouring cell $i = 2$ with integer coordinates x_2, y_2 is selected in an equiprobable way. The Neumann neighbourhood is accepted as a neighbourhood scheme in this case, i.e. a cell has only four neighbours.

3. A cellular automata interaction between the two cells takes place.

The described method of continuous asynchronous cellular automata can be applied to solve problems of heat conduction. In particular, it is shown in [6, p. 97].

The essence of cellular automata interactions is to modify the values of corresponding continuous layers of cells according to the following system of equations:

$$\begin{cases} T^{i'} = T^i + (T_m - T^i) a_m / a_{max}; \\ \text{if } (T^{i'} > T_f) \text{ and } (H^i < H_f), \text{ then } \{H^{i'} = H^i + c_S^i (T^{i'} - T_f); T^{i'} = T_f;\} \\ \text{if } (H^{i'} > H_f), \text{ then } \{T^{i'} = T^{i'} + (H^{i'} - H_f)/c_L^i; H^{i'} = H_f;\} \\ \text{if } (T^{i'} < T_f) \text{ and } (H^i > 0), \text{ then } \{H^{i'} = H^i + c_L^i (T^{i'} - T_f); T^{i'} = T_f;\} \\ \text{if } (H^{i'} < 0), \text{ then } \{T^{i'} = T^{i'} + H^{i'}/c_S^i; H^{i'} = 0;\} \end{cases}$$

$$a_m = (a^1 + a^2)/2,\ a^i = k^i / \rho^i c^i,\ T_m = \frac{w^1 T^1 + w^2 T^2}{w^1 + w^2},\ w^i = \rho^i c^i, \quad (4)$$

where a – thermal diffusivity $i = 1, 2$ – index value that corresponds to the selected cell and the adjacent cell with coordinates (x^1, y^1) and (x^2, y^2) respectively. Values at the next moment are stroke-marked.

The first equation of system (4) is a cellular automaton analogue of the heat equation (1) and (2) which has been investigated in [7, p. 294], the rest of the equation in (4) – approximation of equation (3), the

second and third equations of system (4) describes the process of melting, and the fourth and fifth – the process of crystallization.

The system of equations (4) describes the change of temperature and latent melting heat of the respective cells during one elementary interaction of cellular automata. It is a kind of Stefan problem numerical solution approximation (1–3).

3. Calculation Results Analysis

It is necessary to define the parameters accuracy of the approximation depend on and their influence on it. This will prove as viable modeling of heat conduction by cellular automata method.

For simplicity, consider a one-dimensional homogeneous sample [7, p. 297]. We will take the coefficients of thermal diffusivity equal to a constant. (1) becomes in this case:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = a\frac{\partial T^2(x,t)}{\partial x^2},\ a = \frac{k}{c\rho}, \qquad (5)$$

From solution of the equation (5), in the area of substance with length d comes up some value – the characteristic time of establishing of the temperature in the system:

$$t_{est} = \frac{d^2}{a}, \qquad (6)$$

We try to estimate the time of single cellular automata interaction for described above asynchronous approach. We assume $d = 1$, $a = 1$. Then the characteristic size of a single cell $d \sim 1/N$, where N – number of cells cellular automata field. On the other hand, the probability of selection of cells for the interaction act as equals $1/N$. That is to provide a choice of given cell it should be implemented in the average N sampling from the total population. By analogy with the process of mass transfer in the diffusion, where the diffusion coefficient is directly proportional to the number of elementary acts of mass transfer per unit time we obtain $a \sim N$. Using (6), we obtain:

$$t_{CA} \sim \frac{1}{N^3}, \qquad (7)$$

Confirmation of the statement (7) is possible by means of computer simulation, which consists in comparing the cellular automaton dynamics with different numbers of cells of cellular automata field with a particular solution of equation (5). Based on this experiment, temperature distribution $T(x,t)$ was constructed in a range $x \in [0,1]$ in different time points.

In parallel with calculations was performed the cellular automata simulation of the heat transfer. In cases where the maximum similarity, which was analyzed by the method of least squares on the set of control points, was fixed number of cellular automata interactions.

By analyzing results of computational experiments it is possible to confirm the validity of relation (7), as well as get a proportionality factor.

Thus, time of a cellular automata interactions for the described method is for three-dimensional model $(N_x \times N_y \times N_z)$:

$$t_{CA} = \frac{d_x^2}{a_{\max}}\frac{1}{6N_x^3N_yN_z} = \frac{d_y^2}{a_{\max}}\frac{1}{6N_y^3N_xN_z} = \frac{d_z^2}{a_{\max}}\frac{1}{6N_z^3N_yN_x}, \qquad (8)$$

where d_x, d_y, and d_z – the dimensions of the sample along coordinate x, y and z, respectively.

At figure 2 is shows a high degree of coincidence of solutions, which confirms the adequacy of the use of cellular automata approach for approximation of the solution of nonstationary heat conduction equation.

From the foregoing it can be concluded that the dimension of cellular automata field must be as large

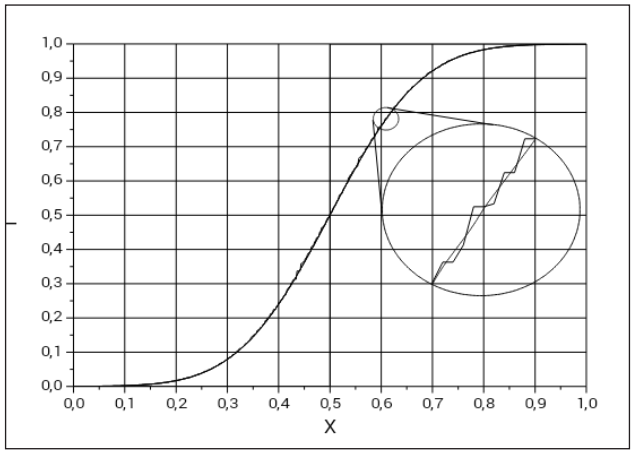


Fig. 2. Temperature distribution in the sample at time t = 0,01s (N = 500). Smooth line - decision by the formula (5), broken - cellular automata decision

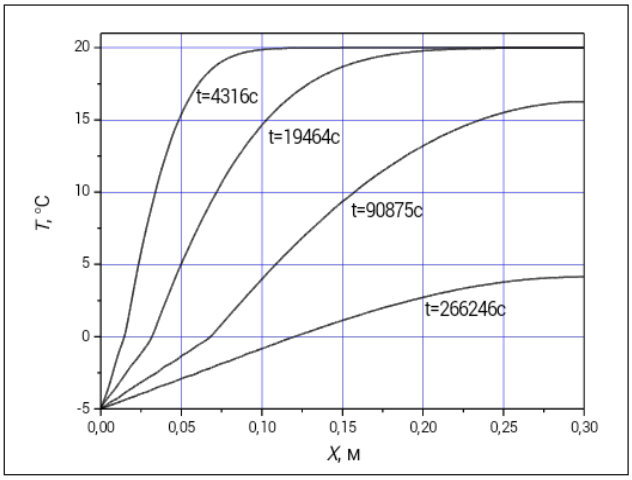


Fig. 3. Temperature distribution over the depth of the soil

as possible to ensure the adequacy of the modeling process. On the other hand, it will necessarily lead to long-term modeling process. Therefore, it is need to look for compromise between the accuracy of the solution and the time required to obtain it to solve this problem. With this shortcoming of the proposed method it can be overcome by using parallel computing [8, p. 341], since their principles apply to cellular automata and can significantly increase the size of the model.

By drawing an analogy between the CA method and Monte Carlo simulation, it is easy to notice a similar relationship – the longer the computation time, the more accurate the result. Herewith, as in the case of proposed probabilistic scheme of asynchronous sampling of cellular automata, use of probabilistic mechanisms also takes place in the Monte Carlo method. But unlike the Monte Carlo method for solving equations, cellular automata method is a method of simulation and it can be used to model systems that can not be described in terms of theory of differential equations [1, p. 93].

Further improvement of the proposed cellular automata method results in a need to consider the processes of thermal conductivity, accompanied by first order phase transitions. Let's proceed to consider a non-stationary task of the process of thermal conductivity with first order phase transition i.e., the Stefan problem – freezing of moist soil. Let the moist ground is in thawed state. At the initial moment t = 0 it has a uniform temperature T=20 ° C. Also on the soil surface at the initial moment temperature is instantly set below the freezing point T = -5 ° C. As a result, there will be a freezing. Formed frozen layer will have a variable thickness $\xi = f(t)$. Its movable boundary always has a freezing point. At this boundary take place transition from one state to another, which takes the heat of transition H_f, (J/kg). Thus, the boundary $x = \xi$ of the melt zone has a constant freezing temperature and the thermal conditions on the boundary $x = L$ we assume adiabatic. Assume the depth of soil equal to L = 0,3 m. Calculations of temperature distributions in the depth of the soil were performed at various time points by using the cellular automata approach. The results of calculations for one-dimensional (N_x = 500), two-dimensional ($N_x \times N_y$ = 500×100) and three-dimensional ($N_x \times N_y \times N_z$ = 500×10×10) CA models along the x axis are shown in Fig.3.

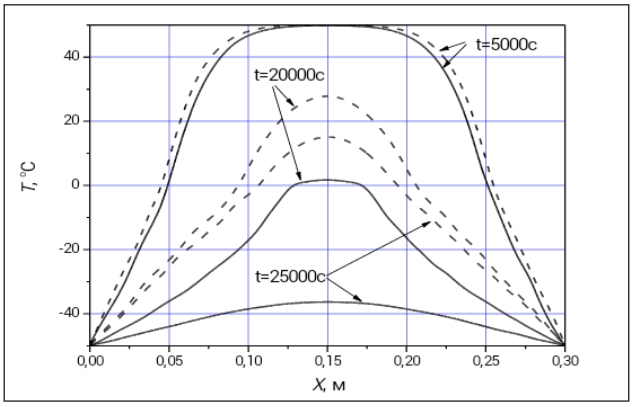


Fig. 4. Temperature distribution along the diagonal section of the cylinder (solid line) and along the cross section of the square bar (dotted lines)

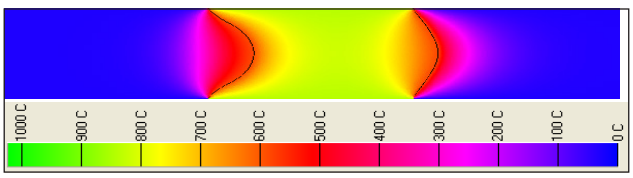


Fig. 5. Example of simulation of a zone growing Bi_2Te_3

Models of different dimensions agree with one another and with the corresponding results of numerical solutions of equations (1) – (3) for a given problem of freezing of moist soil [6, p. 35].

Another example of the Stefan problem was examined in this paper. The process of zone growing of materials was modelled on the example of bismuth telluride (Bi_2Te_3). In practice, zone growing of materials often occurs in cylindrical quartz ampoules. For realization of cellular automaton model of the growth process, the cylindrical symmetry of the system (by including the multiplier $(1+\pi R)$ in (4) for weight coefficient) was taken into account, which made it possible to reduce a three-dimensional model to a two-dimensional one and by that reduce the computing time with other parameters of the model being constant. So the expression becomes: $w^j = \rho^i c^i \left(1 + \pi R^i\right)$ where R^i – the distance from the axis of the cylinder to the i-th cell. Please note that the parameters a_{m}, $a_{\max}$, t_{1CA}, H_f does not depend on the multiplier, since the thermal parameters of the material does not change. To test our hypothesis, execute the computational experiments to cool square-section bar $D \times D$ and cylinder of diameter D. Significant discrepancies for the distribution of temperature of the bar and the cylinder in different times are shown at Fig. 4. But solutions completely coincide if we consider the multiplier.

Thus it is possible to realize a two-dimensional cellular automata model of zone growing materials in cylindrically symmetric quartz ampoules. An example of modelling the process of growing zone Bi_2Te_3 is shown at Fig. 5. Parameters that provide a flat crystallization front have also been obtained and empirically confirmed [7, p. 298]. Their receipt

ensured uniformity of physical parameters along the cross-section of the ingots. Equality of real and model growth parameters, in which there is a flat crystallization front [7, p. 300] demonstrates the adequacy of the described cellular automata approach.

Conclusion. Cellular automata model that describes the processes of thermal conductivity, accompanied by first order phase transitions was also presented. Parameters that provide the plane crystallization front in itinerant growing of semiconductor materials and the temperature distribution along the depth of the soil at different times moments for problem of freezing of moist soil were obtained and empirically validated.

As a conclusion, we note that the proposed method can be a worthy alternative to the previously known classical methods of Stefan problems solving and has prospects due to its versatility and simplicity. It implies that the method of continuous cellular automata can be used for description of dependence of the phase transition temperature on composition and modelling of instability of crystallization front.

References:

1. Бандман О.Л. Клеточно–автоматные модели пространственной динамики. Системная информатика. 2005. Вып. 10. С. 57–113.
2. Ванаг В.К. Исследование пространственно распределённых динамических систем методами вероятностного клеточного автомата. Успехи физических наук. 1999. Том 169, № 5. С. 481–505.
3. Малинецкий Г.Г., Степанцов М.Е. Моделирование диффузионных процессов клеточными автоматами с окрестностью Марголуса. Журнал вычислительной математики и математической физики. 1998. Том 36(6). С. 1017–1021.
4. Бобков С.П., Войтко Ю.В. Использование систем клеточных автоматов для моделирования нелинейных задач теплопроводности. Химия и химическая технология. 2009. Том 52 (11). С. 126–128.
5. Лиманова Н.И., Мамзин Е.А., Матвеев С.Г. Моделирование процессов теплообмена. Вестник Самарского государственного аэрокосмиче ского университета. 2009. № 3(19). С. 265–269.
6. Кузнецов Г., Шеремет М. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие Томск: Изд-во ТПУ, 2007. 172 с.
7. Жихаревич В.В., Шумиляк Л.М. Аппроксимация решения нестационарного уравнения теплопроводности методом вероятностных непрерывных асинхронных клеточных автоматов для одномерного случая. Компьютерные исследования и моделирование. 2012. Т. 4(2). С. 293–301.
8. Бандман О. Параллельная реализация клеточно-автоматных алгоритмов моделирования пространственной динамики. Сиб. журн. вычисл. матем. 2007. № 10. С. 335–348.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ СТЕФАНА ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ АСИНХРОННИХ КЛІТИННИХ АВТОМАТІВ

Стаття присвячена побудові клітинно-автоматної моделі (КА) процесів теплопровідності з фазовими переходами першого роду. У роботі розглянуто основні підходи та загальну методологію розробки клітинно-автоматних моделей. Дослідження проводилися методом клітинних автоматів для моделювання задач із рухомим фронтом розділу фаз на прикладі задачі промерзання вологого ґрунту та зміни форм фронту кристалізації в процесі вирощування Bi2Te3. Показано, що КА-моделі можуть бути альтернативою використанню класичних диференціальних рівнянь. Доведено, що модель як система клітинних автоматів є досить зручним інструментом для вивчення нелінійних задач теплопровідності, незважаючи на простоту її опису, і може описувати дуже складну поведінку системи.

Ключові слова: *фазовий перехід першого роду, клітинний автомат, теплопровідність, задача Стефана, зонне вирощування.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СТЕФАНА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА АСИНХРОННЫХ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ

Статья посвящена построению клеточно-автоматной модели (КА) процессов теплопроводности с фазовыми переходами первого рода. В работе рассмотрены основные подходы и общая методология разработки клеточно-автоматных моделей. Исследования проводились методом клеточных автоматов для моделирования задач с подвижным фронтом раздела фаз на примере задачи промерзания влажного грунта и изменения форм фронта кристализаши в процессе выращивания Bи2Te3. Показано, что КА-модели могут быть альтернативой использованию классических дифференциальных уравнений. Доказано, что модель как система клеточных автоматов является достаточно удобным инструментом для изучения нелинейных задач теплопроводности, несмотря на простоту ее описания, и может описывать очень сложное поведение системы.

Ключевые слова: *фазовый переход первого рода, клеточный автомат, теплопроводность, задача Стефана, зонное выращивание.*

ЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.43.056

Абдулін М.З.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сірий О.А.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ СТАЛОСТІ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ У СТРУМЕНЕВО-НІШЕВІЙ СИСТЕМІ СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА

У статті виконано огляд основних схем стабілізації полум'я промислового газопальникового обладнання. Подано основні їх переваги та недоліки. Показано перспективність застосування як стабілізатора комбінованої схеми на основі поганообтічного тіла та газодинамічного струменевого екрану, яка реалізована у струменево-нішевій системі (СНС). Подано результати дослідження впливу основних геометричних параметрів струменево-нішевої системи на сталість горіння газоподібного палива. Наведено експериментальні результати дослідження зривних меж («бідного» й «багатого» зриву полум'я) залежно від конфігурації струменево-нішевої системи.

Ключові слова: *струменево-нішевий стабілізатор полум'я, «бідний» і «багатий» зрив полум'я, параметри паливорозподілу.*

Постановка проблеми. Питання підвищення енергоефективності паливоспалюючого обладнання залишаються провідними в енергетиці та промисловості країни. В умовах складної економічно-політичної обстановки завдання повного оновлення парку вогнетехнічного обладнання (далі – ВО) виявляється досить витратним, а в окремих випадках навіть недосяжним. Одним з альтернативних варіантів підвищення енерго-економічних характеристик застарілого парку ВО є проведення його маловитратної модернізації. Основні шляхи в цьому напрямі такі: впровадження сучасних технологій спалювання; заміна тягло-дуттьового обладнання на агрегати з частотним регулюванням; упровадження ефективних теплообмінників; застосування сучасних теплоізоляційних матеріалів.

Комплексний підхід до підвищення енергоефективності дає змогу досягти не тільки значної економії енергоресурсів, а й забезпечити надійність та екологічність обладнання.

Результати, що наведені в роботі, стосуватимуться суто питань, які пов'язані з особливостями впровадження технології спалювання за рахунок заміни газопальникового обладнання й дають змогу в кінцевому результаті отримати найбільший із вищеперерахованих заходів енергоекологічний ефект. У цьому аспекті найбільш ефективною паливоспалюючою вітчизняною технологією, яка дає можливість надійно та ефективно працювати в широкому діапазоні робочих навантажень ВО, є струменево-нішева технологія (далі – СНТ) [1]. Сьогодні на основі СНТ проведено модернізацію близько 1000 ВО України та зарубіжжя. Основні принципи, що покладені в основу технології, такі:

– раціональний розподіл палива в потоці окисника;

– стійка регульована структура течії палива, окисника та продуктів згоряння;

– саморегульованість складу паливної суміші в зоні стабілізації факелу;

– самоохолодження пальника;

– термічна підготовка пального.

Усі принципи, зазначені вище, досягаються за рахунок вдалого конструктивного розміщення

СНС [2–4] на автономному колекторі-пілоні, з яких складається пальник.

Поряд із проблемами, пов'язаними з необхідністю економії дефіцитних енергоресурсів, нагальними є вимоги стосовно розширення меж потужності пальникових пристроїв за рахунок зниження пускових тисків палива, що також допомагає забезпечити високі енергетичні показники агрегату та його надійну експлуатацію з можливістю глибокого розвантаження під час пусків і регулювання потужності роботи ВО. Розроблення відповідних заходів є необхідною вимогою з погляду підтримання номінального рівня температур у топковому просторі, при цьому варто запобігати термічному «удару» й температурній нерівномірності по об'єму.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ефективна організація робочого процесу ВО, що використовує газоподібне паливо, вимагає врахування відповідних його характеристик під час спалювання в промислових установках:

1) температура займання палива достатньо висока (для природного газу становить 650–800°С);

2) у технологічному процесі котлів, печей, сушарок тощо потоки повітря й палива подаються в топковий простір зі швидкостями, що досягають десятків, а часом і сотень метрів за секунду, це значно більше за нормальну швидкість поширення полум'я, значення якої залежно від виду палива й температур реагентів не більше ніж 1 м/с;

3) для забезпечення стійкого горіння робоча суміш повинна включати необхідну концентрацію палива в загальному об'ємі компонентів реакції (5–15% для природного газу);

4) кількість теплоти, яка виділяється в процесі реакції, повинна перевищувати кількість відведеного тепла.

Для запобігання «зриву» полум'я необхідно забезпечити умови для його стабілізації, тобто безперервне займання горючої суміші у фіксованих ділянках топкового простору. Аналіз робіт, що присвячені дослідженню горіння в потоці, дає змогу виділити кілька способів стабілізації фронту полум'я. Перший – це стабілізація за рахунок підведення енергії від зовнішнього джерела постійної дії, а другий – стабілізація за рахунок підведення енергії із зони горіння.

Перший спосіб зазвичай досягається за допомогою так званого чергового факела (пальника, форсажної камери), а другий – за допомогою зони зворотних струмів високонагрітих продуктів згоряння, яка виникає під час закручення потоку за системою погано обтічних тіл різної геометричної форми або гідродинамічної взаємодії течій тощо [5, с. 527; 6, с. 185].

Найбільш поширеним способом стабілізації полум'я у промислових пальниках (далі – ПП) є закрутка потоків окисника та палива. У цих ПП параметр закрутки потоку визначає потужність зворотної течії високо нагрітих продуктів згоряння з топкового простору до устя факелу, забезпечуючи таким чином стабілізацію процесу горіння [7, с. 97]. До недоліків цієї схеми в пальниках під час їх експлуатації варто зарахувати підвищений гідравлічний опір, а також температурний перегрів як елементів пальника, так і їх амбразур. Крім того, глибина регулювання таких ПП не велика.

Ефективність процесу стабілізації полум'я може бути оцінена низкою критеріїв, кожен із яких характеризує рівень вирішення проблем, пов'язаних із експлуатацією та характеристиками стійкості роботи стабілізатора і ступенем його впливу на робочий процес: діапазон стабілізації за швидкістю потоку й коефіцієнта надлишку повітря; надійність запуску камер згоряння (далі – КЗ) із цим типом стабілізатора; ресурс пристрою стабілізації; гідравлічний опір; вплив процесу сумішоутворення на повноту згоряння, протяжність зони горіння; витрати енергії від зовнішніх джерел; простота й відносна дешевизна конструкції [8, с. 28].

Як відомо, принцип дії механічних стабілізаторів фронту полум'я заснований на конвективному перенесенні тепла продуктів згоряння до свіжої суміші в зоні зворотних струмів (далі – ЗЗС). Головним чином зона стабілізації може бути створена під час обтікання тіл з погано обтічною конфігурацією (великим лобовим опором) або зміни кривизни поверхні каналу (уступ, каверна, лунка).

Поганообтічні стабілізатори знайшли своє застосування в камерах згоряння ГТУ. У цьому випадку зона відриву знаходиться з підвітряного боку погано обтічного тіла. Усередині ЗЗС розміщена вихорова структура, що під час обертання створює умови для процесу масообміну з активним потоком набігаючого повітря. Як межу цієї зони розглядають лінію, що обмежує циркулюючу течію з постійним масообміном. При цьому циркуляційна течія ЗЗС нестаціонарна. При невеликих числах Рейнольдса відбувається періодичний відрив великих вихорів, тому розмір зони постійно змінюється. У разі збільшення чисел Рейнольдса течія набуває квазістаціонарного характеру за рахунок зменшення числа відриву вихорів ЗЗС. Експериментальні дослідження показали, що в середньому

розмір зони циркуляції за погано обтічним стабілізатором у 2–2,5 раза більший за його поперечний розмір в ізотермічних умовах і збільшується під час горіння [9–10]. ЗЗС утворюється у випадку як дозвукового, так і надзвукового обтікання поганообтічних стабілізаторів, при цьому рівні швидкостей ЗЗС у 2–3 рази менші, ніж швидкості набігаючого потоку окисника [11, с. 110].

Ділянка стійкої роботи, яка обмежується кривими «багатого» та «бідного» зриву полум'я (рис. 1) [5, с. 557]. Ділянка стабілізації факела в основному залежить від таких параметрів: швидкості основного потоку, форми та розміру стабілізатора, тиску й температури потоку, інтенсивності турбулентності, якості й типу палива. Аналізуючи ці дані, варто зазначити, що найбільш широкі межі стабілізації мають тіла з найбільшим лобовим опором потокові повітря, що набігає.

Як показали дослідження, максимальна швидкість набігаючого потоку повітря, за якої відбувається зрив полум'я, відповідає стехіометричному складу пальної суміші. Зі збільшенням або зменшенням концентрації палива в повітрі швидкість зриву полум'я зменшується. За мінімальних швидкісних режимів стабілізатора «бідний» і «багатий» зрив факела відповідає мінімальній і максимальній концентраційним межам запалення суміші.

Дослідження розвитку перпендикулярного струменя в потоці, що набігає, виконано в роботі [12, с. 615]. При цьому в затіненій зоні обтікання струменя виникає картина, подібна обтіканню циліндра. На більшій відстані від устя струмінь розсіюється, але парні вихорі за ним усе ще можуть існувати, створюючи вплив на картину течії. У деяких умовах можливе виникнення парних вихорів

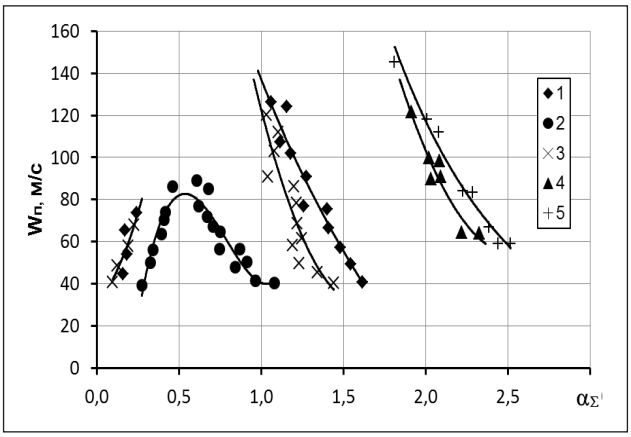


Рис. 1. Зривні характеристики поганообтічних тіл, гомогенна бензино-повітряна суміш, $t_{сум}$=200°С: 1 – диск, $d_{ст}$=40 мм; 2 – шар, $d_{ст}$=40 мм; 3 – конус, $d_{ст}$=40 мм; 4 – циліндр, $d_{ст}$=40 мм; 5 – V-подібний стабілізатор, $d_{ст}$=40 мм

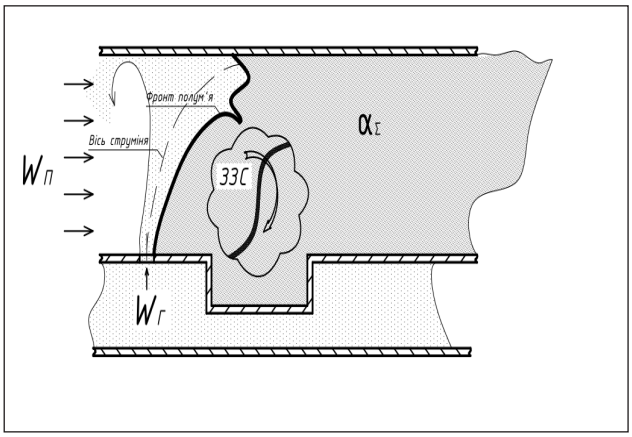


Рис. 2. Схема процесу стабілізації полум'я в СНС, $W_п$, $W_г$ – швидкість повітря та палива, відповідно, м/с

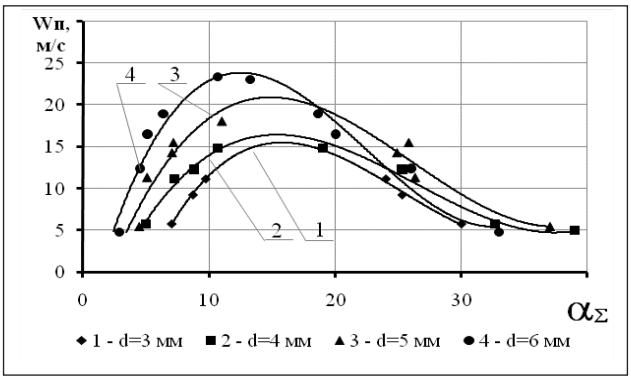


Рис. 3. Зривні характеристики одиночного газового пропан-бутанового струменю різного діаметру в умовах СНС з параметраи: відношення довжини до глибини ніші L/H=40/10, L_1=10 мм, відстань від зривної кромки ніші L1=10 мм, висота повітряного каналу $H_к$=72 мм, α_Σ – сумарний коефіцієнт надлишку повітря в системі

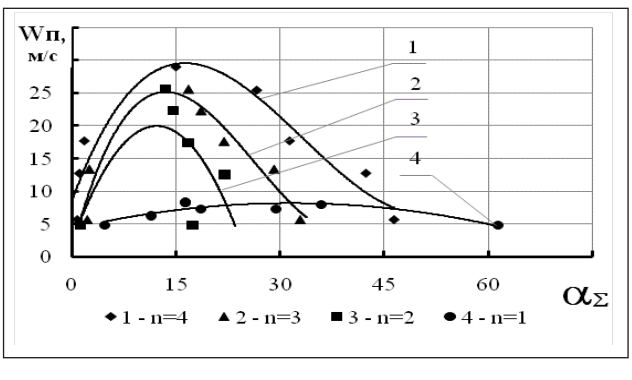


Рис. 4. Зривні характеристики СНС при переході від одиночного струменя (n=1) до системи струмин з параметрами: відношення довжини до глибини ніші L/H=40/10, відстань від зривної кромки ніші L/H=40/10, L1=10 мм, висота повітряного каналу $H_к$=72 мм, діаметри газоподавальних отворів d=2 мм, крок розташування отворів, $\bar{S} = 4,6$

безпосередньо всередині струменя, вісі яких паралельні аеродинамічній осі самого струменя.

Стабілізатори полум'я у вигляді поганообтічних тіл мають низку вагомих недоліків, основні з яких – підвищений гідравлічний опір потокові, неможливість ефективного регулювання процесу горіння під час зміни потужності КЗ за рахунок автомодельності циркуляційної течії за стабілізатором. Варто зазначити також неможливість застосування такої конструкції в умовах обладнання, працюючого при а, близьких до одиниці.

Ефективним способом стабілізації полум'я є перпендикулярна система струменів, яка в поєднанні з нішевою порожниною має низку переваг порівняно зі стабілізацією поганообтічних тіл. По-перше, плавним регулюванням фізичних розмірів так званого «струменевого екрана», а по-друге, автомодельністю процесів сумішоутворення в ЗЗС, що виникає в затіненій зоні екрану й зоні циркуляції в ніші на пускових режимах. Отже, використання СНС є на порядок більш ефективним засобом стабілізації факела порівняно з різноманітними варіантами просто струменевої стабілізації й дає змогу регулювати процес у більш широкому діапазоні теплових навантажень [13].

Тому одним із перспективних завдань стосовно пальників СНТ є вдосконалення геометричних характеристик СНС для забезпечення мінімізації тиску пального на пускових витратах пальника, а також установлення впливових факторів на коефіцієнт робочого регулювання системи, з метою розроблення рекомендацій щодо конструктивних схем пальників відповідно до використовуваного газоподібного палива.

Постановка завдання. Мета статті – виконати огляд основних схем стабілізації полум'я промислового газопальникового обладнання; подати основні їх переваги та недоліки.

Виклад основного матеріалу дослідження. Схема стабілізації факела в досліджуваній системі наведена на рис. 2.

У роботі досліджено режими стабілізації полум'я одиночним струменем, розміщеним перед нішевою порожниною. Результати подано на рис. 3.

Результати експерименту показали розширення меж сталого горіння в СНС з одним струменем під час збільшення його діаметра. Значення коефіцієнта а в цьому випадку далекі від стехіометричних, оскільки значна частина повітря проходить транзитом у каналі, не беручи участі в процесі горіння, тому в досліджуваних умовах максимум характеристики зміщений із ділянки стехіометрії в бік збідненої суміші й дещо зміщується під час зменшення діаметра газового сопла. Варто зазначити, що зі збільшенням діаметра діапазон сталого горіння розширюється (площа під кривими запалення та згасання), що може бути пояснено збільшенням фізичного розміру зони циркуляції в затіненій частині струменя (рис. 3).

Очевидно, що поодинокий струмінь не дає змоги ефективно стабілізувати полум'я й межа багатого зриву за коефіцієнтом надлишку повітря становить значення 3–5 в умовах горіння пропану. На рис. 4 подано експериментальні результати дослідження стабілізаційних якостей СНС під час переходу від поодинокого струменя до системи струмин палива. Необхідно врахувати особливості взаємного впливу струменів у системі, які в загальному випадку визначаються відносним кроком розташування: так, у разі зменшення кроку до значень менше ніж 2,0 пограничні шари окремих струменів з'єднуються й система наближається за характеристиками до суцільного щілинного струменя, а збільшення відносного кроку до значень 6,0 і більше призводить до мінімізації взаємодії струмин, і вони індивідуально розвиваються в потоці окисника [13].

Дослідження зривних процесів виконувалось у «відкрите» повітря без застосування вогнетривкої футерованої ділянки, фотознімки факела під час горіння поодинокого струменя подано на рис. 5.

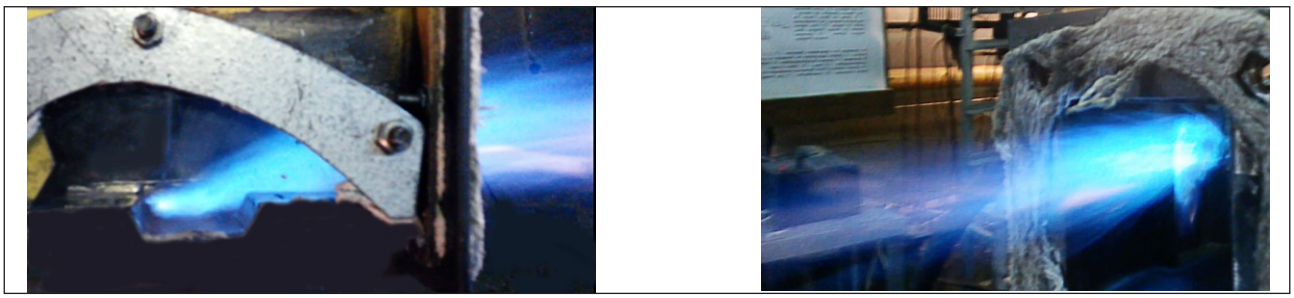


Рис. 5. Фотознімки горіння одиночного струменя в СНС при L/H=40/10, L_1=10 мм, висота повітряного каналу $H_к$=72 мм, d=6 мм

У роботі [2] отримано рекомендації стосовно найбільш прийнятного кроку розміщення струменів палива під час спалювання природного газу. Отже, фізично картина розвитку перпендикулярних струменів у набігаючому потоці окисника з погляду їх далекобійності під час варіювання кроку розташування за постійних значень швидкостей палива й окисника буде поводити себе так: у разі зменшення кроку далекобійність системи буде зменшуватись, а в разі збільшення, відповідно, збільшуватись.

Висновки. Виконано огляд найбільш розповсюджених схем стабілізації факела промислового газопальникового обладнання. Наведено основні їх переваги та недоліки. Основну увагу приділено огляду конструктивних схем пальників, що складаються зі стабілізаторів у вигляді поганообтічних тіл і схем із закруткою потоків окисника та палива. Приведено переваги застосування газодинамічної схеми стабілізації полум'я, яка працює на основі взаємодії течії ближнього сліду за поганообтічними тілами й системи перпендикулярних струменів палива та реалізована в СНС.

Установлена залежність геометричних характеристик системи паливорозподілу СНС на межі сталого горіння. Визначено таке:

1) поодинокий струмінь під час збільшення його діаметра в умовах СНС здатний стабілізувати полум'я, але при цьому зона сталого горіння зміщена в сторону збіднених сумішей, що не задовольняє вимогам реального ВО, яке працює в діапазонах, близьких до стехіометричного складу пальних сумішей;

2) перехід від поодинокого струменю до системи струмин дає змогу розширити робочий діапазон СНС і максимально наближує ділянку сталого горіння до ділянки стехіометричних сумішей ($\alpha \rightarrow 1{,}0$); близькою за можливостями регулювання робочих навантажень розглядається система, що складається з 4 і більше струменів палива.

Список літератури:

1. Абдулин М.З. Применение струйно-нишевой технологии сжигания топлива в энергетических установках. Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ». 2005. № 6. С. 130–144.
2. Абдулин М.З. Струйно-нишевая система смесеобразования и стабилизации пламени: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: спец. 05.04.01. Киев: КПИ, 1986. 20 с.
3. Джамал Абдель Карим Ибрагим. Особенности рабочего процесса модуля газогорелочного устройства с поперечной подачей струй газа: дисс. ... канд. техн. наук: спец. 05.04.01. Киев: КПИ, 1997. 20 с.
4. Абдулін М.З., Джамал І. Тепловий режим мікродифузійного газогорілочного пристрою. Наукові вісті НТУУ «КПІ». 1997. С. 111–113.
5. Щетинков Е.С. Физика горения газов. Москва: Физматгиз, 1965. 740 с.
6. Раушенбах Б.В., Белый С.А., Беспалов И.В., Бородачев В.Я., Волынский М.С., Прудников А.Г. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. Москва: Машиностроение, 1964. 526 с.
7. Иванов Ю.В. Газогорелочные устройства. Москва: Недра, 1972. 276 с.
8. Винтовкин А.А., Ладыгичев М.Г. Современные горелочные устройства. Москва: Машиностроение-1, 2001. 487 с.
9. Христич В.А., Любчик Г.Н., Гавриш С.А. Расходные характеристики и оптимальные геометрические соотношения горелок струйного типа. Вестник КПИ. Серия «Теплоэнергетика». Киев, 1973. № 10. С. 31–34.
10. Бутовский Л.С., Грановская Е.А., Любчик Г.Н., Христич В.А. Исследование закономерности выгорания топлива за уголковыми и плоскими стабилизаторами пламени. Теория и практика сжигания газа: сбороник. Ленинград: Недра, 1975. Вып. VI. С. 324–338.
11. Пчелкин Ю.М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. Москва: Машиностроение, 1984. 280 с.
12. Абрамович Г.Н., Гиршович Т.А. Теория турбулентных струй. Москва: Наука, 1984. 718 с.
13. Абдулін М.З., Сірий О.А. Принципи організації робочого процесу камер згоряння. Авіаційно-космічна техніка та технологія. 2014. № 35. С. 22–25.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ В СТРУЙНО-НИШЕВОЙ СИСТЕМЕ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА

В статье выполнен обзор основных схем стабилизации пламени промышленного газогорелочного оборудования. Приведены основные их преимущества и недостатки. Показана перспективность применения в качестве стабилизатора комбинированной схемы на основе плохообтекаемого тела и газодинамического струйного экрана, которая реализована в струйно-нишевой системе (СНС). Представлены результаты исследования влияния основных геометрических параметров струйно-нишевой системы на устойчивость горения газообразного топлива. Приведены экспериментальные результаты исследования срывных границ («бедного» и «богатого» срыва пламени) в зависимости от конфигурации струйно-нишевой системы.

Ключевые слова: *струйно-нишевый стабилизатор пламени, «бедный» и «богатый» срыв пламени, параметры топливоподачи.*

STABILITY ANALYSIS OF COMBUSTION ACTION IN THE JET-NICHE SYSTEM OF BURNING FUEL

The overview of the main schemes of stabilization the flame industrial equipment is shown. The main advantages and disadvantages are presented. The prospect of using as a stabilizer of a combined scheme on the basis of a poorly polluting body and a gas-dynamic jet screen, which is implemented in the jet-niche system, are presented. The results of the studying of the influence of the main geometric parameters of the JNS on the constancy of combustion of gaseous fuel are reveal in the article. Experimental results of the research of the gap (“poor” and “rich” flame failure) are investigated, depending on the configuration of the JNS.

Key words: *jet niche flame stabilizer, poor and rich flame failure, fuel distribution parameters.*

УДК 621.314

Беляев В.К.
Учебно-научный институт энергетики, автоматики и энергосбережения
Национального университета биоресурсов и природопользования Украины

Паненко Е.Н.
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ ПОД РАБОЧИМ НАПРЯЖЕНИЕМ

В статье рассмотрены методики обработки результатов измерений тангенса угла диэлектрических потерь высоковольтной изоляции, используемые в системах контроля без вывода оборудования из эксплуатации. Сопоставлены методика с использованием назначения определенного стандартного объекта и методики, не использующие назначения специальных стандартных объектов. Показано, что применение методик обработки без выделения отдельного эталонного объекта может приводить к существенным сложностям в оценке результатов контроля изоляции. Предлагаются усовершенствования методики обработки, уменьшающие погрешности методик и трудоемкость измерений.

Ключевые слова: *высоковольтная изоляция, диагностика, методика обработки, погрешность, тангенс угла диэлектрических потерь.*

Постановка проблемы. Одной из актуальных задач современной энергетики Украины остается оценка состояния изоляции высоковольтных трансформаторов тока и вводов силового маслонаполненного оборудования. Традиционная методология диагностирования изоляции, основанная на периодическом отключении оборудования и измерении ряда нормированных параметров, неэффективна, особенно в условиях эксплуатации состаренного оборудования. Один из путей улучшения ситуации – внедрение новых современных технологий контроля изоляции без вывода оборудования из эксплуатации (контроль под рабочим напряжением).

Действующими нормами предусмотрена возможность контроля под рабочим напряжением рассматриваемого оборудования двумя существенно различающимися методами: неравновесно-компенсационным (балансовый контроль) и методом сравнения (дифференциальный контроль) [1; 2]. Не рассматривая не раз обсуждаемые достоинства и недостатки неравновесно-компенсационного метода контроля и устройств, его осуществляющих, можно сказать, что эти устройства остаются приборами скорее аварийной сигнализации, чем диагностики. Высокий порог срабатывания, устанавливаемый для уверенного обнаружения дефекта, не позволяет использовать эти приборы для раннего обнаружения дефектов изоляции и отслеживания их развития.

При осуществлении дифференциального контроля под рабочим напряжением реализуют слежение за изменением традиционно измеряемых электрических характеристик изоляции: тангенса диэлектрических потерь и емкости, проводя множественные измерения названных величин. При этом особую роль играет достоверность получаемой информации, что предполагает высокую точность проводимых измерений и корректность процедур обработки результатов.

Анализ последних исследований и публикаций. Для повышения эффективности контроля в таких технологиях предложено [3; 4] использовать методики, при которых предполагается, что каждый объект контроля (далее – ОК) поочередно используется как эталонный для всех других контролируемых ОК (без выделения отдельного эталонного объекта). Названный подход позволяет отказаться от специального контроля и неудобных смен эталонных объектов. В то же время в работе

В.К. Беляева, Е.Н. Паненко [5] указано на возникновение дополнительных ошибок при такой обработке, не возникающих при обработке традиционных измерений с выделением специального эталонного объекта.

Постановка задания. Цель статьи – разработка методики обработки результатов измерений тангенса угла потерь изоляции конденсаторного типа при осуществлении дифференциального контроля без вывода из эксплуатации (под рабочим напряжением) и оценка погрешности такой методики.

Изложение основного материала исследования. Основы измерений тангенса потерь изоляции. В основе дифференциального контроля лежит мостовой метод сравнения с образцовым объектом (эталоном) [1; 2]. Используя мост переменного тока, измеряют тангенс ($tg\delta_{meg}$) разницы углов диэлектрических потерь ОК (δ_{ok}), подключенного к входу «X», и угла потерь эталона (δ_e), подключенного к входу «0» (ввиду малости реальных значений углов потерь можно не учитывать отличие тангенса разницы от разницы тангенсов):

$$tg\delta_{ok} = tg\delta_{meg} + tg\delta_e \ . \qquad (1)$$

Системы непрерывного контроля множества ОК строятся на основе приборов нового поколения, основанных на микропроцессорной технике, способных осуществлять автоматический контроль электрических характеристик изоляции с высокой точностью (в последнее время используют высокоточные векторные измерители, например [6]).

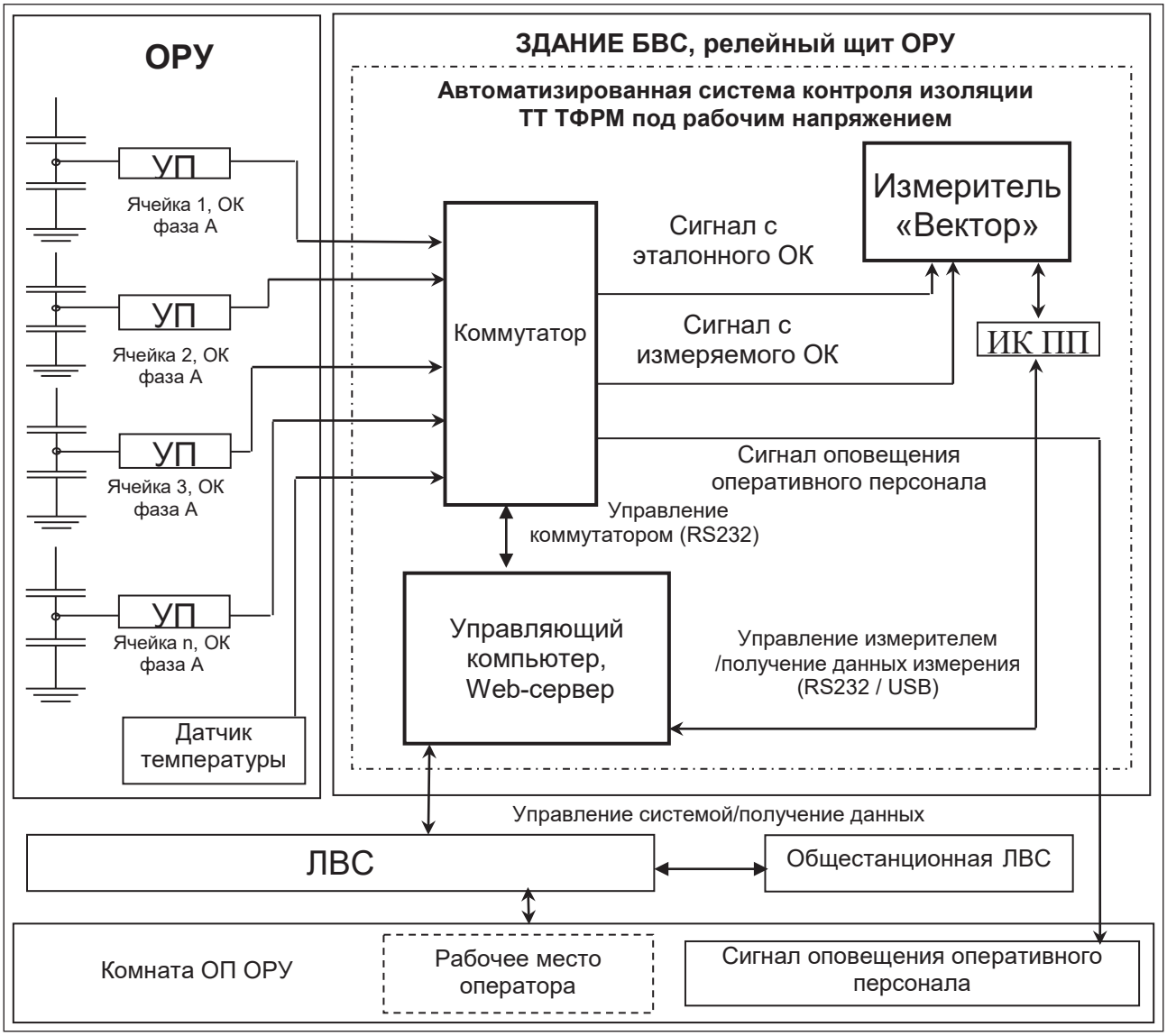


Рис. 1. Блок-схема автоматизированной системы контроля параметров изоляции трансформаторов тока на подстанции [6]

Типичная блок-схема автоматизированной системы контроля параметров изоляции под высоким напряжением приведена на рис 1. Система осуществляет пофазные, попарные измерения для ОК, находящихся в разных ячейках, обработку измерений, анализ полученных результатов [6].

Проблема заключается в том, что действительное значение тангенса потерь эталонного объекта, используемое как база для отсчета, во время измерения неизвестно, и вместо него используют приближенные значения, что и является источником методических ошибок: расчетный тангенс отличается от действительного тангенса потерь ОК.

Для случая измерений множества объектов под рабочим напряжением, для ОК одной фазы в произвольный момент времени k запишем формулу (1) следующим образом (для упрощения здесь и далее вместо tgδ записываем δ):

$$\delta_{j(k)} = \partial\delta_{ij(k)} + \delta_{i(k)}, \text{ или } \partial\delta_{ij(k)} = \delta_{j(k)} - \delta_{i(k)} \qquad (2)$$

где $\delta_{j(k)}$ – тангенс угла потерь *j*-го ОК; $\partial\delta_{ij(k)}$ – тангенс дифференциального угла при измерении для *j*-го ОК при *i*-м эталоне (первый индекс – эталона, второй – проверяемого ОК). Здесь, в соответствии с [1], измеряемый тангенс разницы углов потерь ОК и эталона назван тангенсом дифференциального угла.

При дифференциальном контроле определяется не сам тангенс дифференциального угла ОК, а его приращение ($\Delta\delta_{ij}$) относительно базовых значений – значений в начале контроля [1; 2]. Так, при измерении в *k* момент времени для *j*-го ОК при *i*-м эталоне (одно парное измерение) приращение тангенса дифференциального угла:

$$\Delta\delta_{ij(k)} = \partial\delta_{ij(k)} - \partial\delta_{ij(0)} = -\Delta\delta_{ji(k)}, \qquad (3)$$

где $\partial\delta_{ij(0)}$ – начальное значение тангенса дифференциального угла, измеряемое при взятии объектов на контроль.

Согласно методике, описанной в СОУ-Н МПЕ [1], измерения проводят с выделенным эталонным ОК (*i* – индекс эталона). Используя полученное по (3) приращение, определяют текущее расчетное значение тангенса проверяемого ОК [1; 2]:

$$\delta p_{j(k)} = \Delta\delta_{ij(k)} + \delta_{j(0)}, \qquad (4)$$

где $\delta_{j(0)}$ – начальное значение тангенса для j-го ОК, определяемое при взятии объектов на контроль.

Для эталонного ОК:

$$\delta p_{i(k)} = -\Delta\delta_{ij(k)} + \delta_{i(0)}. \qquad (5)$$

Полученные расчетные значения сравнивают с допустимыми значениями тангенса угла потерь, нормированными в [1] (критерии отбраковки).

Подставляя определение (3) в формулу (4), после преобразований получаем такое выражение для определения расчетного значения тангенса:

$$\delta p_{j(k)} = \partial\delta_{ij(k)} + \delta_{i(0)}. \qquad (6)$$

Сравнивая (6) с точным выражением (2) для действительного значения тангенса ОК, видим, что в методике 1 при определении расчетного тангенса предлагается, вместо неизвестного, во время измерений значения тангенса эталонного объекта $\delta_{i(k)}$ использовать значение, определяемое при взятии объектов на контроль $\delta_{i(0)}$. Получаемое расчетное значение тангенса угла потерь $\delta_{pj(k)}$ (которое сравнивается с допустимой нормой) будет отличаться от действительного $\delta_{j(k)}$ на величину приращения тангенса эталонного объекта за время от начала контроля.

При массовом контроле изоляции ОК на ОРУ возникают определенные неудобства с выбором и контролем состояния эталонного ОК, а при выборе одного эталона для всех ОК фазы (наиболее удобный вариант) формула (5) для оценки эталонного ОК становится неприемлемой [3]. Действительно, для каждого проверяемого ОК при неизменном эталоне получаем свой, отличный от других результат

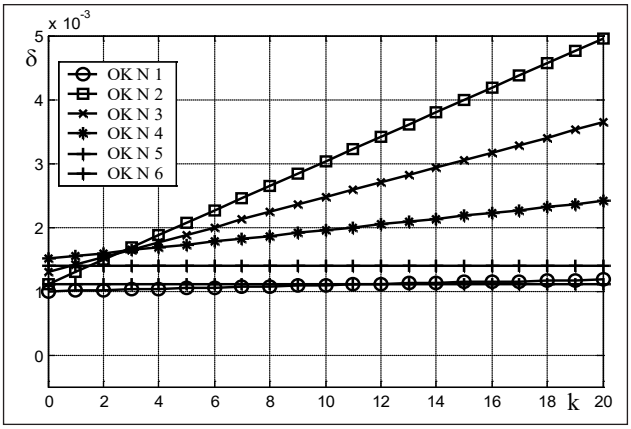


Рис. 2. Изменения действительных значений тангенсов потерь изоляции ОК

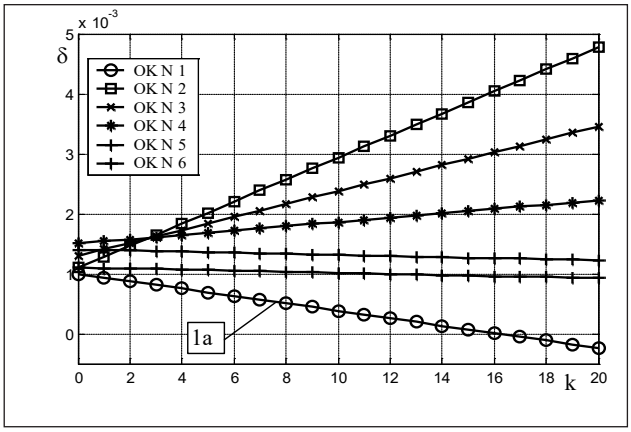


Рис. 3. Изменения расчетных значений тангенсов потерь изоляции ОК, определенных по методике [1]

для $\Delta\delta_{ij(k)}$ и, как следствие, разные значения расчетного тангенса $\delta_{pi(k)}$ для одного и того же *i*-го эталона.

Методика обработки без выделения отдельного эталона. В случаях проведения автоматизированного периодического или непрерывного контроля трансформаторов тока предложено несколько методик (алгоритмов) определения расчетного тангенса, основанных на проведении множества измерений, без выделения отдельного эталонного ОК [3; 4]. В этих измерениях каждый ОК поочередно выступает в качестве эталонного для других проверяемых ОК одноименной фазы. Поскольку каждый ОК проходит измерения в паре с каждым, общее количество измерений значительно возрастает – пропорционально квадрату количества ОК.

К примеру, согласно методике, используемой на девяти подстанциях Донбасской энергосистемы и описанной Г.В. Шинкаренко, В.А Онищенко, О.А. Орнатский [3], при контроле *N* объектов на фазе, при определении текущего значения расчетного тангенса каждого ОК, вместо формул (4) и (5), используют следующее выражение:

$$\delta p_{i(k)} = -\frac{1}{N-1}\sum_{j\neq i}^{N}\Delta\delta_{ij(k)} + \delta_{i(0)}\,. \qquad (7)$$

Отличия алгоритмов обработки результатов без выделения отдельного эталона [3; 4] состоят только в значениях, взятых за базовые, от которых отсчитываются приращения. В методике [3] за базовое берется среднее всех значений тангенсов ОК при взятии на контроль, в [4] используется среднее всех расчетных значений в предыдущем измерении. В обеих методиках применяют усреднение измеренных значений тангенса дифференциального угла.

Анализ названных методик обработки результатов измерений без выделения отдельного эталонного ОК показал [5], что их отличительной особенностью является возможность влияния изменения тангенса потерь одного из ОК на результаты оценки тангенсов других ОК. Это влияние приводит к сложно прогнозируемым методическим погрешностям, которые затрудняют оценку действительного значения тангенса и могут вызывать ошибки при оценке состояния объектов контроля.

Появление хотя бы одного ОК с сильно ухудшающимися действительными параметрами приводит к снижению расчетных тангенсов потерь всех ОК, что маскирует появление других неблагополучных ОК с меньшими отклонениями и делает затруднительным выявление таких отклонений для определения развивающегося дефекта изоляции на ранних стадиях.

Для иллюстрации указанного влияния и возникающих погрешностей в [5] рассмотрена модельная ситуация, подобная возникающей при реальном контроле множества ОК, когда в результате старения изоляции одновременно постепенно растут тангенсы у нескольких объектов с разной скоростью. При достижении критических нормированных значений тангенсов у одного из ОК принимается решение о дополнительной проверке или выводе его из эксплуатации [1].

На рис. 2 показана идеализированная картина изменения действительных значений тангенсов изоляции 6 контролируемых ОК (начальные значения от 0,001 до 0,0015) в процессе эксплуатации с постоянной скоростью – от измерения к измерению (k – момент времени, индекс измерения). У ОК № 2 сильное изменение приводит к достижению на 20-м шаге контроля критически большого значения (0,005), у ОК № 3, 4 нарастания более слабые, у ОК № 1 плохо различимое нарастание (в 20 раз меньше, чем у № 2), у двух оставшихся изменения отсутствуют.

На рис. 3, 4 приведены графики изменения расчетных тангенсов, определенных, соответственно, по методикам СОУ [1] и методике с усреднением,

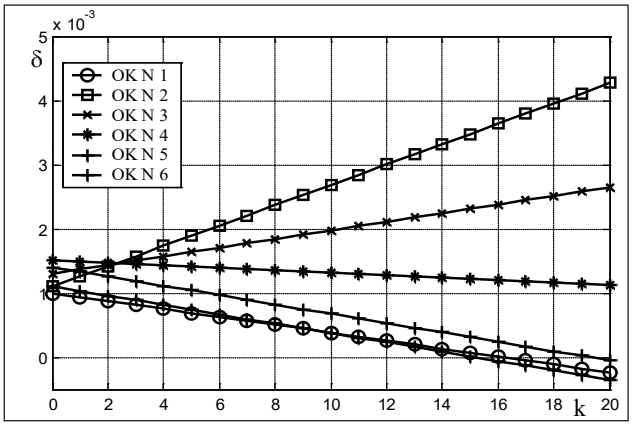


Рис. 4. Изменения расчетных значений тангенсов потерь изоляции ОК

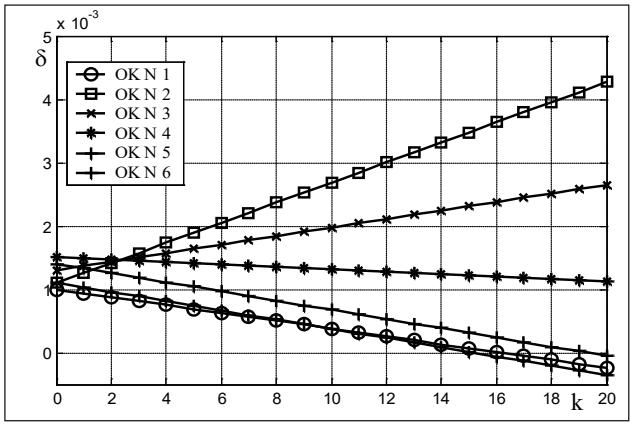


Рис. 5. Изменения расчетных значений тангенсов потерь ОК, определенных по усовершенствованной методике

описанной в [3], обладающей меньшей (для рассмотренной ситуации) погрешностью, чем [4]. При использовании методики 1 (рис. 3) в качестве эталонного принят ОК № 1 с незначительным, но не с самым малым изменением, что встречается на практике. Соответственно, расчетные значения тангенсов у контролируемых объектов меньше действительных (рис. 2) на значение прироста тангенса эталонного ОК. У ОК с неизменными действительными тангенсами будет фиксироваться их незначительное уменьшение (на такое же значение). Состояние эталонного ОК по этой методике нельзя оценить.

На рис. 3 также приведены расчетные тангенсы эталонного ОК № 1, определенные по методике, описанной в [3] (график обозначен 1а), которые показывают, что такая оценка в рассмотренной ситуации дает существенное занижение тангенса, такое же, как при использовании методики 2 (см. далее рис. 4).

Графики рис. 4 четко показывают ОК с сильным изменением тангенса, но расчетные значения тангенса существенно отличаются от действительных значений. Также легко определяется относительное состояние изоляции объектов контроля, но определить, насколько велики действительные значения тангенсов (что необходимо для выявления значений превышающих нормированные) и как быстро они нарастают, сложно. Распознать при таких погрешностях объект с малым нарастанием тангенса (начальные стадии развития дефектов) – трудновыполнимая задача. Реальные ситуации усложняются неравномерностью нарастания потерь, температурной зависимостью измеряемых параметров изоляции (разной даже для однотипных реальных ОК), невозможностью полностью отсеять внешние случайные и неслучайные влияния.

Методика СОУ [1] обладает легче прогнозируемой погрешностью (определяется состоянием эталонного ОК), и, учитывая, что в качестве эталонного выбирается объект в лучшем состоянии, погрешность этой методики будет меньше, чем у методик [3] и [4].

В итоге можно констатировать, что методики обработки без выделения отдельного эталона не дают преимуществ в точности определения результата, но требуют проведения существенно большего количества измерений (N_2 против N у методики 1). Погрешность указанных методик меньше при большем количестве контролируемых ОК и при меньшем суммарном изменении тангенсов (меньший рост значений действительных тангенсов, меньшее количество ОК с ухудшением состояния).

Усовершенствованная методика. Уменьшения погрешностей методик без выделения отдельного эталона можно достичь, следующим образом изменяя порядок расчета. Усреднение результатов измерений, проводимое в формуле (7) при определении расчетного тангенса, должно осуществляться не по всем ОК, а по выделенной меньшей группе объектов объемом N_m. Состав этой «опорной» группы определяется на предыдущем *(k–1)* временном шаге измерений путем выбора ОК с наименьшими приростами расчетного тангенса относительно начальных значений: $(\delta_{pj(k-1)}-\delta_{j(0)})$. При таком подборе из усреднения исключаются ОК, несущие потенциальную опасность большого искажения расчетных результатов, что уменьшает ожидаемую погрешность (суммарный прирост тангенсов «опорной» группы меньше общего прироста).

Таким образом, при контроле N объектов на фазе определяют текущее расчетное значение тангенса проверяемого ОК:

$$\delta p_{i(k)} = -\frac{1}{Nm-1}\sum_{j\neq i}^{Nm}\Delta\delta_{ij(k)} + \delta_{i(0)} = \frac{1}{Nm-1}\sum_{j\neq i}^{Nm}\left(-\partial\delta_{ij(k)} + \delta_{j(0)}\right), \quad (8)$$

если i-й ОК входит в выделенную группу, если нет, то в (8), вместо N_{m-1}, следует писать N_m.

Поскольку вероятность одновременного значительного ухудшения состояния у многих ОК мала, «опорная» группа может содержать на несколько объектов меньше общего количества ОК. Чем больше ОК входит в группу, тем реже может изменяться ее состав.

Для существенного уменьшения количества проводимых измерений на каждом временном шаге (от $\approx N^2$ до $\approx N$) можно определять тангенс дифференциального угла двух ОК в (8) не прямым измерением, а расчетным путем, используя измерения тангенса с выделением отдельного эталонного объекта:

$$\partial\delta_{ij(k)} = \partial\delta_{lj(k)} - \partial\delta_{li(k)},$$

где l – индекс выделенного эталонного объекта.

При таком подходе проверку результатов и отклонения неудачных предлагается выполнять путем контроля отклонений при статистической обработке результатов повторяющихся измерений с выделенным эталоном.

На рис. 5 приведены графики изменения расчетных тангенсов, определенных по формуле (8), предлагаемой методики для модельной ситуации описанной ранее. При расчете выбиралась «опорная» группа из 4 ОК с наименьшим приростом на текущем временном шаге, тем самым было исключено искажающее влияние 2 и 3 ОК на результаты оценки (изменения на ОК 1 и 4 продолжают

влиять, обусловливая погрешность). Видно, что расчетные тангенсы лучше воспроизводят значения и тенденции изменения действительных тангенсов, чем в методике [3]. Положительный момент, по сравнению с методикой [1], состоит в том, что контролируются все ОК, включая эталон.

Выводы. Описанная усовершенствованная методика определения расчетных значений тангенса с усреднением по выделенной «опорной» группе ОК позволяет уменьшить негативное влияние объектов с ухудшающимися характеристиками на оценку тангенсов других ОК, что является отличительной особенностью методик без выделения эталона, и снизить погрешность, сохраняя при этом возможность одновременного контроля всех ОК (что нельзя осуществить при стандартной методике с выделением эталона).

Использование расчетного способа определения тангенсов дифференциального угла двух ОК по результатам измерений с использованием выделенного эталона позволяет существенно снизить количество необходимых измерений (до значения, необходимого при традиционной методике с выделением эталона).

Список литературы:

1. СОУ-Н МПЕ 40.1.46.301:2006. Перевірка ізоляції трансформаторів струму 330-750 кВ під напругою: методичні вказівки. Київ: Мінпаливенерго, 2006. 27 с.
2. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. Москва: Энергоатомиздат, 1992. 240 с.
3. Шинкаренко Г.В., Онищенко В.А., Орнатский О.А. Технологии измерения параметров изоляции маслонаполненных трансформаторов тока 330–750 кВ под рабочим напряжением. Электрические сети и системы. 2012. № 3. С. 67–71.
4. Сахно А.А. Алгоритм измерения тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции трансформаторов тока и вводов 330–750 кВ при непрерывном контроле, под рабочим напряжением. Електротехніка та Електромеханіка. 2010. № 2. С. 54–55.
5. Беляев В.К., Паненко Е.Н. Определение диэлектрических параметров изоляции трансформаторов тока при множественных измерениях в системах контроля под рабочим напряжением. Електротехніка та Електромеханіка. 2016. № 5. С. 40–46.
6. Беляев В.К., Борщев П.И., Ободовский В.Д., Канивецкий Ю.В., Бехтев Г.В., Богданов С.Г., Масенко Д.А., Двойных В.П. Приборное обеспечение и опыт контроля изоляции конденсаторного типа под рабочим напряжением. Электрические сети и системы. 2012. № 4. С. 68–72.

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ІЗОЛЯЦІЇ ПІД ЧАС ВИМІРІВ У СИСТЕМАХ КОНТРОЛЮ ПІД РОБОЧОЮ НАПРУГОЮ

У статті розглянуто методики оброблення результатів вимірів тангенсу діелектричних утрат високовольтної ізоляції, що використовуються в системах контролю без виведення обладнання з експлуатації. Зіставлені методика з використанням призначення окремого еталонного об'єкта й методики, що не використовують призначення окремих еталонних об'єктів. Показано, що застосування методик без виділення окремого еталонного об'єкта може призводити до суттєвих ускладнень в оцінюванні результатів контролю ізоляції. Пропонуються вдосконалення методики оброблення, що зменшують похибки методик і трудомісткість вимірювань.

Ключові слова: *діагностика, високовольтна ізоляція, методика оброблення, похибка, тангенс кута діелектричних втрат.*

METHOD OF DETERMINING THE DIELECTRIC PARAMETERS OF INSULATION AT MEASUREMENTS BY MONITORING SYSTEM UNDER WORKING VOLTAGE

Features of the data processing procedures of multiple measurements of the dielectric loss tangent of the high-voltage insulation, which are based on the comparison method, were considered. Three procedures were compared: the one procedure uses an assignment of a particular standard object for comparison, and two procedures don't use assignments of the special standard objects. Improvements in processing techniques which reduce errors and reduce the amount of measurements are proposed. The study results are useful in monitoring and diagnostic of basic insulation of current transformers or high-voltage bushings.

Key words: *bushing, current transformer, diagnostic, data processing procedure, dielectric loss, high-voltage insulation, monitoring.*

УДК 621.311.13

Бунько В.Я.
Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут»

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ З ПЕРЕВАЖНО ІНДУКТИВНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

У статті проведено обґрунтування та аналіз визначення й дослідження показників якості електричної енергії системи електроспоживання. Дослідження базуються на використанні аналізатора якості електричної енергії AFLEX-6300. Дослідження проведено в реальному часі з використанням синхронізації з ПК. Показано та обґрунтовано залежності електричних параметрів мережі від реального часу, при якому переважає індуктивне навантаження. Наведено графічні залежності, які характеризують роботу електричної мережі й, відповідно, якість електричної енергії, що визначається основними показниками – відхиленням напруги та частоти.

Ключові слова: *показники, якість, електрична енергія, відхилення, напруга, частота, навантаження, мережа.*

Постановка проблеми. Забезпечення необхідної якості електроенергії для приймачів – це комплекс складних завдань, які розв'язуються під час проектування й експлуатації електропостачальних систем. Якість електроенергії значною мірою впливає на технологічний процес виробництва і якість продукції, на втрати електроенергії, на параметри самої електропередавальної системи (ЕПС) та її режиму роботи й залежить не тільки від енергосистеми як джерела живлення, а й від споживачів, тому що на сучасних підприємствах є значна кількість особливих електроприймачів, які негативно впливають на якість електроенергії [7, с. 99; 8, с. 264–265]. Наявність у системах електропостачання потужних дугових електропечей, регульованих вентильних перетворювачів та інших електроприймачів і споживачів з нелінійними вольт-амперними характеристиками та приймачів із різкозмінним навантаженням створює проблеми, пов'язані з їх електромагнітною сумісністю з ЕПС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Показники якості визначаються за стандартами та нормами. Розробка норм і стандартів є складною проблемою, ця робота проводиться постійно в багатьох країнах світу і в міжнародних галузевих організаціях. Останнім часом міжнародними організаціями прийнято низку нормативних документів, в основу яких покладено стандарти провідних країн світу. Так, Європейським комітетом нормалізації в галузі електротехніки в 1994 р. прийнято й розроблено багато стандартів, якими нормують показники якості електроенергії в різних мережах, зокрема й промислових, і визначають умови приєднання споживачів до мереж.

Допустиме відхилення напруги в Україні становить ±5%, а гранично допустиме її відхилення – ±10%. Допустиме відхилення частоти струму – ±0,2%, а гранично допустиме відхилення – ±0,4% [1, с. 21]. Із цього питання дослідження проводили В.М. Ванько, П.Г. Столярчук, В.Г. Кузнєцов, О.Г. Шполянський, Н.А. Яремчук, де основна увага зосереджена на дослідженні узагальнюючого показника якості енергії в електричних мережах і системах, контролю показників і наведена методика оцінювання якості електроенергії [2, с. 47; 3, с. 50].

Постановка завдання. Метою роботи є обґрунтування та аналіз визначення й дослідження параметрів електричної енергії та їх вплив на роботу інших споживачів системи електрозабезпечення при переважаючому реактивному навантаженні.

Виклад основного матеріалу дослідження. Передавання, розподіл, перетворення та споживання електричної енергії супроводжуються відхиленнями параметрів, які характеризують її за певними властивостями від первинних значень.

Сукупність властивостей електричної енергії, які обумовлюють її придатність для нормальної роботи

електроприймачів відповідно до їх призначення з розрахунковою працездатністю, є якістю електроенергії.

Тому успішне вирішення проблем, які пов'язані з електромагнітною сумісністю з ЕПС, забезпечує раціональну роботу як таких приймачів, так і всіх інших, приєднаних до тієї самої системи (освітлення, електродвигуни тощо).

Норми, що встановлені цим стандартом, є рівнями електромагнітної сумісності для кондуктивних електромагнітних збурень (перешкод) в ЕПС загального призначення [7, с. 100]. У разі дотримання цих норм забезпечується електромагнітна сумісність електричних мереж систем електропостачання загального призначення та електричних мереж споживачів (приймачів) електричної енергії. Норми є обов'язковими в усіх режимах роботи електропостачальних систем загального призначення, крім режимів, зумовлених:

– винятковими погодними умовами;

– непередбачуваними ситуаціями (пожежі, вибухи тощо);

– умовами, регламентованими державними органами управління, а також пов'язаними з ліквідацією наслідків, спричинених винятковими погодними умовами та непередбачуваними обставинами.

У разі невідповідності нормативних показників якості електроенергії (ПЯЕ) споживач має право вимагати від електропостачальних компаній відшкодування збитків, оскільки електроенергія відображає вимоги міжнародного стандарту ГОСТ 32144-2013, термінологічних стандартів ГОСТ 30372-95 і ДСТУ 3466-96 [1, с. 20; 5, с. 12; 6, с. 10].

Міждержавним ГОСТом 13109-97 установлено показники якості електричної енергії, які потребують постійного дослідження та визначення в системі електропостачання: усталене відхилення напруги δU_y; розмах зміни напруги δU_t; доза флікера P_t; коефіцієнт спотворення синусоїдної кривої напруги K_u; коефіцієнт n-ї гармонічного складника напруги $Ku_{(n)}$; коефіцієнт несиметрії напруг оберненої послідовності K_{2u}; коефіцієнт несиметрії напруг нульової послідовності K_{0u}; відхилення частоти Δf; тривалість провалу напруги Δt_n; імпульсна напруга $U_{імп}$; коефіцієнт тимчасової перенапруги $K_{пер}u$, а також під час визначення

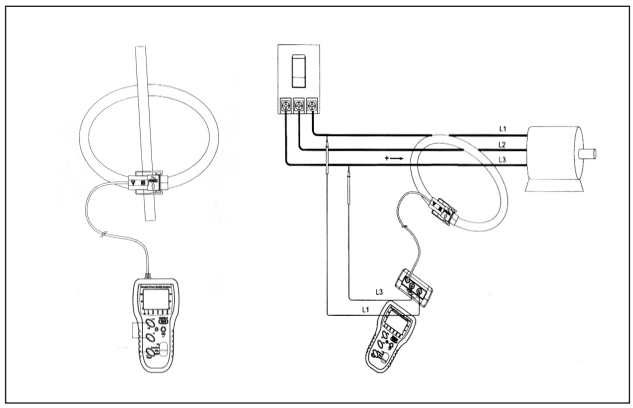


Рис. 1. Схема підключення аналізатора в мережу

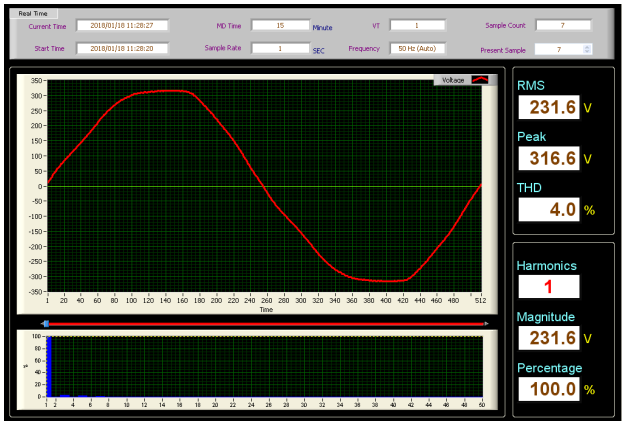


Рис. 2. Крива напруги при переважно індуктивному навантаженні

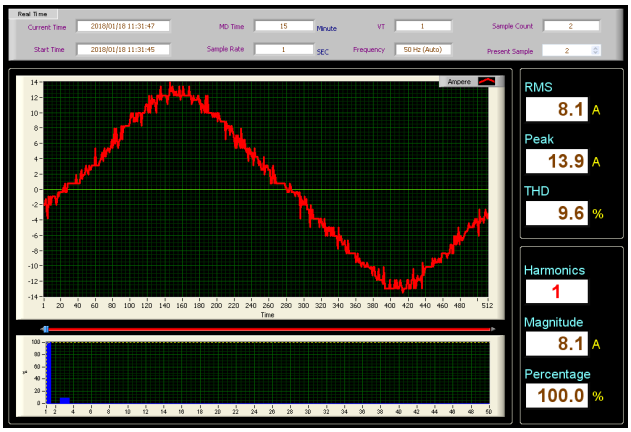


Рис. 3. Крива протікання струму залежно від напруги та реального часу

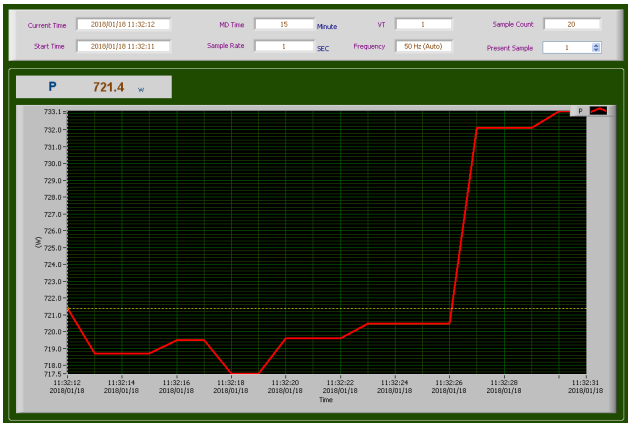


Рис. 4. Зміна активної потужності залежно від напруги мережі в часі

деяких показників якості електроенергії (ЯЕ) використовуються допоміжні параметри електроенергії: частота повторення змін напруги $F_{\delta Ut}$; інтервал між змінами напруги $\Delta t_{i,i+1}$; глибина провалу напруги δU_n; частота появи провалів напруги F_n; тривалість імпульсу з рівнем 0,5 від його амплітуди $\Delta t_{imn0,5}$; тривалість тимчасової перенапруги Δt_{nepU} [1, с. 11].

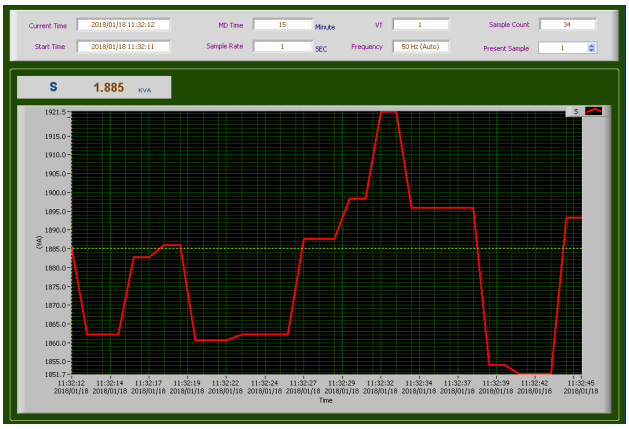


Рис. 5. Зміна повної потужності залежно від напруги мережі в часі

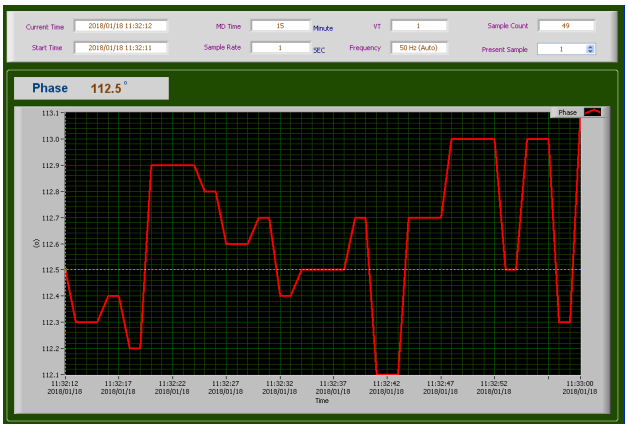


Рис. 6. Графік кута зсуву вектора напруги при переважно реактивному навантаженні

Таблиця 1

Матриця частини даних параметрів системи

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
4	Sample Rate (Sec) : 1									
5	Sample Count : 40									
6	MD Time (Minute) : 15									
7	VT : 1									
8	Func / Func_1 : 2 / 2 / NO / 1P									
9	Date/Time,V,A,W,VA,Phase,V Waveform,A Waveform									
10	2018/01/18 11:38:50,229.7,8.2,715.8,1883.5,112.3,77 93 413 701 1021 1309 1565 1821 2077 2333 2589 2781 2									
11	2018/01/18 11:38:51,229.7,8.2,715.8,1883.5,112.3,77 93 413 701 1021 1309 1565 1821 2077 2333 2589 2781 2									
12	2018/01/18 11:38:52,229.7,8.1,687.3,1860.6,111.3,93 173 413 765 1053 1309 1565 1821 2077 2333 2589 2845									
13	2018/01/18 11:38:53,229.7,8.1,687.3,1860.6,111.3,93 173 413 765 1053 1309 1565 1821 2077 2333 2589 2845									
14	2018/01/18 11:38:54,228.6,8.1,712.7,1851.7,112.7,79 175 415 735 1055 1311 1567 1823 2143 2335 2591 2847									
15	2018/01/18 11:38:55,228.6,8.1,712.7,1851.7,112.7,79 175 415 735 1055 1311 1567 1823 2143 2335 2591 2847									
16	2018/01/18 11:38:56,228.7,8.1,715.1,1852.5,112.4,74 170 410 730 1050 1306 1626 1818 2170 2330 2586 2810									
17	2018/01/18 11:38:57,228.7,8.1,715.1,1852.5,112.4,74 170 410 730 1050 1306 1626 1818 2170 2330 2586 2810									
18	2018/01/18 11:38:58,228.7,8.1,715.1,1852.5,112.4,74 170 410 730 1050 1306 1626 1818 2170 2330 2586 2810									
19	2018/01/18 11:38:59,228.2,8.0,715.0,1825.6,112.5,80 96 416 736 992 1312 1568 1856 2080 2336 2528 2784 29									
20	2018/01/18 11:39:00,228.2,8.0,715.0,1825.6,112.5,80 96 416 736 992 1312 1568 1856 2080 2336 2528 2784 29									
21	2018/01/18 11:39:01,229.9,8.2,731.0,1885.2,112.8,75 187 411 731 1051 1307 1659 1883 2139 2363 2587 2843									
22	2018/01/18 11:39:02,229.9,8.2,731.0,1885.2,112.8,75 187 411 731 1051 1307 1659 1883 2139 2363 2587 2843									
23	2018/01/18 11:39:03,230.3,8.2,727.6,1888.5,112.5,77 173 413 733 1053 1309 1565 1821 2077 2333 2525 2813									
24	2018/01/18 11:39:04,230.3,8.2,727.6,1888.5,112.5,77 173 413 733 1053 1309 1565 1821 2077 2333 2525 2813									
25	2018/01/18 11:39:05,230.3,8.2,727.6,1888.5,112.5,77 173 413 733 1053 1309 1565 1821 2077 2333 2525 2813									
26	2018/01/18 11:39:06,229.0,8.1,711.2,1854.9,112.4,80 176 416 736 1024 1312 1568 1824 2080 2336 2528 2816									
27	2018/01/18 11:39:07,229.0,8.1,711.2,1854.9,112.4,80 176 416 736 1024 1312 1568 1824 2080 2336 2528 2816									
28	2018/01/18 11:39:08,228.0,8.0,691.7,1824.0,112.1,78 94 414 734 1054 1310 1534 1790 2014 2302 2526 2782 2									

Відхилення напруги характеризується показником усталеного відхилення напруги з такими нормами:

– нормально допустимі та гранично допустимі значення усталеного відхилення напруги δU_y на затискачах приймачів електроенергії рівні, відповідно, ±5 і ±10% від номінальної напруги електричної мережі [7, с. 100–101];

– нормально допустимі та гранично допустимі значення усталеного відхилення напруги в точках загального приєднання споживачів електроенергії до електричних мереж напругою 0,38кВ і більше повинні бути встановлені в договорах на користування електроенергією між електропостачальною організацією та споживачем електроенергії з урахуванням необхідності виконання норм цього стандарту на затискачах приймачів електроенергії [4, с. 95];

– відхилення частоти напруги змінного струму в електричних мережах характеризується показником відхилення частоти з такими нормами: нормально допустимі та гранично допустимі значення відхилення частоти Δf_y рівні, відповідно, ±0,2 Гц і ±0,4 Гц.

Оцінювання відповідності показників якості електроенергії нормам здійснюється за час розрахункового періоду, який дорівнює 24 год., за винятком тривалості провалу напруги, імпульсу напруги та коефіцієнта тимчасової перенапруги.

Для визначення відхилення частоти необхідно здійснити її вимірювання. Для кожного *і-го* спостереження за встановлений період часу проводиться вимірювання дійсного значення частоти (Гц), а потім розраховується усереднене значення f_y (Гц) як результат усереднення N спостережень f_i за інтервал часу, що дорівнює 20с, за формулою:

$$\Delta f_y = \frac{\sum_{i=1}^{N} f_i}{N}.$$

Спостережень має бути не менше ніж 15.

Значення відхилення частоти Δf (Гц) розраховуємо за формулою:

$$\Delta f_y = f_y - f_{\text{ном}},$$

де f_y – усереднене значення частоти за інтервал часу 20 с, Гц;

$f_{\text{ном}}$ – номінальне значення частоти, Гц.

Значення усередненої напруги U_y (В, кВ) як результат усереднення N спостережень напруг $U_{(1)i}$ та $U_{1(1)i}$ за інтервал часу 1 хв. визначаємо за формулою:

$$U_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} U_i^2}{N}},$$

де U_i – значення напруги $U_{(1)i}$ та $U_{1(1)i}$ в *і*-му спостереженні, В, кВ.

Спостережень за 1 хв. проводимо не менше ніж 18.

Значення усталеного відхилення напруги у відсотках знаходимо за формулою:

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100\%,$$

де $U_{ном}$ – номінальна фазна (міжфазна) напруга, В, кВ. Якість електричної енергії за усталеним відхиленням напруги в точці загального приєднання до електричної мережі вважається такою, що відповідає вимогам стандарту, якщо всі значення усталеного відхилення напруги, що виміряні протягом 24 год., знаходяться в інтервалі, обмеженому гранично допустимими значеннями, а не менше ніж 95% вимірювань за цей період, які знаходяться в інтервалі, обмеженому нормально допустимими значеннями.

Додатково допускається визначати відповідність нормам стандарту за сумарною тривалістю виходу виміряних значень цього показника за межі нормально та гранично допустимих відхилень. Якість електричної енергії за відхиленням напруги вважається такою, що відповідає вимогам, якщо сумарна тривалість часу виходу за межі нормально допустимих значень становить не більше ніж 5% від установленого періоду часу, тобто 1 год. 12 хв., а за межі гранично допустимих значень – 0%.

Для визначення напруги за допомогою аналізатора необхідно зробити порівняння реальної кривої напруги з ідеальною. Оскільки ідеальна крива напруги у вигляді синусоїди нам відома, то реальна або дійсна крива синусоїди напруги при цьому дослідженні, де використовується переважно індуктивне навантаження, буде мати такий вигляд, який зображено на рис. 2.

Як видно з графіка, ця синусоїдальна крива напруги дещо спотворена, оскільки напруга в мережі становить 231,6 В, яка перевищує допустимі значення номінальної напруги відповідно до показників якості електричної енергії (±5%).

Відповідно зі зміною напруги в системі, буде змінюватись і струм навантаження.

Графіки потужностей матимуть такий вигляд, як зображено на рис. 4 та рис. 5.

Варто зауважити, що, відповідно до даних, отриманих під час дослідження, частота не змінювалася протягом усього періоду й дорівнювала *f=50Гц=const.*

Оскільки навантаження переважно реактивного характеру, то, відповідно, кут зсуву вектора напруги становить 112,5о електричних градусів.

Під час дослідження за допомогою програми Excel складено матрицю даних параметрів мережі та параметрів споживача електричної енергії.

Висновки. Отже, як видно з проведеного дослідження, напруга електричної мережі змінюється в часі, відповідно, змінюються всі параметри електричної системи мережа-споживач. Варто зазначити, що в разі відхилення напруги на ±5% нормативні показники знаходяться в діапазоні 209÷231В. Проте в деяких випадках під час декількох спостережень такий показник відрізняється від цих параметрів, а тому необхідно зауважити, що параметри електричної енергії постійно змінюються залежно від навантаження, а це, у свою чергу, впливає на показники якості електричної системи загалом.

Список літератури:

1. ГОСТ 13109–97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Держстандарт України. Київ, 1999. 32 с.
2. Кузнєцов В.Г., Шполянський О.Г., Яремчук Н.А. Узагальнений показник якості енергії в електричних мережах і системах. Технічна електродинаміка. 2011. № 3. С. 46–52.
3. Ванько В.М., Столярчук П.Г. Проблеми контролю якості електроенергії в електричних мережах. Вимірювальна техніка та метрологія. 2001. № 58. С. 47–56.
4. Бунько В.Я. Підвищення параметрів електричної енергії в мережах 0,4 кВ на основі оптимальної компенсації реактивної потужності. Електромеханічні та енергетичні системи. Методи моделювання та оптимізації: збірник наукових праць XV Міжнар. наук.-техн. конф. (Кременчук, 11–12 квітня 2017 р.). Кременчук, 2017. С. 95–96.
5. ГОСТ 21128–83 Системы энергоснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения до 1000 В.
6. ГОСТ 30372–95 Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения.
7. Бунько В.Я. Питання якості електричної енергії в розподільних пристроях систем електропостачання. Молодий вчений. 2016. № 1 (28). Ч. 3. С. 99–103.
8. Бунько В.Я. Розробка моделі активного фільтра вищих гармонік для забезпечення показників якості електричної енергії / за ред. С.М. Ніколаєнко. Київ: Національний університет біоресурсів і природокористування України, 2016. Вип. 240. Ч. 1. С. 264–271.

АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ С ПРЕИМУЩЕСТВЕННО ИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ

В статье проведено обоснование и анализ определения и исследования показателей качества электрической энергии системы электроснабжения. Исследования базируются на использовании анализатора качества электроэнергии AFLEX-6300. Исследования проведены в реальном времени с использованием синхронизации с ПК. Показано и обосновано зависимости электрических параметров сети от реального времени, при котором преобладает индуктивная нагрузка. Приведены графические зависимости, характеризующие работу электрической сети и, соответственно, качество электрической энергии, что определяется основным показателем – отклонением напряжения и частоты.

Ключевые слова: *показатели, качество, электрическая энергия, отклонения, напряжение, частота, нагрузка, сеть.*

ANALYSIS OF RESEARCH AND DETERMINATION OF INDICATORS OF ELECTRIC ENERGY QUALITY WITH PRIORLY INDUCTIVE LOAD

The article substantiates and analyzes the determination and study of the electrical energy quality indicators of the power supply system. The conducted studies are based on the use of the AFLEX-6300 power quality analyzer. These studies were carried out in real time using synchronization with a PC. The paper shows and justifies the dependence of the electrical network parameters on the real time, in which the inductive load predominates. Graphic dependencies describing the operation of the electrical network and, accordingly, the quality of electrical energy, are given, is determined by the main indicators – voltage and frequency deviation.

Key words: *indicators, quality, electrical energy, deviations, voltage, frequency, load, network.*

УДК 621.327.534:635.64

Велит І.А.
Полтавська державна аграрна академія

ВПЛИВ СКЛАДУ АМАЛЬГАМИ НАТРІЙ-ЦЕЗІЙ-РТУТЬ НА СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАТРІЄВИХ ЛАМП ВИСОКОГО ТИСКУ ДЛЯ УМОВ ТЕПЛИЧНОГО ГОСПОДАРСТВА

У статті подано результати досліджень потрійної системи натрій-цезій-ртуть амальгами натрієвих ламп високого тиску. Установлено температури плавлення амальгам. Розраховано й виміряно тиск пар компонентів. Проаналізовано ріст рослин при додатковому освітленні натрієвими лампами високого тиску з різним складом амальгами.

Ключові слова: *амальгама, цезій, натрієві лампи високого тиску, рослини.*

Постановка проблеми. Сучасне суспільство вимагає від сільгоспвиробників збільшення виробництва овочів у зимових умовах. Однак вирішення цього дуже важливого завдання полягає у використанні спеціальних енергоефективних джерел світла для вирощування овочів в умовах закритого ґрунту. В Україні такі джерела не випускаються, унаслідок чого стримується вирішення завдання соціальної та економічної ваги.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із напрямів підвищення врожайності овочів при зниженні енерговитрат в умовах закритого ґрунту є застосування ефективного опромінення рослин штучним світлом. Енергетичну ефективність опромінювальних систем для рослинництва можна досягти використанням високоефективних джерел світла зі спектральним складом випромінювання, який сприятливо впливає на біологічні процеси в рослинах. Натрієві ламп високого тиску є одним із найефективніших джерел світла. Основним недоліком цих ламп є те, що в спектрі суттєво не вистачає синього та червоного випромінювання, що є головним недоліком цих ламп. Регулювання спектрального складу випромінювання натрієвих ламп можливе за рахунок зміни тиску парів натрію: при збільшенні тиску парів натрію має місце самообертання та розширення резонансних ліній натрію й поліпшення розподілу випромінювання по зонах, але при цьому значно зменшується світлова віддача (до 20–15%) [1; 2; 3]. Значний інтерес становить поліпшення спектрального випромінювання НЛВД у такий спосіб, як уведення в розряд різних добавок. Більшість публікацій, присвячених добавкам, є патентною документацією [4] на можливі добавки і статтями про дослідження термодинамічних властивостей складних амальгам [5]. Усі основні метали-добавки, які випробували у НЛВТ [6], умовно можна розподілити на основні групи: кадмій, цинк; індій, галій, талій; рідкоземельні метали – ітрій, самарій; лужні метали – калій, рубідій, цезій.

Існує кілька патентів [7; 8], згідно з якими пропонується використовувати добавки – лужні метали (K, Rb, Cs). Невеликі добавки лужних металів призводять до значних змін у спектрі лампи: з'являються лінії добавок у червоній ділянці спектру, збільшуються безперервний фон і ширина самообертання резонансних ліній натрію.

При серійному виробництві натрієвих ламп високого тиску ДНаТ400 джерелом випромінювання є амальгама натрію з умістом натрію (25±1) ваг. %. Така амальгама характеризується точкою плавлення 60–63°С. При температурах нижче 34°С із такої амальгами виділяється металоїд Na_3Hg. Уведення третього компонента, цезію, у натрієву амальгаму призводить до зміни температур плавлення, які можуть змінюватися в широких межах залежно від співвідношення в сплавах натрію й цезію.

Постановка проблеми. Мета статті – дослідження складу амальгам натрій-цезій-ртуть для НЛВТ з метою отримання іншого спектрального складу випромінювання, що значно збільшує сферу використання ламп.

Виклад основного матеріалу дослідження. У роботі досліджені потрійні сплави системи натрій-цезій-ртуть для ізоконцентратів із постійним умістом ртуті 0,2 м. д. Зразки для виміру готувалися безпосереднім змішуванням компонентів в ампулах у боксі, в атмосфері очищеного й осушеного аргону. Після заповнення металами ампули вакуумувалися та запаювалися. Сплави гомогенізували в осередках, у печі при температурах, вищих за температуру плавлення натрію.

Дослідження світлових і спектральних характеристик проводили з натрієвими лампами потужністю 400 Вт, що мають такі геометричні розміри розрядної трубки: $d_{внутр.}$=7 мм, $d_{нар.}$=9 мм, l труб.=11,3 мм.

Розрядна трубка виконана з полікристалічного окису алюмінію. Амальгами системи натрій-цезій-ртуть готувалися прямою сплавкою компонентів у боксі з інертною атмосферою, а потім використовувалися для заповнення під вакуумом тонкої ніобієвої трубки. Зразки амальгами захищені від окислювання. Дозування амальгами здійснюється через ніобієвий штенгель розрядної трубки безпосередньо перед відкачкою трубки. Надалі лампа проходила весь технологічний цикл виготовлення. Готові лампи піддавалися тренуванню й іспитам.

Вимір світлової віддачі експериментальних зразків проводився у світломірній кулі діаметром 1,5 м. Приймач – селеновий фотоелемент із корегуючим і нейтральними фільтрами. Еталон – натрієва лампа високого тиску. Для запису спектральних характеристик використовувався спектрофотометр ИСП-51.

Тиск пару компонентів у потрійній амальгамній системі Na-Cs-Hg узяті нами з роботи [1],

Таблиця 1

Світлові й електричні характеристики ламп ДНаТ400, заповнених сплавами системи Na-Cs-Hg

№№ з/п	Na		Cs		Hg		Uм.,В	Uл.,В	Iл., А	Рл., Вт	Ф, лм	Н,лм/Вт
	Ваг.	Ат.	Ваг.	Ат.	Ваг.	Ат.						
	%											
1	28,6	77	6,4	3	64,9	20	220	120	4,8	380	23940	63
2	28,9	75	10,4	5	62,7	20	220	120	4,9	380	26220	69
3	25,4	73	14,6	7	62,8	20	220	123	5,1	380	24320	64
4	23,1	70	19,1	10	61,0	20	220	124	5,2	380	22800	60

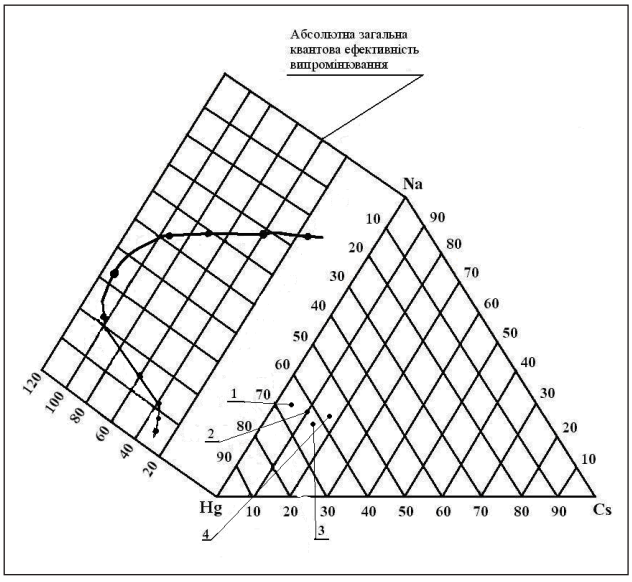


Рис. 1. Залежність абсолютної квантової ефективності випромінювання в системі Na-Hg від умісту натрію й розташування обраних амальгам на концентраційному трикутнику (1-Na-28,6 ваг. %, Cs-6,4 ваг. %, Hg-65 ваг. %; 2-Na-29 ваг. %, Cs-10,4 ваг. %, Hg-62,7 ваг. %; 3-Na-22,6 ваг. %, Cs-14,6 ваг. %, Hg-62,8 ваг. %; 4-Na-23,1 ваг. %, Cs-19,1 ваг. %, Hg-57,8 ваг. %)

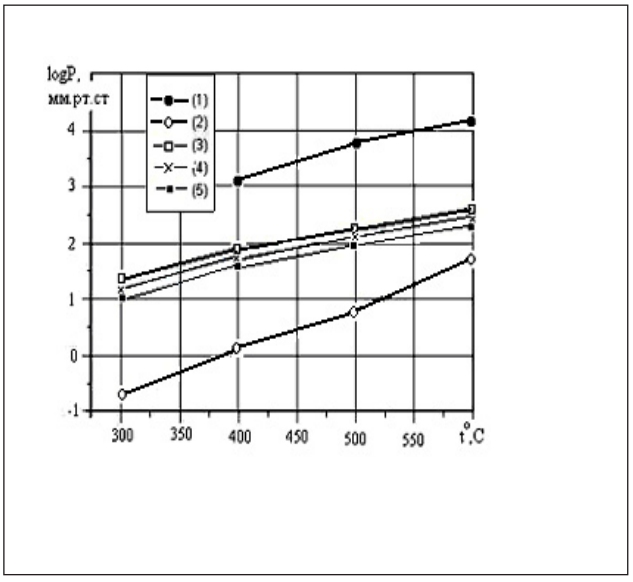


Рис. 2. Залежність тиску парів (Р) від температури (t) для сплавів із різним вмістом компонентів: 1 – Hg; 2 – (Na-78ат.%, Hg-22ат.%); 3 – (Na-30 ат.%, Cs-50 ат.%, Hg-20ат.%); 4 – (Na-50 ат.%, Cs-30ат.%, Hg-20 ат.%); 5 – (Na-60 ат.%, Cs-20ат.%, Hg-20 ат.%)

де дослідження термодинамічних властивостей системи Na-Cs-Hg робили методом виміру тиску насиченої пари ртуті (ізотеніскопний). $NaNO_3$-KNO_3-$LiNO_3$, температура плавлення якої 110°С.

Вибір складу амальгам здійснювався на підставі відомих даних про квантову ефективність випромінювання натрій-ртутних пар під дією випромінювання ртуті (253.7 нм) [2].

Відповідно до цих даних, вибирали склади амальгам, у яких уміст ртуті залишався постійним і рівним 40 ваг. %, а відношення концентрацій натрію і цезію мінялося в широких межах. На рис. 1 приведені крапки на концентраційному трикутнику, що відповідають складу обраним амальгам для іспитів у лампах ДНаТ400, і приведені значення абсолютної квантової ефективності для бінарної системи натрій-ртуть.

У результаті дослідження фізико-хімічних властивостей системи Na-Cs-Hg обрано найефективніший склад амальгам. Установлено, що тиск парів компонентів є визначальним параметром для світлових і спектральних характеристик розрядних ламп високого тиску в інтервалі температур від 250 до 530°С при постійному вмісті в сплавах ртуті і співвідношенні в сплавах натрію й цезію 4:1. Розраховано тиски насичених парів для різних температур і зіставлені з тисками парів у бінарній системі Na-Hg (рис. 2).

Обрано склад амальгами розрядної трубки, в якій співвідношення концентрацій натрію і ртуті близьке до відповідного співвідношення в стандартній натрієвій лампі, а добавки цезію змінюються в межах від 5 до 10 ат. %. Виготовлено лампи ДНаТ400 з добавками Na-Cs-Hg, а також проведено їх промислові випробування (таблиця 1).

На рис. 3 наведено залежність характеристик потоку випромінювання пальника ламп із міжелектродною відстанню 8,5 см і різними добавками від питомої потужності (P_1). Результати досліджень свідчать, що Фе в лампах із добавкою Cs(5%) вищий, ніж у лампах із добавками Cs(5%)-K(1%). Світлова ефективність (η) при збільшенні P1 ламп зростає, причому для натрій-ртутних ламп при P_1 (25–60 Вт/см) η є вищою, ніж для ламп із добавками Cs, K, Rb, а при P1, більшій 60÷65Вт/см, η вища для ламп із наповненням Na-Cs-Hg і Na-Cs-K-Hg і становить 29÷2%.

Установлено, що зі збільшенням P_1 і температури холодної зони (tхз) зростання Фе випромінювання відбувається переважно за рахунок зростання його червоної та інфрачервоної ділянок. Відповідно до рис. 4, де показано залежність потоку випромінювання і світлового потоків (Ф) від питомої потужності й температури холодної зони для ламп із наповненням Na-Cs-Hg і Na-Cs-K-Hg, кращі показники мають лампи з добавками цезію. Отже, для світлокультури рослин при P_1>58÷60 Вт/см ефективнішими є натрієві лампи високого тиску з добавками цезію.

Досліджено спектральний склад випромінювання ламп зі складом амальгами натрію й добавками цезію (Hg-20%, Na-75%, Cs-5%). Спектральний склад випромінювання має меншу, ніж стандартні натрієві лампи високого тиску, інтен-

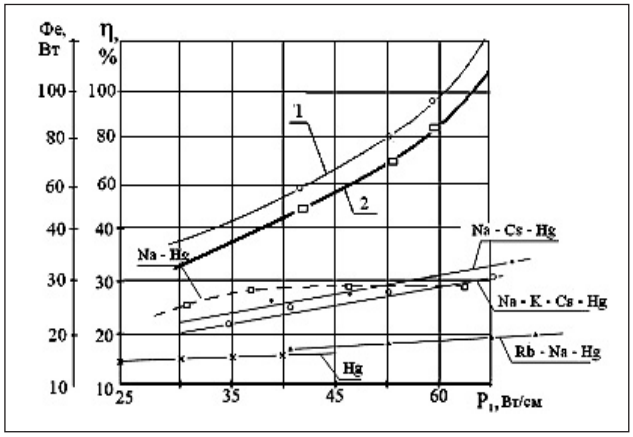


Рис. 3. Залежність енергетичного потоку випромінювання (Фе) з різними добавками (1-Cs(5%); 2-K(1%), Cs(5%)) та світлової ефективності (η) ламп із різним наповненням (□ – Na-Hg, o – Na-K-Cs-Hg, • – Na-Cs-Hg, × – Hg, ▲ – Rb-Na-Hg) від питомої потужності ламп (P_1)

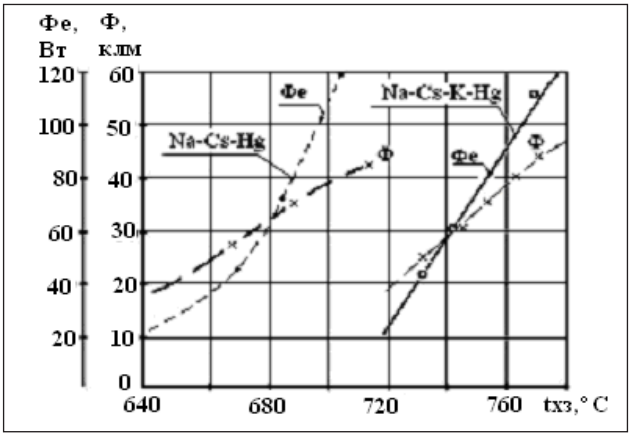


Рис. 4. Залежність потоку випромінювання (Фе) і світлового потоків (Ф) випромінювання натрієвих ламп потужністю 400 Вт із добавками цезію та калію від температури холодної зони $t_{хз}$

сивність випромінювання в ділянці 500–600 нм і значно більшу в червоній (600–700 нм) і ближній інфрачервоній ділянках (рис. 5).

Досліджено вирощування рослин на перших етапах розвитку при опроміненні світлом із різним спектральним складом. Установлено відмінності в реакціях рослин томатів сортів «Де Барао» і «Гібрид Тарасенка» на накопичення пігментів і їх співвідношення. Уміст хлорофілу й каротиноїдів у сортах томатів «Де Барао» і «Гібрид Тарасенка» при опроміненні натрієвою лампою високого тиску з добавками цезію є вищим, ніж при опроміненні ДРЛФ400 і ДНаТ400.

Проаналізувавши ріст рослин при додатковому освітленні натрієвими лампами високого тиску з добавками цезію різного складу амальгам, подамо залежність ефективності освітлення рослин від складу амальгам (рис. 6).

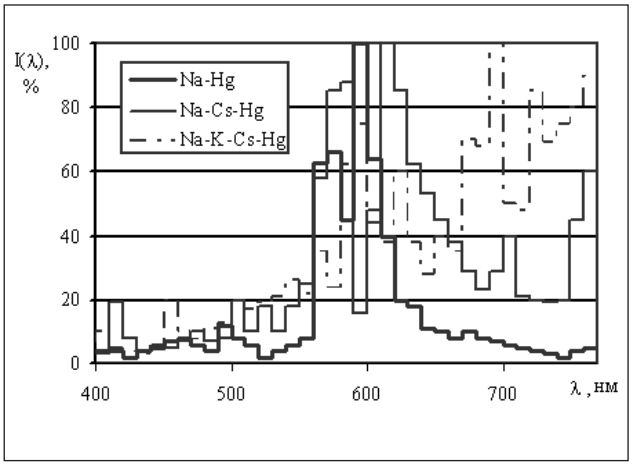


Рис. 5. Розподіл відносної спектральної енергії випромінювання ламп із різним наповненням: Na-Hg, Na-Cs-Hg, Na-K-Cs-Hg

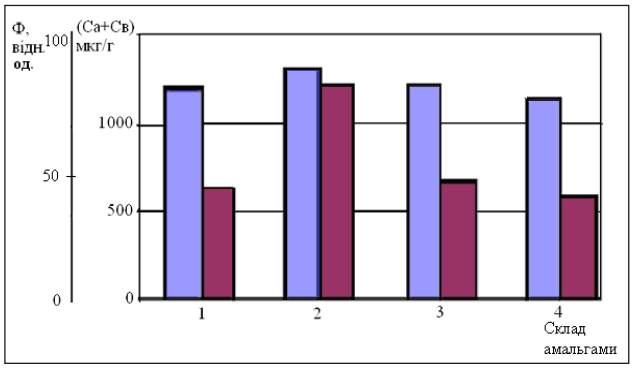


Рис. 6. Уміст пігментів у листках рослин томатів при опроміненні натрієвими лампами з різним наповненням: 1 – (20ат%Hg, 77ат.%Na, 3ат.%Cs20); 2 – (20ат%Hg, 75ат.%Na, 5ат.%Cs); 3 – (20ат%Hg, 73ат.%Na, 7ат.%Cs); 4 – (20ат%Hg, 70ат.%Na, 10ат.%Cs); □А – світловий потік випромінювання; ■Б – сумарний уміст пігментів (Са+Св)

Вирощування рослин на перших етапах розвитку показало, додаткове освітлення високоінтенсивними розрядними лампами з добавками цезію, які мають склад амальгами (20ат%Hg, 75ат.%Na, 5ат.%Cs), найбільш ефективне.

Висновки. З огляду на викладене вище, можемо підсумувати таке:

1. На основі проведених досліджень установлено оптимальні параметри ламп, які можна використовувати для світлокультури рослин: зовнішній діаметр розрядної трубки з полікристалічного окису алюмінію – 8,9 мм, міжелектродна відстань – 85 мм, склад амальгами натрію з добавками цезію (Hg-20%, Na-75%, Cs-5%), з Хе при холодному тиску 20 мм рт. ст., в інтервалах питомих потужностей розрядного стовпа – 55–65 Вт/см і к. к. д. ФАР – 29–32%. Доведено, що зміна складу амальгами призводить до зменшення тиску ртуті. Негативні відхилення активності ртуті від прямої ідеального поводження свідчать про максимальне зв'язування цього компонента розплаву в з'єднанні.

Дослідження спектрів випромінювання при інших складах амальгами натрій-цезій-ртуть показало, що інтенсивність ліній у ділянці 620–700 нм слабко залежить від зміни вмісту цезію в сплавах у межах вивчених концентрацій.

2. Проведене фізико-хімічне дослідження властивостей потрійної системи натрій-цезій-ртуть дало змогу встановити температури плавлення амальгам, розрахувати й виміряти тиск пар компонентів. Показано, що тиск пари ртуті й натрію підвищується порівняно з бінарною системою натрій-ртуть, що сприятливо впливає на спектральні характеристики натрієвих ламп високого тиску. Температури плавлення досліджених амальгам не перевищують 102 °С, тому амальгами можуть дозуватися в розрядну трубку в рідкому стані.

3. На підставі даних про абсолютну ефективність випромінювання розряду бінарної системи натрій-ртуть і даних про фізико-хімічні властивості потрійної системи обрані оптимальні склади амальгам, у яких співвідношення концентрацій натрію і ртуті близько до стандартної натрієвої лампи, а добавки цезію змінюються в межах (5–10 ат. %, 6,6–13,6 ваг. %).

Спектральні характеристики ламп із досліджуваною амальгамою вказують на збільшення потужності випромінювання в червоній ділянці спектра, що дає можливість використовувати їх в умовах тепличного господарства.

Список літератури:

1. Айзенберг Ю.Б. Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю.Б. Айзенберга. Москва: Энегроатомиздат, 1995. 528 с.
2. Рохлин Г.Н. Разрядные источники света. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Энергоатомиздат, 1991. 720 с.
3. Петренко Ю.П., Федюнькин Д.Б., Бахнова К.В. Совершенствование источников излучения для растениеводства. Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1994. № 7. С. 23–26.
4. Сайто Н., Таминага Д., Цуцуми С. НЛВД с улучшенной цветностью излучения. Заявка № 63–2243 (Япония). Заявл. 20.06.1986. № 61-145333; опубл.07.01.88. МКИ HOI J61/22.
5. Goodman D. Thermodynamic models of multicomponent sodium alloys . High Temp. Lamp Chem. Proc. Symp.Sci. and Technol., Toronto. 1985. P. 193–203.
6. Литвинов В.С., Петренко Н.П. Тенденции развития натриевых ламп с улучшающими спектральными добавками. Доп. в информэлектро. № 229-ЭТ. 15.11.1989.
7. Натриевая лампа: пат. № 51-39473 (Япония). Кавасима Кодзо. заявл. 30.11.1971. № 45-96456; опубл. 28.10.1976. МКИ HOI J 61/22.
8. Харуо К., Ясабуро Т., Ясуо Х. Натриевая лампа высокого давления. Заявка № 60-107256 (Япония). Заявл. 15.11.1983, № 58-215216; опубл. 12.06.1985. МКИ HOI J 61/56.

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА АМАЛЬГАМЫ НАТРИЙ-ЦЕЗИЙ-РТУТЬ НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАТРИЕВЫХ ЛАМП ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ УСЛОВИЙ ТЕПЛИЧНОГО ХОЗЯЙСТВА

В статье приведены результаты исследований тройной системы натрий-цезий-ртуть амальгамы натриевых ламп высокого давления. Установлены температуры плавления амальгам. Рассчитано и измерено давление паров компонентов. Проанализирован рост растений при дополнительном освещении натриевыми лампами высокого давления с различным составом амальгамы.

Ключевые слова: *амальгама, цезий, натриевые лампы высокого давления, растения.*

THE INFLUENCE OF THE COMPOSITION OF SODUIM-CESIUM-MERCURY AMALGAM ON SPECTRAL CHARACTERICTICS OF HIGH PRESSURE SODIUM LAMPS FOR GREENHOUSES

The article deals with the results of the research of the triple system of sodium-cesium-mercury amalgam of high pressure sodium lamps. The melting temperatures of amalgams have been set. The vapour pressure of components has been calculated and measured. The article represents the analysis of the growth of plants under additional lighting with high pressure sodium lamps with different amalgam composition.

Key words: *amalgam, cesium, high pressure sodium lamps, plants.*

УДК 662.611.2:662,613,5

Максимов М.В.
Одесский национальный политехнический университет

Брунеткин А.И.
Одесский национальный политехнический университет

Максименко А.А.
Одесский национальный политехнический университет

Лысюк О.В.
Одесский национальный политехнический университет

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА СМЕСИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩИХ ГАЗОВ СЖИГАЕМОГО ТОПЛИВА

Установлена причина, затрудняющая использование несертифицированных видов топлива – неизвестность и переменность их состава. Предложены математическая модель и метод, позволяющие в процессе сжигания такого топлива определить его состав и обеспечить оптимальные параметры процесса горения. Определены ограничения, накладываемые моделью на используемый метод.

Ключевые слова: *углеводородное топливо, определения условной формулы, продукты сгорания, математическая модель.*

Постановка проблемы. Тенденции освоения промышленностью топлив с непостоянной теплотворной способностью, таких как газы при добыче нефти, в т. ч. сланцевый и рудничный, продукты пиролиза, сбраживание органических остатков, биотопливо, доменные газы, газы брожения мусора и пр. вызывают интерес к решению задачи по созданию модели и метода, обеспечивающих эффективное сжигание таких газов. Особое внимание следует обратить на экологический аспект продуктов сгорания, так как в результате некачественного и неполного сжигания таких топлив образуются и сбрасываются в окружающую среду большое количество вредных органических соединений.

При использовании в качестве топлива для энергоустановок сертифицированных природных энергоносителей самым важным показателем является постоянство их состава и, как следствие, постоянство теплотворной способности, что позволяет при режимной наладке энергетических установок обеспечить эффективное сжигание топлива при минимизации вредных выбросов для соблюдения экологических норм. Интерес представляет работа [1], где исследуются причины вредных выбросов при эксплуатации дизельного двигателя на смесях нефтяного и биодизельного топлива. Анализ проводился для выбросов органических соединений, которые классифицируются по охране окружающей среды США как токсичные вещества. Другая работа [2] иллюстрирует результаты исследования по выбросу тяжелых углеводородов при работе дизельного двигателя.

Постановка задачи. Управление сжиганием горючего неизвестной теплотворной способности может быть обеспечено экстремальным регулятором. При заданном расходе горючего путем изменения расхода окислителя (воздуха) обеспечивается стехиометрическое соотношение, что соответствует максимальной температуре продуктов сгорания. Максимальная температура достигается при коэффициенте избытка воздуха , который равен 1,0.

Альтернативой такому методу может служить определение состава газа неизвестной теплотворной способности с помощью газоанализатора.

Такой метод обладает рядом недостатков: ресурсоемкий, громоздкий, имеет большое время

инерции и, как следствие, запаздывание. Поэтому такой метод трудно интегрируется в автоматизированную систему управления. Для газоанализаторов требуются данные по перечню газов в смеси. Применение газоаналитических приборов усложняется тем, что такие газы содержат в своем составе нежелательные компоненты, которые приводят к ускоренному износу первичных приборов и выходу их из строя. Стоимость системы растет с увеличением этого перечня.

Целью данной статьи является разработка математической модели по определению состава смеси углеводородных кислородсодержащих газов в модельном представлении ее условной формулой с исходными данными в виде измеренных технологических параметров: температура продуктов сгорания и объемные расходы смеси и воздуха.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач. Разработать общую математическую модель для решения поставленной цели. При необходимости разработать дополнительные замыкающие соотношения для нахождения решения в аналитическом виде. Рассмотреть особенности модели и на примере типового кислородсодержащего углеводородного топлива провести расчеты.

Изложение основного материала исследования.

1. Математическая модель определения состава продуктов сгорания

Рассмотрим реакцию горения спирта в кислороде при их стехиометрическом соотношении:

$$C_2H_5(OH)+3\cdot O_2=2\cdot CO_2+3\cdot H_2O \qquad (2.1)$$

Из (2.1) следует, что для стехиометрического сжигания одного моля спирта необходимо три моля кислорода. Другими словами, для пары спирт – кислород мольный стехиометрический коэффициент имеет значение

$$\chi_0^O=3. \qquad (2.2)$$

С учетом же принятого состава окислителя в виде воздуха мольный стехиометрический коэффициент реакции будет равен:

$$\chi_0^w=14.32. \qquad (2.3)$$

Реакции горения в энергетическом оборудовании не обязательно идут в стехиометрическом соотношении. Это учитывается введением коэффициента избытка окислителя α и все соотношения реакций строятся с использованием мольного коэффициента соотношения компонентов:

$$\chi^w=\alpha\cdot\chi_0^w \qquad (2.4)$$

Расчет состава продуктов сгорания ведется на основе условной формулы топлива, включающей горючее и окислитель с учетом величины χ^w.

В общем виде для произвольного углеводородного кислородсодержащего горючего, сжигаемого в воздухе, условная формула топлива будет иметь вид:

$$C_{b_C}H_{b_H}O_{(b_O+\alpha\cdot\chi_0^w\cdot 0.419)}N_{(\alpha\cdot\chi_0^w\cdot 1.581)} \qquad (2.5)$$

Запишем перечень веществ и ионов, которые могут образоваться в процессе горения такого топлива:

$$[CO],[CO_2],[H_2],[O_2],[H_2O],[OH],[N_2],$$
$$[NO],[C],[H],[O],[N]. \qquad (2.6)$$

Определение состава продуктов сгорания заключается в нахождении количественного соотношения газов из этого перечня. Количество неизвестных в модели определяется перечнем веществ в (2.6).

При варьировании коэффициента избытка окислителя α будет меняться количество и состав образующихся веществ. Например, при $\alpha<1$, т. е. при нехватке окислителя, в смеси может отсутствовать $[O_2]$ и присутствовать $[CO]$ *и* $[H_2]$. В противоположность этому при $\alpha>1$ появляются $[O_2]$ *и* $[NO]$, но исчезают $[CO]$ *и* $[H_2]$. В состав продуктов сгорания могут входить и другие вещества более сложного состава, но при любой величине α их количество будет исчезающе мало. Поэтому в расчетах они не принимаются во внимание. Таким образом, в (2.6) приведен перечень веществ, охватывающий практически важные случаи.

Рассмотрим уравнения химического равновесия для веществ из списка (2.6). Их перечень приведен в табл. 1.

Таблица 1

Основные реакции образования зависимых веществ

1	$CO\leftrightarrow C+O$
2	$CO_2\leftrightarrow C+2O$
3	$H_2O\leftrightarrow 2H+O$
4	$OH\leftrightarrow H+O$
5	$H_2\leftrightarrow 2H$
6	$O_2\leftrightarrow 2O$
7	$N_2\leftrightarrow 2N$
8	$NO\leftrightarrow N+O$

Для уравнений, приведенные в таблице, можно записать закон действующих масс, который представляет собой отношение концентрации веществ соответствующих реакций, являющийся константой химического равновесия. Так, например, для второго уравнения из табл. 1. выражение закона будет иметь вид:

$$\frac{c(C)\cdot c^2(O)}{c(CO_2)}=K_{CO_2}(T). \qquad (2.7)$$

Здесь $c(C)$, $c(O)$, $c(CO_2)$ – мольные концентрации соответственно углерода, кислорода и углекислого газа, $K_{CO_2}(T)$ – константа химического равновесия образования углекислого газа при некоторой температуре Т. Показатель степени определяется коэффициентом при соответствующем химическом элементе. Уравнения вида (2.7), записанные для веществ из табл. 1., являются частью разрабатываемой модели.

Удобнее состав смеси газов определять не через концентрации, а через их парциальные давления. Уравнения вида (2.7) можно выразить и через эти величины. Мольные концентрации продуктов сгорания определяются по отношению, например, к одному молю топлива на основании выражения (2.5). Для замены концентраций на парциальные давления дополнительно к ним введем еще одну переменную M_T – количество рассматриваемых молей топлива. Ее величину будем не выбирать, а определять в процессе расчетов таким образом, чтобы величины парциальных давлений продуктов сгорания численно были равны их концентрациям. Всего модель включает 13 неизвестных величин: 12 парциальных давлений газов (2.6) в продуктах сгорания и число молей M_T рассматриваемого количества топлива.

Первые 8 уравнений запишем, выражая через парциальные давления продуктов сгорания закон действующих масс для реакций из табл. 1:

$$\frac{P_C \cdot P_O}{P_{CO}} = K_{CO}(T); \quad (2.8)$$

$$\frac{P_C \cdot P_O^2}{P_{CO_2}} = K_{CO_2}(T); \quad (2.9)$$

$$\frac{P_H^2 \cdot P_O}{P_{H_2O}} = K_{H_2O}(T); \quad (2.10)$$

$$\frac{P_H \cdot P_O}{P_{OH}} = K_{OH}(T); \quad (2.11)$$

$$\frac{P_H^2}{P_{H_2}} = K_{H_2}(T); \quad (2.12)$$

$$\frac{P_O^2}{P_{O_2}} = K_{O_2}(T); \quad (2.13)$$

$$\frac{P_N^2}{P_{N_2}} = K_{N_2}(T); \quad (2.14)$$

$$\frac{P_N \cdot P_O}{P_{NO}} = K_{NO}(T). \quad (2.15)$$

Константы химического равновесия табулированы в соответствующих справочниках и в расчетах для соответствующей температуры могут быть выбраны или рассчитаны с помощью аппроксимационных полиномов. Кроме того, они могут быть рассчитаны на основе энтальпий образования и энтропий веществ, входящих в рассматриваемые реакции, которые, в свою очередь, также табулированы или могут быть рассчитаны на основе аппроксимационных полиномов [3].

Следующие четыре уравнения запишем, выражая закон сохранения вещества в виде равенства количества атомов соответствующего химического элемента в топливе и продуктах сгорания. Воспользуемся тем, что в рассматриваемом случае парциальные давления газов в продуктах сгорания численно равны их концентрациям. Количество атомов в топливе берем на основании выражения (2.5) с учетом количества рассматриваемых его молекул M_T:

для [C] $b_C \cdot M_T = P_{CO} + P_{CO_2} + P_C$; (2.16)

для [H] $b_H \cdot M_T = 2 \cdot P_{H_2O} + P_{OH} + 2 \cdot P_{H_2} + P_H$; (2.17)

для [O] $(b_O + \alpha \cdot \chi_0^w \cdot 0.419) \cdot M_T =$;

$$= P_{CO} + 2 \cdot P_{CO_2} + P_{H_2O} + P_{OH} + 2 \cdot P_{O_2} + P_{NO} + P_O \quad (2.18)$$

для [N] $(\alpha \cdot \chi_0^w \cdot 1.581) \cdot M_T = 2 \cdot P_{N_2} + P_{NO} + P_N$. (2.19)

Для замыкания системы в качестве последнего уравнения запишем закон Дальтона, выражающий равенство суммы парциальных давлений продуктов сгорания давлению в камере сгорания (топке) P_Σ:

$$P_\Sigma = P_{CO} + P_{CO_2} + P_{H_2O} + P_{OH} + P_{H_2} + .$$
$$+ P_{O_2} + P_{N_2} + P_{NO} + P_C + P_H + P_O + P_N \quad (2.20)$$

2. Метод решения модельной задачи

Записанная модель представляет собой систему нелинейных алгебраических уравнений. Для ее решения может быть использован метод Ньютона. Он подразумевает линеаризацию уравнений системы и решение их относительно поправок неизвестных величин. С целью повышения точности, уменьшим разницу в порядке величин путем логарифмирования системы.

Для примера рассмотрим уравнение (2.9). После логарифмирования имеем:

$$\ln(P_C) + 2 \cdot \ln(P_O) - \ln(P_{CO_2}) = \ln[K_{CO_2}(T)], \quad (2.21)$$

а после его линеаризации:

$$1 \cdot \Delta\left[\ln(P_C)\right] + 2 \cdot \Delta\left[\ln(P_O)\right] - 1 \cdot \Delta\left[\ln(P_{CO_2})\right] =$$
$$(-1) \cdot \{\ln(P_C) + 2 \cdot \ln(P_O) - \ln(P_{CO_2}) - \ln[K_{CO_2}(T)]\}^0. \quad (2.22)$$

Здесь верхний индекс 0 говорит о том, что выражение в фигурных скобках является начальным приближением или берется с предыдущего шага расчета.

Чтобы несколько снизить громоздкость записей, в дальнейшем выражение вида $\Delta\left[\ln(P_O)\right]$ будет представляться как $\varnothing_O$, а, например, $\Delta\left[\ln(P_{CO_2})\right]$ как $\varnothing_{CO_2}$.

Большую сложность представляет обработка таким образом уравнений вида (2.16 2.20).

Рассмотрим в качестве примера уравнение (2.16). После его логарифмирования получим:

$$\ln(b_C) + \ln(M_T) = \ln(P_{CO} + P_{CO_2} + P_C), \quad (2.23)$$

а после линеаризации:

$$\frac{P_{CO}}{A}\cdot\Delta_{CO} + \frac{P_{CO_2}}{A}\cdot\Delta_{CO_2} + \frac{P_C}{A}\cdot\Delta_C - 1\cdot\Delta_{M_T} = (-1)\cdot\left[\ln(A) - \ln(M_T) - \ln(b_C)\right]^0, \quad (2.24)$$

где $A = P_{CO} + P_{CO_2} + P_C$.

Преобразовав описанным способом исходную систему (2.13 2.24), получим линеаризованную систему уравнений:

$$1\cdot\Delta_C + 1\cdot\Delta_O - 1\cdot\Delta_{CO} = (-1)\cdot\left\{\ln(P_C) + \ln(P_O) - \ln(P_{CO}) - \ln\left[K_{CO}(T)\right]\right\}^0; \quad (2.25)$$

$$1\cdot\Delta_C + 2\cdot\Delta_O - 1\cdot\Delta_{CO_2} = (-1)\cdot\left\{\ln(P_C) + 2\cdot\ln(P_O) - \ln(P_{CO_2}) - \ln\left[K_{CO_2}(T)\right]\right\}^0; \quad (2.26)$$

$$2\cdot\Delta_H + 1\cdot\Delta_O - 1\cdot\Delta_{H_2O} = (-1)\cdot\left\{2\cdot\ln(P_H) + \ln(P_O) - \ln(P_{H_2O}) - \ln\left[K_{H_2O}(T)\right]\right\}^0; \quad (2.27)$$

$$1\cdot\Delta_H + 1\cdot\Delta_O - 1\cdot\Delta_{OH} = (-1)\cdot\left\{\ln(P_H) + \ln(P_O) - \ln(P_{OH}) - \ln\left[K_{OH}(T)\right]\right\}^0; \quad (2.28)$$

$$2\cdot\Delta_H - 1\cdot\Delta_{H_2} = (-1)\cdot\left\{2\cdot\ln(P_H) - \ln(P_{H_2}) - \ln\left[K_{H_2}(T)\right]\right\}^0; \quad (2.29)$$

$$2\cdot\Delta_O - 1\cdot\Delta_{O_2} = (-1)\cdot\left\{2\cdot\ln(P_O) - \ln(P_{O_2}) - \ln\left[K_{O_2}(T)\right]\right\}^0; \quad (2.30)$$

$$2\cdot\Delta_N - 1\cdot\Delta_{N_2} = (-1)\cdot\left\{2\cdot\ln(P_N) - \ln(P_{N_2}) - \ln\left[K_{N_2}(T)\right]\right\}^0; \quad (2.31)$$

$$1\cdot\Delta_N + 1\cdot\Delta_O - 1\cdot\Delta_{NO} = (-1)\cdot\left\{\ln(P_N) + \ln(P_O) - \ln(P_{NO}) - \ln\left[K_{NO}(T)\right]\right\}^0; \quad (2.32)$$

для [C] $$\frac{P_{CO}}{A}\cdot\Delta_{CO} + \frac{P_{CO_2}}{A}\cdot\Delta_{CO_2} + \frac{P_C}{A}\cdot\Delta_C - 1\cdot\Delta_{M_T} = (-1)\cdot\left[\ln(A) - \ln(M_T) - \ln(b_C)\right]^0, \quad (2.33)$$

где $A = P_{CO} + P_{CO_2} + P_C$;

для [H] $$\frac{2\cdot P_{H_2O}}{Б}\cdot\Delta_{H_2O} + \frac{P_{OH}}{Б}\cdot\Delta_{OH} + \frac{2\cdot P_{H_2}}{Б}\cdot\Delta_{H_2} + \frac{P_H}{Б}\cdot\Delta_H - 1\cdot\Delta_{M_T} = (-1)\cdot\left[\ln(Б) - \ln(M_T) - \ln(b_H)\right]^0, \quad (2.34)$$

где $Б = 2\cdot P_{H_2O} + P_{OH} + 2\cdot P_{H_2} + P_H$;

для [O] $$\frac{P_{CO}}{B}\cdot\Delta_{CO} + \frac{2\cdot P_{CO_2}}{B}\cdot\Delta_{CO_2} + \frac{P_{H_2O}}{B}\cdot\Delta_{H_2O} + \frac{P_{OH}}{B}\cdot\Delta_{OH} + \frac{2\cdot P_{O_2}}{B}\cdot\Delta_{O_2} + \frac{P_{NO}}{B}\cdot\Delta_{NO} + \frac{P_O}{B}\cdot\Delta_O - 1\cdot\Delta_{M_T} = (-1)\cdot\left[\ln(B) - \ln(M_T) - \ln(b_O + \alpha\cdot\chi_0^w\cdot 0.419)\right]^0, \quad (2.35)$$

где $B = P_{CO} + 2\cdot P_{CO_2} + P_{H_2O} + P_{OH} + 2\cdot P_{O_2} + P_{NO} + P_O$;

для [N] $$\frac{P_{N_2}}{Г}\cdot\Delta_{N_2} + \frac{P_{NO}}{Г}\cdot\Delta_{NO} + \frac{P_N}{Г}\cdot\Delta_N - 1\cdot\Delta_{M_T} = (-1)\cdot\left[\ln(Г) - \ln(M_T) - \ln(\alpha\cdot\chi_0^w\cdot 1.581)\right]^0, \quad (2.36)$$

где $Г = 2\cdot P_{N_2} + P_{NO} + P_N$;

для [PΣ] $$\frac{P_{CO}}{Д}\cdot\Delta_{CO} + \frac{P_{CO_2}}{Д}\cdot\Delta_{CO_2} + \frac{P_{H_2O}}{Д}\cdot\Delta_{H_2O} + \frac{P_{OH}}{Д}\cdot\Delta_{OH} + \frac{P_{H_2}}{Д}\cdot\Delta_{H_2} + \frac{P_{O_2}}{Д}\cdot\Delta_{O_2} + \frac{P_{N_2}}{Д}\cdot\Delta_{N_2} + \frac{P_{NO}}{Д}\cdot\Delta_{NO} + \frac{P_C}{Д}\cdot\Delta_C + \frac{P_H}{Д}\cdot\Delta_H + \frac{P_O}{Д}\cdot\Delta_O + \frac{P_N}{Д}\cdot\Delta_N = (-1)\cdot\left[\ln(Д) - \ln(P_\Sigma)\right]^0, \quad (2.37)$$

где $Д = P_{CO} + P_{CO_2} + P_{H_2O} + P_{OH} + P_{H_2} + P_{O_2} + P_{N_2} + P_{NO} + P_C + P_H + P_O + P_N$.

Решение строится на предположении об изоэнтальпийности процесса в камере сгорания (топке) энергетического оборудования. Для выбранной пары горючее – окислитель с известными для них энтальпиями $I^{(г)}$ и $I^{(о)}$ и заданной величины χ^w (2.3) мольного коэффициента соотношения компонентов вычисляется энтальпия топлива:

$$I^{(T)} = I^{(г)} + \chi^w\cdot I^{(о)} \quad (2.38)$$

Далее процесс решения строится в соответствии со следующим алгоритмом:

1. Выбирается некоторая температура T^0 (начальное приближение). Она считается реализуемой в рассматриваемый момент в камере сгорания $T_i = T^0$;

2. С помощью итерационного процесса на основе линеаризованной модели (2.25 2.37) определяется состав (парциальные давления P_i, а, следовательно, и мольные доли) продуктов сгорания, соответствующий текущей рассматриваемой температуре T_i. Как отмечалось ранее, необходимые для этого расчета значения констант химического равновесия могут быть взяты из таблиц или рассчитаны с помощью аппроксимационных полиномов, подобных, приведенным в [3];

3. Определяются энтальпии продуктов сгорания I_i, соответствующие текущей рассматриваемой температуры T_i. Эти величины могут быть также взяты из таблиц или рассчитаны с помощью аппроксимационных полиномов, подобных приведенным в [3];

4. Используя значения парциальных давлений как величины мольных долей соответствующих газов, входящих в состав продуктов сгорания, вычисляется их энтальпия $I_{ПС}$:

$$I_{ПС} = \sum_i (P_i\cdot I_i). \quad (2.39)$$

5. Сравниваются величины энтальпий топлива и продуктов сгорания при текущей рассматриваемой температуре. Следует учитывать, что исполь-

зованные для расчета $I_{ПС}$ значения парциальных давлений численно равны мольным концентрациям только в том случае, когда рассматривается M_T молей топлива. Иными словами, сравнение энтальпий должно происходить в виде соотношения $M_T \cdot I^{(T)} \Leftrightarrow I_{ПС}$;

6. В случае равенства этих величин или допускаемой величине отклонения температура и состав продуктов сгорания **считаются определенными. Расчет останавливается.** В противном случае переходим к следующему пункту;

7. В зависимости от превышения левой или правой части выражения $M_T \cdot I^{(T)} \Leftrightarrow I_{ПС}$ происходит корректировка значения текущей рассматриваемой температуры T_i в сторону ее увеличения или уменьшения. С новым значением величины T_i переходим к пункту 2 алгоритма и все расчеты повторяем.

Однако изоэнтальпийность наблюдается лишь в отдельных энергетических установках. Например, в камерах сгорания жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) за счет специальным образом организованной системы охлаждения. Такой подход может быть реализован и при расчете процессов в цилиндре двигателя внутреннего сгорания (ДВС) в границах одного такта его работы. Это обуславливается быстротой протекающих процессов и, соответственно, малой долей потерь через стенки цилиндра. В подавляющем большинстве энергетических устройств условия изоэнтальпийности процесса горения неосуществимы.

3. Определение температуры и состава продуктов сгорания этилового спирта в воздухе

Этиловый спирт в качестве горючего для решения модельной задачи выбран по причине его широкого распространения и наличия результа-

Таблица 2.1

Результаты расчета определения состава и температуры продуктов сгорания этилового спирта в воздухе на основе модели (2.25 2.37) для различных значений α

α	*0,5*	*0,6*	*0,7*	*0,8*	*0,9*	*1,0*	*1,1*	*1,2*
T, K	**1567**	**1781**	**1951**	**2089**	**2198**	**2225**	**2146**	**2048**
$\mathbf{P_{CO}}$	1,35E-01	1,09E-01	8,29E-02	5,58E-02	2,86E-02	8,38E-03	2,36E-03	7,74E-04
$\mathbf{P_{CO2}}$	5,23E-02	6,03E-02	7,18E-02	8,64E-02	1,03E-01	1,13E-01	1,10E-01	1,03E-01
$\mathbf{P_{H2O}}$	1,35E-01	1,60E-01	1,76E-01	1,84E-01	1,85E-01	1,78E-01	1,66E-01	1,55E-01
$\mathbf{P_{OH}}$	3,71E-07	7,77E-06	6,04E-05	2,84E-04	1,04E-03	2,43E-03	2,37E-03	1,71E-03
$\mathbf{P_{H2}}$	1,46E-01	9,41E-02	5,61E-02	2,93E-02	1,17E-02	2,96E-03	8,48E-04	2,96E-04
$\mathbf{P_{O2}}$	1,08E-11	3,73E-09	2,45E-07	7,68E-06	2,08E-04	4,27E-03	1,64E-02	2,99E-02
$\mathbf{P_{N2}}$	5,31E-01	5,76E-01	6,13E-01	6,44E-01	6,70E-01	6,88E-01	6,98E-01	7,06E-01
$\mathbf{P_{NO}}$	9,45E-09	4,26E-07	6,11E-06	5,10E-05	3,51E-04	1,72E-03	2,83E-03	2,99E-03
$\mathbf{P_{C}}$	3,77E-20	3,61E-18	4,62E-17	1,68E-16	1,81E-16	2,05E-17	5,54E-19	1,42E-20
$\mathbf{P_{H}}$	1,40E-05	9,02E-05	2,65E-04	4,86E-04	5,93E-04	3,47E-04	1,17E-04	3,75E-05
$\mathbf{P_{O}}$	2,62E-11	5,09E-09	1,85E-07	2,95E-06	3,21E-05	1,73E-04	2,03E-04	1,37E-04
$\mathbf{P_{N}}$	1,99E-13	1,80E-11	3,19E-10	2,33E-09	9,40E-09	1,31E-08	5,07E-09	1,40E-09
$\mathbf{M_T}$	9,38E-02	8,48E-02	7,73E-02	7,11E-02	6,57E-02	6,09E-02	5,62E-02	5,21E-02
α	*1,3*	*1,4*	*1,5*	*1,6*	*1,7*	*1,8*	*1,9*	*2,0*
T, K	**1955**	**1869**	**1790**	**1718**	**1651**	**1597**	**1543**	**1494**
$\mathbf{P_{CO}}$	2,79E-04	1,05E-04	4,12E-05	1,66E-05	6,74E-06	3,11E-06	1,37E-06	6,22E-07
$\mathbf{P_{CO2}}$	9,67E-02	9,06E-02	8,51E-02	8,04E-02	7,61E-02	7,20E-02	6,84E-02	6,53E-02
$\mathbf{P_{H2O}}$	1,45E-01	1,36E-01	1,28E-01	1,20E-01	1,14E-01	1,08E-01	1,03E-01	9,79E-02
$\mathbf{P_{OH}}$	1,14E-03	7,37E-04	4,70E-04	2,99E-04	1,89E-04	1,25E-04	8,10E-05	5,31E-05
$\mathbf{P_{H2}}$	1,15E-04	4,69E-05	1,98E-05	8,62E-06	3,79E-06	1,87E-06	8,88E-07	4,33E-07
$\mathbf{P_{O2}}$	4,22E-02	5,32E-02	6,30E-02	7,24E-02	8,09E-02	8,60E-02	9,20E-02	9,76E-02
$\mathbf{P_{N2}}$	7,12E-01	7,18E-01	7,23E-01	7,28E-01	7,34E-01	7,33E-01	7,36E-01	7,39E-01
$\mathbf{P_{NO}}$	2,76E-03	2,40E-03	2,02E-03	1,68E-03	1,38E-03	1,13E-03	9,22E-04	7,53E-04
$\mathbf{P_{C}}$	4,16E-22	1,31E-23	4,40E-25	1,57E-26	5,63E-28	3,23E-29	1,53E-30	7,97E-32
$\mathbf{P_{H}}$	1,24E-05	4,15E-06	1,41E-06	4,93E-07	1,72E-07	6,94E-08	2,64E-08	1,04E-08
$\mathbf{P_{O}}$	7,95E-05	4,33E-05	2,28E-05	1,19E-05	6,13E-06	3,38E-06	1,79E-06	9,64E-07
$\mathbf{P_{N}}$	3,66E-10	9,35E-11	2,38E-11	6,10E-12	1,55E-12	4,69E-13	1,31E-13	3,81E-14
$\mathbf{M_T}$	4,85E-02	4,53E-02	4,26E-02	4,02E-02	3,81E-02	3,60E-02	3,42E-02	3,26E-02

тов, пригодных для проверки адекватности разработанной модели. Так, в [12] приведены результаты расчета процесса горения этилового спирта в воздухе при изменении α в диапазоне [0.7–1.4] Были выполнены расчеты, охватывающие более широкий диапазон изменения α [0.5 2]. Сравним рассчитанные температуры и величины парциальных давлений некоторых газов. Часть веществ для сравнения выберем, исходя из их заметной доли в составе продуктов сгорания. Это связано с тем, что именно они определяют энтальпию газовой смеси и, следовательно, ее температуру. Рассмотрим также величины парциальных давлений окиси углерода (угарного газа) и окиси азота, поскольку они определяют вредные выбросы продуктов сгорания.

Выше было обосновано учет в составе воздуха только кислорода и азота. Кроме того, в расчетах будут заданы условия применения спирта со 100% концентрацией. Это сделано для упрощения модели и расчетов на ее основе. На практике это не соответствует действительности, и спирт всегда содержит в своем составе некоторое количество воды. Так, в [12] приведены результаты для спирта с 5% содержания H_2O. Кроме того, учитывается содержание в воздухе некоторого количества аргона и углекислого газа (суммарно в пределах 1%). Отклонение заложенных в расчеты условий от данных справочника [12] позволит оценить чувствительность разработанной модели к погрешности задания исходных данных.

В табл. 2.1. приведены результаты расчета на основе модели (2.25 2.37) для различных значений α. В (табл. 2.2.) приведены данные, взятые из [12].

Сравнение таблиц показывает качественное совпадение рассматриваемых результатов. Заметные расхождения наблюдаются для температуры и парциального давления паров воды. Количественную величину этих расхождений можно оценить из данных, приведенных в табл. 2.3.

Сравнение таблиц показывает качественное совпадение рассматриваемых результатов. Заметные расхождения наблюдаются для температуры и парциального давления паров воды. Количе-

Таблица 2.2

Результаты расчета определения состава продуктов сгорания этилового спирта в воздухе из [12]

α	*0,7*	*0,8*	*0,9*	*1,0*	*1,1*	*1,2*	*1,3*	*1,4*
T, K	**1897**	**2038**	**2151**	**2190**	**2108**	**2010**	**1918**	**1835**
$\mathbf{P_{CO}}$	8,42E-02	5,71E-02	2,91E-02	7,50E-03	1,90E-03	6,00E-04	2,00E-04	
$\mathbf{P_{CO2}}$	6,91E-02	8,41E-02	1,02E-01	1,14E-01	1,10E-01	1,03E-01	9,64E-02	9,03E-02
$\mathbf{P_{H2O}}$	1,86E-01	1,93E-01	1,93E-01	1,86E-01	1,73E-01	1,61E-01	1,50E-01	1,41E-01
$\mathbf{P_{OH}}$		2,00E-04	7,00E-04	2,00E-03	2,00E-03	1,40E-03	9,00E-04	6,00E-04
$\mathbf{P_{H2}}$	5,36E-02	2,75E-02	1,07E-02	2,30E-03	6,00E-04	2,00E-04		
$\mathbf{P_{O2}}$			1,00E-04	3,60E-03	1,61E-02	2,96E-02	4,19E-02	5,28E-02
$\mathbf{P_{N2}}$	5,99E-01	6,30E-01	6,56E-01	6,75E-01	6,85E-01	6,93E-01	6,99E-01	7,05E-01
$\mathbf{P_{NO}}$			2,00E-04	1,60E-03	2,70E-03	2,90E-03	2,70E-03	2,30E-03
$\mathbf{P_{C}}$								
$\mathbf{P_{H}}$	1,00E-04	2,00E-04	3,00E-04	2,00E-04				
$\mathbf{P_{O}}$				1,00E-04	1,00E-04			
$\mathbf{P_{N}}$								
$\mathbf{M_{T}}$								

Таблица 2.3

Относительные отклонения для величин процесса сжигания этилового спирта в воздухе между результатами расчетов и данными из [12]

A	*0.7*			*1.0*			*1.4*		
	Расчет	Глушко	ε	Расчет	Глушко	ε	Расчет	Глушко	E
T, K	1951	1897	**2,8%**	2225	2190	**1,6%**	1869	1835	**1,8%**
$\mathbf{P_{CO}}$	8.29E-02	8.42E-02	**0,1%**	8.38E-03	7.50E-03	**0,1%**			
$\mathbf{P_{NO}}$				1.72E-03	1.60E-03	**0,0%**	2.40E-03	2.30E-03	**0,0%**
$\mathbf{P_{CO2}}$	7.18E-02	6.91E-02	**0,3%**	1.13E-01	1.14E-01	**0,0%**	9.06E-02	9.03E-02	**0,0%**
$\mathbf{P_{H2O}}$	1.76E-01	1.86E-01	**1,1%**	1.78E-01	1.86E-01	**0,8%**	1.36E-01	1.41E-01	**0,5%**
$\mathbf{P_{O2}}$				4.27E-03	3.60E-03	**0,1%**	5.32E-02	5.28E-02	**0,0%**

ственную величину этих расхождений можно оценить из данных, приведенных в табл. 2.3.

Отклонение в определении температуры и парциального давления паров воды можно объяснить различием в составе горючего, принятого в расчетах и использованного при получении данных для справочника [12]. Содержание в последнем случае 5% воды ведет к уменьшению энтальпии по сравнению со 100% спиртом и, как следствие, к снижению температуры продуктов сгорания. Данные, приведенные в табл. 2.3., показывают, что относительное различие рассматриваемых температур не превосходят 2,8%. Погрешность определялась относительно величины рассчитанной температуры. Эта величина позволяет оценить параметрическую чувствительность разработанной модели: 5% изменения состава горючего ведет к 2,8% отклонения величины рассчитанной температуры. Аналогичная причина лежит в основе отклонения в определении парциального давления паров воды. Именно наличие 5% воды в горючем ведет к превышению величин данных из справочника [12] по сравнению с рассчитанными величинами. Относительная погрешность не превышает 1,1%. Это отражено в табл. 2.3. Погрешность определена относительно давления в камере сгорания (топке). В расчетах она была принята равной 1 бару. Все остальные погрешности рассмотренных величин (табл. 2.3.) меньше отмеченных выше.

Пустые графы в табл. 2.3. обусловлены отсутствием данных в [12]. При записи величин относительных погрешностей ε отображалась только одна значащая цифра после запятой. Большее их количество при инженерных расчетах не имеет оснований. Такой подход, а так же малые погрешности, привели к появлению нулевых значений погрешностей в табл. 2.3.

Все вычисленные и приведенные в табл. 2.3. погрешности <5%, что соответствует допустимой точности инженерных расчетов. Это позволяет использовать данные, приведенные в табл. 2.1., в качестве расширенной, по сравнению с [12], основы для определения состава и температуры продуктов сгорания этилового спирта в воздухе при различных α.

Выводы. 1. Математическая модель на основании уравнений вида (2.25 2.37) для газообразного топлива позволяет определить количественный состав его условной формулы, энтальпию топлива, состав продуктов сгорания при использовании в качестве исходных данных величин замеренных технологических параметров (расходов компонентов топлива, соответствующих им температур в камере сгорания), известного элементного (качественного) состава топлива ([*C], [H], [O*] и т. д.).

2. Математическая точность модели позволяет использовать полученные на ее основе данные для оценки чувствительности результатов расчетов на неточность измерительного канала исходных технологических параметров.

3. При решении реальных технологических задач энтальпии и энтропии продуктов сгорания должны определяться с максимально возможной точностью на основании таблиц или программных комплексов, табулирующих подобного рода таблицы. Полиномиальные зависимости для определения энтальпий и энтропий продуктов сгорания, вследствие значительных погрешностей аппроксимации, не могут быть использованы для решения расширенной задачи.

Список литературы:

1. Kento T., Gomez M., Olson M., Okuda T., Walz A., Schauer J. Sensitivity of hazardous air pollutant emissions to the combustion of blends of petroleum diesel and biodiesel fuel. Atmospheric Environment. 2012. T. 50. P. 307–313.

2. Barbella R., Ciajolo A., D'Anna A. The emission of heavy hydrocarbons from a diesel engine and a spray flame. Fuel. 1989. T. 68, June. P. 690–696.

3. Глушко В.П. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: справочник. АН СССР, ВИНИТИ. 1972. Т. 1. 266 с.

4. Fokion N., Dimotakis P.E. Non-premixed hydrocarbon ignition at high strain rates. Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute. 1998. P. 641–648.

5. Sangiovanni J.J., Liscinsky D.S. Soot formation characteristics of well-defined spray flames. Twentieth Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute. 1984. P. 1063–1073.

6. Alfe M., Apicella B., Rouzaud J.-N. The effect of temperature on soot properties in premixed methane flames. Combustion and Flame. 2010. T. 157. P. 1959–1965.

7. Buipham M., Seshadri K., Williams F.A. The asymptotic structure of premixed methane-air flames with slow CO oxidation. Combustion and Flame. 1992. T. 89. P. 343–362.

8. Shigeyuki T., Ayala F., Keck J.C. A reduced chemical kinetic model for HCCI combustion of primary reference fuels in a rapid compression machine. Combustion and Flame. 2003. T. 133. P. 467–481.

9. Максимов М.В., Брунеткин А.И., Бондаренко А.В. Модель и метод определения условной формулы углеводородного топлива при сжигании. Вост.-европ. журн. передовых технологий. 2013. Т. 6. № 8(66). С. 20–27.

10. Давыдов В.О., Бондаренко А.В. Метод расчета температуры горения произвольной смеси газообразного углеводородного топлива при произвольном избытке воздуха. Тр. Одес. политехн. ун. О., 2013. Вып. 3 (42). С. 98–102.

11. Бондаренко А.В. Моделирование образования продуктов сгорания газообразного углеводородного топлива. Судновые энергетические установки. О., 2013. Вып. 31. С. 178–187.

12. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: справочник / под ред. В.П. Глушко. АН СССР, ВИНИТИ. 1972. Т. 2. Топлива на основе кислорода. 490 с.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДУ СУМІШІ ВУГЛЕВОДНЕВИХ КИСНЕВМІСНИХ ГАЗІВ ПАЛИВА, ЩО СПАЛЮЄТЬСЯ

Встановлено причину ускладнення використання несертифікованих видів палива – невідомість і змінність їх складу. Запропоновано математичну модель та метод, що дозволяють в процесі спалювання такого палива визначити його склад і забезпечити оптимальні параметри процесу горіння. Визначено обмеження, що накладаються моделлю на використовуваний метод.

Ключові слова: *вуглеводневе паливо, визначення умовної формули, продукти згоряння, математична модель.*

MATHEMATICAL MODEL OF DETERMINATION OF COMPOSITION OF MIXTURE OF HYDROCARBONIC ACID-CONTAINING GASES OF COMBUSED FUEL

In this paper has been identified the cause that makes it difficult to use uncertified fuels – the uncertainty and variability of their composition. A mathematical model and a method that allow determining its composition in the combustion process of such a fuel and providing optimal parameters of the combustion process are proposed. The limitations imposed by the model on the method used are determined

Key words: *hydrocarbon fuel, definitions of the conventional formula, combustion products, mathematical model.*

УДК 621.311

Пантелеева И.В.
Украинская инженерно-педагогическая академия

СОСТОЯНИЕ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ НА ОСНОВЕ БИОТЕХНОЛОГИЙ

В статье рассматриваются основные аспекты развития современной энергетики, в частности – использование нетрадиционных видов топлива. Эти виды не нашли широкое применение в энергетике, хотя имеют достаточно высокую теплотворную способность. К таким видам топлива относится биологическое топливо. Проанализированы пути дальнейшего развития биоэнергетики, проблемы и риски, связанные с ее интенсивным внедрением. Рассмотрены виды биотоплива и технологии получения биомассы.

Ключевые слова: *энергетика, биотопливо, биомасса, источник энергии, электростанция, биогазификация, риски биоэнергетики, электроэнергия.*

Постановка проблемы и анализ последних исследований и публикаций. Во всем мире и в Украине, в частности, все чаще и острее возникает вопрос нехватки энергоресурсов, их дороговизны, а также загрязнения окружающей среды вредными отходами производства электроэнергии на тепловых электростанциях. Значимость информации о новых разведанных ресурсах традиционных источников энергии возрастает как с экономической, так и со стратегической точки зрения. К традиционным источникам энергоресурсов относятся: нефть, газ, уголь, торф, уран. У экологов серьезные опасения за состояние нашей планеты вызывает повсеместное использование этих видов топлива, существует риск того, что следующие поколения столкнутся со сложнейшими задачами по восстановлению нормальной экологической обстановки на Земле.

В сложившихся обстоятельствах на первое место выходит способ получения энергии с помощью нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. Некоторые виды топлива, ныне относящиеся к нетрадиционным источникам энергии, известны достаточно давно, но в силу различных причин не используются. В связи с бурным развитием технологий одним из существующих преимуществ таких нетрадиционных источников энергии является тенденция снижения их цены, а недавнее повышение мировых цен на нефть и природный газ привело к очередному всплеску интереса к развитию технологий с применением, в частности, биологического топлива [1, с. 20].

Стратегия развития энергокомплексов многих стран мира связана с использованием нетрадиционных и возобновляемых источников энергии, что является реальным путем для успешного решения проблемы энергоснабжения и сохранения окружающей среды [2, с. 223].

В настоящее время биомасса является одним из крупнейших мировых источников возобновляемой энергии и имеет значительный потенциал для расширения производства тепла, электроэнергии и топлива для транспорта. Однако сегодня доля возобновляемых источников энергии (далее – ВИЭ) в мировом энергетическом балансе невелика – порядка 14%, а вклад биомассы – около 1,8%. Но, как показывает практика, даже незначительные колебания в предложении на рынках энергетических ресурсов вызывают сильные изменения цен. Это говорит о том, что роль альтернативной энергетики в укреплении стабильности на рынках энергетических ресурсов в перспективе будет только расти.

По прогнозам специалистов [3, с. 34], доля возобновляемых источников энергии к 2040 г. достигнет 47,7%, а вклад биомассы – 23,8%.

Биотопливо – продукт переработки биомассы, один из видов биотоплива – компост, причем в компостных контейнерах при переработке выделяется тепловая энергия, которую можно употреблять для технических нужд.

Все виды биотоплива можно классифицировать следующим образом [4, с. 53]:

– первичное древесное топливо (дрова, лесосечные отходы, щепа, энергетический лес);

– вторичное древесное топливо (дрова, опилки, стружка, гранулы, пеллеты, брикеты, древесный уголь);

– утилизированное древесное топливо (отработанные щелоки целлюлозного производства, бумажное и картонное вторсырье):

– утилизированное топливо из промышленных и бытовых отходов (биогаз из различной биомассы, в том числе от анаэробной очистки бытовых и промышленных стоков);

– жидкие виды биотоплива (биоэтанол, дизельное растительное топливо и т. д.):

– недревесные биомассы (солома, отходы растениеводства и т. д.).

Ресурсы биомассы в различных видах есть практически во всех регионах мира, и почти в каждом из них может быть налажена ее переработка в энергию и топливо. На современном уровне за счет только биомассы можно получить 6÷10 % от общего количества энергетических потребностей стран.

Постановка задания. Цель статьи – анализ направлений получения и использования биотоплива в мировой энергетике, развития биоэнергетики в мире, разработка мероприятий по развитию устойчивой биоэнергетики Украины.

Изложение основного материала исследования. Что касается биомассы, то известны различные способы ее преобразования в энергию:

– получение растительных углеводородов (предельные и непредельные углеводороды, растительные масла, высокомолекулярные жирные кислоты);

– прямое сжигание биомассы, газификация, пиролиз, фест-пиролиз, сжижение;

– биотехнологическая конверсия биомассы в топливо (при влажности более 75%); низкоатомные спирты, жирные кислоты, биогаз.

В последние десятилетия появились и сравнительно новые виды биотоплива:

– пеллеты;

– получаемый из твердых бытовых отходов (далее – ТВО) биогаз;

– продукты жизнедеятельности микроорганизмов.

В последнее время новый вид биотоплива в Европе стал очень популярен. Дело в том, что эти гранулы называют «улучшенным» топливом, так как теплотворная способность одной тонны пеллет сопоставима с теплотворностью тонны угля, а 2 тонны гранул соответствуют одной тонне нефти или кубометру газа. Еще одним несомненным плюсом пеллет является то, что они не самовозгораются, так как в их структуре малое межпоровое пространство (например, в угле больше). Теплотворная способность пеллет меньше, чем каменного угля, нефти, природного газа. Однако их сжигание не оказывает такого негативного влияния на окружающую среду, как сжигание традиционных видов топлива.

В настоящее время отходы лесного хозяйства, сельского хозяйства и жилищно-коммунального комплекса являются основным сырьем для генерации электрической и тепловой энергии из биомассы. Кроме того, незначительная доля сельскохозяйственных культур – сахарные, зерновые, растительное масло – используется в качестве сырья для производства жидкого биотоплива. Сегодня объем энергии потребляемой биомассы составляет около 50 ЭДж во всем мире и составляет около 10–15% мирового годового потребления первичной энергии. Это главным образом традиционная биомасса для приготовления пищи и отопления. Однако существует значительный потенциал для расширения использования биомассы за счет большого объема неиспользованных остатков и отходов. Использование обычных растительных культур для генерации энергии также может быть увеличено при наличии свободных площадей и правильном учете спроса на продовольствие. В среднесрочной перспективе лигноцеллюлозные культуры (как травянистые, так и древесные) могут быть получены на маргинальных, деградированных и излишках сельскохозяйственных земель и потенциально способны обеспечить большую биомассу.

В долгосрочной перспективе водная биомасса (водоросли) также может внести значительный вклад.

Исходя из широкого спектра сырья, технический потенциал биомассы оценивается более чем 1 500 ЭДж/год к 2050 г., хотя существующие тенденции получения биомассы указывают, что ежегодный потенциал составляет 200–500 ЭДж/год (за исключением водной биомассы).

Отходы лесного и сельского хозяйства и другие органические отходы (в том числе твердые бытовые отходы (далее – ТБО)) могут обеспечить от 50 до 150 ЭДж/год, в то время как остальная часть биоэнергии может быть сгенерирована в результате использования энергетических культур, избытков роста лесов и увеличения продуктивности сельского хозяйства. Различные пути развития низкоуглеродистой энергетики показывают, что будущий спрос на биоэнергию может составить до 1 000 ЭДж/год. Можно предположить, что биомасса может составить от 1/4 до 1/3 в будущем мировом энергетическом балансе. Безусловно, в действительности многое будет зависеть от ценовой конкурентоспособности биоэнергии и будущих глобальных решений, таких, как целевые показатели выбросов парниковых газов [5, с. 56].

Рост использования ресурсов биомассы в среднесрочном периоде до 2030 г. будет зависеть от ряда факторов. Строгие цели в возобновляемой энергии, установленные на региональном и национальном уровне (например, Европейская директива по возобновляемой энергии), вероятно, приведут к значительному увеличению спроса. Это требование может быть выполнено за счет увеличения использования остатков и отходов сахара, крахмала и масличных культур, а также больше за счет лигноцеллюлозных культур. Вклад в энергетику сельскохозяйственных культур зависит от их выбора и скорости их роста, которые обусловлены производительностью труда в сельском хозяйстве, экологическими ограничениями, наличием воды и материально-технических возможностей. При благоприятных условиях существенный рост может быть достигнут в течение ближайших 20 лет. Но оценки потенциального роста производства различны. Например, потенциал биомассы из отходов и энергетических культур в Европейском Союзе (далее – ЕС) до 2030 г. оценивается в пределах от 4,4 до 24 ЭДж.

Долгосрочный потенциал выращивания энергетических культур во многом обусловлен следующим:

– наличием свободной земли, связанным с развитием продовольственного сектора (рост спроса на продовольствие и увеличение урожайности сельскохозяйственных культур), и такими факторами, ограничивающими доступ к земле, как вода и охрана природы;

– выбором энергетических культур, которые определяют выход биомассы и могут быть получены на свободной земле;

– другими факторами, влияющими на потенциал биомассы, включая влияние биотехнологий, таких, как генетически модифицированные организмы, наличием воды и последствиями изменения климата.

Использование биомассы зависит от нескольких факторов:

– затрат на производство биомассы – 4 доллара Соединенных Шатов Америки (далее – США) на получение 1 ГДж часто рассматривается как верхний предел, когда биоэнергетика может быть широко развита сегодня во всех секторах;

– логистики – как и все сельскохозяйственное сырье, энергетические культуры и отходы требуют соответствующей цепочки поставок и инфраструктуры;

– ресурсов и охраны окружающей среды – производство сырья для биомассы может иметь как положительное, так и отрицательное воздействие на окружающую среду (наличие и качество воды, качество почвы и биоразнообразие). Необходимо учитывать законы, которые могут ограничивать или стимулировать существующие практики (например, экологические законы, стандарты устойчивости и т. д.).

Для использования биоэнергетического потенциала в долгосрочной перспективе усилия должны быть направлены на повышение уровня выхода биомассы и модернизацию сельского хозяйства, прямое увеличение глобального производства продуктов питания, а значит, и ресурсов для биомассы. Это может быть достигнуто путем развития технологий, а также распространения устойчивого ведения сельского хозяйства. Также необходимо поощрять и способствовать развитию устойчивого использования остатков и отходов для производства биоэнергии, представляющей ограниченные или нулевые экологические риски.

Существует много путей преобразования исходной биомассы в конечный продукт в виде энергии. Несколько технологий были разработаны и адаптированы, исходя из различной физической природы и химического состава исходного сырья и вида энергии (тепло, энергетика, топливо для транспорта). Модернизация технологий для биомассы (например, таблетирование, торрефикация и пиролиз) в настоящее время разрабатывается для преобразования громоздкой сырой биомассы в более плотные и практичные носители энергии для эффективной транспортировки, хранения и удобного использования в последующих процессах преобразования. Производство тепла за счет прямого сжигания биомассы является ведущим использованием биоэнергии во всем мире и часто становится экономической альтернативой ископаемому топливу.

Технологии варьируются от элементарных до сложных печей. Для более эффективного использования энергии из биомассы современные крупномасштабные тепловые решения часто сочетаются с производством тепла и электрической энергии (когенерации). Совместное сжигание угля и биомассы в тепловых электростанциях является наиболее экономичным использованием биомассы для производства энергии.

В транспортном секторе первое поколение биотоплива широко используется в ряде стран – в основном биоэтанол из крахмала и сахарных культур и биодизель из масличных культур, остаточных масел и жиров. Затраты на производство биотоплива значительно различаются в зависимости от используемого сырья (и нестабильных цен на него) и масштабов завода. Потенциал для дальнейшего развертывания этих технологий первого поколения

достаточно высокий при условии устойчивых критериев землепользования. Однако первое поколение биотоплива сталкивается как с социальными, так и с экологическими проблемами, в основном потому, что для производства используются продовольственные культуры, что может привести к росту цен на продовольствие и, возможно, косвенным образом изменить структуру землепользования.

Второе поколение технологий в основном использует лигноцеллюлозное сырье для производства этанола, синтетического дизельного и авиационного топлива. Однако данные технологии еще незрелые и необходимо их дальнейшее развитие и инвестиции, чтобы продемонстрировать надежную работу в коммерческом масштабе и снизить стоимость за счет масштабирования и репликации. При этом текущий уровень деятельности в области показывает, что указанные технологии, скорее всего, станут коммерческими в течение следующего десятилетия.

Третье поколение биотоплива – масла, получаемые из водорослей, находится на стадии научных исследований и требует значительных усилий, прежде чем оно сможет стать конкурентоспособным на энергетическом рынке.

Главными преимуществами биогаза является его возобновляемость, наличие местных источников сырья для получения топлива, снижение парникового эффекта и экологического ущерба от систем сбора органических отходов, обеспечение экологически замкнутой энергетической системы. Биогаз – универсальное топливо, являющееся продуктом метанового брожения жидких органических отходов (канализационных стоков, навоза). Метановое брожение является комплексным процессом, который позволяет утилизировать отходы канализации и сельскохозяйственного производства, превратив их в удобрения, и является источником получения горючего газа на основе метана.

В США в настоящее время годовой объем выработки биогаза составляет 500 млн. м3. Значительная часть его поступает на электростанции. Суммарная электрическая мощность установок, работающих на биогазе, составляет около 200 МВт. Кроме того, в США широко распространены установки для использования отходов небольших скотоводческих ферм с поголовьем крупного рогатого скота до 150 голов. Принятый Конгрессом США акт «Об использовании биомассы» по существу сформулировал государственную программу, по которой было выделено 500 млн. долларов на первый год для университетов и лабораторий, которые займутся разработкой технологий. Цель программы – разработать дешевую технологию, а через 25 лет перевести 25% химической промышленности страны на растительное сырье – на кукурузу, только в данном случае на переработку пойдут стебли и другой мусор, который раньше сжигали.

В ноябре 2007 г. в Великобритании было создано Агентство по возобновляемому топливу (англ. Renewable Fuels Agency), обязанное контролировать введение требований к использованию возобновляемого топлива. В Великобритании добывается в год около 200 млн. м3 биогаза. Суммарная мощность Биоэлектростанций Великобритании составляет около 80 МВт. Во Франции добывается в год около 40 млн. м3 биогаза. На одной из свалок вблизи Парижа была построена биотепловая электростанция, использующая биогаз, эмиссия которого составляет 1,5 тыс. м3 в сутки.

Ведущее место по производству биогаза занимает Китай. С середины 70-х гг. в этой стране ежегодно строилось около миллиона метантенков. В настоящее время их количество превышает 20 млн. Китайская Народная Республика обеспечивает 30% национальных потребностей в энергии за счет биогаза. В настоящее время в Китае эксплуатируется более 5 млн. семейных биогазовых реакторов (ферментеров), ежегодно производящих около 1,3 млрд. м3 биогаза, что обеспечивает газом для бытовых нужд свыше 35 млн. человек. Также имеются 600 больших и средних биогазовых станций, которые используют органические отходы животноводства и птицеводства, винных заводов с общим объемом 220 тыс. м3. Действуют 24 тыс. биогазовых очистительных реакторов для обработки отходов городов, работают около 190 биогазовых электростанций с ежегодным производством 3 109 Вт•ч. Биогазовая продукция в Китае оценивается в 33 ПДж.

Второе место в мире по производству биогаза занимает Индия, в которой еще в 30-е гг. была принята первая в мире программа по развитию биогазовой технологии. На конец 2000 г. в сельских районах Индии было построено свыше 1 млн. метантенков, что позволило улучшить энергообеспеченность ряда деревень, их санитарно-гигиеническое состояние, замедлить вырубку окрестных лесов и улучшить почвы. Сегодня ежедневное производство биогаза в Индии составляет 2,5–5 млн. м3. В Индии, как и в Китае, основной упор сделан на семейные и общинные биогазовые установки – в 1993 г. их было около 2 млн. Ежегодно в Индии вводится в эксплуатацию 5,6 тыс. таких установок, дающих от 2 до 400 м3 биогаза в день. Основные положения национальной программы Индии по развитию биогазовых технологий включают в себя пункты о снаб-

жении чистой энергией для отопления и приготовления пищи, получении органических удобрений, повышении эффективности сельскохозяйственного производства и многое другое.

Большое количество биогаза производится также и при переработке твердых бытовых отходов городов: в США – 9 ПДж, в Германии – 14 ПДж, в Японии – 6 ПДж, в Швеции – 5 ПДж.

Стремление к устойчивой энергетической системе может потребовать использования больше биоэнергетики, чем намечено в рамках бизнес-проектов. Необходимо четко оценивать все риски, которые влечет биоэнергетика:

1. Поставки сырья. Этот риск связан непосредственно с использованием биологических процессов (погодные и сезонные колебания), которые могут привести к значительным изменениям поставок сырья в терминах количества, качества и цены. Стратегии по уменьшению риска уже широко используются пищевой промышленностью и энергетическими рынками и включают, например, создание буферных запасов.

2. Экономия на масштабе и логистике. Многие коммерческие предприятия, имеющие технологии, страдают от плохой экономики из-за малого масштаба производства и наоборот, большие объемы требуют улучшения и более сложной логистики поставок сырья. В связи с этим необходимо прилагать усилия для разработки технологий в соответствующих масштабах и с соответствующей логистикой поставок для удовлетворения различных требований [6, с. 141, 143].

3. Конкуренция. Биоэнергетические технологии конкурируют с другими возобновляемыми и невозобновляемыми источниками энергии, они могут конкурировать за сырье в других секторах, таких, как продукты питания, химические вещества и материалы. Кроме того, разработка технологий производства второго поколения биотоплива может привести к конкуренции за биомассу, возможно, с другими секторами промышленности. Поэтому необходима государственная поддержка, которая должна быть направлена на развитие экономических путей развития биоэнергетики и на производство большего количества биомассы из устойчивых источников.

4. Участие общественности. Это основной фактор риска, связанного с альтернативными источниками энергии и биоэнергетики в частности. Общественность должна быть информирована и уверена в том, что биоэнергетика является экологически и социально полезной и не приведет к значительным негативным экологическим и социальным явлениям.

Украина находится на этапе перехода к устойчивому социально-экономическому развитию. В то же время экономика страны характеризуется высоким потреблением энергии. Высокая энергоемкость экономики приводит к нерациональному использованию топливно-энергетических ресурсов, снижает конкурентоспособность и приводит к существенному загрязнению окружающей среды.

Вместе с тем Украина обладает значительным биоэнергетическим ресурсом. Помимо отходов сельского хозяйства (энергетический потенциал 3,9 ПДж), следует обратить внимание на проблему твердых бытовых отходов, которая становится одной из самых острых хозяйственных и природоохранных проблем. Удельные показатели образования отходов, по данным департамента экологии Министерства охраны окружающей среды, в больших городах достигают в среднем 0,5 кг в день с 1 чел. и имеют тенденции к росту.

У Украины хорошие шансы на развертывание биоэнергетики и получение соответствующих выгод. Биоэнергетика во всем мире уже вносит существенный вклад в решение этих проблем и способна на большее, благодаря существующим и новым технологиям. Кроме того, биоэнергетика может способствовать решению других экологических и социальных задач, например, обработки отходов и развития сельских районов.

Следует, однако, помнить, что помимо того, что биоэнергетика может привести к многочисленным внешним выгодам, ее развертывание влечет за собой и риски. Разработка и внедрение стратегии должны быть основаны на тщательном рассмотрении сильных и слабых сторон, а также возможностей и угроз, которые ее характеризуют.

Предполагаем, что дальнейшее развертывание биоэнергетики и, в частности, биотоплива для транспорта в краткосрочной перспективе должно осуществляться путем:

– особого внимания к вопросам устойчивого развития технологий, непосредственно связанных с биомассой в производстве энергии, и предотвращения или смягчения негативного воздействия через разработку и внедрение устойчивых схем:

– стимулирования использования биотоплива в связи с потенциальной выгодой в контексте парниковых газов:

– учета потенциального воздействия спроса на биомассу для генерации энергии на товарных рынках и косвенного изменения землепользования.

Разработка новых и улучшение существующих технологий конверсии биомассы будут иметь большое значение для широкого развертывания и долгосрочного успеха в нашей стране.

Государственные и частные финансовые проекты должны быть направлены на следующие исследования и разработки [7, с. 103]:

– для производства жидкого биотоплива – передовые технологии, которые позволяют эффективнее использовать сырьевую базу с учетом непродовольственных культур, с меньшим количеством экологических и социальных рисков и более низким выходом парниковых газов;

– для производства тепла и электроэнергии – более эффективной передовой технологии, с улучшением рентабельности использования в малых хозяйствах, чтобы обеспечить рациональное использование биомассы;

– для производства новой биомассы – модернизация технологий и многопрофильных биореакторов, которые могли бы способствовать развитию общей экономической конкурентоспособности биоэнергии.

Наличие остатков и отходов будет ограничивать развитие биоэнергии в долгосрочной перспективе, поэтому необходима стратегия, которая должна быть направлена на стимулирование производительности труда в сельском и лесном хозяйствах, а также касающаяся государственных и частных решений, направленных на разработку новых энергетических культур, таких, как многолетние лигноцеллюлозные культуры, и других видов биомассы (водорослей), необходимой для устойчивого роста биоэнергетической промышленности.

Выводы.

1. В работе проанализированы пути получения и использования биотоплива в мире.

2. Дальнейшее развитие биоэнергетики в Украине и мире может обеспечить:

– еще больший вклад в глобальную традиционную энергетику:

– значительное сокращение выбросов парниковых газов и, возможно, получение других экологических выгод;

– усиление энергетической безопасности и торгового баланса, заменяя импорт ископаемых видов топлива внутренней биомассой;

– возможности для экономического и социального развития сельской местности;

– возможности использования отходов, их сокращение, решение проблем утилизации и повышения эффективности использования ресурсов.

Список литературы:

1. Панцхава Е. Биоэнергетика – самостоятельная часть современной энергетики. Биоэнергетика. 2007. № 1. С. 17–25.

2. Пантелеева И., Козюпа С. Анализ путей развития биоэнергетики. Системи обробки інформації. ХУПС. 2010. № 1 (82). С. 223–225.

3. Коробко Б., Жовнір М. Концепція та основні завдання галузевої програми впровадження нових та поновлених джерел енергії. Энергетика и электрификация. 1999. № 7. С. 33–41.

4. Лотош В. Переработка отходов природопользования. Екатеринбург, 2002. 463 с.

5. Гютт А. Мини-дрова на экспорт и не только. Биоэнергетика. 2007. № 1. С. 55–57.

6. Шматько Н. Організація планування структурних змін у процесі розвитку промислового підприємства. Управління розвитком: зб. наук. робіт. ХНЕУ. 2016. № 4 (186). С. 138–143.

7. Пантєлєєва І., Шматько Н. Сучасний стан економічного розвитку мікроГЕС у світі. Вісник НТУ «ХПІ». 2016. № 47 (1219). С. 101–104.

СТАН РОЗВИТКУ ЕНЕРГЕТИКИ НА ОСНОВІ БІОТЕХНОЛОГІЇ

У статті розглядаються основні аспекти розвитку сучасної енергетики, зокрема – використання нетрадиційних видів палива. Ці види не знайшли широкого використання в енергетиці, хоча мають досить високу теплотворну здатність. До таких видів палива належить біологічне паливо. Проаналізовані шляхи подальшого розвитку біоенергетики, проблеми і ризики, пов'язані з її інтенсивним впровадженням. Розглянуті види біопалива і технології здобуття біомаси.

Ключові слова: *енергетика, біопаливо, біомаса, джерело енергії, електростанція, біогазифікація, ризики біоенергетики, електроенергія.*

DEVELOPMENT OF ENERGY STATUS ON THE BASIS OF BIOGEOTECHNOLOGIES

The basic aspects of development of modern energy are examined in the article, in particular is the use of untraditional types of fuel. These kinds did not find a wideuse in energy, although have a high enough heating value. A biological fuel behaves to such types of fuel. The ways of further development of bioenergetics, problems and risks, related to its intensive introduction, are analysed. The types of biopropellant and technology of receipt of biomassy are considered.

Key words: *energy, biopropellant, biomassa, energy source, power-station, biogasification, risks of bioenergetics, electric power.*

УДК 621.311.22

Петров С.В.
Институт газа Национальной академии наук Украины

Забулонов Ю.Л.
Института геохимии окружающей среды Национальной академии наук Украины

Т. Яшар Катирджы оглу
Компании АРТЕКС (ARTECS), Турция

СИСТЕМА ПЛАЗМЕННОЙ ПОДСВЕТКИ НИЗКОРЕАКЦИОННЫХ ТОПЛИВ ДЛЯ ТЕПЛОАГРЕГАТОВ

Разработана и исследована система плазменной подсветки низкореакционных топлив для теплоагрегатов, когда в качестве растопочного и сопровождающего горение топлива может использоваться применяемый в котлоагрегате уголь. В данном исследовании принят бурый уголь БР-1. Показано, что надежное и стабильное воспламенение и горение водоугольной суспензии из такого угля осуществляется с расходом более 100 кг/час при мощности плазмотрона 17,5 кВт. Время жизни электродов такого плазмотрона – более 1 000 часов. В плазменно-угольной горелке обеспечивается полное выгорание углерода с выделением тепловой мощности более 290 кВт. Плазменная система является маломощным компактным модулем, вписывается в конструкцию пылеугольного котлоагрегата и позволяет исключить дополнительное высокореакционное топливо – мазут или газ.

Ключевые слова: *плазменная подсветка, маломощный плазмотрон, низкореакционный уголь, водоугольная суспензия.*

Постановка проблемы. Существует много мировых энергетических прогнозов, которые в основных показателях близки между собой. Баланс между энергогенерирующими секторами определяют конкретные аспекты политических мер, в частности, по сокращению выбросов парниковых газов, основывающихся на ценах на углерод, мандатах и низкоуглеродных технологиях и т. д. Из прогноза Британской нефтегазовой компании BP следует, что до 2050 г. уголь будет основным источником тепловой и электрической энергии в мире, независимо от развития возобновляемых источников энергии [1]. Во многих документах, например, «Долгосрочной программе развития угольной промышленности России на период до 2030 г.» говорится, что уже в скором времени доля угля должна значительно увеличиться в топливном секторе, достигнув 32 35% и т. д. Но пока это только теория. Следует учесть, что в оптимистичных прогнозах закладываются новые технологии топливоиспользования, в т. ч. и так называемые технологии «чистого угля».

Начиная с середины 1960-х гг., пылеугольные ТЭС, которые до настоящего времени являются базовыми, достигли предела своего совершенства, определяемого законами термодинамики и свойствами материалов, из которых изготавливаются котлы и турбины. При этом за прошедшие годы одновременно существенно повысились капитальные затраты на строительство ТЭС в связи с ужесточением требований к защите окружающей среды от вредных выбросов, и стоимость производства электроэнергии на угольных ТЭС значительно возросла, а их привлекательность снизилась. Главной причиной значительного повышения стоимости производства электроэнергии на угольных ТЭС, построенных в основном в 1960–1970-х гг., специалисты-теплоэнергетики обоснованно признают использование в котлах этих станций крайне неэффективной технологии факельного (пылеугольного) сжигания угля [2]. Причина в том, что для розжига пылеугольных котлов и стабилизации процессов горения (подсветки пылеугольного факела) обычно применяют природный газ или мазут, стоимость которых постоянно растет. Проблема обостряется в теплоэнергетике, где используются малой и средней мощности котлы

с турбулентными вихревыми пылеугольными горелками. Для таких котлов характерны режимы с переменной тепловой нагрузкой. В этом случае практически все время требуется мазутная подсветка пылеугольных горелок, и мазут становится не дополнительным, а вторым основным топливом. При таком сжигании угля содержание углерода в золе достигает 20–30%. Сдерживающими факторами при использовании угля в энергетике всегда были чрезвычайно грязная технология и низкая эффективность его сжигания.

Следует отметить, что для Украины тепловые электростанции, работающие на низкосортных углях, являются базовыми [3]. Поэтому следует ожидать, что обостряющийся дефицит мазута и газа, повышение их стоимости актуализируют разработки и внедрение технологий эффективного безмазутного сжигания высокозольной низкореакционной угольной пыли. В настоящее время принято считать, что масштабные проекты с долгосрочной окупаемостью труднореализуемы, поэтому приоритет, исходя из такой логики, должен отдаваться комплексным проектам, направленным на совместную оптимизацию экономических и экологических показателей работы энергогенерирующих предприятий [4].

Анализ последних исследований и публикаций. Для решения проблемы высокоэффективного использования низкосортных твердых топлив при минимальном отрицательном воздействии на окружающую среду в 1983 г., по предложению ведущих специалистов в области плазменной техники и технологии М.Ф. Жукова, Л.С. Полака и др., поддержанному Госкомитетом по науке и технике, были начаты работы по созданию принципиально новой, плазменной технологии сжигания пылевидного топлива с помощью электродуговых нагревателей газа – плазмотронов [5]. Были проведены детальные экспериментальные и теоретические исследования процессов розжига и подсветки пылеугольного факела, разработана теория термохимической подготовки топлива к сжиганию (ТХПТ) [6; 7; 8; 9]. Впервые плазменная технология розжига была применена на Гусиноозерской ГРЭС на котлах типа ТПЕ-215, БКЗ-640, БКЗ-420. Эти разработки долго не получали промышленного распространения и только начали использоваться в течение последних лет на угольных электростанциях развитых стран мира. Сегодня в Китае данной технологией оснащены более 470 угольных котлов суммарной мощностью блоков более 200 млн кВт, что составляет примерно 30% от общей установленной мощности страны. Плазменный розжиг используется также в Индонезии (6 блок Индонезийской ТЭС «Суналая», Монголии (Улан-Баторская ТЭЦ), Тайвани (1, 2 блоки Хопингской электростанции, Словакии (ТЭС «Вояны») [4]. Плазменно-топливные системы (далее – ПТС) уже испытаны на большом количестве энергетических котлов паропроизводительностью от 75 до 670 т/ч и оборудованных различными типами пылеугольных горелок (прямоточных, муфельных и вихревых). При испытании плазменно-топливных систем сжигались угли всех сортов (бурый, каменный, антрацит и их смеси). Содержание «летучих» в них составляло от 4 до 50%, содержание золы – от 15 до 48%, и теплота сгорания была в диапазоне от 1 600 до 6 000 ккал/кг. Однако, хотя эти станции с ПТС подключены к сети, дают электроэнергию, они должны проработать до принятия решения о тиражировании проекта после полного цикла испытаний.

Технология ПТС заключается в ударном нагреве части аэросмеси (угольная пыль + воздух) пылеугольной горелки электродуговой плазмой до температуры выхода летучих угля и частичной газификации коксового остатка. Это является достаточным при сжигании низкосортных углей (при постоянной работе плазмотрона) и позволяет осуществить растопку котла при кратковременной, необходимой для достижения растопочных параметров котла, работе плазмотрона. По разным оценкам, электрическая мощность, потребляемая плазмотроном, не превышает 2,5% от тепловой мощности пылеугольной горелки, и составляет 0,3–0,5% от тепловой мощности котла. Принципиальная проблема, которая сдерживает промышленную реализацию плазменно-угольной технологии, заключается в необходимости использования достаточно мощных плазмотронов (свыше 200 кВт). Мощность плазмотрона определяется минимальными относительными затратами энергии, равными отношению тепловых мощностей плазмотрона и пылеугольной горелки, для АШ составляет 1,5–2,0 %. Реальный ресурс непрерывной работы таких плазмотронов в лучшем случае составляет 200–300 часов (декларируется больший, но в реальных условиях никто его не может продемонстрировать). Такого ресурса вполне достаточно для поджига, но не для подсветки [10; 11].

Следует отметить, что, с целью повышения ресурса топливно-плазменной системы, проводятся исследования по использованию СВЧ-плазмотронов [3; 12], поскольку они не требуют

применения специальных угольных или медных электродов, а также потому, что в них возможно создание критической концентрации электронов, т. е. к ударному термическому воздействию подключить плазмохимические эффекты. Это способствует раннему воспламенению холодной углевоздушной смеси и, при относительно малых временах взаимодействия угольных частиц с плазменным факелом (~0,05 с), интенсивному выгоранию углеродных частиц.

Постановка задачи. Целью данного исследования является преодоление основного недостатка плазменно-дуговых систем ТХПТ, связанного с ресурсом работы плазмотрона, и обоснование возможности их применения для розжига и подсветки низкореакционой угольной пыли с перспективой тиражирования. Основная идея развиваемого авторами подхода заключается в реализации трехступенчатой схемы умножения мощности плазмы с использованием базового низкосортного угля до уровня мощности мазутного факела, необходимого для достижения растопочных и сопровождающих горение параметров котла. При этом используется маломощный (15–20 кВт) специальный плазмотрон с ресурсом работы медных электродов более 1 000 часов.

Изложение основного материала исследования. На первом этапе разработки технологической схемы процесса была приготовлена активированная водоугольная суспензия (далее – ВУС) в двух исполнениях из бурого угля марки БР-1, техническая характеристика которого приведена в табл. 1.

Процесс получения ВУС (исполнение 1) по традиционной схеме включал следующие операции: дробление исходного угля до размера частиц 3 мм; тонкий помол угля в мельнице совместно с водной фазой и перемешивание. Для приготовления и исследования ВУС из бурого угля БР-1 использовалась лабораторная шаровая барабанная двухкамерная мельница МБЛ-100. Масса разовой порции угля, загружаемого в мельницу, – 10 кг. Соотношение угля и воды определяли по сухой массе угля таким образом, чтобы концентрация суспензии соответствовала заданному значению. В мельнице уголь измельчали преимущественно до класса 0–0,4 мм. Содержание фракции менее 50 мкм составляло ~ 60%. Время измельчения в мельнице – 60 мин. Концентрацию твердой фазы, полученной ВУС, определяли высушиванием при температуре 105°С, гранулометрический состав – методом влажного фракционирования на ситах по стандартной методике. Реологические характеристики определяли на универсальном ротационном вискозиметре Rheotest RN4.1. Суспензии готовились с использованием питьевой воды и добавлением пластификатора (NaOH). Добавка вводилась на первой стадии помола совместно с водной фазой. Таким образом, было получено достаточное для проведения испытаний количество ВУС со следующими характеристиками:

– содержание твердой фазы в ВУС – 52,3%;

– концентрация добавки – 0,1% в расчете на сухую массу угля;

– структурная вязкость – 0,7 Па·с;

– начальное напряжение сдвига – 12,5 Па;

– стабильность – до 30 сут.;

– предел текучести – 1,2–1,4 Па;

– низшая теплота сгорания суспензии – 10 500 кДж/кг.

Стабильность готового топлива определяли при хранении в аккумулирующем бункере с использо-

Таблица 1

Техническая характеристика угля БР-1

Параметр	Значение	Метод определения
Влага (рабочее сост.)	35,00%	GOST 11014-81
Зола (рабочее сост.)	11,23%	GOST 11022-95
Зола (сухое сост.)	25,00%	GOST 6382-91
Летучие в-ва (рабочее сост.)	22,70%	
Летучие в-ва (сухое сост.)	59,50%	ISO 195796: 2006
Сера (рабочее сост.)	1,46%	
Сера (сухое сост.)	3,33%	
Kcal/kg, MJ/kg Низшая теплота сгорания (рабочее сост.)	3 100 kcal/kg, 13,02 MJ/kg	ISO 1928: 2009
Kcal/kg, MJ/kg Высшая теплота сгорания (сухое сост.)	6 500 kcal/kg, 27,31 MJ/kg	
Kcal/kg, MJ/kg Высшая теплота сгорания (сухое беззольное сост.)	7 500 kcal/kg, 31,51 MJ/kg	

ванием пробоотборных устройств на нескольких уровнях. При низком качестве суспензию возвращали на переработку в мельницы. После завершения этапа приготовления водоугольную суспензию из резервуара для хранения насосом подавали на сжигание в топливно-плазменную горелку.

Приготовление ВУС (исполнение 2) выполняли кавитационным измельчением угля в водной среде без применения химических присадок в дезинтеграторе мокрого помола – «ГОРИЗОНТ-3000 МК-ВА», в который подавался уголь с размером частиц не более 10 мм. Перед подачей в дезинтегратор вода проходит подготовку в роторно-импульсном аппарате РИА-150-ВУТ. Выход суспензии с заданными параметрами происходил через 1 мин после включения аппарата. Получена ВУС с размером частиц до 50 мкм. Данная суспензия сохраняла стабильность на протяжении 5 суток. Считается, что в результате ударно-кавитационного разрушения угля, в отличие от традиционных механических процессов помола в мельницах раздавливающе-истирающего действия, ВУС приобретает ряд полезных свойств: 1) происходит выделение гуминовых кислот с образованием гуматов, приобретающих желеобразное состояние, что повышает устойчивость против расслоения; 2) высокая эффективность процесса сжигания при активной роли воды, нечувствительность к качеству исходного угля [13; 14].

На основе анализа существующих способов сжигания низкореакционной угольной пыли и собственных исследований были сформулированы основные принципы оптимальной системы ее воспламенения и сопровождения горения:

– предлагаемая система не должна изменять конструкцию котлоагрегата;

– наиболее сложная часть процесса – воспламенение топлива и его ТХП – должна быть вынесена из топочного пространства в специальный модуль, в котором можно контролировать процесс и управлять им;

– специальный модуль должен быть компактным, высоко теплонапряженным, чтобы обеспечить надежное воспламенение топлива на начальной стадии горения, когда оно еще малореакционно;

– наличие различных видов топлива (основное и растопочное) является нежелательным, следует стремиться к использованию одного вида топлива;

– на сегодняшний день наилучшей системой зажигания и сопровождения горения топлива являлась бы плазменная система;

– управление системой зажигания и сопровождение горения должны осуществляться автоматически при использовании процессора или компьютера.

Для реализации такого подхода в качестве растопочного и сопровождающего горение топлива может быть использован применяемый в котлоагрегате уголь, в данном исследовании принят бурый уголь БР-1. Основной проблемой при использовании ВУС, до сих пор окончательно и качественно не решенной, является его низкая реакционная способность на начальном участке горения. Поскольку активное воспламенение топлива определяет его дальнейшее горение, эта проблема сдерживает развитие технологии водо-угольного топлива вообще. Усилия по решению проблемы стабильного и надежного сжигания водоугольного топлива должны быть направлены на интенсификацию воспламенения топлива на начальном участке горения. Задача заключается в том, чтобы за малое время пролета частиц пыли в горелке выгорел твердый углерод и был запущен автотермический механизм горения. Воспламенение и стабилизация горения при использовании ВУС имеет свои особенности [15], которые следует учесть с применением плазменной системы. Это время обезвоживания угольной частицы, которое для размеров менее 50 мкм составит около 0,1 сек с соответствующим временем задержки зажигания в условиях термического удара плазмы. Время задержки зажигания связано с диаметром частиц и обусловлено, скорее всего, необходимостью достижения условия полного испарения воды из её пористой структуры. Для каждого характерного размера частицы ВУС есть предельные по температуре внешней среды условия зажигания. Это обусловлено ростом затрат на нагрев и испарение воды в пористой структуре частицы угля. Можно условно выделить два режима воспламенения: низкотемпературный (<950 K) и высокотемпературный (>950 K). Это обусловлено тем, что при более высоких температурах внешней среды прогрев частицы происходит более интенсивно. Для мелких частиц ВУС ($<0{,}4\cdot10^{-3}м$) различие времен задержки зажигания несущественно. В общем случае в диапазоне температур внешней среды (Тс = 900÷1300 K) различие между временами задержки воспламенения не превышает 30%. Воспламенение происходит после полного испарения всей влаги, содержащейся в пористой структуре частиц угля, но при достаточно низких температурах поверхности. В зависимости от температуры поверхности

угольной частицы, от времени до момента её воспламенения можно выделить три характерных участка. Первый соответствует интервалу времени прогрева частицы до температуры кипения (или близкой к ней) и означает ее полное «обезвоживание». Второй участок соответствует периоду прогрева и термического разложения сухого угля. После этого выполняется условие воспламенения ВУС и в дальнейшем температура растет до значений, соответствующих горению. Варьирование массовой доли компонент (воды и непосредственно угля) в достаточно широком диапазоне не оказывает существенного изменения условий и характеристик зажигания малых по размерам частиц водоугольной смеси.

Анализ существующих методов показывает превосходство плазменной технологии как более простой и удобной, чем розжиг с использованием растопочного топлива. Что касается влияния плазмы, то следует отметить, что общей теории протекания реакций пароплазменной газификации в неравновесных условиях, а во многих случаях даже и подхода к ней, не существует. Имеющийся материал разрознен и крайне немногочислен. Здесь можно ожидать самых неожиданных проявлений. Низкотемпературная плазма атмосферного давления содержит большое количество заряженных и нейтральных активных частиц. Эти активные частицы с высокой способностью излучения энергии могут существенно ускорять химические реакции и осуществлять возможность проведения реакций, которые в нормальных условиях затруднительны. Экспериментальные подтверждения существенного влияния радикалов на пароплазменную газификацию угля в условиях дуговой плазмы атмосферного давления получены в работе [16]. Уголь в условиях плазмы подвергается реакциям быстрого разложения и диссоциации с выделением летучих веществ и коксового остатка, которые при дальнейшем разложении образуют большое количество активных частиц, включая C_nH_m углеводороды, возбужденные С и Н атомы и т. д. Затем образуются различные газы CO, H_2 и CO_2 благодаря сложному комплексу параллельно-цепных реакций, а именно такие газы, как CO_2 и H_2, преобразуются или конвертируются в H_2 с выделением множества активных частиц, таких как OH, H радикалы и электроны, которые принимают участие в реакциях окисления по схеме рециклинга.

В ходе проведения данного исследования была разработана, смонтирована и испытана лабораторная установка по сжиганию водоугольного топлива с плазменным зажиганием и сопровождением горения для получения исходных данных при проектировании топливно-плазменной горелки в составе котлоагрегата, работающего на низкореакционной угольной пыли. Установка включала в себя основные элементы, необходимые для обеспечения процесса розжига и поддержки стабильного процесса горения ВУС: система хранения и регулируемой подачи ВУС; система водо- и газоснабжения; плазменная аппаратура с топливно-плазменной горелкой. Розжиг горелки и стабилизация пламени производились плазмотроном мощностью до 30 кВт (так называемый плазмотрон малой мощности). Это плазмотрон линейной схемы с двумя соосными цилиндрическими электродами и вихревой стабилизацией дуги (рис. 1). Плазмотрон охлаждается водой. Плазмообразующим газом является воздух. При работе на воздухе среднемассовая температура плазменной струи составляла примерно 4 000 К, тепловой КПД – около 80%.

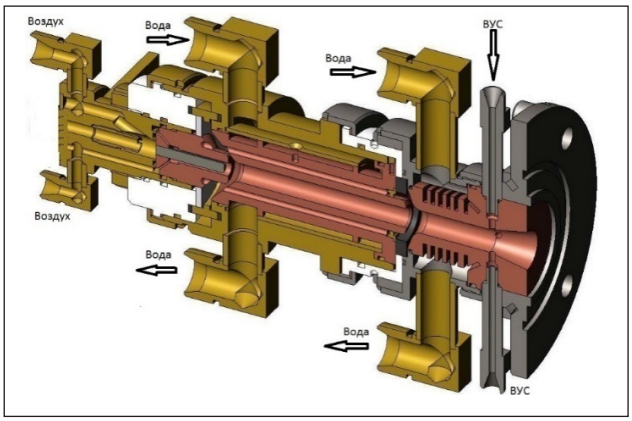


Рис. 1. Плазмотрон для топливно-плазменной горелки

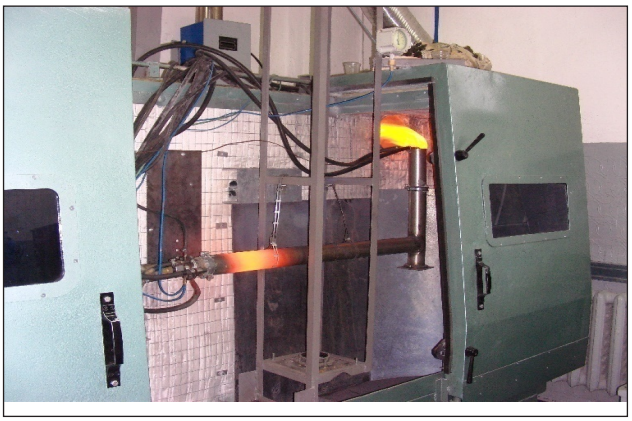


Рис. 2. Экспериментальная плазменно-угольная горелка в работе

Была применена такая система плазменного воспламенения при розжиге плазменно-угольной горелки, когда плазмотрон располагался по оси жаровой трубы. Вид экспериментальной плазменно-угольной горелки (плазмотрон, совмещенный с жаровой трубой) в работе приведен на рис. 2. Плазменная струя, подведенная к корню факела распыляемого топлива, разогревала и зажигала буроугольную ВУС. На рис. 3а приведена плазменная струя в отсутствие подачи ВУС, а 3б – при её подаче.

В плазменно-угольной горелке (рис. 1) решена задача достаточно быстрого смешения поперечно подаваемого сырья и теплоносителя в минимальном объеме реакционной зоны. Смешение происходит в интенсивно соударяющихся между собой встречных струях ВУС. В этом случае столкновение струй приводит к их самодроблению и интенсивной турбулизации потока. Взаимодействие потока горячей дуговой плазмы с распыленной холодной ВУС начинается в зоне прианодной части столба электрической дуги. Оптимизация смесителя сводилась к выбору такой геометрии (диаметр и угол раскрытия канала сопла плазмотрона, диаметр и углы отверстий для подачи ВУС по отношению к оси канала плазмотрона), при которой обеспечивается равномерное распределение распыленной ВУС в канале. Количество поперечных струй – 2 либо 4. Следует отметить, что для обеспечения требуемой дальнобойности необходимо было с высокой точностью поддерживать величину гидродинамических параметров – небольшие изменения расходов или температуры приводят к весьма значительным колебаниям дальнобойности. Все это необходимо учитывать при проектировании плазмохимического смесителя.

Процесс горения ВУС в топливно-плазменной горелке (рис. 1) можно вести в двух режимах – режиме «полного выгорания» и режиме «газификации». Первый обусловлен подачей всего воздуха, необходимого для горения непосредственно на вход жаровой трубы, второй предполагает работу горелки с недостатком окислителя. Во втором случае дополнительный воздух вдувается в переходный газоход или топку котла. Таким образом, режим «газификации» предполагает ступенчатое сжигание топлива.

Геометрическая схема топливно-плазменной горелки, предназначенной для отработки указанных технических решений в лабораторных условиях, имеет две секции: плазменный модуль предгазификации, содержащий плазмотрон с форкамерой, и модуль газификации/полного выгорания (жаровая труба с Dy = 150 мм) с узлом вдува вторичного воздуха. В экспериментах по газификации жаровую трубу теплоизолировали.

Процесс розжига ВУС осуществлялся в следующем порядке. Включался плазмотрон (рис. 3а) и осуществлялся прогрев форкамеры до появления светимости внутренней поверхности участка. После прогрева форкамеры потоком плазмы в течение 1,5–2 мин до температуры 700–750°С открывался кран на трубопроводе, осуществлялась подача ВУС с расходом 100–400 кг/час (рис. 3б) и происходило устойчивое зажигание и стабильное горение ВУС. При работе плазмотрона были зафиксированы следующие параметры: диаметр сопла анода – 10 мм, длина форкамеры – 20 мм, внутренняя поверхность форкамеры и жаровой трубы обмурована теплоизоляционным материалом. Расход плазмообразующего воздуха $G=20$ *нм³/час* , ток дуги I=50 А, напряжение на дуге U=350 В, мощность N=17,5 кВт, длина начального участка плазменной струи – 15 см. Плазмотрон работал устойчиво как в режиме прогрева плазмы, так и при подаче суспензии через форсунки.

В процессе исследований подтвердились эрозионные характеристики электродов плазмотрона

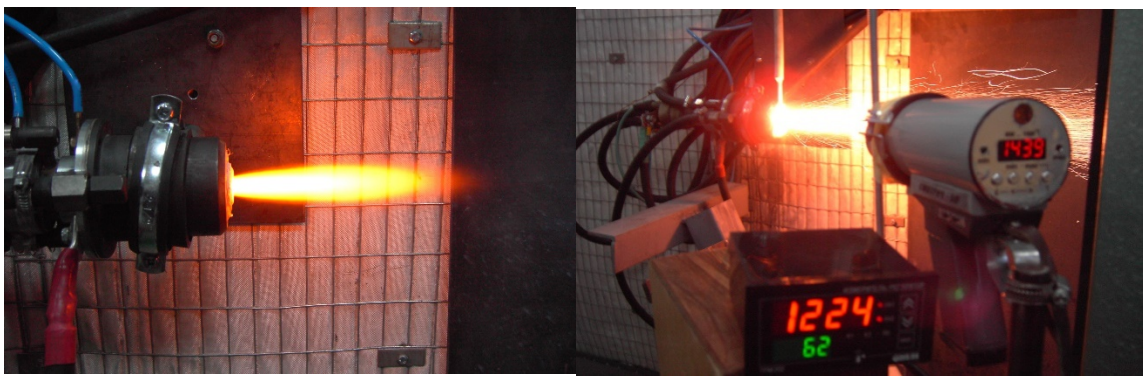


Рис. 3. Плазменная струя, а – отсутствие подачи ВУС, б – подача ВУС

(рис. 1). Эрозия медного полого катода в воздушной атмосфере составляет порядка ≈ $2 \cdot 10^{-9}$ кг/Кл, средний уровень эрозии анода ниже и составляет ≈ $4 \cdot 10^{-11}$ кг/Кл. Эрозия медных электродов определяется плотностью теплового потока, температурой поверхности и скоростью перемещения приэлектродных участков дуги. При обеспечении хорошей стабильности работы электродов сегодня можно говорить о гарантированном ресурсе в воздушной среде катода плазмотрона (рис. 1) более 1 000 часов, анода – 2 000 часов при токе 50 А и глубине срабатывания материала $1{,}5 \cdot 10^{-3}$ м.

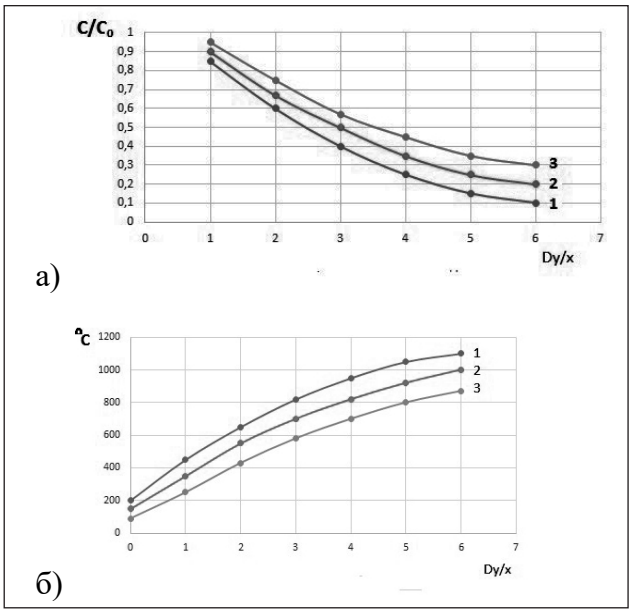


Рис. 4. Зависимости распределения по длине жаровой трубы: а – степени выгорания углерода, б – температуры стенки. 1 – расход ВУС – 100 кг/час, вторичного воздуха – 150 нм³/ч; 2 – расход ВУС – 200 кг/час, вторичного воздуха – 300 нм³/ч; расход ВУС – 300 кг/час, вторичного воздуха – 450 нм³/ч

Наибольший интерес с научной и практической точек зрения при переработке ВУС в топливно-плазменной горелке представляет режим газификации. Возможность проведения процесса газификации в данной конструкции при недостатке окислителя гарантирует режим «полного выгорания». Исследованиями, выполненными в работе [17], установлено, что при температурах процесса 1 500–2 500 К практически единственными компонентами синтез-газа, получаемого при газификации ВУС, являются H_2 и CO. Содержание их в газовой фазе достигает 93–97%. Энергетические затраты при этом составляют 3,0–3,5 кВт·ч/кг, теплота сгорания получаемого синтез-газа при плазменной газификации составляет 11,5–12,5 МДж/м³ и на 10–30% превышает теплоту сгорания газа при парокислородной газификации. Это обусловлено повышенным содержанием водорода (H_2=50–55%) в синтез-газе, который получают при плазменной газификации угля, по сравнению с содержанием водорода (H_2=35–45%) при парокислородной газификации. Для снижения энергетических затрат процесса плазменной газификации ВУС целесообразно использовать комбинированную алло-автотермическую газификацию, сочетающую плазменную ступень с традиционной автотермической ступенью газификации.

Лимитирующая стадия – это процесс газификации твердого углерода ВУС, происходит за счет протекания двух основных реакций:

$$2C+O_2 \rightarrow 2CO+218{,}8...кДж/моль$$
$$C+H_2O \rightarrow CO+131{,}4...кДж/моль$$

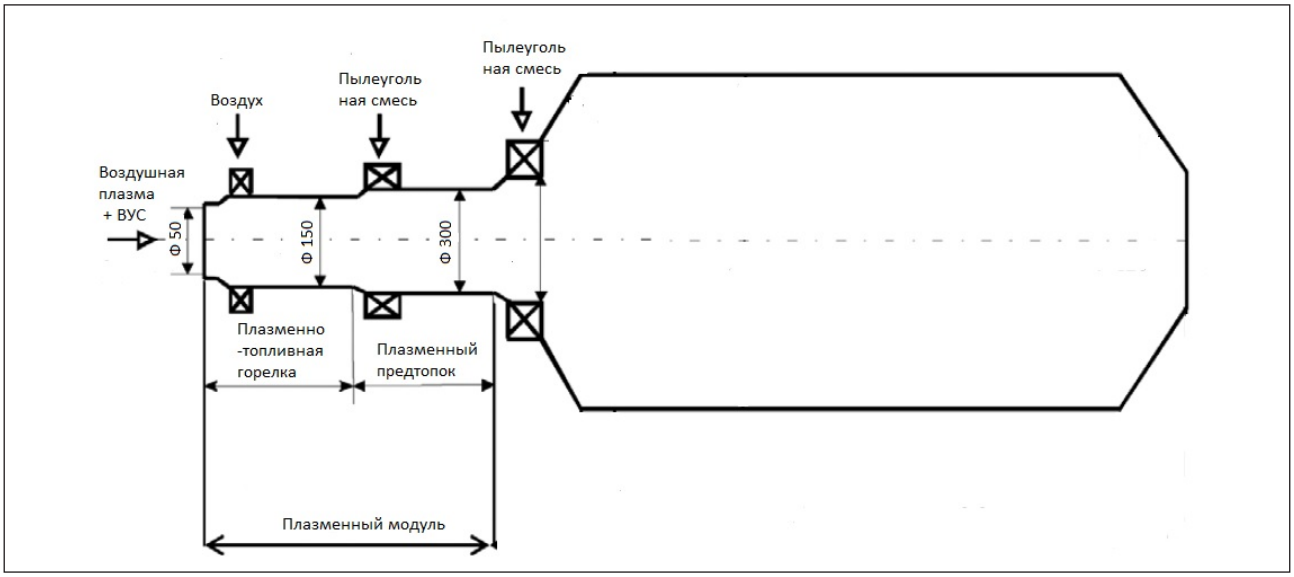


Рис. 5. Геометрическая схема плазменного модуля для розжига и подсветки пылеугольного факела

Исследования кинетической характеристики ВУС с помощью дериватографа [18] показывают, что горение происходит с высокой скоростью даже при низких температурах 300…400°С, когда заканчивается горение летучих и начинается переход к выгоранию коксового остатка. Таким образом, подтверждается тезис о том, что усилия по решению проблемы стабильного и надежного сжигания ВУС должны быть направлены на интенсификацию воспламенения топлива на начальном участке горения. Эта задача решается с помощью плазмотрона малой мощности. Дальнейший процесс автотермического окисления будет определяться разницей между количеством тепла, которое выделяется в результате первой реакции, и теплом, которое поглощается в результате второй реакции.

В результате исследований [19] подтверждено, что при распылении ВУС образуется полидисперсный поток, содержащий как чисто угольные частицы, так и водоугольные капли, имеющие в своем составе тонкие угольные частицы, окруженные жидкой фазой. Очевидно, что механизмы воспламенения и сжигания полидисперсного потока капель ВУС различны. Для проектирования новых конструкций горелок и определения оптимальных режимов работы выполнены базовые экспериментальные исследования на стенде (рис. 2) по степени среднемассового выгорания углерода по длине с соответствующим распределением температуры стенки футерованной жаровой трубы. Забор пыли осуществлялся водоохлаждаемым зондом по оси жаровой трубы. На рис. 4 приведены усредненные зависимости степени выгорания углерода (а) и распределения температуры стенки (б) по длине жаровой трубы плазменно-угольной горелки для ВУС исполнения 1. Видно, что основной выход летучих и их горение происходят в зоне подачи вторичного воздуха, где избыток воздуха очень мал (порядка 0,2–0,4) за счет тепла, излучаемого футеровкой. Горение же коксового остатка продолжается по всей длине при подаче всего воздуха, необходимого для горения в жаровой трубе, и степень выгорания топлива на выходе, равная ≤ 90% (дальнейшее дожигание коксового остатка должно проходить в следующей секции или в топочной камере котла). Температура стенок соответствовала верхнему пределу измерения ≤ 1 100°С. При использовании ВУС исполнения 2 степень выгорания углерода и, соответственно, температура стенки повышаются приблизительно на 10%. Причина пока не понятна, но, чтобы связать этот эффект с лучшей активацией угольной пыли, необходимы дополнительные исследования. Исходя из степени выгорания углерода при расходах ВУС 100–300 кг/час, можно заключить, что при использовании плазмотрона для интенсификации воспламенения на начальном участке мощностью 17,5 кВт может быть получена тепловая мощность в выходном факеле порядка 260–700 кВт

Ухудшение качества топлива, моральное старение, физический износ котлов и оборудования привели к снижению КПД котлов до 80 ÷ 82% и увеличению до 40 ÷ 45% (по тепловыделению) доли природного газа или мазута. При этом дефицитное высокореакционное топливо расходуется не только на подсветку пылеугольного факела, но и на компенсацию дефицита пыли, вызванного недостаточной производительностью при работе котла на топливе ухудшенного качества. Предлагаются различные варианты решения проблемы, но они в основном частичные [20]. Реальный путь повышения эффективности работы котлов прежних поколений при работе на низкосортных углях ухудшенного качества, а также полного отказа от использования остродефицитного нефтегазового топлива без кардинального изменения технологии сжигания и конструкции топочного устройства – поэтапная реконструкция существующих котлоагрегатов путем модернизации или замены существующих технологий и оборудования на комбинированные плазменные системы (рис. 5).

Выводы. Из приведенного анализа можно заключить, что плазменная технология, даже если не принимать во внимание экологическую сторону проблемы, является более простой и удобной для розжига и сопровождения горения низкореакционных углей, чем с применением растопочного топлива, и может быть рекомендована для использования в энергетике.

Список литературы:

1. Прогноз развития мировой энергетики до 2030 г. BP 2011. 80 с.URL:https://www.bp.com/content/dam/bpcountry/ru_ru/folder/Energy_outlook_2030_rus_2011.pdf.

2. Кравченко А. Глобальные проблемы Украинской теплоэнергетики. Электрик. № 9. 2013. С. 38–41.

3. Канило П.М., Ваврив Д.М., Шунеман К., Соловей В.В., Костюк В.Е., Костенко К.В. Альтернативные технологии сжигания низкореакционных углей в теплоэнергетических установках без дополнительного использования мазута или природного газа. Авиационно-космическая техника и технология. 2006. № 10 (36). С. 82–90.

4. Елин В.Н. Технология плазменного розжига и поддержания горения в пылеугольных котлах. Уголь. 2011. № 4. С. 12–13.

5. Тимошевский А.Н., Засыпкин И.М., Ващенко С.П., Комарицын В.К. Применение систем плазменного воспламенения угольной пыли в котлах Таштагольской производственно-отопительной котельной. Новости теплоснабжения. 2002. № 1 (17). С. 14–21.

6. Плазменная безмазутная растопка котлов и стабилизация горения пылеугольного факела / под ред. В.Е. Мессерле. Новосибирск: Наука. 1996. 415 с.

7. Жуков М.Ф. Плазмохимическая переработка угля. М.: Наука, 1990. 315 с.

8. Жуков М.Ф., Калиненко Р.А., Левицкий А.А., Полак Л.С. Плазмохимическая переработка угля. М.: Наука, 1990. 200 с.

9. Карпенко Е.И., Мессерле В.Е. Плазменноэнергетические технологии топливоиспользования. Новосибирск: Наука, 1998. 385 с.

10. Петров С.В., Саков А.Г., Котляров О.Л., Яценко В.П. К проблеме снижения энергозатрат на пламенный розжиг и стабилизацию горения пылеугольного факела. Техническая электродинамика. 2004. № 3. С. 84–87.

11. Петров С.В., Литовкин В.В. К вопросу о применении плазмы для эффективного сжигания низкореакционных углей. Энергетика и электрификация. 2005. № 3. С. 36–40.

12. Казанцев В.И., Ваврив Д.М., Канило П.М., Расюк Н.И., Шунеман К., Грицаенко С.В., Тымчик А.В., Мессерле А.В. Исследование СВЧ-плазменной технологии сжигания низкосортных углей. Теплоэнергетика. 2002. № 12. С. 39–44.

13. Дубинский Ю.Н., Карпов Е.Г., Калоша Е.Ю. Кавитационное водоугольное топливо – технология будущего.The international conference Heat Power Engineering and Environmental Protection. TENOR 2011 Ugljevik, (Republic of Srpska, Bosnia and Herzegovina), 14–16 September. 2011. P. 49–56.

14. Морозов А.Г. Гидроударные технологии в производстве водоугольного топлива. Энергобезопасность и энергосбережение. 2010. № 2 (32). С. 12–15.

15. Сыродой С.В. Термическая подготовка и зажигание частиц водоугольного топлива применительно к топкам котельных агрегатов: дисс. … .канд. техн. наук: 05.14.14.Томск, 2014. 130 с.

16. Xiaojun He, Tengcai Ma, Jieshan Qiu, Tianjun Sun, Zongbin Zhao, Ying Zhou, Jialiang Zhang. Mechanism of coal gasification in a steam medium under arc plasma conditions. Plasma Sources Science and Technology. 2004. № 13. P. 446–453.

17. Булат А.Ф., Шумриков В.В., Алымов Б.Д., Холявченко Л.Т., Васильев Л.М. Плазменная газификация водоугольных топлив. Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. ИГТМ НАН Украины. Днепропетровск, 2006. Вып. 67. С. 185–196.

18. Овчинников Ю.В., Бойко Е.Е., Серант Ф.А. Проблемы сжигания водоугольного топлива и предложения по разработке технологии сжигания. Доклады АН ВШ РФ. 2015. Январь – март. № 1 (26). Технические науки. С. 85–93.

19. Мурко В.И., Федяев В.И., Карпенок В.И., Засыпкин И.М., Сенчурова Ю.А., Риестерер А. Результаты исследований процессов распыления и сжигания суспензионного угольного топлива. Современная наука. 2012. № 1 (9). С. 89–96.

20. Шуваева Н.М., Борисенко О.М., Борисенко О.А. Повышение эффективности подготовки к факельному сжиганию низкореакционных углей Украины. Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. 2005. № 36. С. 124–129.

СИСТЕМА ПЛАЗМОВОГО ПІДСВІЧУВАННЯ НИЗЬКОРЕАКЦІЙНИХ ПАЛИВ ДЛЯ ТЕПЛОАГРЕГАТІВ

Розроблена та досліджена система плазмового підсвічення низькореакційних палив для теплоагрегатів, якщо в якості розпалювального та супроводжуючого горіння палива може використовуватися застосоване в котлоагрегаті вугілля. У даному дослідженні прийняте буре вугілля БР-1. Показано, що надійне та стабільне спалахування і горіння водовугільної суспензії із такого вугілля здійснюється з витратами більше ніж 100 кг/год за потужності плазмотрона 17,5 кВт. Термін життя електродів такого плазмотрона – понад 1 000 годин. В плазмово-вугільному пальнику забезпечується повне вигоряння вуглецю з виділенням теплової потужності понад 290 кВт. Плазмова система є малопотужним модулем, який вписується в конструкцію пиловугільного агрегату і дозволяє виключити додаткове високореакційне паливо – газ, мазут.

Ключові слова: *плазмове підсвічування, малопотужний плазмотрон, низькореакційне вугілля, водовугільна суспензія.*

PLASMA LIGHTING SYSTEM OF LOW-REACTIVE FUELS FOR HEAT-GENERATING SETS

A system for the plasma lighting of low-reaction fuels for heat-generating sets was developed and investigated, when coal used in the boiler can be used as the ignition and accompanying combustion of fuel. In this study brown coal BR-1 was adopted. It is shown that reliable and stable ignition and combustion of coal-water suspension from such coal is carried out at a flow rate of more than 100 kg/hr with a 17,5 kW plasmatron power. The lifetime of electrodes of such a plasma torch is more than 1 000 hours. In the plasma coal burner, complete carbon burn-out is achieved with the release of a thermal power of over 290 kW. The plasma system is a low-power compact module that fits into the design of a pulverized coal boiler and allows excluding additional high-reaction fuel – fuel oil or gas.

Key words: *plasma lighting, low-power plasmatron, low-reaction coal, water-coal suspension.*

УДК 621.311, 621.316.7

Розен В.П.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

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

Реуцький М.О.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ФОРМУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВОДОВІДЛИВНИХ УСТАНОВОК НА ГІРНИЧОВИДОБУВНОМУ ПІДПРИЄМСТВІ

У статті визначена математична модель погоризонтного шахтного водовідливу, параметри якої дозволяють визначити енергоефективні режими роботи насосів для тризонного тарифу. Використання алгоритму управління електроспоживанням шахтних водовідливних установок визначає режим роботи насосів для лінійної зміни притоку. Для змінного притоку визначення режиму роботи супроводжується визначенням гідравлічної потужності обладнання водовідливу. Визначені вимоги до гідравлічного обладнання водовідливу при змінному притоці. Показані межі гідравлічної потужності обладнання водовідливу та вплив зміни параметрів на режим роботи.

Ключові слова: *максимум енергосистеми, гідравлічний потенціал обладнання, горизонт шахти, водний притік у шахту, погоризонтна схема водовідливу.*

Постановка проблеми. Для економіки України розвиток гірничовидобувної галузі є пріоритетним напрямком, оскільки особливо важливого значення в сучасних умовах набуває питання ефективного використання електроенергії в енергоємних галузях промисловості. На сьогодні переважна більшість сировини видобувається підземним способом. Зі збільшенням глибини виробок зростає енергоємність гірничого підприємства. Тому ефективне використання електроенергії в гірничій промисловості стає все більш важливим завданням, яке необхідно вирішувати з погляду раціонального її використання з урахуванням обмежень зі сторони енергосистеми. Графік навантаження енергосистеми формується споживачами електричної енергії. Аналіз зміни графіків навантаження енергосистеми показує, що нерівномірність навантаження має тенденцію до зростання. Добові графіки навантаження сучасних енергосистем мають, як правило, два явно визначені піки – ранковий двогодинний (8:00–10:00 год) та вечірній чотиригодинний (17:00–21:00 год). Між піками знаходиться зона зниженого навантаження. Ще більше зниження спостерігається протягом семигодинного нічного часу(23:00–06:00 год).

У зв'язку зі збільшенням нерівномірності графіка електричних навантажень енергосистеми енергетичні компанії змушені змінювати тарифні коефіцієнти для стимулювання споживачів. Виробничий процес, зазвичай, не дозволяє переривати роботу споживачів. У гірничодобувній промисловості як регулятор навантаження енергосистем доцільно використовувати водовідливну установку, яка характеризується значною потужністю та вільним циклічним графіком роботи в часі [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На практиці під час проектування та експлуатації шахтного водовідливу глибоких шахт (800–1 600 м) все більшого поширення набуває погоризонтна або багатоступенева схема водовідливу [5]. Використання погоризонтної схеми шахтного водовідливу обумовлено не лише самим характером поступового заглиблення гірничих

робіт, але й відсутністю потреби у використанні високонапірних насосних агрегатів. Основною складністю під час проектування та експлуатації комплексів шахтного водовідливу є врахування нестабільності водного притоку. У роботах [6; 7] автори зазначають, що прогнозне визначення притоку води в шахту зазнає значних похибок, однак коливання притоку відбувається в певних межах. У разі значних перевищень нормального притоку води до горизонту [8] необхідно визначити надлишковий потенціал гідравлічних потужностей обладнання, тобто об'єм водозбірної споруди (водозбірника) та потужності насосного обладнання, яке у процесі проектування зазвичай приймається відповідно до вимог правил безпеки.

Постановка завдання. Метою даної роботи є визначення надлишкових гідравлічних потужностей обладнання під час можливих змін водного притоку для підвищення рівня енергоефективності функціонування водовідливних установок.

Виклад основного матеріалу дослідження. Витрати на електроенергію Проб у процесі роботи водовідливу на горизонті залежать від його режиму роботи [2; 3]:

$$П_{роб} = \frac{\rho \cdot Q_p \cdot H_p}{10^3 \cdot \eta_д \cdot \eta_c \cdot \eta_p} \cdot \sum t_p \cdot a_i, \qquad (1)$$

де ρ – щільність рідини, кг/м^3;

Q_p, H_p, η_p – робочі параметри насоса (подача, м^3/год; напір, м; ККД);

$\eta_д, \eta_c$ – ККД двигуна і електричної мережі;

ΣT_p – сума робочого часу насосів;

a_i – велична плати за електроенергію у відповідній зоні.

Функція мети у процесі регулювання водовідливу шахти в певних тарифних зонах має вигляд:

$$\sum t_p \cdot a_i \to \min, \qquad (2)$$

де Σt_p – сума робочого часу насосів;

a_i – зонні тарифи на електроенергію.

Для зменшення витрат на електроенергію необхідно зменшити тривалість увімкнення насосів не лише в часи пікового тарифу, а також під час напівпікового періоду. Час увімкнення насосів, які знаходяться на горизонті водовідливу, залежить від параметрів моделі погоризонтного шахтного водовідливу:

$$< Q_{пр}, Q_{под}, V_{вод} >, \qquad (2)$$

де $Q_{пр} = Q_{под\text{-}1}, + Q_{гор}$, – притік води до водозбірника на горизонті водовідливу, який залежить від фактичного притоку води на горизонті та подачі води з попереднього (нижнього) горизонту, м^3/год;

$Q_{под} = f\ (\ H_{гор}, Q_{нас}, \eta_{нас}, R_{тр}, N_{пр},\ P_{нас})$ – подача води з горизонту шахтного водовідливу, м^3/год, яка залежить від глибини горизонту водовідливу $H_{гор}$;

$Q_{нас}$ – робоча подача насоса, встановленого на горизонті водовідливу;

$\eta_{нас}$ – коефіцієнт корисної дії насоса;

$R_{тр}$ – еквівалентний опір трубопроводу на горизонті водовідливу;

$N_{пр}$ – кількість паралельно працюючих насосів на горизонті водовідливу;

$P_{нас}$ – споживана електрична потужність одного двигуна на горизонті водовідливу;

$V_{вод}$ – об'єм водозбірника на горизонті водовідливу, м^3.

Дана модель описує будь-який погоризонтний шахтний водовідлив, що дозволяє застосовувати її як для існуючих шахт, так і для проектування нових. Параметри математичної моделі погоризонтного шахтного водовідливу поділяються на два типи: нерегульовані $Q_{пр}$ параметри, під які необхідно підлаштовувати режими роботи споживачів, та регульовані $Q_{под}$, $V_{вод}$ параметри, які можна змінювати для досягнення мінімальних витрат на електроенергію.

Постійний видобуток вугілля або руди призводить до зменшення покладів на робочих горизонтах, що потребує поглиблення шахти. Проектування роботи водовідливу нового горизонту (нижнього) дозволяє врахувати характеристики гідравлічної потужності обладнання під час побудови водовідливу. Для роботи нижнього горизонту математична модель погоризонтного водовідливу шахти значно спрощується, оскільки притік $Q_{пр}$ не залежить від роботи попереднього горизонту $(Q_{гор\text{-}1}=0,\ Q_{пр}=Q_{гор})$ за умови, що очищення трубопроводу проводиться за планом, і трубопровід знаходиться в робочому стані $(Q_{под}=Q_н)$. Спрощена математична модель погоризонтного шахтного водовідливу має вигляд:

$$< Q_{гор}, Q_н, V_{вод} >, \qquad (3)$$

Для розрахунку за спрощеною моделлю погоризонтного шахтного водовідливу за алгоритмом управління електроспоживанням шахтних водовідливних установок необхідно визначити параметр нормального притоку води до горизонту. Параметр нормального притоку води до горизонту визначається геологічним відділом на залізовидобувному підприємстві. За відомим параметром притоку можливо визначити межі гідравлічної потужності значень регульованих параметрів (об'єм водозбірника, подачу насоса).

Для описання алгоритму управління електроспоживанням шахтних водовідливних установок приймемо такі припущення:

– притік води протягом добового проміжку часу є рівномірним, тобто рівняння заповнення водозбірника лінійне;

– параметри насосів і трубопроводів для кожного режиму їх роботи протягом добового проміжку часу, на якому виконується моделювання, постійні;

– відкачка води з горизонту виконується насосами одного типу.

Основною задачею алгоритму є визначення моменту часу ввімкнення водовідливних насосів, які зможуть забезпечити до моменту максимуму енергосистеми відкачування води з водозбірника.

Нехай графік зміни рівня води у водозбірнику для працюючої водовідливної установки задається лінією ВС (рис. 1.).

Заповнення водозбірника відбувається на лінії АВ. Необхідно, щоб точка С, яка показує момент часу повної відкачки води з водозбірника, була поєднана з початком періоду максимуму навантаження енергосистеми (T_1 – для ранкового максимуму, T_3 – для вечірнього максимуму). Для цього проведемо з точки С лінію паралельну АВ, і з точки T_1 – лінію, паралельну ВС. Проекція точки В` на вісь часу показує момент увімкнення t_2 водовідливної установки, який визначається за формулою:

$$t + h(t)S / (Q_н - Q_п) - T_1 + E \geq 0 , \qquad (4)$$

де $h(t)$ – поточний рівень води в водозбірнику;

t – поточний час;

S – площа водозбірника;

$Q_н$ – подача насосної установки;

$Q_п$ – приток води у водозбірнику;

E – запас часу, що гарантує завершення відкачування води до розрахованого моменту.

У разі досягнення верхнього рівня води в водозбірнику (точка D) водовідливна установка вмикається від сигналу датчика верхнього рівня (у момент t_3). Час мінімальної роботи водовідливної установки в період максимуму навантаження енергосистеми визначається як проекція лінії DE на вісь часу. Точка Е знаходиться на перетині ліній DE і EF. Сигнал на відключення водовідливної установки формується в момент часу t4. Момент відключення водовідливної установки визначають за формулою:

$$H - h(t) - Q_п(T_2 - t) / S \geq 0 , \qquad (5)$$

де Н– висота водозбірника;

T_2 – закінчення ранкового максимуму.

Точка G показує момент часу повної відкачки води з водозбірника.

Якщо продуктивність працюючої водовідливної установки не дозволяє відкачати воду з водозбірника у період між ранковим та вечірнім максимумами навантаження енергосистеми (закон зміни об'єму води в водозбірнику при працюючій водовідливній установці заданий лінією FG), передбачається вироблення керуючого сигналу на вмикання резервного насоса. Момент відключення додаткового насоса визначається за формулою:

$$T_2 - T_3 + E + h(t)S / (Q_{н1} + Q_{н2} - Q_п) + \\ + h(t)S / (Q_{н1} - Q_п) \leq 0 \qquad (6)$$

Даний алгоритм працює за умови лінійної зміни притоку води в шахту і є ідеальною умовою. Хоч притік води в шахту досить складно визначити точно, зміна водного притоку не може відбуватися миттєво, що свідчить про плавну зміну водного притоку. Плавність зміни притоку пов'язана з особливістю будови стоку води в водозбірник із гірничої виробки, яка проходить через водовідливні канави, довжина яких сягає декількох кілометрів, отже, сумарний об'єм водовідлив-

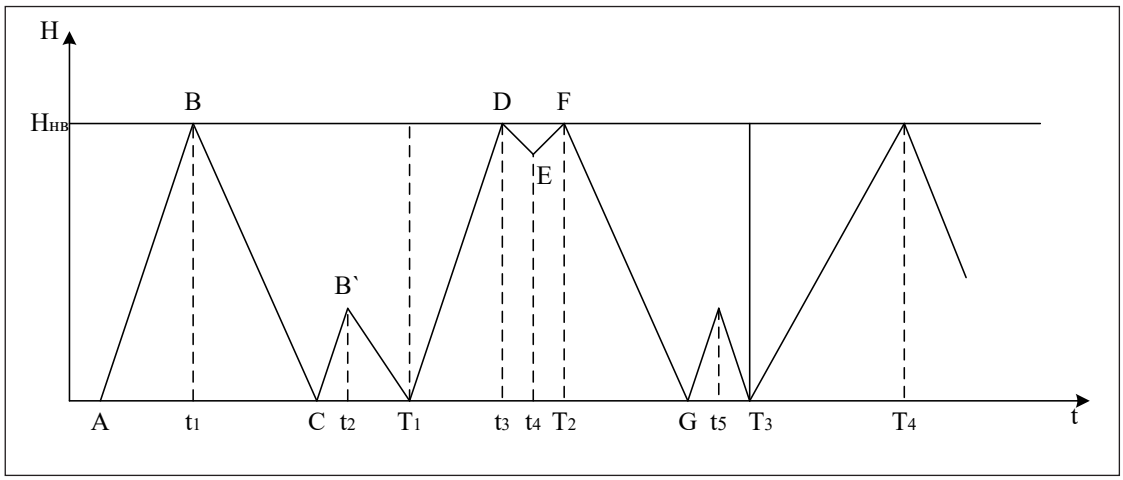


Рис. 1. Графік роботи водовідливної установки в режимі позапікового споживання електричної енергії

них канав становить приблизно 100–300 м^3 [7]. Таким чином, водовідливні канави є натуральним буфером, який згладжує різкі зміни водного притоку. Відповідно, сезонні коливання притоку протягом року проходитимуть поступово, без різкої зміни, що спричиняє накладення певних вимог на гідравлічне обладнання водовідливу шахти на кожному горизонті:

1. Необхідність моніторингу зміни притоку та швидкості заповнення водозбірника в реальному часі.

2. Визначення гідравлічних потужностей обладнання для зменшення роботи в пікові та напівпікові періоди енергосистеми за умови коливань притоку.

Для дотримання першої умови необхідне встановлення лічильників на притоці води до водозбірника або датчиків, які б показували кількість води у водозбірнику. Однак через особливості будови водозбірника обидва варіанти вирішення потребують значних коштів. Для вирішення першої умови пропонується скористатися проблемою нерегульованого привода шахтного водовідливу, а саме – зміною статичного напору [9]. Зміна статичного напору пропорційна зміні притоку води до горизонту шахти. Реалізується за допомогою встановлення датчика тиску на всмоктувальному трубопроводі, який знаходиться в нижній точці водозбірника; датчик показуватиме швидкість прибування води до водозбірника та швидкість відкачування.

Дотримання другої умови дозволить визначити необхідність збільшення гідравлічних потужностей обладнання, а саме збільшення водозбірника, заміну насосів на більш потужні або дооснащення насосними агрегатами. Визначення мінімальної межі гідравлічної потужності обладнання проводиться відповідно до правил безпеки на вугільній шахті, згідно з якими об'єм водозбірника головного водовідливу повинен забезпечувати накопичення не менш ніж чотиригодинного максимального припливу води, що дозволяє перекрити час чотиригодинного вечірнього пікового періоду. Мінімальний об'єм водозбірника повинен складати:

$$V_{\min} = k_з \cdot t_м \cdot Q_{макс}, \qquad (7)$$

де: $k_з$ = 1,15 – середнє значення замулення вітки водозбірника від максимально допустимого, що дорівнює 30%;

$t_м$ = 4год – найбільша тривалість одного періоду проходження максимуму навантаження в енергосистемі;

$Q_{макс}$ – максимальне значення годинного шахтного притоку води, м^3/год.

Із формули (7) визначається мінімальне значення об'єму водозбірника для функціонування водовід-

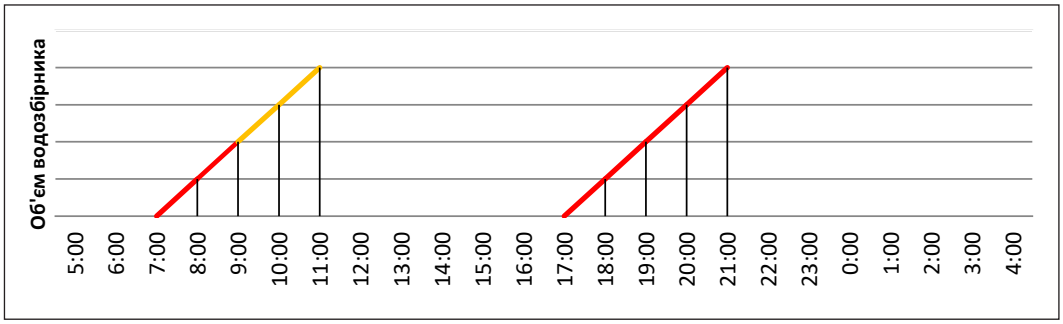


Рис. 2. Графік чотиригодинного заповнення водозбірника

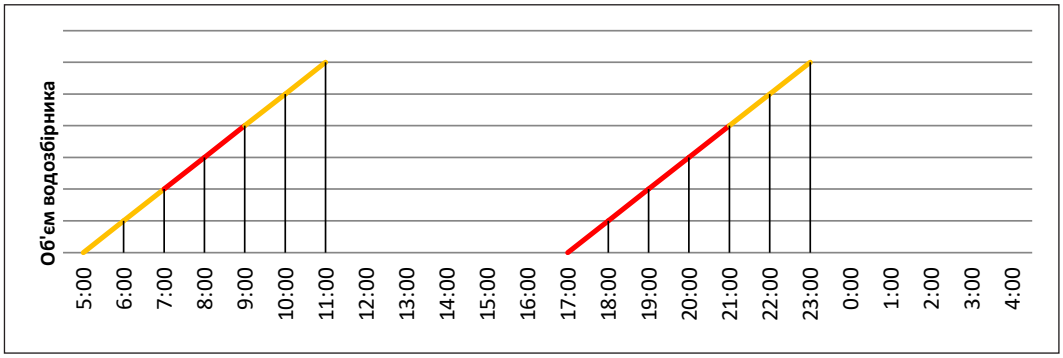


Рис. 3. Графік шестигодинного заповнення водозбірника

ливу на горизонті шахти, відповідно до реального об'єму водозбірника на горизонті отримуємо:

$$V_{min} \le V_{вод} \quad (8)$$

Якщо задатися умовою, що до періоду початку максимумів енергосистеми водозбірник має бути порожнім, то графік чотиригодинного заповнення матиме такий вигляд (рис. 2).

Якщо точно визначити приток води до горизонту досить складно, існує два можливих варіанти умов, а саме:

– водозбірник заповниться до 11:00, о 21:00 датчик верхнього рівня спрацює раніше, а насос почне відкачувати воду в час максимуму енергосистеми, що є неенергоефективним для підприємства.

– водозбірник заповниться після 11:00, о 21:00 датчик верхнього рівня спрацює після і насос почне відкачувати воду; чим пізніше насос почне відкачувати воду, тим вигідніше для підприємства (за умови, що насос відкачає воду до часу початку максимуму).

За рахунок наявності більшого водозбірника та можливості заповнення за шестигодинний нормальний притік зміститься початок ранкового максимуму (рис. 3), що може призвести до зменшенню часу роботи в напівпікові періоди.

Це створить двогодинний запас (9:00–11:00 год, 21:00–23:00 год), який повинен урахувати збільшення водного притоку. Величина запасу визначається співвідношенням:

$$\frac{Q_{\max}}{Q_{нор}} = 1 + \frac{t_{зап}}{t_з}, \quad (9)$$

де $Q_{мах–}$ максимальний притік води до горизонту;

$Q_{нор}$ – нормальний притік води до горизонту;

$t_{зап}$ – час запасу;

$t_з$ – час заповнення водозбірника у разі нормального притоку води до горизонту.

Водовідливні установки, як правило, обладнані відцентровими насосами, що обумовлюється високою надійністю їх роботи, високою економічністю порівняно з поршневими та здатністю використовувати високошвидкісні електродвигуни [4]. Подача насоса визначається з правил безпеки, у яких визначається, що головні і дільничні водовідливні установки повинні бути обладнані не менш ніж трьома насосними агрегатами, подача кожного з яких має забезпечувати відкачування добового припливу води не довше, ніж за 20 годин.

$$20 > \frac{V_{вод}}{Q_{нор} + Q_н} > T_м - t_{зап} + t_з, \quad (10)$$

де $T_м$ – період часу між максимумами енергосистеми.

Збільшення водозбірника повинно враховувати здатність насосів відкачати збільшений об'єм до початку максимуму енергосистеми. Здатність насосів визначає час, за який насоси повинні відкачати весь об'єм водозбірника при максимальному притоці, і включають у себе робочу та резервну групи.

Висновок. Розроблена математична модель погоризонтного шахтного водовідливу та алгоритм управління електроспоживанням шахтних водовідливних установок дозволяють встановити вимоги до гідравлічного обладнання водовідливу. Врахування коливань водного притоку визначає межі гідравлічної потужності обладнання.

Список літератури:

1. Праховник А.В., Розен В.П., Дегтярев В.В. Энергосберегающие режимы электроснабжения горнодобывающих предприятий. Москва: Недра, 1985. 232 с.

2. Про затвердження Порядку застосування тарифів на електроенергію від 13 червня 2017 р. № 764 / Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сфері енергетики. URL: http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0599-12.

3. Данильчук Г.И., Шевчук С.П., Василенко П.К. Автоматизация электропотребления водоотливных установок. Киев: Техніка, 1981. 102 с.

4. Попов В.М. Рудничные водоотливные установки. Москва: Недра, 1972. 304 с.

5. Стожков Д.С. Обоснование зависимости затрат на электропривод насосных агрегатов от высоты ступени в многоступенчатом шахтном водоотливе. Известия Уральского государственного горного университета. 2013. № 1 (29). С. 59–62.

6. Тимухин С.А., Долганов А.В., Угольников А.В. Проблемы проектирования и эксплуатации комплексов шахтного водоотлива. Известия Уральского государственного горного университета. 2014. № 3 (35). С. 68–74.

7. Лисицкий А.В. Совершенствование системы управления шахтным водоотливом за счет краткосрочного прогноза водопритоков. Записки Горного института. 2002. № 150. С. 96–99.

8. Тимухин С.А., Иващенко Е.П., Марченко А.Ю., Марченко М.Ю., Салтанов С.Н., Баринов И.М., Викулов Е.А. О необходимости более полного учета максимальных притоков воды в проектных решениях

комплексов главного водоотлива. Известия Уральского государственного горного университета. 2015. № 4 (40). С. 41–45.

9. Бабокин Г.И. Энергосбережение в насосных станциях водоотлива средствами регулируемого электропривода. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 11. С. 305–306

ФОРМИРОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВОДООТЛИВНЫХ УСТАНОВОК НА ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

В статье определена математическая модель погоризонтного шахтного водоотлива, параметры которой позволяют определить энергоэффективные режимы работы насосов для трехзонного тарифа. Использование алгоритма управления электропотреблением шахтных водоотливных установок определяет режим работы насосов для линейного изменения притока. Для переменного притока определение режима работы сопровождается определением гидравлической мощности оборудования водоотлива. Определены требования к гидравлическому оборудованию водоотлива при переменном притоке. Показаны границы гидравлической мощности оборудования водоотлива и влияние изменения параметров на режим работы.

Ключевые слова: *максимум энергосистемы, гидравлический потенциал оборудования, горизонт шахты, водный приток в шахту, погоризонтная схема водоотлива.*

FORMATION OF ENERGY-EFFICIENT MODES OF WORKING OF WATER-RESISTANT INSTALLATIONS ON MINE-ENTERPRISE ENTERPRISES

In the article a mathematical model of the horizontally shaft drainage is determined, the parameters of which allow to determine energy-efficient modes of operation of pumps for a three-zone tariff. The use of the management algorithm for managing the consumption of mine drainage systems determines the mode of operation of the pumps for the linear change of inflow. For an alternating tributary, the determination of the operating mode is accompanied by the definition of the hydraulic power of the drainage equipment. As well as certain requirements for hydraulic drainage equipment with variable inflow. Displays the limits of the hydraulic power of the drainage equipment, and how the change of parameters affects the operating mode.

Key words: *maximum of the power system, hydraulic potential of the equipment, mine horizon, water flow into the mine, horozontous drainage scheme.*

УДК 621.314

Савченко Н.П.
Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

Третьяк А.В.
Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

Шевченко С.Ю.
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

МАХОВИК ПЕРЕМЕННОГО МОМЕНТА ИНЕРЦИИ С ДИСБАЛАНСНЫМИ ГРУЗАМИ

В статье проанализированы конструкции маховиков с переменным моментом инерции для использования в составе кинетического энергонакопителя с целью регулирования нагрузки в электрических сетях 0,4 кВ. Разработана новая конструкция маховика с переменным моментом инерции и усовершенствованными параметрами работы за счет включения в конструкцию дисбалансных грузов.

Ключевые слова: *маховик, момент инерции, дисбалансный груз, кинетический энергонакопитель.*

Постановка проблемы. Известно большое количество маховиков различной конструкции, соответственно и области их применения разнообразны. С недавнего времени маховики стали широко применять в энергетике в качестве аккумуляторов энергии для регулирования нагрузки в электрических цепях как высокого, так и низкого напряжения.

По большей части имеющиеся конструкции механических маховиков разработаны для использования в приводах различных машин и автомобилей, для аккумулирования больших мощностей в энергетике используют супермаховики.

При применении маховиков в составе кинетического энергонакопителя (далее – КЭН) небольшой мощности для хранения энергии, регулирования и симметрирования нагрузки общественных зданий [1, с. 70], основными параметрами являются простота конструкции, надежность, долговечность и невысокая стоимость, при этом необходимо свести к минимуму процесс биения маховика при вращении, вызванного центробежной силой. Процесс балансировки возможно выполнить различными способами, но, как правило, они являются дорогостоящими. Одним из сравнительно легко реализуемых и эффективных способов является введение в конструкцию маховика дисбалансных грузов.

Анализ последних исследований и публикаций. Разработки конструкций механических маховиков с переменным моментом инерции приведены в научных трудах А.В. Ильченко, А.А. Войны, Г.Г. Смердова, С.В. Елисеева и др. [2–5], конструкция с дисбалансными грузами рассмотрена в работе С.В. Щитова, В.А. Сенникова и др. [6].

Постановка задачи. Целью данного исследования является разработка простой и эффективной конструкции маховика КЭН небольшой мощности, применяемого для регулирования и симметрирования нагрузки общественного здания.

Изложение основного материала исследования. Выполним анализ известных конструкций маховиков с переменным моментом инерции и целесообразность их применения в КЭН для регулирования и симметрирования нагрузки здания.

Для понимания целесообразности применения той или иной конструкции маховика на рис. 1 приведена упрощённая схема КЭН для регулирования нагрузки здания, полное описание которой находится в [1 с. 71].

В [3, с. 1] приведена конструкция маховика переменного момента инерции, содержащая вал, на котором жестко закреплен трехлучевой кронштейн и установлена с помощью подшипников

центральная шестерня. На концах кронштейна закреплены соосно маховичные секторы, позволяющие накапливать кинетическую энергию, и зубчатые секторы, жестко соединенные с маховичными секторами. Зубчатые секторы находятся в зубчатом зацеплении с центральной шестерней. Накопитель потенциальной энергии выполнен в виде пружины, навитой вокруг вала в полости, образованной валом и центральной шестерней. Концы пружины соединены с центральной шестерней и трехлучевым кронштейном. Основное применение данной конструкции – в приводах различных машин (например, автомобилей) с целью уменьшения расхода топлива за счет рекуперации энергии торможения и поддержания частоты вращения вала двигателя в заданном диапазоне. Конструкция маховика приведена на рис. 2.

Применение его в составе КЭН нецелесообразно, так как он имеет сложную конструкцию, что приведет к большим потерям мощности в элементах маховика и низкому КПД.

В [4, с. 1] приведена конструкция маховика, которая содержит массивный обод, являющийся связующим звеном для полумуфт, размещенных на валах электродвигателя и начального звена механизма. Массивные ползуны выполнены с возможностью перемещения в радиальных пазах обода и образуют с ним поступательные кинематические пары. Спицы образуют вращательные кинематические пары в соединениях с полумуфтами и ползунами. Достигаются регулирование величины момента инерции в процессе работы маховика и снижение величины пускового момента. Конструкция маховика приведена на рис. 3.

Применение его в составе КЭН нецелесообразно, так как он имеет большие потери на трение в кинематических парах ползунов в радиальных пазах обода, а также низкую точность балансировки.

В [5, с. 1] маховик содержит закрепленный на валу корпус, внутри которого имеются радиально перемещающиеся элементы. Ступица

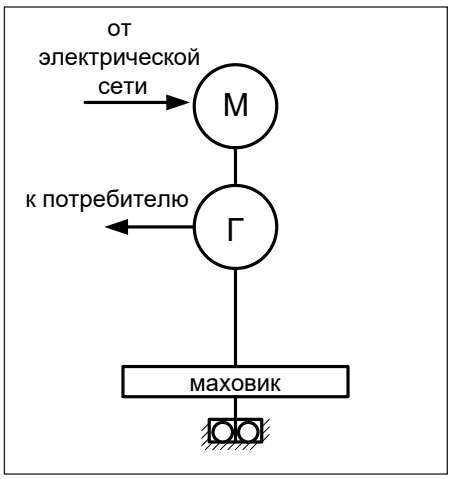


Рис. 1. Структурная схема КЭН: М – электродвигатель, Г – генератор

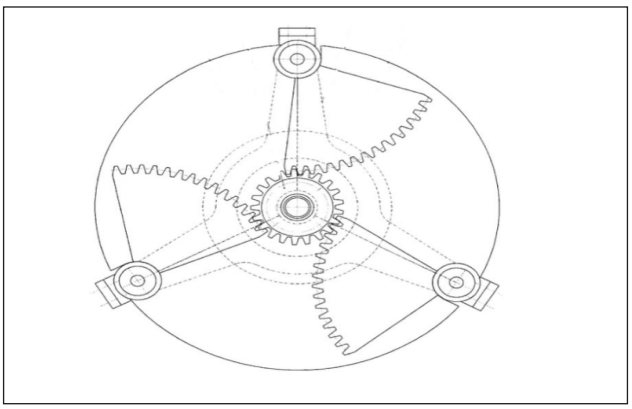


Рис. 2. Конструкция маховика с трехлучевым кронштейном

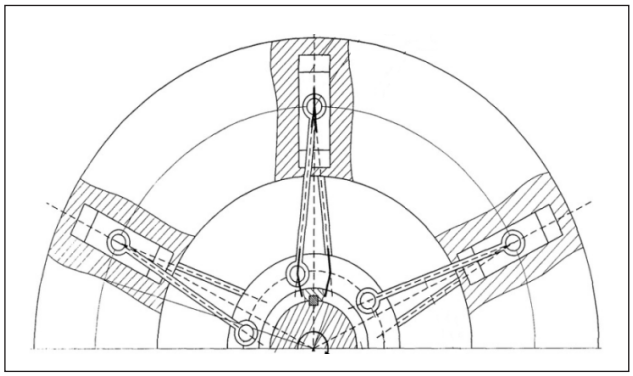


Рис.3. Конструкция маховика с массивными ползунами

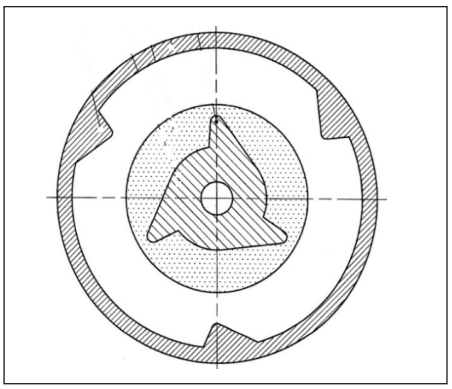


Рис. 4. Конструкция маховика с радиально перемещающимися элементами

маховика выполнена из материала, обладающего свойствами магнита, а полый корпус с ободом – из материала, не обладающего свойствами магнита. Полый корпус частично заполнен сыпучим материалом, взаимодействующим с магнитом, например, стальными шариками или чугунной стружкой. На внешней образующей поверхности ступицы и внутренней образующей поверхности обода внутри корпуса маховика имеются выступы. Передняя и задняя поверхности этих выступов выполнены с различными углами наклона. Изобретение позволяет уменьшить массу маховика, уменьшить энергозатраты в начальный период вращения маховика и повысить плавность вращения в рабочем режиме. Конструкция маховика приведена на рис. 4.

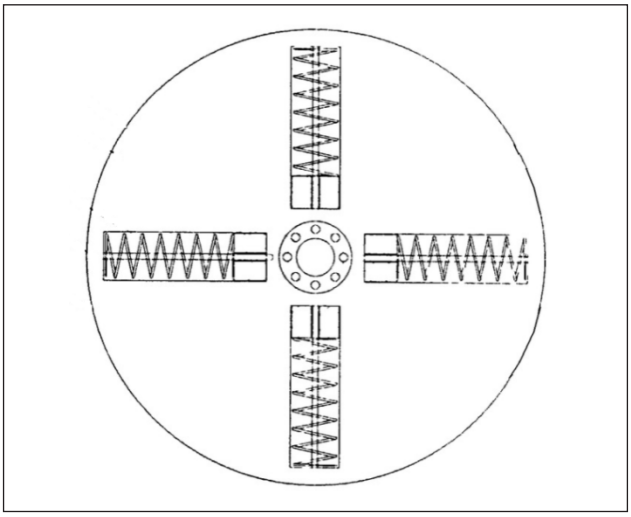


Рис. 5. Конструкция диска-маховика с дисбалансными грузами

Применение его в составе КЭН не целесообразно, так как он ограничивает процесс регулировки нагрузки из-за малого момента инерции.

В [6, с. 1] диск-маховик с центральным крепежным отверстием содержит направляющие, на которых установлены подвижные дисбалансные грузы. Эти грузы поджаты возвратными винтовыми пружинами. Техническим результатом является преодоление кратковременных нагрузок на двигатель и трансмиссию трактора, увеличение их эксплуатационной долговечности, снижение общего расхода топлива за счет установки регулятора маховикового типа с изменяемым моментом инерции, простота его конструкции и изготовления, снижение количества задействованных узлов и деталей, высокая надежность, удобство в установке, обслуживании и эксплуатации. Устанавливается на колесные тракторы с задним приводом вала отбора мощности, аккумулирующим механическую энергию вращения и передвижения грузов в целях преодоления кратковременных нагрузок на двигатель и трансмиссию. Конструкция маховика приведена на рис. 5.

Применение в составе КЭН целесообразно. Данная конструкция является прототипом предлагаемой ниже новой конструкции с улучшенными параметрами балансировки маховика.

Разработанный маховик, приведенный на рис. 6, конструктивно состоит из толстостен-

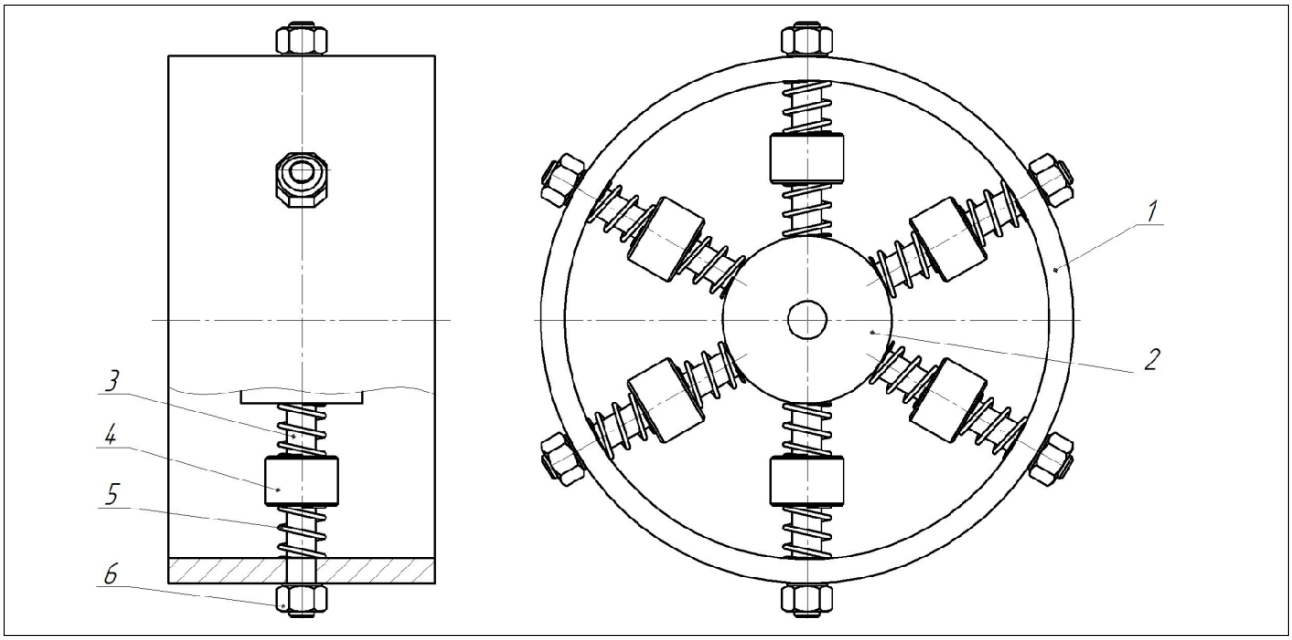


Рис. 6. Разработанная конструкция маховика

ного обода 1, центральной втулки 2, которые соединены между собой с помощью шпилек 3, на которых расположены дисбалансные грузы 4, поджимаемые пружинами 5 с обеих сторон. Такая конструкция дисбалансных грузов позволяет точно балансировать маховик во время его работы и при этом уменьшать энергозатраты при запуске маховика за счет создания переменного момента инерции. Гайками 6 обеспечивается центрирование обода маховика относительно центральной втулки.

Разработанная конструкция маховика проста в изготовлении и может быть рекомендована для применения в составе КЭН небольшой мощности с целью регулирования и симметрирования нагрузки общественного здания, так как она имеет улучшенные параметры по сравнению с конструкцией-прототипом.

Выводы. Разработана новая конструкция маховика КЭН небольшой мощности, применяемого для регулирования и симметрирования нагрузки общественного здания. Данная конструкция обладает следующими преимуществами:

– уменьшенные энергозатраты в начальный период вращения маховика и повышенная плавность вращения в рабочем режиме;

– снижение количества задействованных узлов;

– высокая надежность и долговечность работы, связанная с простотой конструкции;

– точная и конструктивно простая балансировка за счет применения дисбалансных грузов;

– аккумулирует большее количество энергии и обладает большим временем разряда при регулировании и симметрировании нагрузки общественного здания.

Список литературы:

1. Shevchenko S.Yu., Savchenko N.A., Tretjak A.V. Managing the load schedule of the administrative building taking into account emerging risks when connecting the kinetic energy storage to the power supply system. Електротехніка і електромеханіка. 2017. № 6. С. 69–73.

2. Ильченко А.В., Ломакин В.О. Маховик переменного момента инерции. Автомобиль и электроника. Современные технологии. 2011. № 1.

3. Война А.А. Патент РФ, МПК F16F15/31. Маховик переменного момента инерции; патент РФ № 2516883, заявка от 01.01.12, опубл. 25.05.14.

4. Елисеев С.В., Милованова Е.А., Милованов А.А., Милованов А.И., Барсуков С.В. Патент РФ, МПК F16F15/31, F16D3/12. Маховик с регулируемым моментом инерции; патент РФ № 2498127, заявка от 11.03.11., опубл. 10.11.13.

5. Смердов Г.Г. Патент РФ, МПК F16F15/31, F03G3/08. Маховик; патент РФ № 2439394, заявка от 12.05.10 г., опубл. 10.01.12 .

6. Щитов С.В., Сенников В.А., Кузнецов Е.Е., Спириданчук Н.В. Патент РФ, МПК F03G3/08. Регулятор маховикового типа с изменяемым моментом инерции; патент РФ № 2509917, заявка от 16.10.12, опубл. 20.03.14.

МАХОВИК ЗМІННОГО МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ ІЗ ДИСБАЛАНСНИМИ ВАНТАЖАМИ

У статті проаналізовано конструкції маховиків зі змінним моментом інерції для використання їх у складі кінетичного енергонакопичувача з метою регулювання навантаження у електричних мережах 0,4 кВ. Розроблена нова конструкція маховика зі змінним моментом інерції та удосконаленими параметрами роботи за рахунок включення у конструкцію дисбалансних вантажів.

Ключові слова: *маховик, момент інерції, дисбалансний вантаж, кінетичний енергонакопичувач.*

FLYWHEEL OF THE VARIABLE MOMENT OF INERTIA WITH DISBALANCED CARGOES

The article analyzes the design of flywheels with a changeable moment of inertia for use in the kinetic energy storage for the purpose of load regulation in 0,4 kV electric networks. A new flywheel design with a variable moment of inertia and improved working parameters was developed due to the inclusion of unbalance loads in the design.

Key words: *flywheel, moment of inertia, unbalance load, kinetic energy storage.*

РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 622.24.058

Василишин В.Я.
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

ПРАКТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КРУТНОГО МОМЕНТУ НА ОПІР ВТОМИ РІЗЬОВИХ З'ЄДНАНЬ ТРУБ НАФТОВОГО СОРТАМЕНТУ

У статті проведено аналіз експериментальних і теоретичних досліджень впливу крутного моменту згвинчування на опір втомлюваності замкових різьбових з'єднань бурильних труб. Розв'язано важливе науково-технічне завдання підвищення працездатності різьбових з'єднань обсадних і насосно-компресорних труб шляхом удосконалення вузлів герметизації з'єднань з урахуванням експлуатаційних навантажень, що забезпечує надійність кріплення та безпеку експлуатації нафтогазових свердловин. Отримані результати дають змогу визначити напруження та деформації в корпусі або трубопроводі, який піддається комплексним навантаженням. Наявна детальна інформація про вплив конструктивних та експлуатаційних факторів на продуктивність різьбових з'єднань труб, які є найважливішим елементом надійності й довговічності труб.

Ключові слова: *крутний момент згвинчування, опір втомлюваності, замкове різьбове з'єднання, ніпель, муфта, герметизація, обсадні труби, буріння, нафтові родовища.*

Постановка проблеми. Україна належить до країн, економічний розвиток яких значною мірою стримується нестачею власних енергоресурсів. Тому останніми роками Україна все активніше займається питаннями енергодиверсифікації. Одним зі складників цього процесу є розробка нових родовищ вуглеводнів, зокрема видобуток нетрадиційних видів газу (сланцевий газ, метан вугільних родовищ, газ щільних колекторів тощо). Цей енергоресурс викликає підвищену цікавість світової громадськості у зв'язку з тим, що містить у собі якості видобувного палива та відновлюваного джерела. Привабливим є факт формування покладів сланцевого газу в межах більшої частини території України, а також наявність розвиненої мережі газопроводів, які можуть забезпечити оперативну доставку видобутого газу. Крім того, це виключає витрати значних коштів для будівництва нових трубопроводів. Під час буріння замкове різьбове з'єднання бурильних труб піддається розтяганню, згинанню та крученню, а також на нього впливає крутний момент згвинчування. Якщо крутний момент вибрано правильно, то дуже рідко розтягання, згинання або дія знакозмінного згинання є причиною пошкодження замкових різьбових з'єднань. Втомне пошкодження в результаті недостатнього крутного моменту згвинчування є однією з причин аварій замкових різьбових з'єднань. Переважно замкове різьбове з'єднання значно міцніше на розтягання і згинання, ніж бурильна труба.

Вибір оптимального крутного моменту згвинчування суттєво впливає на міцність за втомлюваністю. Викликають інтерес дослідження впливу крутного моменту згвинчування на опір втомлюваністю різьбових з'єднань за максимального і мінімального його значення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Впливу крутного моменту згвинчування на опір втомлюваності замкових різьбових з'єднань присвячено цілу низку робіт [1; 2; 3; 4; 5].

Постановка завдання. Мета статті – проаналізувати експериментальні й теоретичні дослідження впливу крутного моменту згвинчування на опір втомлюваності замкових різьбових з'єднань бурильних труб.

Виклад основного матеріалу дослідження. Аналіз результатів дослідження різьбового

з'єднання З-50 труб геологорозвідувального буріння з різьбою $З-56\times4$, $233\times1:5$ свідчить [3], що збільшення крутного моменту згвинчування з $0,5\,кН\cdot м$ до $3\,кН\cdot м$ дає зменшення напружень від згинання на ділянці найбільш навантаженого витка приблизно в 2 рази, а опір втомлюваності різьбового з'єднання зростає в 2,4 раза.

Ю.І. Газанчаном [4] у ході дослідження замкових різьбових з'єднань діаметром 75 мм установлено, що існує певний крутний момент згвинчування, який називається оптимальним $M_{кр.згв.опт.}$, при якому опір втомлюваності замкових різьбових з'єднань мінімальний. На основі теоретичних та експериментальних досліджень Н.Д. Щербюком [2] установлено залежність оптимальних напружень $\sigma_З$, що виникають у згвинчених замкових з'єднаннях, виготовлених зі сталі з $\sigma_{0,2}=(640...680)МПа$, від площі небезпечного перерізу ніпеля $F_н$. Запропоновано формулу, яка дає змогу визначати оптимальні величини крутних моментів згвинчування для замкових різьбових з'єднань різних типорозмірів, виготовлених зі сталей з $\sigma_{0,2}=(640...800)МПа$:

$$M_{кр.згв.опт.}=\sigma_З\times F_н\times a,$$

$$\sigma_З=161\times e^{-0,035F_н}+200,$$

де $F_н$ – площа небезпечного перерізу ніпеля, см^2;

a – параметр, що характеризує геометрію різьбового з'єднання, см.

Автором [2] установлено, що оптимальне напруження, яке виникає від крутного моменту згвинчування залежно від діаметра з'єднання, підвищує граничне амплітудне напруження в 1,2–2,8 раза.

Отже, вибір оптимальної величини крутного моменту є найкращим і найпростішим способом збільшення опору втомлюваності різьбових з'єднань. Достатньо широко досліджено вплив $M_{кр.згв.}$ на опір втомлюваності замкових різьбових з'єднань із середньоміцних легованих сталей з $\sigma_{0,2}=(640...680)МПа$ і встановлені залежності, за якими можна визначати оптимальні крутні моменти з'єднань із цих сталей.

Показано [2], що перевищення $M_{кр.згв.опт.}$ призводить до зниження опору втомлюваності з'єднань та оптимальне напруження, що виникає при згвинчуванні $\sigma_{З.опт.}$, рекомендується визначати зі співвідношення $\sigma_{З.опт.}=(0,3...0,4)\sigma_{0,2}$.

Для запобігання неконтрольованому розкріпленню замкових різьбових з'єднань нижньої частини бурильної колони в процесі роторного буріння й під дією великих динамічних навантажень, а також ураховуючи рекомендації Американського нафтового інституту (АНІ) $(\sigma_З=(0,7...0,9)\sigma_{0,2})$, збирання замкових різьбових з'єднань здійснюється за умови $\sigma_З=(0,4...0,6)\sigma_{0,2}$.

Але в цілій низці робіт відзначено, що збільшення напруження $\sigma_З$ до $(0,73-0,9)\sigma_{0,2}$ підвищує межу витривалості замкових різьбових з'єднань. Так, у ході дослідження на знакозмінний згин моделей з'єднань обважнених бурильних

Таблиця 1

Таблиця поділених різниць для ніпеля 1 (рис. 1)

$M_{кр.згв.}$	$\sigma_{зг.}$ МПа	Значення перших різниць	Значення других різниць	Значення третіх різниць
0,75	7,50	$\frac{5,20-7,50}{1,50-0,75}=-3,067$	$\frac{-0,333-(-3,067)}{2,25-0,75}=1,823$	$\frac{0,887-1,823}{3,00-0,75}=$ $=-0,416$
1,50	5,20			
2,25	4,95	$\frac{4,95-5,20}{2,25-1,50}=-0,333$	$\frac{1,000-(-0,333)}{3,00-1,50}=0,887$	
3,00	5,70	$\frac{5,70-4,95}{3,00-2,25}=1,000$		

Таблиця 2

Таблиця поділених різниць для муфти 2 (рис. 1)

$M_{кр.згв.}$	$\sigma_{зг.}$ МПа	Значення перших різниць	Значення других різниць	Значення третіх різниць
0,75	4,00	$\frac{6,45-4,00}{1,50-0,75}=3,267$	$\frac{-0,067-3,267)}{2,25-0,75}=-2,222$	$\frac{-0,977+2,222}{3,00-0,75}=$ $=0,553$
1,50	6,45			
2,25	6,40	$\frac{6,40-6,45}{2,25-1,50}=-0,067$	$\frac{-1,533+0,067)}{3,00-1,50}=-0,977$	
3,00	5,25	$\frac{5,25-6,40}{3,00-2,25}=-1,533$		

них труб діаметром 65 мм із замковою різьбою $З-54\times5,08\times1:4$ зі сталі 35 з $\sigma_{0,2}=350 МПа$, зібраних із напруженням $\sigma_з=0,9\sigma_{0,2}$, отримано високу межу витривалості – близько 150 МПа (на відміну від 100 МПа, отриманих при $\sigma_з=0,73\sigma_{0,2}$).

Оскільки досліджень впливу $M_{кр.згв.}$ на опір втомлюваності замкових різьбових з'єднань зі сталі $\sigma_{0,2}\geq 900 МПа$ обмаль, то для збирання таких з'єднань використовують рекомендації, встановлені для з'єднань зі сталі $\sigma_{0,2}=(640...800) МПа$. Авторами [5; 6] розглянуто зміну напруження в серединному перерізі довжини різьби ніпеля й муфти зі зростанням моменту затягування при дії на з'єднання згинального моменту 1200 $Н\cdot м$ (рис. 1). Ці залежності подано в зіставленні із залежностями, які встановлюють зв'язок між граничною амплітудою і крутним моментом згвинчування для з'єднань, виготовлених зі сталі 45. Для з'єднань, які згвинчені з $M_{кр.згв.}=750\ Н\cdot м$, гранична амплітуда згинальних моментів найменша. При цьому напруження в ніпелі максимальне, а в муфті – мінімальне. Із цього випливає, що при недостатньому $M_{кр.згв.}$ зовнішнє навантаження сприймає в основному ніпель. У з'єднаннях, які згвинчені з $M_{кр.згв.}=1500\ Н\cdot м$, значно збільшилася гранична амплітуда. Напруження в ніпелі різко падають, а у муфті – зростають. Отже, збільшення $M_{кр.згв.}$ призвело до сприятливого перерозподілу напруження в деталях з'єднання. Руйнування від втомлюваності проходить по ніпелю, оскільки при згвинчуванні в ньому виникають напруження розтягання, а у муфті – стискання.

З'єднання, які згвинчені з $M_{кр.згв.}=2250\ Н\cdot м$, мають найвищу граничну амплітуду. Подальше збільшення $M_{кр.згв.}$ до 3000 $Н\cdot м$ призводить до її зменшення порівняно з максимальним значенням. Напруження в ніпелі починають зростати, а у муфті – спадати. Так установлюється зв'язок між граничною амплітудою з'єднань, згвинчених різними крутними моментами, і напруженнями, які виникають у деталях з'єднання під дією на них згинального моменту. Цим самим можна прогнозувати оптимальний крутний момент, для якого гранична амплітуда з'єднання найвища.

Використаємо вираз поділених різниць

$$y=[x_s,...,x_t]=\frac{y[x_{s+1},...,]-y[x_s,...,x_{t-1}]}{x_t-x_s} \qquad (1)$$

для створення інтерполяційного поліному залежності напружень, що виникають у ніпелі (1) та муфті (2) (рис. 1) під дією на них згинального моменту залежно від зовнішнього навантаження за різних $M_{кр.згв.}$.

Складемо таблицю числових значень поділених різниць, розрахованих за поданим вище рівнянням.

Отже, для ніпеля маємо інтерполяційний поліном виду

$$\sigma_{зг.}=7,50+(M_{кр.згв.}-0,75)\times(-3,067)+$$
$$+(M_{кр.згв.}-0,75)\times(M_{кр.згв.}-1,50)\times1,823+ \qquad (2)$$
$$+(M_{кр.згв.}-0,75)\times(M_{кр.згв.}-1,50)\times$$
$$\times(M_{кр.згв.}-2,25)\times(-0,416).$$

Після перетворень отримаємо

$$\sigma_{зг.}=-0,416\,(M_{кр.згв.})^3+3,695\,(M_{кр.згв.})^2- \qquad (3)$$
$$-9,743\,M_{кр.згв.}+12,904.$$

Отже, для муфти маємо інтерполяційний поліном виду

$$\sigma_{зг.}=4,00+(M_{кр.згв.}-0,75)\times3,267+$$
$$+(M_{кр.згв.}-0,75)\times(M_{кр.згв.}-1,50)\times \qquad (4)$$
$$\times(-2,222)+(M_{кр.згв.}-0,75)\times$$
$$\times(M_{кр.згв.}-1,50)\times(M_{кр.згв.}-2,25)\times0,553.$$

Після перетворень отримаємо

$$\sigma_{зг.}=0,553\,(M_{кр.згв.})^3-4,710\,(M_{кр.згв.})^2-$$
$$-11,687\,M_{кр.згв.}-2,348. \qquad (5)$$

Відомо, що $Q=\sigma_m F_н$; $Q=M_{кр}/a$, (6)

де σ_m – середнє значення напруження циклу, що виникає в ніпелі;

$F_н$ – площа поперечного перерізу ніпеля по першому спряженому витку різьби;

a – постійна, що залежить від розміру з'єднання.

Тоді $\sigma_m=M_{кр.згв.}/a:F_н$. (7)

Для з'єднань, які згвинчені з $M_{кр.згв.}=750\ Н\cdot м$, $M_{кр.згв.}=1500\ Н\cdot м$, $M_{кр.згв.}=2250\ Н\cdot м$, ці напруження дорівнюють, відповідно, 68,0 Н/мм^2, 135,0 Н/мм^2, 202,0 Н/мм^2 [6].

Оптимальними будуть ті середні напруження, за яких гранична амплітуда найбільша.

Максимально допустимий крутний момент згвинчування

$$M_{кр.згв.мах.}=F\sigma_T a,$$

де F – менше зі значень $F_н$ (площа перерізу ніпеля на відстані 24 мм від упорного уступу) або $F_м$ (площа перерізу муфти на відстані 24 мм від упорного торця);

σ_T – границя текучості матеріалу замка.

Для визначення мінімального крутного моменту згвинчування з урахуванням навантажень згинання визначають середнє напруження в небезпечному перерізі ніпельної частини з'єднання $\sigma_{т(н)}$, використовуючи діаграму міцності за втомлюваністю, яка характеризує постійне відношення між статичною й циклічною міцністю металів.

Мінімально допустимий крутний момент згвинчування

$$M_{кр.згв.міп.} = F_н \, \sigma_{т(н)} \, a \, . \qquad (8)$$

Як показали теоретичні та експериментальні дослідження [6; 7], у замковому з'єднанні існують два небезпечні перерізи, по яких можуть проходити втомні руйнування: в ніпелі – по першому спряженому витку, що знаходиться на відстані 24 мм від упорного виступу, в муфті – на відстані 10 мм від меншого торця ніпеля (рис. 2). Перерізи, в яких відбуваються пошкодження, і відповідні значення межі витривалості замкових різьбових з'єднань залежать від співвідношення осьового моменту опору небезпечного перерізу муфтової частини й осьового моменту опору небезпечного перерізу ніпельної частини, тобто від ступеня зрівноваження з'єднання [6].

За даними А.П. Фарра [8], найбільш оптимальним уважається відношення $W_м / W_н = 2,25 \div 2,75$, тобто в середньому 2,5, де $W_н, W_м$ – осьові моменти опору, відповідно, ніпеля й муфти в їх небезпечних перерізах.

При цих співвідношеннях розрахункові напруження згинання в небезпечних перерізах муфти й ніпеля зрівнюються.

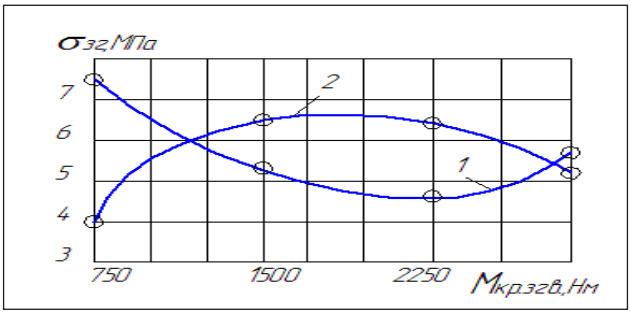


Рис. 1. Розподіл напружень у різьбовому з'єднанні ЗН-75, що виникають від зовнішнього навантаження (Мзг=1200Нм), при різних Мкр. згв.

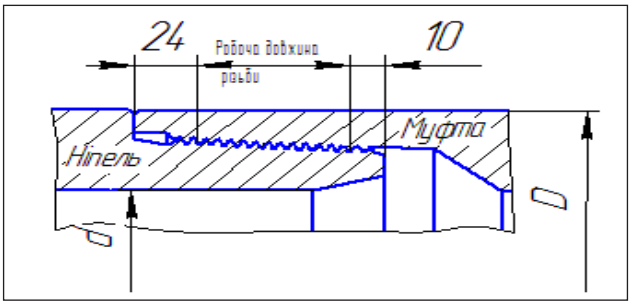


Рис. 2. Небезпечні перерізи замкового різьбового з'єднання

Висновки. На основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень розв'язано важливе науково-технічне завдання підвищення працездатності різьбових з'єднань обсадних і насосно-компресорних труб шляхом удосконалення вузлів герметизації з'єднань з урахуванням експлуатаційних навантажень, що забезпечує надійність кріплення та безпеку експлуатації нафтогазових свердловин.

Список літератури:

1. Крыжановский Е.И. Исследование и повышение сопротивления усталости бурильных колонн при вращательном бурении скважин: дисс. ... докт. техн. наук: спец. 05.04.07. Москва, 1990. 299 с.

2. Щербюк Н.Д. Исследование и разработка конструкций резьбовых соединений труб нефтяного сортамента и забойных двигателей с высокими эксплуатационными характеристиками для бурения глубоких скважин: дисс. ... докт. техн. наук: спец. 05.15.10. Москва, 1978. 400 с.

3. Лачинян Л.А. Конструирование, расчет и эксплуатация бурильных геологоразведочных труб и их соединений / ред. Л.А. Лачинян. Москва, 1975. 228 с.

4. Газанчан Ю.И. Исследование усталостной прочности крупных конических резьбовых соединений: дисс. ... канд. техн. наук: спец. 05.15.10. Москва, 1972. 163 с.

5. Чернов Б.А. Методы повышения работоспособности бурильных и обсадных колонн в нефтяных и газовых скважинах: дисс. ... докт. техн. наук: спец. 05.15.10. Ивано-Франковск, 1999. 345 с.

6. Щербюк Н.Д., Якубовский Н.В. Резьбовые соединения труб нефтяного сортамента и забойных двигателей / ред. Н.Д. Щербюк. Москва, 1974. 252 с.

7. Саркисов Г.М. Расчёты бурильных и обсадных колонн / ред. Г.М. Саркисов. Москва, 1979. 208 с.

8. Farr A.P. Torque requiments for rotary shouldered connections and selection of Connetions for drill collars. The american society of mechanical engineers. 1959. № 57.

ПРАКТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБ НЕФТЯНОГО СОРТАМЕНТА

В статье проведен анализ экспериментальных и теоретических исследований влияния крутящего момента свинчивания на сопротивление усталости замковых резьбовых соединений бурильных труб. Решена важная научно-техническая задача повышения работоспособности резьбовых соединений обсадных и насосно-компрессорных труб путем усовершенствования узлов герметизации соединений с учетом эксплуатационных нагрузок, что обеспечивает надежность крепления и безопасность эксплуатации нефтегазовых скважин. Полученные результаты позволяют определить напряжения и деформации в корпусе или трубопроводе, который подвергается комплексным нагрузкам. Имеется подробная информация о влиянии конструктивных и эксплуатационных факторов на производительность резьбовых соединений труб, которые являются важнейшим элементом надежности и долговечности труб.

Ключевые слова: *крутящий момент свинчивания, сопротивление усталости, замковое резьбовое соединение, ниппель, муфта, герметизация, обсадные трубы, бурение, нефтяные месторождения.*

PRACTICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE CURRENT MOMENT ON THE OPTIMUM OF ROTARY CONNECTIONS OF THE OIL SECTOR PIPE

The analysis of experimental and theoretical investigations of the influence of torque screw on the resistance of the fatigue of castor threaded joints of drill pipes is carried out. The important scientific and technical task of improving the efficiency of threaded joints of casing and pump-compressor pipes is solved by improving the units of sealing of joints, taking into account operational loads, which ensures the reliability of the fastening and safety of exploitation of oil and gas wells. The obtained results allow determining the stresses and deformations in the case or pipeline, which is subject to complex loading. They have detailed information on the influence of design and operational factors on the productivity of threaded joints of pipes, which are the most important element of the reliability and durability of pipes.

Key words: *fatigue resistance, lock threaded connection, nipple, coupling, sealing, casing pipes, drilling, oil fields.*

УДК 622.411.52:532:62-784.4

Гого В.Б.
Індустріальний інститут ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Сироватченко В.О.
Індустріальний інститут ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Михайлов О.І.
Індустріальний інститут ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И СРЕДСТВ КОМПЛЕКСНОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ОБЕСПЫЛИВАНИЯ И ОХЛАЖДЕНИЯ РУДНИЧНОГО ВОЗДУХА

В работе приведено новое решение актуальной научной проблемы, заключающейся в улучшении условий труда шахтеров по пылевым и температурным факторам путем развития теории гидродинамического обеспыливания на основе импульсно-волновых эффектов, создаваемых в процессах поглощения частиц пыли каплями жидкости и обосновании рациональных технических средств гидродинамической борьбы с пылью. Теоретически обосновано и экспериментально доказано, что для частиц пыли и капель жидкости в процессе импульсно-волнового взаимодействия возникают частотные пульсации вместе с изменениями амплитуд колебаний их импульсов в виде волны давления, что повышает эффективность синергетических импульсов ударных взаимодействий капель жидкости и частиц пыли в процессах их слияния (обеспыливание) и охлаждения. Практическое значение состоит в том, что на основе установленных закономерностей и особенностей импульсно-волнового воздействия капель жидкости на частицы пыли, разработаны установки, прошедшие промышленную проверку и показавшие эффективность в процессах улучшения условий труда шахтеров по пылевым и температурным факторам.

Ключевые слова: *угольная шахта, пыль, гидравлическое обеспыливание, охлаждения рудничного воздуха.*

Постановка проблемы. Прогресс угольной отрасли Украины, как основы национальной энергетической независимости, требует решения ряда проблем в охране труда шахтеров. Тревожной является статистика по профессиональным заболеваниям горняков от пыли и высоких температур рудничного воздуха, которые ведут к ежегодным экономическим потерям на сумму, превышающую 1,5 млрд. гривен. Большинство шахт Донецкого бассейна в Украине ведет работы на глубинах свыше 1 тыс. метров, где температура горных пород превышает 40°С, что ведет к нагреву рудничного воздуха выше нормы 26°С. Это отрицательно влияет на здоровье горняков, вызывая патологии сердечно-сосудистой системы, обостряя заболевания органов дыхания и т.д. Поэтому необходимы безотлагательные меры, повышающие качество рудничного воздуха, на основе новых научных разработок для охраны труда шахтеров.

Анализ последних научных исследований и публикаций. В научных работах Г.А. Позднякова, И.Г. Ищука, Е.И. Онтина, В.П. Журавлева, И.Н. Логачева и др. [1; 2; 3] исследовались, главным образом, практические аспекты борьбы с рудничной пылью и возможного охлаждения воздуха в горных выработках шахт на основе применения орошения. Первые исследования по оптимизации параметров гидравлического пылеподавления и охлаждения воздуха при орошении изложены в работах Б.М. Кривохижи, А.Ю. Вальдберга, Ю.В. Ковалевского, Г.К. Лебедюка [2; 3]. Фундаментальные обобщения, сформировавшие научные основы гидравлического подавления пыли в условиях ведения горных работ в угольных шахтах, приведены в работах В.П. Журавлёва, И.Г. Ищука,

Г.А. Позднякова, Э.Н. Медведева, А.П. Коренева и др. [1-3]. В исследованиях этих авторов установлено, что скорость поглощения частиц пыли каплями воды, известного радиуса, зависит от размеров частиц пыли и коэффициента захвата. Чем выше давление воды, тем больше в процессе её дробления турбулизация потока и наблюдается повышение коагуляции пылевых частиц.

Наряду с определенными успехами, достигнутыми в реализации гидродинамического способа, сохраняется **важная научная проблема в раскрытии физической природы действия механизмов и закономерностей комплексного процесса гидрообеспыливания и охлаждения воздуха,** позволяющих повысить эффективность процесса, в частности, импульсно-волновым воздействием капель жидкости. При этом не поставлены и не решены **важные теоретические задачи** по использованию фрактальных представлений о структурности системы турбулентного дисперсного потока «газ – капли жидкости – частицы пыли» для повышения эффективности гидрообеспыливания и охлаждения. Однако, анализ аналогичных исследований показывает, что **проблему повышения эффективности обеспыливания с одновременным охлаждением рудничного воздуха капельной жидкостью следует решать комплексно, на основе использования гидродинамических, в частности, импульсно-волновых и термодинамических эффектов,** к примеру, с применением предварительно охлажденного воздуха.

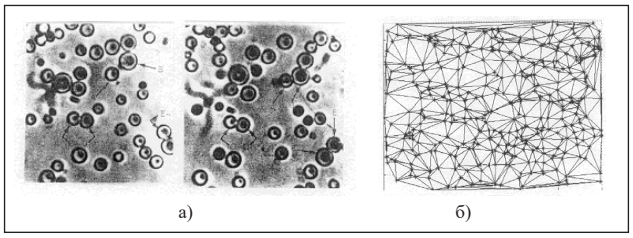


Рис. 1. Фрактальные структуры взаимодействий капель жидкости и пылевых частиц: а – фотоснимки; б – компьютерная обработка

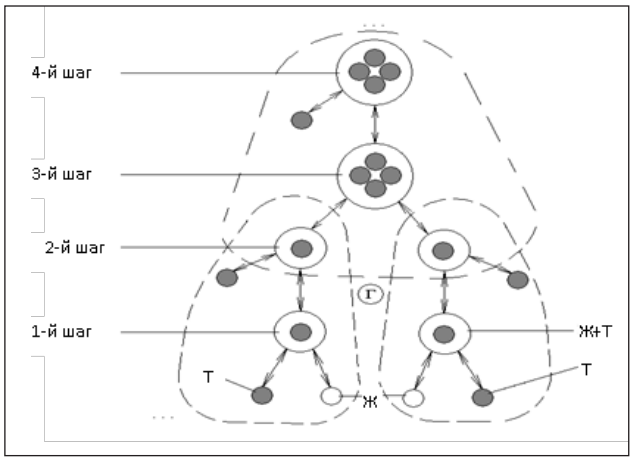


Рис. 2. Схема структур фракталов: Г – газ; Ж – капля; Т – твердая частица

Актуальность указанной проблемы, ее научно-техническая и социальная значимость сконцентрировались в исследовании, направленном на обоснование научных решений, повышения качества рудничного воздуха по факторам запыленности и температуры. Как эффективный вариант предлагается импульсно-волновое гидравлическое пылеподавление и охлаждение воздуха, создаваемое специальными эжекторами, что позволит снизить уровень запыленности рудничного воздуха и его температуру в глубоких горных выработках угольных шахт.

В связи с этим сформулирована цель и задачи исследования: на основе развития теории и совершенствования гидродинамических средств борьбы с пылью и охлаждения рудничного воздуха импульсно-волновым процессом улучшить условия труда шахтеров по пылевому и температурному факторам. Для достижения указанной цели выполнены такие задания:

1. Раскрыть механизм импульсно-волнового гидрообеспыливания воздуха каплями жидкости путем действия капель жидкости на частицы пыли и определить условия возникновения эффективного процесса импульсно-волнового гидрообеспыливания при генерации импульсной волны давления, а также получить термодинамические характеристики процесса для повышения энерготехнологической эффективности средств гидродинамического охлаждения рудничного воздуха.

2. Определить аналитически и проверить экспериментально условия для обеспечения процесса гидрообеспыливания и охлаждения воздуха на основе разработанных средств.

3. Обобщить экспериментально-аналитические исследования и провести синтез разработанных элементов средств импульсно-волнового гидрообеспыливания и охлаждения воздуха для производственных условий угольных шахт.

Изложение основного материала исследования. Для формирования физико-математической модели комплексного процесса улавливания пыли и охлаждения воздуха, проведено аналитическое исследование динамики изменений структур газо-жидкостного потока по экспериментальным фотоснимкам, которые были обработаны компью-

терной программой координатной фрактальной диспозиции зон потоков, как объектов с искомыми изменениями.

Компьютерная обработка снимков позволила разработать модель фрактальной структуры потока, что сделало возможным описание динамики переходов состояний систем «газ – капли жидкости – частицы пыли» в системы «газ – капли жидкости с поглощёнными частицами пыли», а также происходящих тепловых и массообменных процессов, что адекватно гидравлическому улавливанию пыли каплями жидкости, и охлаждению газа. Фото фрактальных структур потока и его модели приведены на рис. 1.

Случайные флуктуации в волновом потоке учитывались в аналитическом описании неоднородных состояний систем при переходах одной структуры компонентов в другую на основе анализа геометрических моделей фрактальных композиций, показанных на рис. 2.

Геометрические фракталы системы «газ – капли жидкости – твердые частицы» получены с помощью линий (поверхностей для пространства), охватывающих элементы фрактала (на рис. 2 – пунктирные линии).

Фрактальное структурирование потока позволило получить аналитическое выражение для предельной массы капли жидкости с поглощенными частицами пыли в виде:

$$M = m_0\left(\sum_i^N 2^i k_S^{(N+2)-1} + (2^N - 1)(k_S^2 + 1) + 1\right),, \quad (1)$$

где k – массовый коэффициент для i-го шага слияния; N – число шагов (слияний); m_0 – начальная масса капли.

Математическое выражение (1) определяет, что существует дискретность в процессе поглощения частиц пыли одной каплей жидкости, т.е. формирования капли предельных параметров с дискретностью ее массового и энергетического состояния совместно с поглощенными частицами пыли.

Исследуемый фрактал структуры пыле-газожидкостного потока является бинарным, поэтому одна капля может захватить только одну или две частицы пыли, не нарушая фрактальной структуры потока. Предельная по массе капля в стабильном энергетическом состоянии формируется с частотой, равной частоте волнового процесса перемещения компонентов потока. Принимаем, что время формирования «предельной капли» и есть технологическое время процесса улавливания частицы пыли каплей жидкости в рабочем объеме потока.

При создании физической модели процесса импульсно-волнового улавливания пыли каплями жидкости в газовом потоке сделаны предположения, что собственные колебания компонентов учитываются без взаимного влияния друг на друга, а эффективность внедрения частицы пыли в каплю зависит от величины внешнего импульса давления. Все столкновения частиц пыли и капель предположительно происходят в области рабочего пространства трехфазного потока.

В разработке математической модели процесса принималось, что в газовой среде образуются системы двух тел (капля-частица). Масса системы равна сумме масс капли жидкости (m) и частицы пыли $(\bar{m})$. В динамике потока учитываются частоты собственных колебаний частиц и волновой характер процесса их перемещения в виде:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \gamma\frac{dx}{dt} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \gamma\frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0, \quad (3)$$

где x – координата движущейся частицы потока (пыли или капли) по оси x;

γ – коэффициент пропорциональности, который формируется параметрами частицы и характеристиками потока;

ω_0 – собственная циклическая частота колебаний частицы потока.

Решением уравнения (3) является:

$$x(t) = x_0 e^{-\varepsilon t}\left(\frac{1}{\omega}(1+\varepsilon)\sin\omega t + \cos\omega t\right). \quad (4)$$

Анализ уравнения (4), позволил установить, что при слабых колебаниях частиц потока экспоненциальный показатель $(\varepsilon\, t)$ можно считать постоянным в течение одного цикла колебаний. При этом предположении второе слагаемое в (4) не учитывается, тогда полная энергия частицы равна:

$$E(t) = E_0 e^{-\gamma t}, \quad (5)$$

где $E(t)$ – полная энергия частицы в волновом процессе (сумма кинетической и потенциальной энергий) для данного момента времени; E_0 – исходная энергия частицы.

Полная энергия частицы в волновом процессе:

$$x(t) = x_0 e^{-\varepsilon t}\left(\frac{1}{\omega}(1+\varepsilon)\sin\omega t + \cos\omega t\right). \quad (6)$$

где m – масса частицы (капли или пыли).

Исходная энергия частицы определяется выражением:

$$E(t) = \frac{m}{2}\left[\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \omega_0^2 x^2\right], \qquad (7)$$

где ω – циклическая частота колебаний частицы потока; c_1 и c_2 – постоянные.

Учитывая, что $\omega = 2\pi\nu$ из (6-7) частота колебаний частицы будет равна:

$$\nu = \nu_0 e^{\frac{-\gamma d_0}{V}}, \qquad (8)$$

где d_0 – диаметр частицы (до столкновения с другой частицей);

V – скорость частицы (потока).

Граничные условия: $\delta(t_0) = \delta_0; \quad P_0 = P(t_0, x_0)$,

где t_0 – время начала отсчета импульса по координате (x); P_0 – начальное давление.

Предполагается, что поток идеальный и в лагранжевых переменных характеризуется системой уравнений в следующем виде:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho J}\left(\frac{\partial P_{\text{ж}}}{\partial x_0}\frac{\partial y}{\partial y_0} - \frac{\partial P_{\text{ж}}}{\partial y_0}\frac{\partial y}{\partial x_0}\right), \quad \frac{\partial x}{\partial t} = u; \qquad (9)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho J}\left(\frac{\partial P_{\text{ж}}}{\partial y_0}\frac{\partial x}{\partial x_0} - \frac{\partial P_{\text{ж}}}{\partial x_0}\frac{\partial x}{\partial x_0}\right), \quad \frac{\partial y}{\partial t} = v; \qquad (10)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho J}\left(\frac{\partial P_{\text{ж}}}{\partial y_0}\frac{\partial x}{\partial x_0} - \frac{\partial P_{\text{ж}}}{\partial x_0}\frac{\partial x}{\partial x_0}\right); \qquad (11)$$

$$\frac{\partial \alpha_{\Gamma}}{\partial t} = \frac{3\alpha_{\Gamma}}{a} w - \frac{\alpha_{\Gamma}\partial J}{J\partial t}; \qquad (12)$$

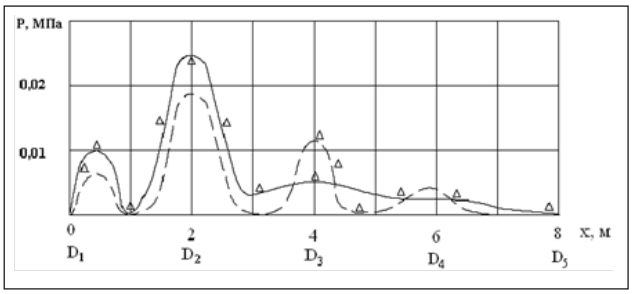


Рис. 3. Графическая интерпретация распространения импульса давления в рабочем объеме потока: пунктир – теория; Δ – эксперимент; D_1, D_2, …, D_5 – датчики давления, установленные по длине потока

Рис. 4. Фотография многокамерного эжектора

$$\frac{\partial P_{\Gamma}}{\partial t} = -\frac{3\gamma P_{\Gamma}}{a} w - \frac{3\gamma - 1}{\alpha_{\Gamma}}\frac{q}{a}; \qquad (13)$$

$$\frac{\partial a_{\text{ж}}}{\partial t} = w = w_A + w_R; \qquad (14)$$

$$w_A = \frac{P_{\Gamma} - P_{\text{ж}}}{T_{\text{ж}}\rho_{\text{ж}}C_{\text{ж}}\sqrt[3]{\alpha_{\Gamma}}} w_R; \qquad (15)$$

$$\frac{\partial w_R}{\partial t} = \frac{1}{a}\left(\frac{P_{\tilde{A}} - P_{\text{æ}}}{\rho_{\text{æ}}} - 1{,}5\alpha_{\tilde{A}} w_R^2 - 4\nu_{\text{æ}}\frac{w_R}{\alpha_{\text{æ}}}\right); \qquad (16)$$

$$J = \frac{\partial x}{\partial x_0}\frac{\partial y}{\partial y_0} - \frac{\partial x}{\partial y_0}\frac{\partial y}{\partial x_0}; \qquad (17)$$

$$\frac{\partial J}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial x_0}\frac{\partial y}{\partial y_0} - \frac{\partial u}{\partial y_0}\frac{\partial y}{\partial x_0} + \frac{\partial x}{\partial x_0}\frac{\partial v}{\partial y_0} - \frac{\partial x}{\partial y_0}\frac{\partial v}{\partial x_0}, \qquad (18)$$

где ρ – плотность смеси потока; P = PГ – давление в потоке; u – скорость по координате (x); v – скорость по координате (y); w – радиальная скорость капель; J – якобиан перехода от лагранжевых к эйлеровым переменным; C – удельная теплоемкость жидкости; γ – показатель адиабаты газа; a – средний радиус фазовой области; α – относительное объемное содержание фаз; q – интенсивность теплообмена между фазами; ж – индекс жидкости; Г – индекс газа; x_0, y_0 – лагранжевые переменные, за которые приняты начальные эйлеровы координаты.

Система уравнений (9-18) решается численными методами (например, в программной реализации MathCad-2005) и даёт иллюстрацию эффекта нелинейности эволюции волнового импульса в потоке в виде:

$$P(t, x) = P_0 + P^* \exp(-\varepsilon), \qquad (19)$$

где P_0 – начальное давление (в начальном сечении); D* – амплитуда импульса давления; ε – показатель действия импульса, равный:

$$\varepsilon = \left(t - 0{,}5t^*\right) t_0^{-1},$$

где t – координатное время; t^* – длительность импульса; t_0 – длительность начального импульса.

Уравнения импульсно-волнового движения капель и частиц в газовом потоке составлены при условии, что мгновенные эффективные радиусы капель в процессе действия на частицы пыли изменяются по зависимости:

$$R_k(t) = R_{k0} + \Delta_k f(t); \qquad \Delta_k (R_{k0})^{-1} << 1,$$

где $R_k(t)$ – мгновенный радиус капли; R_{k0} – невозмущенный радиус капли; $\varnothing_k$ – амплитуда пульсаций капли в эффективном объеме; f(t)– функция, зависящая от времени.

Тогда, система уравнений импульсно-волнового движения капли жидкости относительно оси потока, с точностью до величины второго порядка малости, имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dV_k}{dt} = 2(\dot{V}_Г - g) - \dot{V}_k[\frac{9\eta}{R_{k0}^2\rho_{ж}}(1 - \frac{2\Delta_k}{R_{k0}} + \frac{3\Delta_k}{R_{k0}^2}) + \frac{3}{R_{k0}}\Delta_k(1 - \frac{\Delta_k}{R_{k0}})], \\ \ddot{\Delta}_k + \omega_k^2\Delta_k = \chi_k(\Delta_k, \dot{\Delta}_k, V_k ...), \end{cases} \quad (20)$$

где V_k – скорость поступательного движения капли; VГ – скорость газа; g – ускорение силы тяжести; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости капли; η – динамический коэффициент вязкости; ω – циклическая частота пульсаций (столкновений).

Частота столкновений капель жидкости и частиц пыли, которая пропорциональна пульсациям в потоке, определяется соотношением:

$$\omega = \left\{ (R_{Á\tilde{I}}^2 - R_{MO}^2)^{-1} \left[3Ag(n_Á - n_M) + \right. \right.$$
$$\left. \left. + \frac{2\sigma[R_{MO}(3n_Á - 1) + R_{Á\tilde{I}}(1 - 3n_M)]}{\rho_{æ} R_{Á\tilde{I}} R_{MO}} \right] \right\}^{1/2} \quad (21)$$

где ω – циклическая частота пульсаций в потоке; $R_{БО}$, R_{MO} – начальные радиусы больших и малых капель; nБ, nМ – относительные количества больших и малых капель; А – параметр, зависящий от координаты частицы; σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Упругие свойства газожидкостного потока обеспечивают пульсации давления, а, соответственно, и качество процесса внедрения частицы пыли в каплю жидкости без дополнительных технических средств только путем специальной организации потока.

Таким образом, теоретическое исследование позволило определить, что для частиц пыли и капель жидкости в газовом потоке частотные пульсации повышают эффективность импульсов ударных взаимодействий капель жидкости и частиц пыли, т.е. эффективность подавления пыли и охлаждения.

Экспериментальные исследования проведены на установках, имеющих натурные размеры и режимы, соответствующие условиям промышленной эксплуатации (с целью уменьшения эффекта масштабности). Эксперименты выполнены в лаборатории гидромеханики Индустриального института ДонНТУ и на опытно-промышленных установках в условиях шахт региона.

На рис. 3 приведены экспериментальная и теоретическая зависимости распространения импульса давления в смеси потока, что подтверждает его импульсно-волновое перемещение и взаимодействие компонентов.

На рис. 4 показана фотография многокамерного эжектора, реализующего импульсно-волновой процесс, разработанного на основе патентов [4; 5], и испытанного в условиях угольных шахт региона.

С целью проверки расчетных параметров многокамерного эжектора для обеспыливания и охлаждения воздуха были проведены эксперименты по определению зазоров между цилиндрическими камерами, а также углов раскрытия, образуемого диффузора, для диапазонов рабочих давлений воды (0,5-2) МПа. Экспериментально определено, что зазоры между цилиндрическими камерами составляют убывающую арифметическую прогрессию. Определено, что зазоры между камерами должны быть в пределе (5-9) мм, что создает импульсно-волновое движение потока. Рациональный угол раскрытия диффузорной части эжектора находится в пределах (20–22)0.

Получена эффективность подавления пыли 98,8%, а охлаждение воздуха на (7-9)С0 при начальной температуре воды 20С0, а воздуха 32С0. Разработка найдет применение в очистных и проходческих забоях угольных шахт.

Выводы. Впервые раскрыт и аналитически описан механизм импульсно-волнового комплексного процесса гидравлического подавления пыли и охлаждения воздуха капельной жидкостью, заключающийся в колебательном внедрении частиц пыли в капли. Определено, что за счет результирующих импульсов действующих сил и энергетических потенциалов систем «капля жидкости – частица пыли», повышается эффективность вращательного дрейфа и диффузии частиц пыли в капли жидкости. При этом доминирующим фактором является величина кинетического момента, который проявляется через циклическую частоту колебаний системы, а она зависит от дискретных массовых состояний капли. Эта частота соответствует частоте импульсов, создаваемых в дисперсной пыле-газожидкостной среде, с повышением которых повышается эффект внедрения частиц пыли в капли жидкости и охлаждение воздуха.

Перспективным в исследовании является научное обоснование параметров импульсно-волнового пылеподавления и охлаждения рудничного воздуха при низконапорном орошении. Для этого необходимо определить частоты пульсаций капель больших и малых размеров (100-200) мкм при давлениях воды (0,7-1,0) МПа.

Список литературы:

1. Теория и практика охраны труда на угольных шахтах / Э.Н. Медведев, В.Д. Мартовицкий, О.И. Кашуба и др. Макеевка, МакНИИ: Промдрук, 2006. 600 с.

2. Борьба с угольной и породной пылью в шахтах / П.М. Петрухин, Г.С. Гродель, Н.И. Жиляев и др. М.: Недра, 1981. 271с.

3. Гого В.Б.. Малеев В.Б. Гидродинамическое подавление пыли в условиях угольных шахт: теория и технические решения. Донецк: ДонНТУ, 2008. 240 с.

4. Пат. 27195 Україна, МПК Е 21 F 5/100. Спосіб попередження вибуху газопилоповітряної суміші у гірничих виробках / В.Б. Гого, В.Б. Малєєв, А.К. Семенченко, О.С. Булич, С.В. Москаленко; заявник та патентовласник Донецький НТУ; заявл. 07.05.07 ; опубл. 25.10.2007, Бюл. № 17.

5. Пат. 16953 Україна, МПК F 04 F 5/16. Ежектор / В.Б. Гого, В.Б. Малєєв; заявник та патентовласник Донецький НТУ; заявл. 10.11.05 ; опубл. 15.09.06, Бюл. № 9.

РОЗВИТОК ТЕОРІЇ І ЗАСОБІВ КОМПЛЕКСНОГО ГІДРАВЛІЧНОГО ЗНЕПИЛЮВАННЯ І ОХОЛОДЖЕННЯ РУДНИКОВОГО ПОВІТРЯ

У роботі наведено нове рішення актуальної наукової проблеми, що полягає у покращенні умов праці шахтарів за пиловим та температурним факторами шляхом розвитку теорії гідродинамічного знепилювання на основі імпульсно-хвильових ефектів, що створюються в процесах поглинання частинок пилу краплями рідини і обґрунтуванні раціональних технічних засобів гідродинамічної боротьби з пилом. Теоретично обґрунтовано і експериментально доведено, що для частинок пилу і крапель рідини у процесі імпульсної хвильової взаємодії виникають частотні пульсації разом зі змінами амплітуд коливань їх імпульсів у вигляді хвилі тиску, що підвищує ефективність імпульсів ударних взаємодій крапель рідини і частинок пилу у процесах їх злиття (знепилювання) та охолодження. Практичне значення полягає у тому, що на основі встановлених закономірностей і особливостей імпульсно-хвильової дії крапель рідини на частинки пилу, розроблено установки, що пройшли промислову перевірку і показали ефективність у процесах покращення умов праці шахтарів за пиловим і температурним факторами.

Ключові слова: *вугільна шахта, пил, гідравлічне знепилювання, охолодження рудникового повітря.*

DEVELOPMENT OF THE THEORY AND MEANS OF INTEGRATED HYDRAULIC SPRAYING AND COOLING OF MUNICIPAL AIR

The paper presents a new solution to the actual scientific problem, which is to improve the working conditions of miners by dust and temperature factors by developing a theory of hydrodynamic dust removal based on pulsed-wave effects created in the processes of absorption of dust particles by droplets of a fluid and substantiation of rational technical means of hydrodynamic dust control. It is theoretically substantiated and experimentally mentally proved that for dust particles and liquid droplets in the process of pulse-wave wave interaction, frequency pulsations occur along with changes in the amplitude of the fluctuations of their pulses in the form of a pressure wave that increases the efficiency of synergistic impulses of shock interactions of liquid droplets and dust particles. in the process of their merging (dust removal) and cooling. The practical significance is that on the basis of the established regularities and features of the pulsed-wave action of droplets of a liquid on dust particles, the installations that have undergone an industrial test and demonstrated efficiency in the process of improving the working conditions of miners for dust and temperature factors have been developed.

Key words: *coal mine, dust, hydraulic abatement, cooling of mine air.*

УДК 622.841:622.847

Загриценко А.Н.
ГВУЗ «Национальный горный университет»

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОСНОВА ВОДОРЕГУЛИРОВАНИЯ ПРИ ВЕДЕНИИ ГОРНЫХ РАБОТ В СЛОЖНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ЗАПАДНОГО ДОНБАССА

Оценена эффективность технологических схем водорегулирования с помощью численного моделирования процесса геофильтрации в естественной и нарушенной горными работами гидродинамической обстановке с хронологическим воспроизведением всех этапов отработки шахтного поля и определением факторов формирования водопритоков.

Ключевые слова: *моделирование геофильтрации, обратные задачи, параметры проницаемости, водорегулирование.*

Постановка проблемы. При ведении горных работ в сложных гидрогеологических условиях увеличиваются себестоимость добычи и потеря запасов угля, сокращаются темпы проходки горных выработок и повышается аварийность, возрастает техногенная нагрузка на подземную и поверхностную гидросферу, что в свою очередь приводит к истощению и загрязнению водных ресурсов региона. Несмотря на то, что в условиях Западного Донбасса апробировано ряд технических решений (противофильтрационные завесы, опережающий дренаж, силикатизация) по снижению притоков воды в горные выработки, вышеупомянутые аспекты остаются актуальными и предопределяют поиск новых технологических схем водорегулирования.

Максимальная эффективность технических решений достигается при условии, что достаточно точно установлен механизм формирования водопритоков, природа факторов их формирования и закономерности изменения. Поэтому задачей настоящих исследований является обоснование технологических схем водорегулирования на основе численного моделирования фильтрационных и гидравлических потоков в пределах шахтного поля с установлением закономерностей изменения проницаемости нарушенного горного массива.

Анализ последних исследований и публикаций. Вопросам изучения техногенного режима подземных вод и закономерностям формирования водопритоков в горные выработки шахт Западного Донбасса посвящены работы С.А. Шагоянца, А.В. Безазьяна, С.А. Яковлева, А.М. Антропцева, М.А. Шинкаревского, В.Г. Пасечного.

Технологические аспекты управления геофильтрационным состоянием горного массива вокруг горных выработок при наложении геомеханических и фильтрационных полей исследованы И.А. Садовенко. В работе [1] с использованием метода математического моделирования геофильтрации и напряженно-деформированного состояния горного массива оценены параметры проницаемости и емкости горных пород тектонически нарушенной зоны Богдановского сброса, выполнен прогноз величин водопритоков и деформаций контура откаточного квершлага, разработан специальный гидрогеомониторинг прохождения квершлага через крупноамплитудное тектоническое нарушение.

Методические аспекты численного моделирования шахтных полей в условиях эксплуатации и затопления освещены в работах Ю.А. Норватова, Н.А. Белокопытовой, В.Ю. Сынаха, Е.О. Подвигиной. При обосновании методики моделирования геофильтрации [2] разработаны рекомендации по выбору числа расчетных слоев, способов отображения слоистой системы горных пород, горных выработок, целиков и сбоек между шахтами, но вопросы количественной оценки техногенной проницаемости и ее изменений не раскрываются.

Попытка обосновать изменение коллекторских свойств массива при сдвижении горных пород и их затоплении предпринята А.В. Моховым [3], который исследует причинно-следственные связи геомеханических процессов и гидродинамических явлений. На основе анализа фактов аварийных прорывов воды через барьерные целики и в стволы шахт, смежных с затапливаемыми, автор приводит предположения об изменении характе-

ристик емкостных свойств массива. Количественное значение коэффициента фильтрации обрушенной толщи вкрест напластования (kz =0,003 м/сут) оценено по формуле Дарси.

Определение водопроницаемости горных пород возможно с использованием натурных полевых методов, а именно опытно-фильтрационных откачек, геофизических методов, опытно-миграционных работ по запуску трассеров [4]. Однако в условиях значительных техногенных преобразований горного массива их применение ведет к неоднозначным результатам при интерпретации полученных данных и ограничивается высокой стоимостью проведения испытаний.

Создание фильтрационных численных моделей шахтных полей является наиболее точным и современным методом прогнозирования нарушенных гидродинамических условий, где нерешенной частью проблемы остается изменение параметров проницаемости и емкости горных пород во времени, которое определяет адекватность созданных моделей и достоверность долгосрочных прогнозов.

Постановка задания. Разработка технологических схем водорегулирования с оценкой их эффективности путем создания компьютерной модели фильтрационных и гидравлических потоков шахтного поля в нестационарном поле проницаемости.

Изложение основного материала. Поставленная задача решена для горно-геологических условий шахты им. Н.И. Сташкова ЧАО «ДТЕК

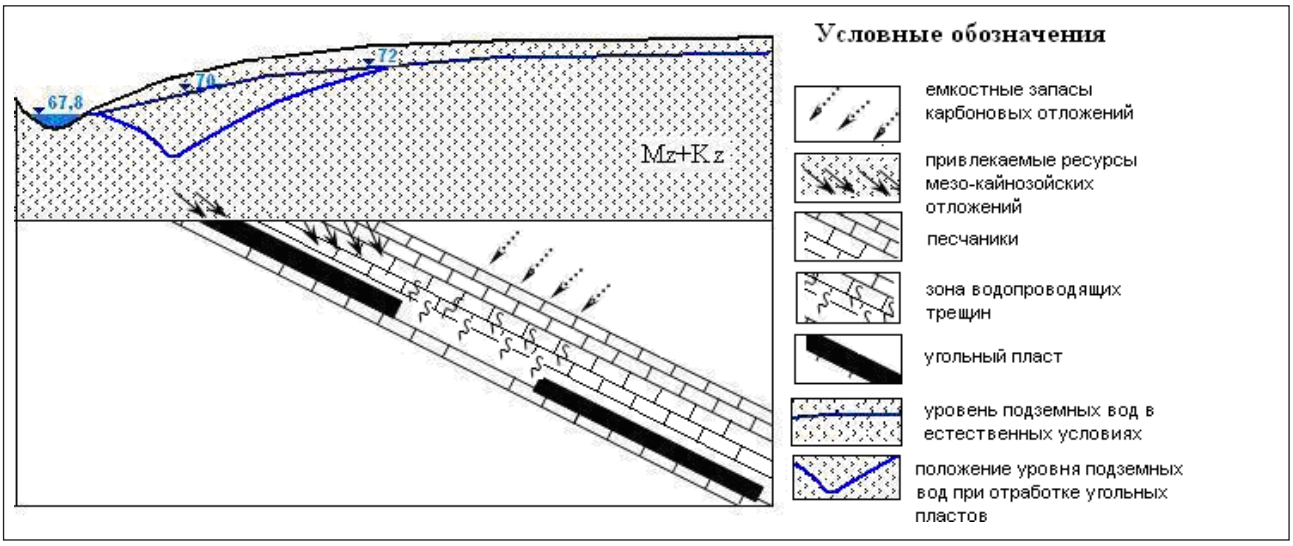


Рис. 1. Схема гидродинамически открытого типа угольных пластов

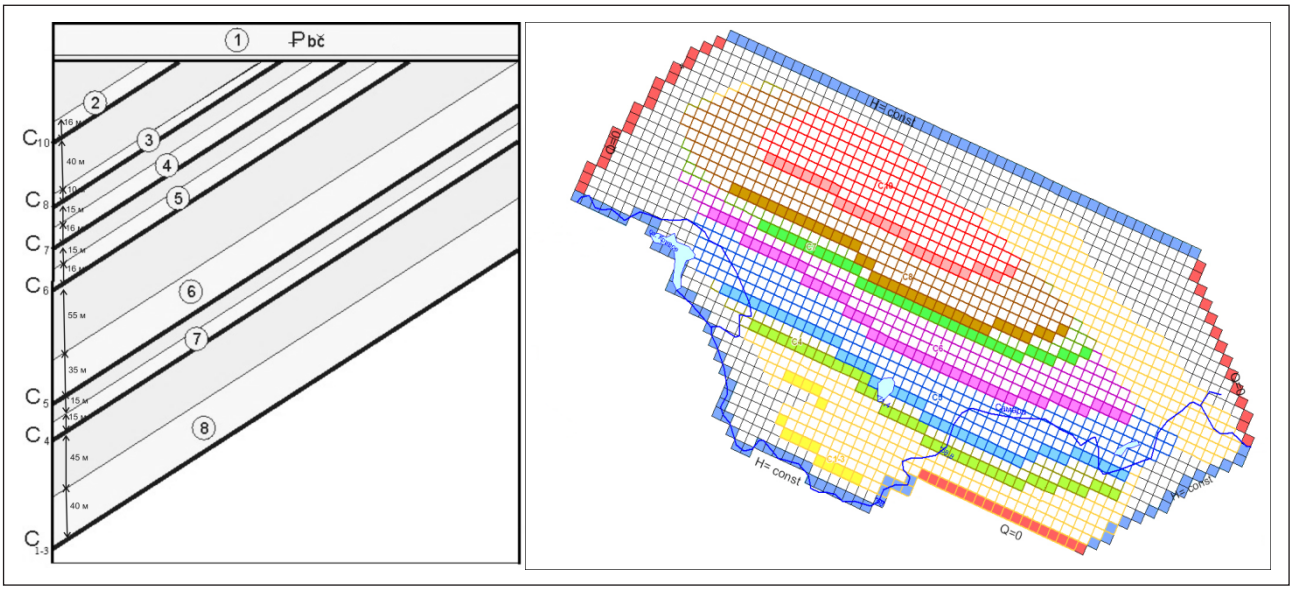


Рис. 2. Схематический вид модели: а) в разрезе; б) аппроксимация выходов угольных пластов в плане

Павлоградуголь», которая отрабатывает гидродинамически открытые угольные пласты в пойме р. Самара, и является одной из самых водообильных шахт в Украине (рис. 1).

В этом случае в обводнении горных выработок шахты, кроме емкостных запасов карбоновой толщи, существенна роль привлекаемых ресурсов покровных отложений и поверхностных вод, а водопритоки определяются зависимостью

$$Q = a_0 + a_1 \frac{BS}{L}, \qquad (1)$$

где a_0 – приток за счет дренирования кровли, м^3/сут; a_1 – водопроводимость угольного пласта, м^2/сут; В – ширина фронта горных работ, *м*; *S* – понижение уровня подземных вод, *м*; *L* – расстояние от границы безопасного ведения горных работ до зоны выхода угольного пласта.

Это означает, что гидродинамическая схема модели должна отражать тесную гидравлическую связь угленосной толщи карбона и покровных отложений, а также превалирующую роль песчаников древнего аллювия в формировании водопритоков. Согласно указанным геолого-структурным особенностям геофильтрационная модель шахтного поля состоит из 8-ми расчетных слоев (рис. 2, а), где первый (1) отражает покрывающий водоносный комплекс бучакско-киевских отложений, а продуктивная толща карбона представлена отрабатываемыми угольными пластами $C_{1-3} – C_{10}$ и палеорусловыми песчаниками (2-8). В плане поле шахты размером 15,4×8,6 км аппроксимировано сеточной областью 77×43 ячейки (рис. 2, б) с граничными условиями первого (H=const) и второго рода (Q=0). Соответственно, выходы угольных пластов определяют размеры и площадь расчетных слоев карбона, которые на рис. 2, б показаны различными цветами

Основным этапом создания численной модели шахтного поля является ее идентификация на основе решения комплекса обратных задач в естественной и нарушенной гидродинамической обстановке. Более подробно остановимся на заключительном этапе верификации, которая выполняется по данным функционирования объекта, т.е. на модели в хронологическом порядке воспроизводится процесс отработки угольных пластов по периодам с характерной динамикой притоков воды в шахту.

Контрольными данными при эпигнозном моделировании служат величины фактических водопритоков и положение уровня подземных вод покровных отложений (табл. 1).

Из таблицы 1 видно, что средняя погрешность решения по величине водопритоков не превышает 10%, по положению уровня – 7%. При этом невязка общего баланса модели на каждом из периодов не превышает 0,01%.

Таблица 1

Данные фактических замеров и результатов эпигнозного моделирования

Периоды отработки угольных пластов	Водоприток по угольным пластам (расчетным слоям) факт/модель, м3/час							Приток по шахте, м^3/час	Понижение уровня подземных вод в бучакских отложениях, м
	C_{10} (2)	C_8 (3)	C_7 (4)	C_6 (5)	C_5 (6)	C_4 (7)	C_{1-3} (8)		
(1982-1990)	45/ 47	335/ 373	–					690/ 675	15/13,5
(1990-1994)	122/117	455/433	–	163/166	649/822	386/230	–	1788/1768	27/31
(1994-1998)	146/152	287/290	–	163/173	412/605	369/192	–	1454/1412	29/30
(1998-2006)	302/307	115/103	–	125/144	556/595	387/342	–	1510/1462	31/30
(2006-2012)	204/220	97/90	–	72/103	463/457	325/352	–	1176/1259	32/31

Таблица 2

Динамика формирования водного баланса по пласту С5

Статьи баланса	Величины приходных (+) и расходных (-) статей баланса							
	1994 г.		1998 г.		2006 г.		2012 г.	
	+	-	+	-	+	-	+	-
Приток к горным выработкам (в т. ч. подток из бучакского водоносного горизонта за счет фильтрации речных вод), м^3/час	-	822 (570)	-	463 (250)	-	590 (159)	-	452 (76)
Переток через кровлю, м^3/час	868	0,9	612,3	2	785,2	1,1	619	-
Переток через подошву, м^3/час	19,3	53,7	29	158,3	28	205	40,2	207,8

Повторение на модели фактической динамики водопритоков и уровней на каждом из этапов позволило установить ряд закономерностей формирования техногенного режима подземных вод.

1. При естественной водопроводимости угольных пластов 0,5-1,5 м^2/сут достижение фактических величин водопритоков на модели (до 822 м^3/час по шахтопласту) возможно при отображении зон повышенной проницаемости. На поле шахты они представлены толщами песчаников мощностью до 45 м и водопроводимостью до 30 м^2/сут, которые залегают в кровле угольных пластов и имеют выход под обводненные покровные отложения.

2. Вовлечение в водоприток шахты дополнительных ресурсов мезо-кайнозойских отложений подтверждается формированием воронки депрессии до 30 м в бучакском водоносном горизонте и изменением направления движения фильтрационных потоков вблизи реки (рис. 3). Анализ балансовых составляющих модели показывает, что количественное соотношение привлекаемого ресурса и статических запасов карбоновой толщи составляет 70% и 30%, соответственно.

3. В нарушенных условиях река Самара из зоны разгрузки превращается в зону питания бучакского водоносного горизонта и соответственно дополнительный ресурс обводнения горных выработок.

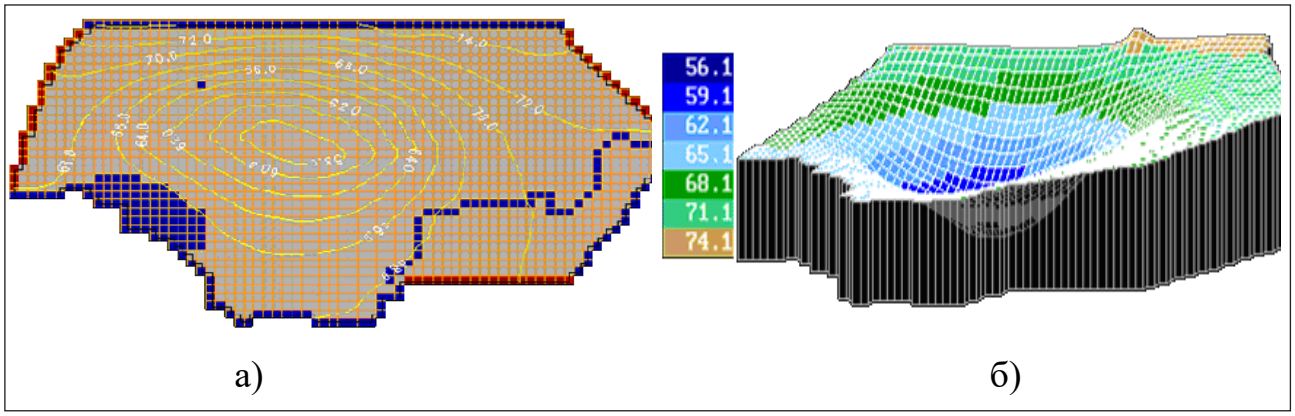


Рис. 3. Водоносный комплекс бучакско-киевских отложений с абс. отм в виде карты гидроизогипс (а) и трехмерное изображение воронки депрессии (б)

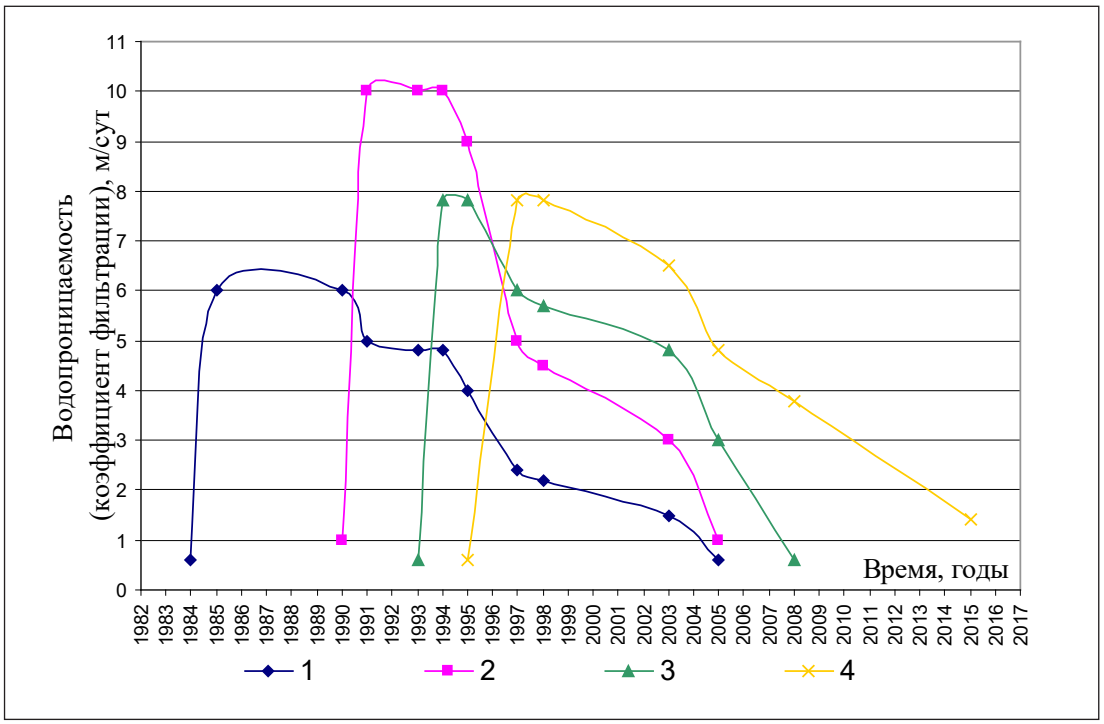


Рис. 4. Изменение водопроницаемости по пласту С5 на участках (1-4), отработанных в разные периоды времени

Максимальное вовлечение речного стока Самары в шахтный водоотлив характерно при отработке угольного пласта C_5 в пойме реки (в 200-х метрах от русла) и непосредственном приближении к границе безопасного ведения горных работ. Так максимальный водоприток по этому пласту 822 м^3/час обусловлен на 69% (570 м^3/час) подтоком речных вод. По мере удаления горных работ от зоны выхода угольного пласта под бучакско-киевские отложения и уменьшения мощности подрусловых песчаников в восточной части шахтного поля этот показатель уменьшается до 76 м^3/час или 17% (табл. 2).

4. Велина водопритоков в шахту не коррелирует с увеличением площади горных работ. На отработанных с обрушением кровли площадях проницаемость карбоновой толщи является величиной переменной во времени, значение которой увеличивается в 10-15 раз при сдвижении горных пород, уменьшается в два раза через 5-10 лет и перестает выполнять дренирующую функцию через 15-20 лет (рис. 4).

Установить подобные трансформации для конкретных горно-геологических условий возможно путем решения длительного (15-20 лет) временного ряда нестационарных идентификационных задач, что является обязательным этапом в методике создания адекватных моделей шахтных полей и получения долгосрочных прогнозов высокой достоверности.

На основании установленной при моделировании гидродинамической структуры, параметров зон повышенной проницаемости и ее динамики, анализа технических возможностей и технологических аспектов рассмотрена эффективность следующих вариантов технических решений по водорегулированию.

Вариант 1. По результатам детальной гидродинамической съемки в горных выработках шахты рассмотрен и реализован вариант создания гидроизоляционной перемычки в зоне погашенного штрека пласта C_5 и перемычки в зоне искусственного перепуска воды с пласта C_6 на C_5 (рис. 2).

Сооружение перемычки в зоне, где водоприток из погашенной горной выработки составляет около 30 м^3/час, приводит к перераспределению потоков подземных вод и формированию подпора подземных вод через 1 год до 7,2 м в зоне перед перемычкой и снижению уровня до 5,7 м за ней.

Противофильтрационная перемычка в условиях установившегося режима фильтрации позволяет перехватить фильтрационный поток по сборному штреку на 67%.

При ликвидации искусственной дрены, т.е. прямого гидравлического перепуска воды (около 78 м^3/час) с пласта C_6 на пласт C_5, водоприток по пласту C_6 увеличивается на 23 м^3/час, а по C_5 уменьшается на 46 м^3/час в условиях установившегося режима фильтрации (через 1 год). При этом восстановление уровней в пласте C_6 приводит к формированию напоров до 20 м.

Вариант 2. Управление затоплением отработанных участков шахтного поля оценено для условий затопления отработанных участков пластов C_5 и C_4 (рис. 2, а) на 300-ом горизонте до отметки -115 м. Уменьшение водопритока в этом случае происходит за счет уменьшения размеров сдренированных площадей (рис. 5).

Результаты решений по варианту с полным погашением восстающей выработки показывают, что затопление до абсолютной отметки -115 м происходит в течение одного года, при этом водоприток по шахте в первый месяц затопления уменьшается на 188 м3/час (17 %), во второй – на 175 м^3/час, а к концу полного затопления характеризуется снижением общешахтного водопритока на 50 м^3/час.

Вариант 3. Тампонирование зон повышенной проницаемости в зоне выхода пластов наиболее рационально с использованием схемы вертикально-горизонтального бурения.

Фактический водоприток по шахте составляет 1161 м^3/час, из него 85% – приток по пластам $C10 + C_5 + C_4$. С учетом этого и динамики движения воронки депрессии в бучакском водоносном горизонте рассмотрены различные варианты создания противофильтрационной завесы (ПФЗ).

Результаты решений показывают наибольшую эффективность ПФЗ (снижение общешахтного

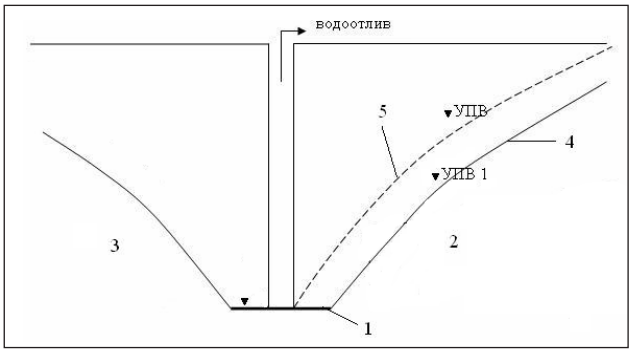


Рис. 5 Схема управления затоплением отработанных частей шахтного поля:

1 – горизонт водоотлива; 2, 3 – отработанный и отрабатываемый блоки, соответственно; 4, 5 – уровень подземных вод до и после затопления блока 2

водопритока на 25%) при коэффициенте фильтрации 10^{-2} м/сут, который принимался как базовый в расчетах и подтвержден практикой уменьшения проницаемости при тампонаже пород.

Наличие открытой гидравлической связи карбоновых отложений и бучакского водоносного горизонта обусловливают активную реакцию шахтного поля на увеличение линейных размеров ПФЗ. Например, при максимальном перекрытии выходов пластов C_{10}, C_5, C_4 возможно уменьшение водопритока в шахту до 695 м^3/час (-38%).

Вариант 4. Гидроизоляция перетока из р. Самара предусматривает формирование по известной технологии «стены в грунте», препятствующей подтоку из реки. В условиях ведения горных работ на современном этапе возможно в 2 раза уменьшить подток из реки до 31 м^3/час путем гидроизоляции прирусловой зоны.

Реализация рассмотренных технологических схем водорегулирования позволяет снизить приток воды в шахту от 10 до 38%. При этом применяться они могут как независимо друг от друга на различных этапах эксплуатации шахты, так и одновременно.

В качестве пилотного проекта разработана и реализована конструкция водоизоляционной перемычки в сборном штреке, в которой предусмотрены контрольные устройства для фиксации параметров изменения гидродинамического давления и корректировки модельных прогнозов.

Выводы. Установленные закономерности изменения техногенной проницаемости и обоснованная методика моделирования геофильтрации шахтного поля повышают достоверность долгосрочных гидродинамических прогнозов и позволяют разрабатывать технологические схемы снижения притоков воды в шахту. Созданная гидродинамическая модель поля шахты им. Н.И. Сташкова является составной частью геофильтрационной модели региона Западного Донбасса для решения текущих задач водорегулирования и экологически щадящего процесса последующего свертывания горных работ.

Список литературы:

1. Садовенко И.А., Загриценко А.Н., Подвигина Е.О., Тимощук В.И. Обоснование параметров безопасного пересечения горными выработками крупноамплитудного тектонического нарушения. Уголь Украины. 2017. №3. С. 17-24.

2. Білокопитова Н.А,. Подвігіна О.О., Токар М.В. Особливості моделювання гідрогеологічних умов Донбасу. Збірник наукових праць Українського державного геологорозвідувального інституту. 2003. № 2. С. 59-62.

3. Мохов А.В. Подземные воды как индикатор геомеханических процессов. ГИАБ. 2014. №3. С. 273-282.

4. Дрибан В.А., Дуброва Н.А. Изучение количественных и пространственных параметров распределения вредных загрязняющих веществ в техногенно нарушенном массиве горных пород сложного строения. Наукові праці УкрНДМІ НАН України: збірник наукових праць. 2012. № 11. С. 306-318.

ПАРАМЕТРИЧНА ОСНОВА ВОДОРЕГУЛЮВАННЯ ПРИ ВЕДЕННІ ГІРНИЧИХ РОБІТ У СКЛАДНИХ ГІДРОДИНАМІЧНИХ УМОВАХ ЗАХІДНОГО ДОНБАСУ

Оцінено ефективність технологічних схем водорегулювання за допомогою чисельного моделювання процесу геофільтрації у природній та порушеній гірничими роботами гідродинамічній обстановці з хронологічним відтворенням всіх етапів відпрацювання шахтного поля і визначенням факторів формування водопритоків.

Ключові слова: *моделювання геофільтрації, обернені задачі, па-параметри проникності, водорегулювання.*

PARAMETRIC BASIS OF WATER REGULATION DURING MINE OPEARATION IN COMPLEX HYDRODYNAMIC CONDITIONS OF WESTERN DONBASS

The effectiveness of technological schemes of water regulation is estimated via numerical simulation of geofiltration process in natural hydrodynamic conditions and conditions disturbed by mining with a chronological reproduction of all stages of mine field operation and determining the factors of water inflows formation.

Key words: *geofiltration simulation, inverse problems, permeability parameters, water regulation.*

УДК 532.595

Нагорний В.П.
Інститут геофізики імені С.І. Субботіна Національної академії України

Денисюк І.І.
Інститут геофізики імені С.І. Субботіна Національної академії України

Юшицина Я.О.
Інститут геофізики імені С.І. Субботіна Національної академії України

ОБРОБЛЕННЯ ВУГЛЕВОДНЕВИХ ПЛАСТІВ АМПЛІТУДНО МОДУЛЬОВАНИМИ ХВИЛЯМИ

У статті наведено результати досліджень стосовно оброблення вуглеводневих пластів амплітудно модульованими акустичними хвилями виду $\upsilon=\upsilon_0(1+m\sin\Omega\tau)\sin\omega\tau$, *де m – індекс модуляції; Ω, ω – низька модулююча та висока несуча частоти відповідно. Під час розв'язання задачі використано широко відоме рівняння Бюргерса, що описує поширення нелінійних хвиль у середовищах з дисипацією. Оцінка ролі нелінійності та дисипації в середовищі провадиться за акустичним числом Рейнольдса Re. Наведено приклади розрахунків амплітуд швидкостей у дисипативних (пісковик, вапняк) та нелінійному середовищах (нафта) на модулюючій Ω та боковій частотах 2ω+Ω. Отримані результати проведених досліджень можуть бути використані в процесі розроблення перспективних технологій хвильової обробки нафтогазоносних пластів із метою підвищення дебіту видобувних свердловин.*

Ключові слова: *амплітуда, дисипація, модуляція, нелінійність, хвиля, частота.*

Постановка проблеми. Акустичні методи оброблення вуглеводневих пластів гармонічними хвилями знайшли широке застосування з метою підвищення видобутку вуглеводнів [1–4]. Проте, відомі методи не враховують нелінійність середовища та дисипативні втрати енергії хвильових збурень в процесі розповсюдження їх в середовищі пласта. Подальшим розвитком акустичних методів є використання в процесі оброблення вуглеводневих пластів дії бігармонічних акустичних хвиль. Застосування такого роду хвиль дає можливість провадити оброблення продуктивних пластів в більш широкому частотному діапазоні, порівняно з гармонічним обробленням на одній фіксованій частоті, що сприяє підвищенню ефективності акустичної дії.

Постановка завдання. У цій роботі проведено дослідження дії амплітудно-модульованих акустичних хвиль в нелінійному дисипативному геофізичному середовищі пласта. Дослідження проведено на основі рівняння Бюргерса [5, 6]:

$$\frac{\partial \upsilon}{\partial x}-\frac{\varepsilon}{c^2}\upsilon\frac{\partial \upsilon}{\partial \tau}=\frac{b}{2\rho c^3}\frac{\partial^2 \upsilon}{\partial \tau^2} \qquad (1)$$

де υ – масова (коливальна) швидкість руху; c – швидкість звуку в середовищі; ρ – щільність середовища; $\varepsilon=(\gamma+1)/2$ – параметр нелінійності середовища; $\gamma=c_p/c_\upsilon$ – показник адіабати в рівнянні стану середовища; $b=\xi+\frac{4}{3}\eta+\kappa\left(\frac{1}{c_\upsilon}-\frac{1}{c_p}\right)$ – дисипативний коефіцієнт (ξ, η – об'ємна та зсувна в'язкості, к – коефіцієнт теплопровідності, c_p, c_υ – питомі теплоємності середовища); $\tau=t-x/c$.

Виклад основного матеріалу дослідження. У рівняння Бюргерса (1) входять нелінійний $\frac{\varepsilon}{c^2}\upsilon\frac{\partial \upsilon}{\partial \tau}$ та дисипативний $\frac{b}{2\rho c^3}\frac{\partial^2 \upsilon}{\partial \tau^2}$ члени. Для оцінки відносної ролі нелінійності та дисипації вводиться акустичне число Рейнольдса $\mathrm{Re}=\frac{p_m}{b\omega}=\frac{\rho c\upsilon_0}{b\omega}$ [7], де p_m – максимальний тиск акустичної хвилі, ω – частота.

Для синусоїдальної хвилі $\upsilon=\upsilon_0\sin\omega\tau$ справедливо:

$$\frac{\textit{нелінійність}}{\textit{дисипація}}=\frac{\frac{\varepsilon}{c^2}\upsilon\frac{\partial \upsilon}{\partial \tau}}{\frac{b}{2\rho c^3}\frac{\partial^2 \upsilon}{\partial \tau^2}}\sim\frac{\frac{\varepsilon}{c^2}\upsilon_0^2\omega}{\frac{b}{2\rho c^3}\upsilon_0\omega^2}=\frac{2\varepsilon\upsilon_0\rho c}{b\omega}=2\varepsilon\,\mathrm{Re}, \qquad (2)$$

Не розв'язуючи рівняння Бюргерса, можна на основі (2) проаналізувати відносну роль дисипації та нелінійності в еволюції профілю хвилі.

Якщо Re << 1, тоді все визначається дисипацією (вона дуже велика), нелінійні спотворення малі і можна користуватися лінійним рівнянням, отриманим з (1).

Якщо Re >> 1, тоді дисипація мала і превалюють нелінійні ефекти.

Зауважимо, що сумісний вплив нелінійності та дисипації можна спостерігати зазвичай на високих частотах (ультразвукових) [5; 6].

Використовуючи рівняння (1), дослідимо поширення в нелінійному дисипативному середовищі амплітудно модульованої акустичної хвилі:

$$\upsilon = \upsilon_0 \left(1 + m \sin \Omega\tau\right) \sin \omega\tau \ , \qquad (3)$$

де m – індекс модуляції; Ω, ω – низька модулююча та висока несуча частоти відповідно.

Розглянемо перший випадок, коли Re << 1 (тобто досліджується акустична дія на дисипативне середовище). У цьому разі, нехтуючи нелінійним членом у рівнянні (1), його можна лінеаризувати. У результаті одержуємо рівняння першого наближення:

$$\frac{\partial \upsilon^{(1)}}{\partial x} = \frac{b}{2\rho c^3} \frac{\partial^2 \upsilon^{(1)}}{\partial \tau^2} \ . \qquad (4)$$

Розв'язок рівняння (4) має вигляд [8]:

$$\upsilon^{(1)} = \upsilon_0 e^{-\alpha x} \sin \omega\tau + \frac{\upsilon_0 m}{2} e^{-\alpha_1 x} \cos \omega_1 \tau - \frac{\upsilon_0 m}{2} e^{-\alpha_2 x} \cos \omega_2 \tau \ , \qquad (5)$$

де $\alpha = \frac{b\omega^2}{2\rho c^3}$; $\alpha_1 = \frac{b\omega_1^2}{2\rho c^3}$; $\alpha_2 = \frac{b\omega_2^2}{2\rho c^3}$; $\omega_1 = \omega - \Omega$; $\omega_2 = \omega + \Omega$.

Згідно з [5], рівняння другого наближення визначається виразом:

$$\frac{\partial \upsilon^{(2)}}{\partial x} - \frac{b}{2\rho c^3} \frac{\partial^2 \upsilon^{(2)}}{\partial \tau^2} = \frac{\varepsilon}{c^2} \upsilon^{(1)} \frac{\partial \upsilon^{(1)}}{\partial \tau} \ , \qquad (6)$$

де $\upsilon^{(1)}$ описується залежністю (5).

Визначивши похідну $\frac{\partial \upsilon^{(1)}}{\partial \tau}$ та добуток $\upsilon^{(1)} \frac{\partial \upsilon^{(1)}}{\partial \tau}$, рівняння (6) представимо у вигляді:

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial \upsilon^{(2)}}{\partial x} - \frac{b}{2\rho c^3} \frac{\partial^2 \upsilon^{(2)}}{\partial \tau^2} = \\
&= \frac{\varepsilon}{c^2} \left[\frac{\upsilon_0^2 \omega}{2} \left(e^{-2\alpha x} + \frac{m^2}{2} e^{-(\alpha_1 + \alpha_2)x} \right) \sin 2\omega\tau + \right. \\
&+ \frac{\upsilon_0^2 m \Omega}{4} \left(e^{-(\alpha + \alpha_1)x} + e^{-(\alpha_1 + \alpha_2)x} \right) \cos \Omega\tau + \\
&+ \frac{\upsilon_0^2 m^2 \Omega}{4} e^{-(\alpha_1 + \alpha_2)x} \sin 2\Omega\tau + \\
&+ \frac{\upsilon_0^2 m (2\omega - \Omega)}{4} e^{-(\alpha + \alpha_1)x} \cos (2\omega - \Omega) - \\
&- \frac{\upsilon_0^2 m (2\omega + \Omega)}{4} e^{-(\alpha + \alpha_2)x} \cos (2\omega + \Omega) - \\
&- \frac{\upsilon_0^2 m^2 \omega_1}{\square} e^{-2\alpha_1 x} \sin (2\omega - 2\Omega) - \square \\
&\left. - \frac{\upsilon_0^2 m^2 \omega_2}{\square} e^{-2\alpha_2 x} \sin (2\omega + 2\Omega) \tau \right] \square \square \square
\end{aligned} \qquad (7)$$

Розв'язок рівняння (7) для коливальної швидкості $\upsilon^{(2)}$ визначається його правою частиною, до якої входять спектральні складники швидкості на частотах 2ω, Ω, 2Ω, $2\omega \pm \Omega$, $2\omega \pm 2\Omega$. Зауважимо, що за дії амплітудно модульованої хвилі на лінійне геосередовище в ньому будуть генеруватися коливання лише на частотах ω та $\omega \pm \Omega$, тобто їхній спектральний склад значно бідніший, ніж у випадку, що розглядається [9].

Розглянемо диференційне рівняння для визначення другого наближення акустичної хвилі на низькій модулюючій частоті Ω, яке отримуємо з виразу (7):

$$\frac{\partial \upsilon_\Omega^{(2)}}{\partial x} - \frac{b}{2\rho c^3} \frac{\partial^2 \upsilon_\Omega^{(2)}}{\partial \tau^2} = \frac{\varepsilon m \upsilon_0^2 \Omega}{4c^2} \left(e^{-(\alpha + \alpha_1)x} + e^{-(\alpha + \alpha_2)x} \right) \cos \Omega\tau \ . \qquad (8)$$

Розв'язок рівняння (8) за Ω << ω і нульовій граничній умові $x = 0$, $\upsilon_\Omega^{(2)} = 0$ має вигляд:

$$\upsilon_\Omega^{(2)} = \frac{\varepsilon m \upsilon_0^2 \rho c \Omega}{2b\omega^2} \left(e^{-\frac{b\Omega^2 x}{2\rho c^3}} - e^{-\frac{b\omega^2 x}{\rho c^3}} \right) \cos \Omega\tau \ . \qquad (9)$$

Для кількісної оцінки амплітуд хвилі на частоті Ω та хвилі на одній із бокових частот $2\omega + \Omega$ розглянемо диференційне рівняння другого наближення щодо частоти $2\omega + \Omega$, яке отримуємо з виразу (7):

$$\frac{\partial \upsilon_{2\omega+\Omega}^{(2)}}{\partial x} - \frac{b}{2\rho c^3} \frac{\partial^2 \upsilon_{2\omega+\Omega}^{(2)}}{\partial \tau^2} = \left(- \frac{\varepsilon m \upsilon_0^2 (2\omega + \Omega)}{4c^2} \right) e^{-(\alpha + \alpha_2)x} \cos (2\omega + \Omega)\tau \ . \qquad (10)$$

Розв'язок рівняння (10) за умови Ω << ω має вигляд:

$$\upsilon_{2\omega+\Omega}^{(2)} = \frac{\varepsilon m \upsilon_0^2 \rho c (2\omega + \Omega)}{4b\omega (\omega + \Omega)} \left(e^{-\frac{2b\omega(\omega+\Omega)x}{\rho c^3}} - e^{-\frac{b\omega(\omega+\Omega)x}{\rho c^3}} \right) \cos (2\omega + \Omega)\tau \ . \qquad (11)$$

Зазначимо, що отримані розв'язки $\upsilon_\Omega^{(2)}$ та $\upsilon_{2\omega+\Omega}^{(2)}$ у межах другого наближення непридатні для чисел Рейнольдса, відмінних від Re << 1. У такому разі для рівняння Бюргерса (1) шукають точні аналітичні розв'язки, зазвичай вони дуже громіздкі і малоефективні для практичного застосування [10].

Розглянемо поширення акустичної амплітудно модульованої хвилі в різних дисипативних геосередовищах: пісковику та вапняку. Характеристики цих середовищ і параметри амплітудно модульованих хвиль наведені в табл. 1. Параметри геосередовищ взяті з роботи [11]. Вибір частот ω та Ω обумовлений сприянням ефективній акустичній дії на резонансних частотах структурних елементів геосередовища (його зерен і блоків).

Із використанням виразів (9) та (11) розраховані та побудовані графіки залежності амплітуд коливань швидкостей $\upsilon_\Omega^{(2)}$, $\upsilon_{2\omega+\Omega}^{(2)}$ від відстані x до джерела збурення (рис. 1).

З рис. 1 видно, що компоненти поля швидкостей суттєво залежать від параметра дисипації b (в'язкості) геосередовища. У разі збільшення параметра b амплітуди хвиль $A_|$, $A_{2\omega+\Omega}$ суттєво зменшуються (криві 2 порівняно із кривими 1). Водночас хвиля на частоті $2\omega + \Omega$ у вапняку (крива 2, рис. 1, б) згасає вже на відстані 1,0 м від джерела збурення. Максимальні значення амплітуд коливань швидкостей досягаються: на частоті

Ω у точках $x_m = 29,524$ м (пісковик) та $x_m = 1,01$ м (вапняк); на частоті $2\omega + \Omega$ – $x_m = 1,685$ м (пісковик), $x_m = 0,062$ м (вапняк).

Відстані, на яких досягаються максимальні амплітуди коливань швидкості на частотах Ω і $2\omega + \Omega$, визначалися з умов $\frac{d\upsilon_\Omega^{(2)}}{dx} = 0$ та $\frac{d\upsilon_{2\omega+\Omega}^{(2)}}{dx} = 0$.

Стрімкий характер згасання амплітуди хвилі на боковій частоті $2\omega + \Omega$ визначається величиною коефіцієнта згасання $\alpha_{2\omega+\Omega} = \frac{2b\omega(\omega+\Omega)}{\rho c^3}$ цієї хвилі, який для цих середовищ значно перевищує коефіцієнт згасання $\alpha_\Omega = \frac{b\Omega^2}{2\rho c^3}$ хвилі на модулюючій частоті Ω.

Розрахунки показують, що на відстані x >15 м від джерела дії АМ-сигналу інтенсивність хвилі на частоті Ω перевищує інтенсивність хвилі на частоті $2\omega + \Omega$, тобто спектральний максимум процесу зміщується в область низьких частот. Це викликано тим, що хвиля на модулюючій низькій частоті згасає слабкіше порівняно із хвилею на більш високій боковій частоті.

Далі розглянемо випадок, коли Re >>1, тобто дисипація мала або практично відсутня (b → 0). У цьому разі експоненти, що входять у формули (9), (11), можна наближено розкласти в ряд, обмежившися двома його членами. У результаті отримуємо:

$$\upsilon_\Omega^{(2)} = \left(\frac{\varepsilon m\Omega\upsilon_0^2}{2c^2}x\right)\cos\Omega\tau \ , \qquad (12)$$

$$\upsilon_{2\omega+\Omega}^{(2)} = \frac{-\varepsilon m\upsilon_0^2(2\omega+\Omega)x}{4c^2}\cos(2\omega+\Omega)\tau \ . \qquad (13)$$

Знак мінус в (13) враховує фазу коливань на частоті $2\omega + \Omega$.

Розв'язки (12) і (13) справедливі лише поблизу джерела випромінювання на відстанях x, що не перевищують величину відрізка $z = c^2/(\varepsilon\omega\upsilon_0)$ [5].

На відстані x = z формується ударна хвиля і профіль хвилі спотворюється, перетворюючися на пилкоподібну згасаючу хвилю [5; 6].

Для кількісної оцінки ефекту амплітудної модуляції на відстанях x ≥ z (в області наявності періодичних ударних хвиль) скористаємося наближеним розв'язком для компоненти швидкості на частоті модуляції Ω [5]:

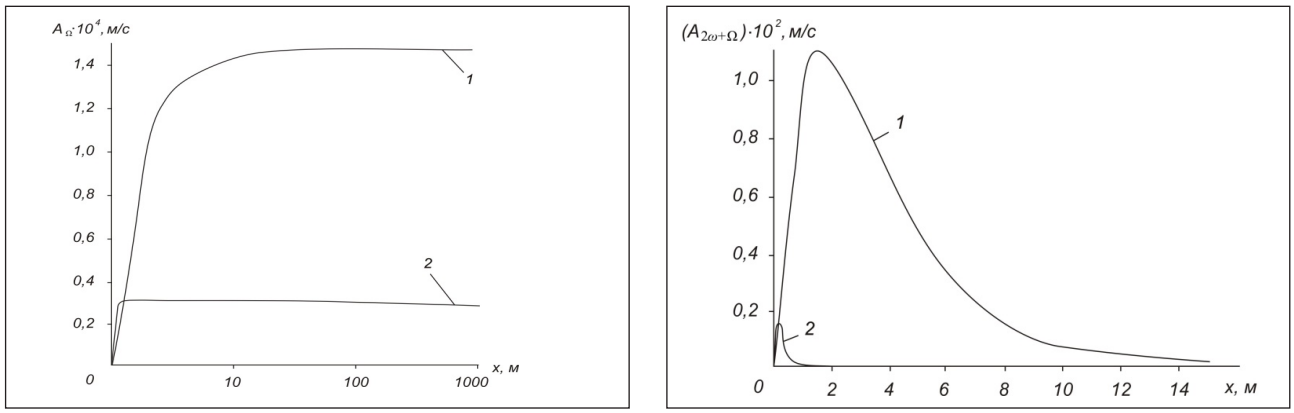
$$\upsilon_\Omega^{(2)} = \frac{m\Omega\upsilon_0}{2\omega}\left[\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{\left[1+\left(\sqrt{\frac{2\pi}{\pi-2}}-1\right)\frac{\varepsilon\omega\upsilon_0}{c^2}\right]^2}\right]\cos\Omega\tau \ . \qquad (14)$$

Залежність (14) дозволяє дослідити характер зміни амплітуди хвилі $\upsilon_\Omega^{(2)}$ на модулюючій частоті Ω від відстані за x > z. В області відстаней $0 \le x \le z$ амплітуда хвилі $\upsilon_\Omega^{(2)}$ визначається залежністю (12).

Таблиця 1

Характеристики геосередовища й амплітудно модульованих хвиль

№ п/п	Параметри геосередовища (ГС)					Параметри амплітудно модульованих хвиль				Числа Рейнольдса,
	Назва ГС	ρ, кг/м³	c, м/с	b, Па•с	ε	ω, Гц	Ω, Гц	υ_0, м/с	m	Re
1.	Пісковик	2 630	6 010	$2,6•10^5$	4,32	$30•10^3$	100	5	0,4	0,01
2.	Вапняк	2 300	2 500	$1•10^6$	4,25	$20•10^3$	100	5	0,4	$1,44•10^{-3}$
3.	Нафта	800	500	0,02	4,20	$20•10^3$	100	0,5	0,4	500
4.	Нафта	800	500	0,02	4,20	$50•10^3$	70	0,5	0,4	200



а) б)

Рис. 1. Зміна амплітуд коливань швидкостей на частоті Ω (а) та боковій частоті $2\omega + \Omega$ (б) залежно від відстані x до джерела збурення: 1 – пісковик; 2 – вапняк

Наприклад, розглянемо дію амплітудно модульованої акустичної хвилі в середовищі, де переважають нелінійні властивості порівняно з дисипацією (Re >> 1). Водночас розглянемо область відстаней $x \leq z$.

Характеристики АМ-хвилі та нелінійного середовища (нафта) [12] наведені в табл. 1 (третій рядок). За таких числових параметрів Re = 500. У цьому разі генерується поле швидкостей, спектральні складники якого описуються залежностями, одержаними із (12), (13):

$$\upsilon_{\Omega}^{(2)} = 8,4 \cdot 10^{-5} x \cos \Omega \tau \ , \qquad (15)$$

$$\upsilon_{2\omega+\Omega}^{(2)} = \left(-1,684 \cdot 10^{-2} x\right) \cos\left(2\omega + \Omega\right) \tau \ . \qquad (16)$$

Розв'язки (15), (16) справедливі в області $0 \leq x \leq 5,95$ м $= z_2$. Графіки амплітуд швидкостей A_{Ω} та $A_{2\omega+\Omega}$ приведені на рис. 2.

За Re = 500 амплітуди хвиль на частоті модуляції Ω та боковій частоті $2\omega + \Omega$ зростають лінійно з відстанню в межах $0 \leq x \leq 5,95$ м.

На рис. 2 наведено також графіки амплітуд швидкостей за Re = 200. Числові параметри для цього прикладу наведені в табл. 1 (четвертий рядок). За таких даних $z_1 = 2,38$ м. Це свідчить про формування ударної хвилі ближче до джерела акустичної дії порівняно з першим прикладом, що обумовлено дією амплітудно модульованої хвилі на більш високій несучій частоті ω і зменшує відрізок z. Амплітуда хвилі A_{Ω} на частоті Ω зменшується в разі зменшенні числа Re (криві 1, 3). Навпаки, амплітуда хвилі $A_{2\omega+\Omega}$ на боковій частоті $2\omega + \Omega$ у разі зменшенні числа Re збільшується (криві 2, 4).

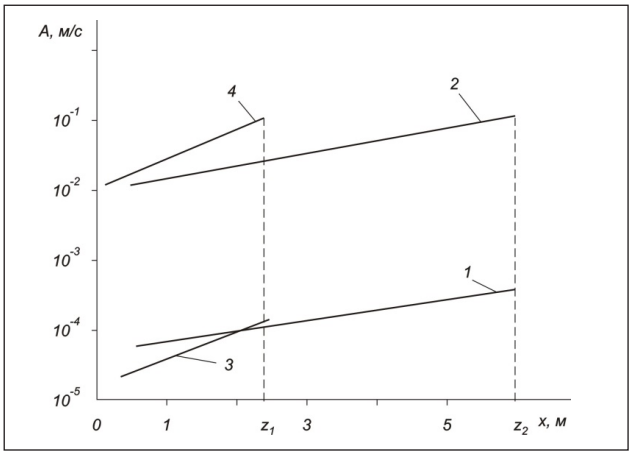


Рис. 2. Зміна амплітуд коливань швидкостей на частоті Ω за Re = 500 (крива 1) і за Re = 200 (крива 3) та на частоті $2\omega + \Omega$ за Re = 500 (крива 2) і за Re = 200 (крива 4) залежно від відстані x до утворення розривів хвилі (z_1 = 2,38 м, z_2 = 5,95 м)

Порівняння кривих 1, 2 та 3, 4 свідчить про те, що амплітуди коливань на бокових частотах у нелінійному середовищі значно вищі, ніж на модулюючій частоті. Тобто відбувається перерозподіл (перекачка) енергії спектральних складників коливальної швидкості в область більш високих частот. Спектральною мовою це означає, що на відстанях $x < x_p$ нелінійність середовища додає енергії високочастотним гармонікам, тобто амплітуди на боковій частоті $2\omega + \Omega$ перевищують значення амплітуд на низькій частоті Ω.

Вибір частот АМ-сигналу Ω і ω за Re >> 1 обумовлений тим, що, як свідчать експериментальні дані [7], під час акустичного оброблення нафти на низьких частотах 50…100 Гц її в'язкість зменшується, а також на таких частотах руйнується просторова сітка колоїдно-дисперсної системи (тобто рідини із частками забруднювачів, що заповнюють порові простори продуктивного пласта) [2; 13]. Дія ж високочастотних складників спектра коливань масової швидкості в діапазоні (10…50) кГц зменшує зв'язки флюїду із твердою фазою пласта, сприяючи тим самим його руху в пористому середовищі [13, 14].

Висновки. Застосування амплітудно модульованих хвиль для оброблення нелінійних дисипативних геосередовищ дозволяє досягнути перерозподілу енергії вихідного збурення не тільки за частотами, а також за інтенсивністю залежно від числа Рейнольдса Re.

Під час застосування амплітудно модульованих сигналів для оброблення нелінійних дисипативних геосередовищ необхідно враховувати параметр в'язкості b середовища. У разі великої дисипації (коли в'язкість суттєво переважає нелінійність) і за значень числа Re << 1 інтенсивність акустичної хвилі на боковій частоті $2\omega + \Omega$ більша ніж на частоті Ω в області до відстані x, що визначається параметрами середовища й АМ-хвилі. Водночас відбувається зміщення спектрального максимуму процесу акустичного оброблення в область високих частот. Після відстані x інтенсивність хвилі на частоті Ω перевищує інтенсивність хвилі на частоті $2\omega + \Omega$ і відбувається зміщення спектрального максимуму процесу акустичного оброблення в область низьких частот.

За Re >> 1 (коли переважають нелінійні властивості середовища) в області відстаней x (до формування ударної хвилі) амплітуда хвилі на боковій частоті $2\omega + \Omega$ більша амплітуди хвилі на частоті Ω, спектральний максимум процесу акустичного оброблення зміщується в область високих частот.

Від числа Рейнольдса Re залежить довжина відрізка x формування ударної хвилі в нелінійному середовищі за малої дисипації. За збільшення числа Re відстань z також збільшується.

Ефективність дії АМ-хвиль залежить від вибору несучої частоти ω і модулюючої частоти Ω, значення яких необхідно визначати відповідно до резонансних характеристик структурних елементів геосередовища (резонансних частот коливань зерен і блоків пласта).

Під час акустичного оброблення нафтогазових середовищ вибір параметрів оброблення має враховувати вплив високих і низьких складників спектра коливань АМ-сигналу на параметри флюїду з метою підвищення його рухливості в пласті.

Отримані результати аналітичних досліджень можуть бути використані під час розроблення перспективних технологій хвильової обробки продуктивних пластів із метою підвищення дебіту нафтогазовидобувних свердловин.

Список літератури:

1. Крутин В. Механизм акустической интенсификации притоков нефти из продуктивных пластов. Каротажник. 1998. Вып. 42. С. 46–53.

2. Горбачев Ю. Акустическое воздействие и повышение рентабельности разработки нефтяных месторождений. Каротажник. 2000. Вып. 60. С. 55–67.

3. Технология акустической реабилитации скважин и пластов для решения задач повышения нефтеотдачи / Э. Орентлихерман, Д. Воронин, А. Исхаков, Ю. Горбачев. Нефть и газ. 2002. № 5. С. 51–55.

4. Нагорний В.П., Денисюк І.І. Технології інтенсифікації видобутку вуглеводнів. Київ: Ессе, 2013. 268 с.

5. Руденко О. Теоретические основы нелинейной акустики. Москва: Наука, 1975. 288 с.

6. Грінченко В., Вовк І., Маципура В. Основи акустики. Київ: Наук. думка. 2007. 640 с.

7. Дружинин Г. Нелинейная акустика: конспект лекций. СПбГУ. Физический факультет. Кафедра радиофизики. Лаборатория нелинейной акустики. 1998–2000. 68 с.

8. Нагорний В.П., Денисюк І.І. Імпульсно-хвильове оброблення нафтогазоносних пластів. – Київ: Інтерсервіс, 2015. – 199 с.

9. Баскаков С. Радиотехнические цепи и сигналы. Москва: Высшая школа. 1988. 448 с.

10. Гурбатов С., Руденко О.Нелинейная акустика в задачах. Москва: МГУ. 1990. 80 с.

11. Михалюк А. Горные породы при неравномерных динамических нагрузках. Киев: Наук. думка. 1980. 154 с.

12. Эксплуатация нефтяных и газовых скважин / А. Акульшин, В. Бойко, Ю. Зарубин, В. Дорошенко. Москва: Недра. 1989. 480 с.

13. Горбачев Ю. Акустическое воздействие и повышение рентабельности разработки нефтяных месторождений. Каротажник. 1999. Вып. 60. С. 55–67.

14. Нагорний В., Денисюк І. Імпульсні методи інтенсифікації видобутку вуглеводнів. Київ: Ессе. 2012. 323 с.

ОБРАБОТКА УГЛЕВОДОРОДНЫХ ПЛАСТОВ АМПЛИТУДНО МОДУЛИРОВАННЫМИ ВОЛНАМИ

В статье изложены результаты исследований по обработке углеводородных пластов амплитудно модулированными акустическими волнами вида $\upsilon=\upsilon_0(1+m\sin \Omega\tau)\sin\omega\tau$, *где m – индекс модуляции; Ω, ω – низкая модулирующая и высокая несущая частоты соответственно. При решении задачи использовано широко известное уравнение Бюргерса, описывающее распространение нелинейных волн в средах с диссипацией. Оценка роли нелинейности и диссипации в среде производится с учетом акустического числа Рейнольдса Re. Приведены примеры расчетов амплитуд скоростей в диссипативных (песчаник, известняк) и нелинейной средах (нефть) на модулирующей Ω и боковой частотах 2ω+Ω. Полученные результаты проведенных исследований могут быть использованы в процессе разработки перспективных технологий волновой обработки нефтегазоносных пластов для повышения дебита добывающих скважин.*

Ключевые слова: *амплитуда, диссипация, модуляция, нелинейность, волна, частота.*

PROCESSING THE HYDROCARBON STRATA BY AMPLITUDE MODULATED WAVES

Results on processing the hydrocarbon strata by amplitude modulated acoustic waves have been given in the article $\upsilon=\upsilon_0(1+m\sin \Omega\tau)\sin\omega\tau$ *type, where m is an index of modulation; Ω, ω are low modulating and high carrying frequencies respectively have been conducted in the work. Established Burgers equation describing propagation of nonlinear waves in media with dissipation has been used while solving the problem. Estimation of nonlinearity and dissipation share in the medium is made taking into account the acoustic Reynolds' number Re. Examples of calculations of velocities amplitudes in dissipative (sandstone, limestone) and nonlinear media (oil) have been given on modulating Ω and lateral 2ω+Ω. frequencies. The results of conducted studies obtained are possible to be used during the process of elaboration of perspective technologies of wave processing of the oil-and-gas bearing layers aimed at increasing the yield of producing wells.*

Key words: *amplitude, dissipation, modulation, nonlinearity, wave, frequency.*

УДК 622.271.46

Слободянюк В.К.
Криворожский национальный университет

Письменный А.В.
ООО «МЕТИНВЕСТ ИНЖИНИРИНГ»

РАЗРАБОТКА РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ЭКСКАВАТОРНО-ПЛУЖНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОТВАЛЬНЫХ РАБОТ ПРИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

В статье рассмотрена новая технология отвалообразования при железнодорожном транспорте. Предложенная технология позволяет отказаться от использования на отвалах дорогостоящих канатных экскаваторов. В качестве основного отвального оборудования используются отвальный плуг и обратный гидравлический экскаватор. Разработанная технология создает условия, необходимые для раздельного складирования вскрышных пород различного минерального состава.

Ключевые слова: *отвалообразование при железнодорожном транспорте, отвальный плуг, гидравлический экскаватор, рациональное недропользование.*

Постановка проблемы. Основной объем вскрышных пород на железорудных карьерах Украины на отвалы доставляется с использованием железнодорожного транспорта. Железнодорожный транспорт применяется как второе звено комбинированного автомобильно-железнодорожного карьерного транспорта. Обладая высокой надежностью и обеспечивая независимость смежных звеньев технологических процессов горных работ, данный вид транспорта характеризуется высокой потребностью в выемочно-погрузочном оборудовании: экскаваторы необходимы на перегрузочных пунктах и на экскаваторных отвалах. Так, для трех забойных вскрышных экскаваторов необходимы два экскаватора на перегрузочной площадке и два экскаватора на отвале. То есть из 7 экскаваторов только 3 решают основную задачу – экскавируют вскрышу из массива или развала горных пород. Таким образом, совершенствование технологических схем карьерного транспорта и отвалообразования является важной проблемой открытой разработки полезных ископаемых.

Анализ последних исследований и публикаций. В последние годы опубликовано мало научно-исследовательских работ, посвященных обобщению накопленного практического опыта, исследованию и совершенствованию технологии экскаваторного отвалообразования. Ряд работ [1; 3; 4] посвящен обоснованию параметров отвалов с точки зрения энергетической теории (обоснование рациональной высоты отвального яруса), изучаются различные аспекты использования внутренних отвалов на крутопадающих месторождениях [2; 6]. Большое количество работ посвящено экологическим аспектам рекультивации отвалов и их гидрозащите.

Продолжаются работы по совершенствованию технологии отвалообразования за счет использования вибрационных питателей и ковшевых отвальных машин [4; 5]. Эти исследования больше направлены на повышение безопасности отвальных работ, чем на улучшение их технико-экономических показателей. Исследования последних лет не привели к внедрению в горную промышленность новых технологий отвалообразования и новых типов отвальных машин.

Анализ зарубежных источников, обобщающих мировой опыт открытой разработки [6], показывает, что основными способами отвалообразования является бульдозерное отвалообразование при автомобильном транспорте и использование консольных отвалообразователей при конвейерной доставке вскрыши. Примечательно, что среди известных способов отвалообразования [6] не упоминается об использовании на вскрышных работах железнодорожного транспорта и экскаваторного отвалообразования.

Постановка задания. Целью работы является разработка технологии отвалообразования при железнодорожном транспорте, отличающейся меньшей потребностью в выемочно-погрузочном оборудовании.

Изложение основного материала исследования. Одной из причин, обуславливающих меньшие затраты на бульдозерное отвалообразование при автомобильном транспорте, является то, что при периферийной разгрузке автосамосвалов 60–70% объема вскрышных пород скатывается по откосу отвального уступа и только 30–40% объема необходимо сталкивать под откос бульдозером. В случае экскаваторного отвалообразования при железнодорожном транспорте, при разгрузке думпкаров практически весь объем горной породы скатывается по отвальному откосу. Но, перемещаясь по откосу, этот объем вскрыши попадает не на место постоянного складирования, а в приемный бункер (приямок) отвального экскаватора, из которого экскавируется и укладывается в отвальную заходку. Из этой основной особенности существующей технологии вытекают ее достоинства и недостатки. Достоинство – снижение объема путепереукладочных работ из-за большой емкости отвальной заходки, определяемой рабочими параметрами экскаватора; недостаток – необходимость повторной переэкскавации всего объема вскрышных пород.

В 30–60-х гг. прошлого столетия на отвалах при железнодорожном транспорте применялось плужное отвалообразование [7, с. 275], при котором разгрузка производится непосредственно под откос уступа одновременно из всех думпкаров. Большая часть породы скатывается вниз, меньшая часть породы при разгрузке остается на откосе в виде нависей. Сбрасывание породы, остающейся на откосе отвального тупика, выполняется отвальным плугом при движении вдоль фронта разгрузки. Ширина отвальной заходки при плужном отвалообразовании составляла 1,5–2,5 м, реже 3–4 м.

Малая приемная способность и большой объем путепередвижных работ являются главными недостатками этого способа. Эффективность от непосредственной разгрузки думпкаров под откос нивелируется затратами на частое перемещение железнодорожных путей.

Таким образом, сохраняет актуальность задача разработки эффективной технологии отвалообразования при железнодорожном транспорте, не требующей переэкскавации всего объема вскрыши, поступающей на отвал. Выполненный анализ показал, что достичь этого возможно путем сочетания работы отвального плуга и экскаватора типа обратная лопата, установленного на железнодорожную платформу (или имеющего конструктивную возможность перемещаться по железнодорожным путям). Организация работы данного оборудования будет схожа с работой бульдозеров при бульдозерном отвалообразовании. Предлагаемая технология позволяет объединить мобильность и высокую производительность обеих отвальных машин с достаточно большим шагом переукладки отвальных путей, что приведет к снижению затрат на отвалообразование.

Особенностью данного способа отвалообразования является попеременная работа отвального плуга и экскаватора. Условно формируемую отвальную заходку по ширине можно разделить на две части: внешнюю и внутреннюю.

На первом этапе формирования отвальной заходки предлагаемая технология в целом аналогична технологии плужного отвалообразования. Отвальным плугом порода укладывается во внутреннюю отвальную заходку.

Следующим (после завершения плугом отсыпки отвальной заходки) этапом является переэкскавация вскрышных пород из верхней части отвальной заходки в нижнюю, под откос отвального яруса, и формирование внешней части отвальной заходки. В последующем отвальный плуг и экскаватор работают последовательно друг за другом: отвальный плуг укладывает породу в верхнюю часть внутренней заходки, экскаватор перемещает уложенную породу во внешнюю часть отвальной заходки и формирует пространство для нового цикла работы отвального плуга. На одном отвальном тупике обе машины работают последовательно, но при этом совместно обслуживают несколько отвальных тупиков.

Предлагаемая технология реализуется следующим образом.

По длине отвального тупика осуществляется разгрузка под откос думпкаров. После заполнения породой фронтального откоса отвального уступа к работе приступает отвальный плуг. Для сталкивания породы под откос плуг совершает несколько проходов, каждый раз увеличивая угол раскрытия отвального крыла. После очистки от горной породы верхней бровки уступа на отвальный тупик снова подаются составы со вскрышей. Попеременная работа отвального плуга и подача железнодорожных составов происходит до тех пор, пока параметры отвального крыла плуга позволяют сталкивать породу под откос. Формиро-

вание внутренней части отвальной заходки завершится тогда, когда рабочие параметры отвального плуга уже не будут позволять сталкивать породу под откос (рис. 1). В период формирования внутренней части отвальной заходки сменная приемная способность отвального тупика максимальная (порода укладывается на всю высоту отвального уступа). Объем породы (в целике), необходимый для формирования внутренней заходки, равен:

$$V_в = l \times H \; / \; K_Р \quad , м^3, \qquad (1)$$

где l – ширина внутренней части отвальной заходки, м;

H – высота отвального уступа, м;

$K_р$ – коэффициент разрыхления породы в отвале.

Ширину внутренней части отвальной заходки находим как разность максимального вылета крыла отвального плуга (М) и расстояния от оси железнодорожного пути до верхней бровки отвального уступа (с).

Порода внутренней части заходки пригружает откос отвального уступа и является фактором, повышающим устойчивость отвала перед началом работы отвального экскаватора.

Экскаватор с рабочим оборудованием типа обратная лопата перемещает верхнюю часть внутренней заходки, сформированной отвальным плугом, во внешнюю заходку (рис. 2). Объем перемещаемой породы определяется глубиной черпания экскаватора и шириной внутренней отвальной заходки. Черпания породы из верхней части отвальной заходки и ее разгрузка во внешнюю часть осуществляются без поворота экскаватора. За счет такой организации работы отвального экскаватора можно достичь его максимальной производительности. Перемещаемая порода располагается у основания отвального уступа, верхняя часть ее приобретает форму гребня и служит для отвального откоса упорной призмой. После отработки верхней части внутренней заходки экскаватор переезжает на другой отвальный участок, на рассматриваемом отвальном участке возобновляет прием железнодорожных составов со вскрышей. Отвальный плуг снова укладывает вскрышу в

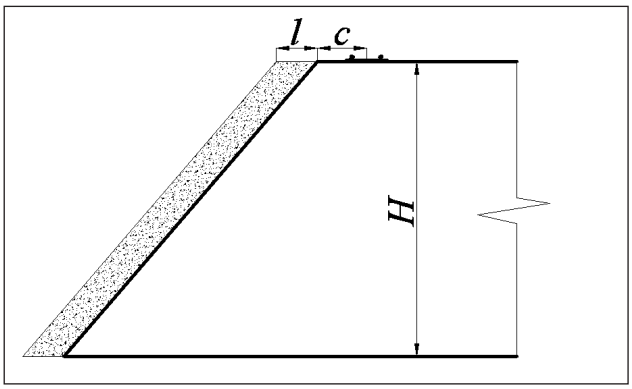


Рис. 1. Сформированная отвальным плугом внутренняя отвальная заходка

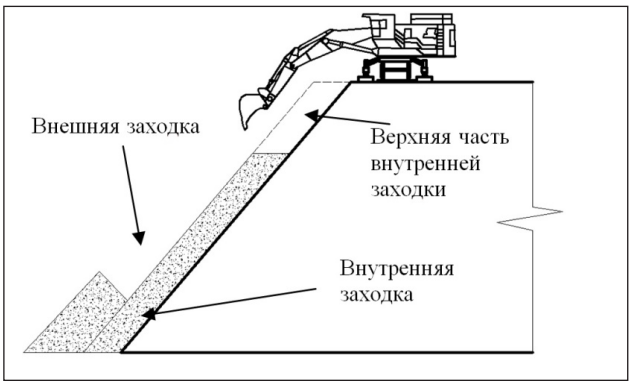


Рис. 2. Работа железнодорожного экскаватора по формированию внешней части отвальной заходки

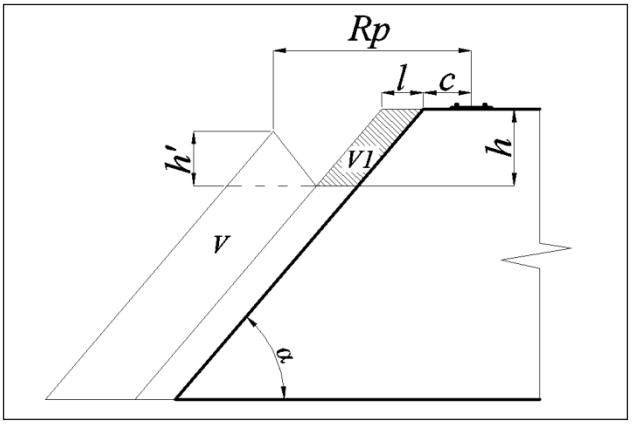


Рис. 3. Условие завершения второго этапа формирования отвальной заходки

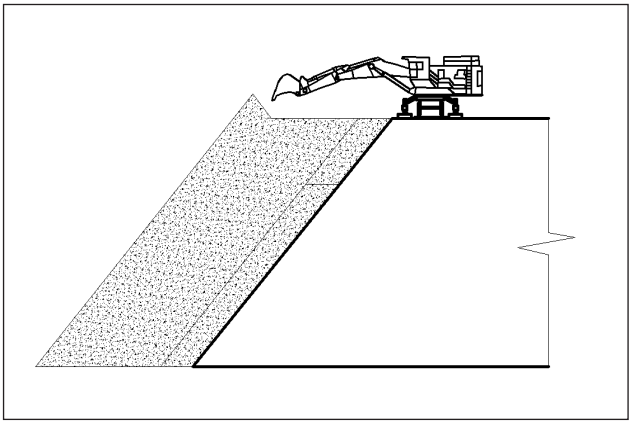


Рис. 4. Отвальная заходка в отсыпанном виде

верхнюю часть внутренней заходки. Далее процесс повторяется, осуществляется попеременная работа на отвальном участке экскаватора и отвального плуга. По мере заполнения внешней части заходки устойчивость отвала повышается. Данный период формирования отвальной заходки является наиболее продолжительным и характеризуется устойчивой приемной способностью отвального тупика.

Объем породы, перемещаемой экскаватором между смежными периодами работы отвального плуга, равен:

$$V_1 = l \times h \,/\, K_P \quad , \text{м}^3, \qquad (2)$$

где h – высота части внутренней заходки, отрабатываемой экскаватором, м.

Второй этап формирования отвальной заходки завершается, когда нижняя бровка внутреннего откоса внешней части отвальной заходки совпадает по глубине с границей отработки экскаватором внутренней части заходки. С этого момента формирование отвальной заходки переходит на заключительный этап. Третий этап характеризуется постоянным уменьшением приемной способности отвальной заходки, сокращаются интервалы времени между работой экскаватора и отвального плуга.

Определим условия, при которых нижняя бровка откоса гребня внешней заходки соприкоснется с нижней бровкой верхней части внутренней заходки. Объем породы, уложенной во внешнюю заходку, условно можно разделить на две части. Первая часть является параллелограммом высотой H-h, с основанием, равным эффективному радиусу разгрузки экскаватора. Под эффективным радиусом разгрузки экскаватора *($R_{ЭФ}$)* будем понимать максимальный радиус разгрузки *(R_P)* за вычетом ширины внутренней части отвальной заходки *(l)* и безопасного расстояния *(c)* от оси вращения экскаватора до верхней бровки отвального уступа в начальном положении. То есть эффективный радиус – это часть радиуса разгрузки, расположенная над внешней частью заходки (рис. 3).

Вторая часть объема представляет собой равнобедренный треугольник, основание которого равно разнице эффективного радиуса и горизонтального заложения высоты внутренней заходки, отрабатываемой экскаватором. Высоту этого треугольника определим по формуле:

$$h' = \frac{R_{ЭФ} - h \times ctg\alpha}{ctg\alpha} \quad , \text{м}^3 \qquad (3)$$

Объем породы, размещенной во внешней заходке до момента соприкосновения, составит:

$$V = \frac{h' \times ctg\alpha \left(h' + 2(H - h)\right)}{K_P} \, , \text{м}^3. \qquad (4)$$

Высота образуемого гребня может быть больше или меньше высоты верхней части внутренней заходки. В зависимости от этого, возможно несколько вариантов развития внешней отвальной заходки (рис. 4).

Одним из главных технологических параметров отвалообразования является сменная приемная способность отвала. Использование двух видов отвального оборудования приведет к неравномерности сменной приемной способности отвального тупика. Так, при работе отвального плуга по созданию внутренней части заходки, приемная способность тупика будет максимальной, а с началом работы экскаватора – уменьшится. За время работы экскаватора отвальный плуг должен подготовить на другом отвальном тупике необходимый объем породы для последующих экскаваторных работ. Общее количество тупиков, приходящееся на группу отвального оборудования, будет состоять из тупика, на котором в настоящий момент времени работает экскаватор, и нескольких тупиков, на которых попеременно осуществляется разгрузка составов и сталкивание породы отвальным плугом.

На основе разработанной методики был выполнен расчет приемной способности отвального тупика и необходимого количества отвального оборудования. Ширина отвальной заходки принята равной 21 м, высота отвального уступа – 30 м. Группа отвальных машин, включающая один гидравлический экскаватор (емкость ковша 4–5 м^3) и 2 отвальных плуга (вылет крыла плуга 7 м), обеспечивает работу 6 отвальных тупиков. Расчетная сменная производительность комплекса отвального оборудования равна 9,7 тыс. м^3.

Выводы. Разработанная технология позволяет снизить затраты и повысить эффективность отвальных работ при железнодорожном транспорте. Отсутствие подумпкарной разгрузки железнодорожного состава в приямок позволяет сократить время разгрузки состава на отвале и приведет к росту производительности железнодорожного транспорта. Из-за отсутствия жесткой привязки места разгрузки думпкаров к положению на отвале экскаватора создаются предпосылки для селективного отвалообразования и формирования техногенных месторождений. Дальнейшие исследования по обоснованию рациональных параметров плужно-экскаваторных отвалов будут выполнены с использованием методов имитационного моделирования.

Список литературы:

1. Свещинская Н.А., Саканцев М.Г. Методы оптимизации параметров автомобильных отвалов. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 2. С. 386–389.
2. Саканцев Г.Г. Зависимость эффективности внутреннего отвалообразования от максимально допустимой высоты отвальных ярусов при разработке глубокозалегающих месторождений ограниченной длины. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 1. С. 40–45.
3. Левенсон С.Я., Гендлина Л.И., Морозов А.В., Усольцев В.М. О формировании автомобильных отвалов при открытой разработке полезных ископаемых. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 11. С. 32–37.
4. Медведев М.Л., Зуев А.Е. Анализ и оценка способов размещения породы во внешних отвалах при открытой разработке рудных крутопадающих месторождений. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № 5. С. 77–83.
5. Левенсон С.Я., Гендлина Л.И., Морозов А.В. Условия эффективного использования вибрационной техники на автомобильных отвалах. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 5. С. 230–234.
6. Surface Mining (2nd edition) / Editor Bruce A. Kennedy. Littleton: Society for Mining Metallurgy and Exploration, 1990. 1177 p.
7. Ржевский В.В. Технология и комплексная механизация открытых горных работ. М.: Недра. 1975. 574 с.

РОЗРОБКА РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧОЇ ЕКСКАВАТОРНО-ПЛУЖНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДВАЛЬНИХ РОБІТ ПРИ ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

У статті розглянута нова технологія відвалоутворення при залізничному транспорті. Запропонована технологія дозволяє відмовитися від використання на відвалах дорогих канатних екскаваторів. У якості основного відвального устаткування використовуються відвальний плуг і зворотній гідравлічний екскаватор. Розроблена технологія створює умови, потрібні для роздільного складування розкривних порід різноманітного мінерального складу.

Ключові слова: *відвалоутворення при залізничному транспорті, відвальний плуг, гідравлічний екскаватор, раціональне надрокористування.*

DEVELOPMENT OF RESOURCE-SAVING EXCAVATOR-PLOW TECHNOLOGY OF PUMPING AT A RAILWAY TRANSPORT

The new technology of pumping at a railway transport is considered in the article. Offered technology allows refusing from using expensive rope shovel excavators. Pumping low and hydraulic back shovel excavator are used as main pumping tools. Developed technology creates necessary conditionals for separated pumping of wastes with different mineral compositions.

Key words: *pumping at a railway transport, pumping low, hydraulic excavator, rational land tenure.*

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 544.032

Зінченко Н.Ю.
Національний університет харчових технологій

Сімурова Н.В.
Національний університет харчових технологій

Попова І.В.
Національний університет харчових технологій

ДОСЛІДЖЕННЯ В'ЯЗКОСТІ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ ІНУЛІНУ

Дана робота присвячена вивченню фізико-хімічних властивостей біополімеру інуліну, одержаного з топінамбура. У ній досліджено в'язкість водних розчинів інуліну та її залежність від температури та концентрації. Визначено кінематичну, відносну та питому в'язкість розчинів інуліну. Результати досліджень представлені у графічному вигляді. Одержані дані можуть бути використані для оцінки молекулярної маси зразків інуліну, одержаного з топінамбура, а також у практичному застосуванні полісахариду е харчовій та фармацевтичній промисловості.

Ключові слова: *інулін, топінамбур, біополімер, розчин, в'язкість.*

Постановка проблеми. Високомолекулярні сполуки, зокрема полісахариди, широко застосовуються у створенні нових матеріалів для фармацевтичної та харчової промисловості. Технологія виробництва функціональних харчових продуктів ґрунтується на модифікації їх складу та збагаченні корисними речовинами. Перспективним інгредієнтом у виробництві дієтичних та функціональних продуктів харчування є інулін. Цей природний полісахарид, основним джерелом якого є бульби топінамбура, на 95% складається з фруктози. Він побудований з ланок β-D-фруктофуранози з кінцевими групами – залишками – α-D-глюкопіранози. У процесі переробки одержують інулін з різною довжиною ланцюга, яка може коливатись від 10 до 60 ланок.

У практичній роботі важливою фізико-хімічною характеристикою інуліну є в'язкість водних розчинів за різної температури, що важливо для їх застосування, зокрема для визначення оптимальних характеристик продукту при збагаченні його інуліном. Віскозиметричні дослідження дозволяють також визначити молекулярну масу біополімеру.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У літературі є значна кількість повідомлень щодо позитивної біологічної дії інуліну на організм людини: Експериментальні дослідження довели, що цей полісахарид стимулює імунну систему організму, відіграє позитивну роль у формуванні здорової мікрофлори кишківника, знижує ризик атеросклерозу, має протипухлинні властивості, регулює рівень інсуліну у крові [1; 2]; відомо, що інулін сприяє нормалізації процесів метаболізму в організмі [3]. На сьогодні інулін знайшов застосування також як носій у виробництві деяких лікарських засобів та як допоміжна речовина при виготовленні фармацевтичних композицій. Дякуючи природному походженню, він не викликає алергії та подразнень, має високу спорідненість з організмом, при розчиненні у воді утворює кремоподібний гель [1]. Окрім того, застосування інуліну надає ряд технологічних переваг при його використанні у харчових продуктах, тому його можна вважати ідеальним замінником жиру функціональних харчових продуктів, зокрема молочних [4] та м'ясних [5]. Проведений нами аналіз досліджень у даній галузі показав перспектив-

ність використання інуліну як важливого функціонального інгредієнта, який позитивно впливає на якісні характеристики збагачених харчових виробів [6]. Оскільки додавання інуліну впливає не тільки на сенсорні, але й на реологічні характеристики продукту, зокрема на його в'язкість, стійкість гелів та емульсій [4; 7], у практичній роботі важливими є дослідження в'язкості водних розчинів інуліну різної концентрації, що дозволить забезпечити необхідні технологічні характеристики при створенні нових продуктів.

При застосуванні біополімерів дуже важливою характеристикою є також їх молекулярна маса, яка пов'язана певними співвідношеннями з в'язкістю розчинів [8], та може відрізнятись для різних зразків у залежності від джерела походження. Саме тому, протягом останніх десятиліть дослідження в'язкості розчинів біополімерів були предметом ретельного вивчення, проте природа фізико-хімічних особливостей розчинів інуліну не може вважатись достатньо вивченою. Тому роботу у цьому напрямку можна вважати актуальною як з теоретичної, так і з практичної токи зору.

Постановка завдання. Метою даного дослідження було визначення кінематичної, відносної та питомої в'язкості водних розчинів інуліну, одержаного з бульб топінамбура, а також встановлення залежності в'язкості розчинів від температури та концентрації. Відомо, що в'язкість розчинів полісахаридів знаходиться у прямій залежності від ступеня їх полімеризації або розгалуженості. Також значний вплив на в'язкість мають температура та концентрація розчину. Зазначимо, що залежність в'язкості від концентрації для речовин полімерної будови має нелінійний характер. Визначення в'язкості розчинів біополімерів, зокрема інуліну, дозволяє судити про величину молекули, тобто дозволяє визначити молекулярну масу ланцюгових полімерів (якщо відомі константи даної системи). Вимірювання в'язкості дає можливість точного спостереження змін молекулярної маси, наприклад, у процесі розщеплення або, навпаки, зростання макромолекули.

Для реалізації поставленої мети нами було обрано віскозиметричний метод, що пов'язано з простотою проведення експерименту, малою тривалістю вимірювань, можливістю проводити вимірювання при різних температурах з використанням різних розчинників. У роботі ми безпосередньо вимірювали в'язкість водних розчинів інуліну.

Виклад основного матеріалу досліджень. Об'єктом дослідження були водні розчини інуліну харчового, виділеного з топінамбура сорту «Вадим» за відомою методикою [9], з концентрацією від 1% до 5% в інтервалі температур від 20ºС до 60ºС.

Дослідження проводили віскозиметричним методом за допомогою приладу ВПЖ-2 (діаметр капіляру 0,73 мм), який термостатували при визначених значеннях температури протягом 15 хвилин. Вимірювання в'язкості віскозиметром полягає у визначенні часу, за який певний об'єм рідини витікає з капіляра під впливом сили тяжіння.

Ми досліджували в'язкість розведених водних розчинів інуліну з концентрацією 1,0 – 5,0%. Обраний інтервал відповідає концентраціям, в яких інулін, як правило, вводять до харчових систем, оскільки інулін починає відчутно впливати на фізико-хімічні властивості системи при концентраціях, більших за 2%. Однак, розчини з концентраціями більше ніж 1% не у повній мірі відповідають визначенню розведених та можуть відрізнятись від них своїми властивостями [10].

Розчини інуліну готували безпосередньо перед дослідженнями розчиненням сполуки у воді певної температури із застосуванням магнітної мішалки. Визначали в'язкість 1, 2, 3, 4, 5%-х водних розчинів інуліну при температурі 20, 30, 40, 50 та 60°С.

Одна із важливих особливостей розведених розчинів полімерів полягає у тому, що їх в'язкість значно більша у порівнянні з чистим розчинником і нелінійно залежить від концентрації розчину. В'язкість розчинів високомолекулярних сполук завжди зменшується при підвищенні температури і, зазвичай, вона тим більша, чим вища концентрація розчину. Розведені розчини високомолекулярних сполук слід розглядати як термодинамічно стійкі (однофазні) системи, що являють собою істинні розчини речовин з великою молекулярною масою. Розведеними вважають розчини з такими концентраціями, при яких молекули розчиненої речовини практично не взаємодіють між собою. Беручи до уваги великий розмір макромолекул полімеру, зрозуміло, що ця концентрація повинна бути дуже малою, і вона тим менше, чим більшою є молекулярна маса полімеру. Такі розчини мають дві основні ознаки, що відрізняють їх від розчинів низькомолекулярних речовин:

1) сильний вплив незначних кількостей домішок на розчинність та в'язкість;

2) мала швидкість процесів, що включають агрегацію та диспергування агрегатів молекул.

Для водних розчинів інуліну нами безпосередньо вимірювались в'язкість розчину η і в'язкість

чистого розчинника (води) η_0. За отриманими даними обраховувалось значення відносної в'язкості:

$$\eta_{від} = \frac{\eta}{\eta_0} \approx \frac{\tau}{\tau_0}$$

де η та η_0 – в'язкість розчину інуліну та в'язкість розчинника відповідно, а τ і τ_0 – час, за який розчин і розчинник проходять через капіляр віскозиметра при постійній температурі.

Кінематичну в'язкість розчинів ν розраховували відповідно [11]. Результати дослідження залежності кінематичної в'язкості ν (мм²/с) розчинів інуліну різної концентрації від температури наведені на рис. 1.

Як видно з рисунка, криві зразків з концентрацією від 1 до 4% мають практично лінійний характер, що підтверджує відсутність взаємодії між молекулами інуліну (тобто розчини можна вважати розведеними). Проте крива розчину з концентрацією 5% не має лінійного вигляду, що можна пояснити наявністю взаємодії між молекулами речовини у розчині.

Надалі за даними кінематичної в'язкості розраховували питому в'язкість $\eta_{пит}$ розчинів за рівнянням:

$$\eta_{пит} = \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0}$$

Питома в'язкість показує відносне збільшення в'язкості чистого розчинника при додаванні до нього полімеру.

Приведена в'язкість $\eta_{прив}$ є відношенням питомої в'язкості до концентрації розчину $\eta_{пит}$ /С. Для більшості розчинів полімерів приведена в'язкість $\eta_{прив}$ лінійно зростає зі збільшенням концентрації. За допомогою екстраполяції одержаних експериментальних даних щодо приведеної в'язкості на вісь ординат можна визначити характеристичну в'язкість [η] розчинів інуліну. У свою чергу [η] пов'язана з молекулярною масою полімерних речовин за рівнянням Марка – Куна – Хаувінка [7]. Значення характеристичної в'язкості розчину полімеру залежить як від молекулярної маси полімеру, так і від типу розчинника.

У таблиці 1 наведені результати розрахунків відносної, питомої та приведеної в'язкості розчинів інуліну з концентраціями від 1 до 5% при постійній температурі 20°С.

Таблиця 1

Результати дослідження в'язкості водних розчинів інуліну при температурі 20°С

С,%	η від	η пит	η прив
1,0	1,0301	0,0301	0,0301
2,0	1,0770	0,0770	0,0385
3,0	1,1408	0,1408	0,0469
4,0	1,2204	0,2204	0,0551
5,0	1,3125	0,3125	0,0625

Відповідно до результатів розрахунків побудовано графік залежності приведеної в'язкості від концентрації розчину від 1 до 5% при температурі 20°С (рис. 2).

Для розчину інуліну, як і для більшості розведених розчинів полімерів приведена в'язкість лінійно зростає зі збільшенням концентрації. Відрізок, що відсікається прямою на осі ординат, дорівнює характеристичній в'язкості розчину [η]. Для досліджуваного зразка [η] становить 0,024 см³/г.

Висновки. У результаті проведених досліджень визначено залежність в'язкості розчинів інуліну, одержаного з топінамбура, від температури та концентрації. На основі одержаних значень кінематичної в'язкості розраховані величини відносної, питомої та приведеної в'язкості вказаних розчинів інуліну. Результати досліджень представлені у графічному вигляді. Розраховано

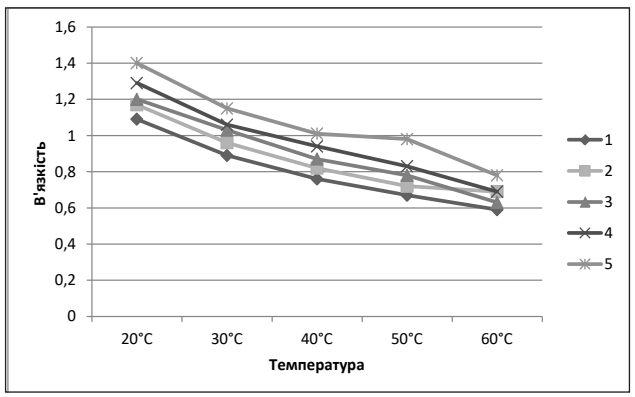


Рис. 1. Залежність кінематичної в'язкості розчинів інуліну ν (мм²/с) різної концентрації (відповідно 1, 2, 3, 4, 5%) від температури

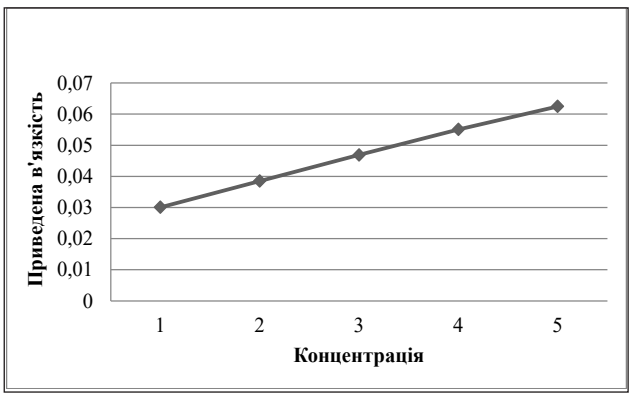


Рис. 2. Залежність приведеної в'язкості розчинів інуліну від концентрації розчину при 20°С

характеристичну в'язкість досліджуваного розчину. Одержані дані можуть бути використані для оцінки молекулярної маси зразків інуліну, одержаного з топінамбура, а також у практичному застосуванні полісахариду у харчовій та фармацевтичній промисловості.

Список літератури:

1. Митрофанова И.Ю., Яницкая А.В., Шуленина Ю.С. Перспективы применения инулина в медицинской и фармацевтической практике. Вестник новых медицинских технологий. 2012. Т. XIX. № 2. С.45-46.
2. Slavin J. Fiber and Prebiotics: Mechanisms and Health Benefits. Nutrient. 2013. V.5. №4. P.1417-1435.
3. Boeckner L.S. Schnepf M.I., Tungland B.C. Inulin: A review of nutritional and health implications. Advances in Food and Nutrition Research. 2001. V.43. №1. P.1-63.
4. Akın M.B., Kırmacı Z., .Effects of inulin and sugar levels on the viability of yogurt and probiotic bacteria and the physical and sensory characteristics in probiotic ice-cream. Food Chemistry. 2007. V.104. №1. P.93-99.
5. Nowak B, von Mueffling T, Grotheer J, Klein G, Watkinson BM. Energy Content, Sensory Properties, and Microbiological Shelf Life of German Bologna-Type Sausages Produced with Citrate or Phosphate and with Inulin as Fat Replacer. Journal of Food Science. 2007. V.72. №9. P.5629-5638.
6. Meyer D., Bayarri S., Tárrega A., Costell E. Inulin as texture modifier in dairy products. Food Hydrocolloids. 2011. V.25. №8. P. 1881-1890.
7. Tadros Th.F., Vandamme A., Levecke B., Booten K., Stevens C.V. Stabilization of emulsions using polymeric surfactants based on inulin. Advances in Colloid and Interface Science. 2004. V.108-109. P. 207-226.
8. Аскадский А.А., Хохлов А.Р. Введение в физико-химию полимеров. Москва: Научный мир, 2009. 380 с.
9. Патент 2148588 РФ, МКИ 7 С 08 В 37/00, 37/18. Способ получения инулина из клубней топинамбура / Манешин В.В., Артемьев В.Д., Васильева Ю. П. – № 98115947/04; заявлено 20.08.1998; опубл. 10.05.2000. Бюл. №13, 2000 г.
10. Перковец М.В. Инулин и олигофруктоза – универсальные функциональные ингредиенты. Масла и жиры. 2008. № 5. С. 2-4.
11. Осовская И.И., Антонова В.С. Вязкость растворов полимеров: учебное пособие Санкт-Петербург: ВШТЭ СПб ГУПТД, 2016. 62 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКОСТИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ИНУЛИНА

Данная работа посвящена изучению физико-химических свойств биополимера инулина, полученного из топинамбура. В ней проведено исследование вязкости водных растворов инулина, а также зависимости вязкости от температуры и концентрации растворов. Проведено определение кинематической, относительной и удельной вязкости указанных растворов. Результаты исследований представлены в графическом виде. Полученные данные могут быть использованы для оценки молекулярной массы образцов инулина, полученного из топинамбура, а также при практическом использовании полисахарида в пищевой и фармацевтической промышленности.

Ключевые слова: *инулин, топинамбур, биополимер, раствор, вязкость.*

THE STUDY OF VISCOSITY OF AQUEOUS INULIN SOLUTIONS

This work is devoted to the study of the physicochemical properties of the inulin biopolymer extracted from Jerusalem artichoke. The viscosities of aqueous solutions of inulin as well as the dependence of viscosity on temperature and concentration of solutions were studied. Based on the obtained kinematic viscosity values, the relative, specific and reduced viscosities of these solutions has been calculated. The results of the studies are presented graphically. The results can be used to measure the molecular weight of inulin, as well as in the application of the polysaccharide in the food and pharmaceutical industries.

Key words: *inulin, Jerusalem artichoke, biopolymer, solution, viscosity.*

УДК 628.33

Колєгова А.С.
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Трохименко Г.Г.
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Гомеля М.Д.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВИВЧЕННЯ ІОНООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ ВИЛУЧЕННЯ ІОНІВ МІДІ ТА ЦИНКУ НА КАТІОНІТІ КУ-2-8 ТА ЕЛЕКТРОХІМІЧНЕ РОЗДІЛЕННЯ РЕГЕНЕРАЦІЙНИХ РОЗЧИНІВ У СИСТЕМІ CU-ZN

Досліджено процеси сорбції та десорбції суміші іонів міді та цинку концентрацією 0,02 та 0,05 н на сильно кислотному катіоніті КУ-2-8. Досліджено ефективність регенерації катіоніту 8% та 10% сірчаною кислотою. Визначено умови електрохімічного розділення суміші іонів міді та цинку у залежності від кислотності розчину та густини струму. Показано, що можна відновлювати метали з відпрацьованих регенераційних розчинів електролізом з отриманням чистого металевого порошку. При цьому отримані концентрати кислот можна повертати у технологічний безвідходний процес.

Ключові слова: *сорбція, десорбція, катіоніт, іонний обмін, регенерація, електроліз, щільність струму.*

Постановка проблеми. Актуальною проблемою для України залишається антропогенне навантаження на навколишнє середовище, а особливо забруднення токсичними речовинами водного, повітряного та ґрунтового середовища. На кожного жителя України припадає 300 кг шкідливих техногенних речовин, у тому числі і важких металів, які здатні утворювати високотоксичні сполуки [1].

В Україні щорічно скидають у водні басейни 10 млрд. м^3 недостатньо очищених стічних вод, у тому числі 3 млрд. м^3 – забруднених.

Щорічно у країні скидається до 5 тис. тонн сполук важких металів. Недостатнє очищення стоків, неякісне очищення промислових вод, надмірна насиченість органікою призводить до того, що сьогодні практично всі водойми країни наблизилися до 3 класу забрудненості. З 120 країн світу Україна посідає 105-е місце за забрудненням води [2].

Важкі метали в основному потраплять до стічних вод від кольорової металургії, лакофарбової промисловості, машинобудівної галузі, гальванічних виробництв, виробництва акумуляторів та скла, хімічної обробки рослин, фосфорних мінеральних добрив і т.д. [1].

Стічні води гальванічного виробництва є одними з найбільш токсичних і шкідливих, при його відносно невеликому споживані води. Велика кількість важких металів, що містяться у гальваностоках потраплять до навколишнього середовища і накопичуються у живих організмах і донних відкладеннях, осадах, що утворюється при очищенні стічних вод, як на промислових підприємствах, так і на міських очисних спорудах, що перешкоджає їх подальшій утилізації [1].

Існує багато методів для очищення стічних вод, що забруднені важкими металами, але їх вибір залежить від вимог до якості води та доступності [3].

Одним із перспективних методів вилучення іонів важких металів зі стічних вод гальванічного виробництва є іонний обмін, який дозволяє організовувати замкнуті (безстічні) цикли водокористування, що забезпечує створення маловідходних процесів переробки відпрацьованих регенераційних розчинів [4]. Для переробки рідких відходів доцільно використовувати електрохімічні методи, що дозволяють повертати у виробництво цінні важкі метали та багаторазово використовувати регенераційні розчини [5].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Методи іонного обміну можна використовувати для очищення води від іонів важких металів, як було описано у роботах [6; 7; 8]. При цьому іони важких металів добре десорбуються з катіоніту при їх обробці розчинами кислот чи солей. А також те, що більшість катіонів, включаючи і катіони нікелю, можна вилучати з відпрацьованих розчинів при електрохімічному відновленні у вигляді металевого порошку [5]. Особливо легко вилучаються електролізом із водних розчинів мідь [8, 6] та значно важче цинк [9].

В очищенні стічних вод від іонів важких металів, не дивлячись на дані розробки, залишається одна проблема, що стримує впровадження даних технологій у виробництво, а саме розділення сумішей металів відпрацьованих регенераційних розчинів. Адже їх розділення при сорбції надто складне, тому, що багато з них мають близьку селективність на сильнокислотних катіонітах.

Постановка завдання. Метою роботи було вивчення процесів сорбції та десорбції суміші іонів міді і цинку та визначення умов їх розділення при електрохімічному вилученні іонів міді електролізом у кислому середовищі.

Завдання роботи:

Вивчити процеси сорбції суміші іонів міді та цинку на катіоніті КУ-2-8 у H^+-формі та процеси їх десорбції розчином сірчаної кислоти;

Дослідити параметри процесу відновлення міді із розчину суміші іонів міді та цинку з надлишку та без надлишку сірчаної кислоти;

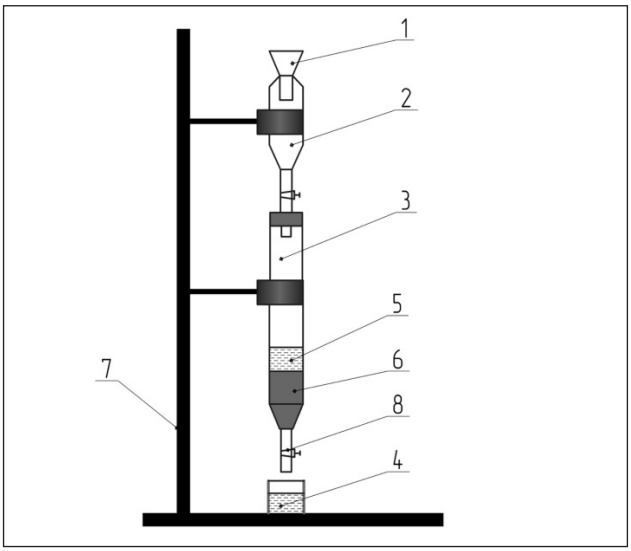


Рис. 1. Колонка для проведення іонообмінного очищення води: 1 – лійка, 2 – крапельна лійка, 3 – колонка, 4 – стакан, 5 – шар модельного розчину над іонітом, 6 – іоніт, 7 – штатив, 8 – гвинтовий зажим

Дати оцінку перспективі електрохімічного розділення іонів міді та цинку при створенні маловідходних іонообмінних процесів їх вилучення з води.

Виклад основного матеріалу. Для вивчення процесів вилучення та регенерація суміші іонів міді та цинку використовували сильнокислотний катіоніт КУ-2-8 у H^+-формі. Іоніт об'ємом 20 $см^3$ розміщали в іонообмінну колонку (рис. 1) діаметром 2 см. Витрата розчину при сорбції складала 15 $см^3$/хв., при регенерації 5 $см^3$/хв.

У роботі використовувались модельні розчини для сорбції, що містили сульфати міді та цинку у концентраціях 10,3-20,4 мг-екв/$дм^3$ та 9,7-27,6 мг-екв/$дм^3$. У процесі сорбції відбирали проби об'ємом від 100 до 500 $см^3$ та аналізували на вміст міді по методиці [13] та цинку при використанні методу трилонометрії з урахуванням концентрації міді [13]. Крім того, у розчинах контролювали pH та кислотність.

Для регенерації використовували 8-10%-і розчини сірчаної кислоти. Об'єм проби брали для аналізу 20-50 $см^3$. У пробах також контролювали вміст міді, цинку, кислотність та pH.

У процесі електролізу використовували проби розчину сульфату міді концентрацією 472,5 мг-екв/$дм^3$ та цинку концентрацією 480 мг-екв/$дм^3$ із концентрацією сірчаної кислоти 0-1000 мг-екв/$дм^3$. Об'єм проби склало 400 $см^3$. Дані розчини близькі за складом до отриманих регенераційних розчинів. Як електроди використовували катод із нержавіючої сталі та титановий анод, покритий оксидом рутенію. Площа аноду 15 $см^2$. Силу струму змінювали від 2 до 3 А.

Результати сорбції іонів міді та цинку приведені на рис. 1 та 2. Згідно з приведеними вихідними даними по сорбції, повна обмінна динамічна ємність (ПОДЄ) по цинку іоніту була дещо вищою у порівнянні з міддю. Проте це обумовлено не стільки селективністю іонів цинку, як більшою їх концентрацією у вихідному розчині. У цілому сумарна ємність іоніту була значною і сягала ~ 2000 мг-екв/$дм^3$.

Як видно з рис. 1 та 2, при сорбції міді та цинку по мірі вичерпаності ємності катіоніту, кислотність розчину знижувалась, а pH зростала.

Дані регенерації катіоніту 10%-ю сірчаною кислотою наведено на рис. 3 та 4. Як видно з рисунка, регенерація відбувається досить ефективно.

Ступінь регенерації за іонами металів сягав 90-100%. Крім іонів міді та цинку, у розчині був присутній надлишок кислоти. Тому для вивчення процесів електрохімічного розділення міді та

цинку використовували модельні розчини з надлишком та без надлишку сірчаної кислоти.

Як видно з рис. 5 електроліз суміші солей та цинку в однокамерному електролізері проходив в основному з виділенням міді у вигляді порошку. В усіх випадках (криві 1-4) спостерігалось зниження концентрації міді у розчині при відносно незмінній концентрації іонів цинку. Певне коливання концентрації цинку можна пояснити певними похибками у результатах аналізу. Процес відновлення міді прискорюється при підвищенні анодної щільності струму. Зміна кислотності розчину мало впливає на процес електролізу.

Як і слід було очікувати, у процесі електрохімічного відновлення міді кислотність зростала, тому що на аноді утворювалась кількість протонів, еквівалентна кількості відновленої міді (рис. 4). У цілому катодні та анодні процеси описуються реакціями:

$$Cu^{2+} + 2e \leftrightarrow Cu^0 \quad (1)$$

$$2H^+ + 2e \leftrightarrow H_2 \uparrow \quad (2)$$

$$2H_2O - 4e = O_2 + 4H^+ \quad (3)$$

Реакція (1) – основна реакція, що забезпечує відновлення міді на катоді.

Реакція (2) – можлива конкуруюча катодна реакція електролізу води.

Реакція (3) – окислення води на аноді.

Даний процес проходить незалежно від того, яка реакція (1 чи 2) реалізується на аноді.

Очевидно, саме тому в усіх 4-х випадках відмічено збільшення кислотності розчину у процесі електролізу на величину, еквівалентну кількості відновленої міді. Відхилення у межах похибки аналізів дослідів.

Початкова кислотність у розчинах, яка повинна визначати швидкість конкуруючої катодної реакції (2) у даному випадку мало впливала на

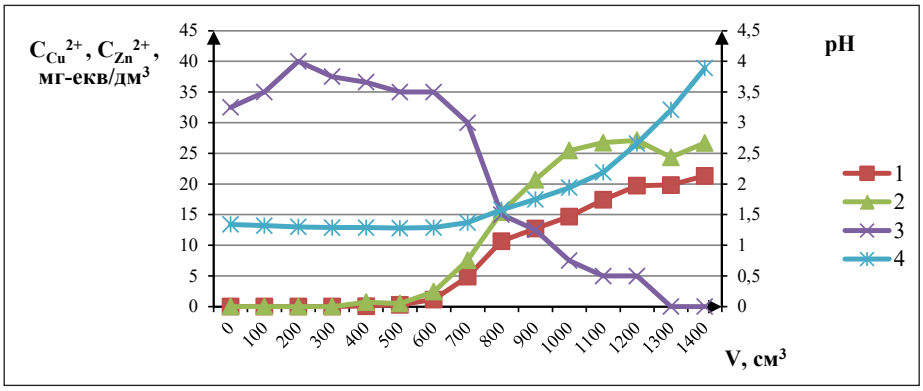


Рис. 2. Залежність вихідної концентрації іонів міді (1), цинку (2), кислотності (3) та pH (4) розчину ($[Cu^{2+}]$ = 20 мг-екв/дм³; $[Zn^{2+}]$ = 27,6 мг-екв/дм³; $[SO_4^{2-}]$ = 48 мг-екв/дм³) при фільтруванні його через катіоніт КУ-2-8 в кислій формі (V_i = 20 см³) (ПОДЄ$_1$ = 926,42 мг-екв/дм³, ПОДЄ$_2$ = 1181,2 мг-екв/дм³)

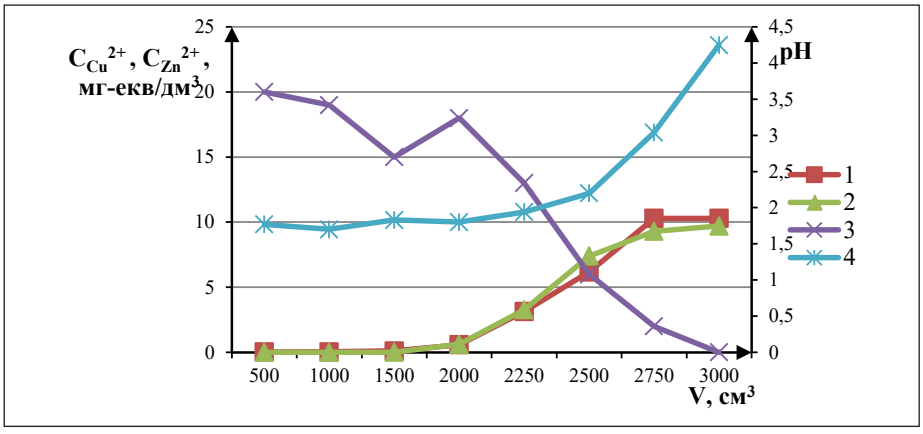


Рис. 3. Залежність вихідної концентрації іонів міді (1), цинку (2), кислотності (3) та pH (4) розчину ($[Cu^{2+}]$ = 10,3 мг-екв/дм³; $[Zn^{2+}]$ = 9,7 мг-екв/дм³; $[SO_4^{2-}]$ = 20 мг-екв/дм³) при фільтруванні його через катіоніт КУ-2-8 в кислій формі (V_i = 20 см³) (ПОДЄ$_1$ = 1152,16 мг-екв/дм³, ПОДЄ$_2$ = 1068,33 мг-екв/дм³)

вихід міді за струмом, який більше залежить від концентрації міді, аніж концентрації протонів. І це не дивно, адже мідь не окислюється воднем і тому легко виділяється з водних розчинів.

Слід відмітити, що при підвищенні щільності струму вихід міді за струмом зменшується. Це можна пояснити якраз збільшення швидкості конкуруючої реакції (2) та втратами енергії на підігрів розчину.

У цілому результати досліджень показали, що застосування електролізу досить перспективне для розділення сполук міді та цинку при використанні розчинів з концентрацією до 500 мг-екв/дм^3.

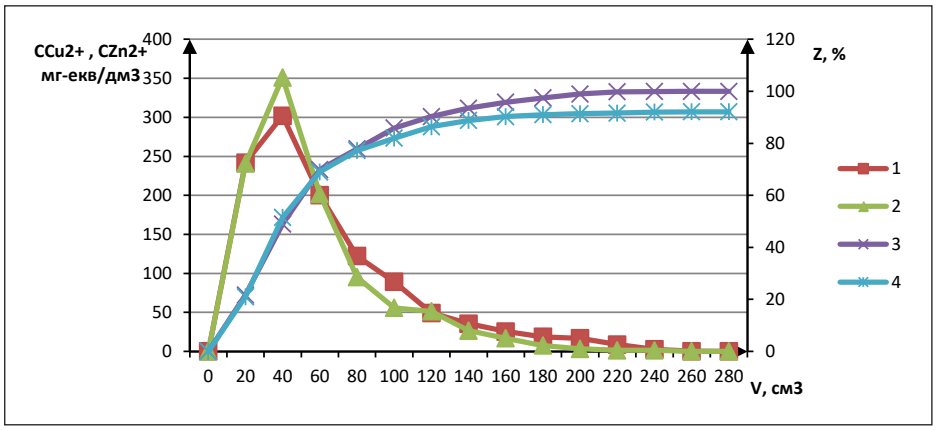


Рис. 4. Залежність вихідних концентрацій іонів міді (1), цинку (2), ступеня десорбції іонів міді (3) та цинку (4) від пропущеного об'єму 10%-го розчину H_2SO_4 через катіоніт КУ-2-8 в Cu^{2+}, Zn^{2+} формі

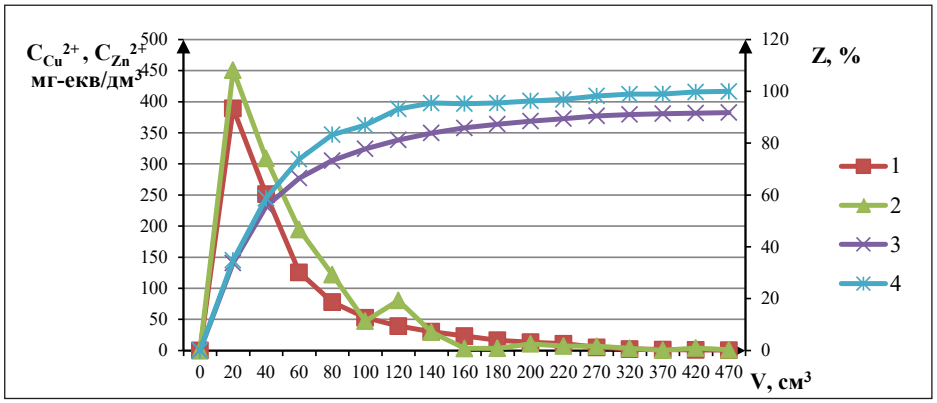


Рис. 5. Залежність вихідних концентрацій іонів міді (1), цинку (2), ступеня десорбції іонів міді (3) та цинку (4) від пропущеного об'єму 8%-го розчину H_2SO_4 через катіоніт КУ-2-8 в Cu^{2+}, Zn^{2+} формі

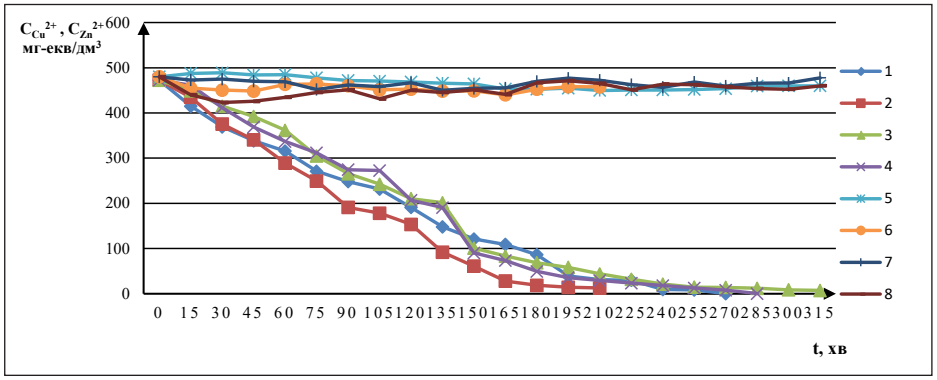


Рис. 6. Залежність залишкової концентрації іонів міді (1, 2, 3, 4) та цинку (5, 6, 7, 8) від часу електролізу розчинів, що містять 472,5 мг-екв/дм^3 іонів міді та 480,0 мг-екв/дм^3 іонів цинку (1-8) при кислотності розчинів 1000 мг-екв/дм^3 (1, 2, 5, 6), 500 мг-екв/дм^3 (3,7) та 0 мг-екв/дм^3 (4, 8) при одній густині струму 13,33 А/дм^2 (1, 3, 4, 5, 7, 8) та 20 А/дм^2 (2, 6)

Більш того, отриманий розчин сульфату цинку з надлишком сірчаної кислоти можна досить легко переробляти у двохкамерних електролізерах. У результаті можна отримати металевий цинк у вигляді порошку та сірчану кислоту. Сірчана кислота придатна для повторної регенерації катіоніту. Таким чином, можна реалізувати безвихідний процес вилучення міді та цинку при іонообмінному їх вилученні з води.

Висновки. Показано, що іони міді та цинку ефективно сорбуються на катіоніті КУ-2-8 у кількостях, пропорційних їх вмісту у розчинах. Застосування 10%-го та 8%-го розчину сірчаної кислоти забезпечує практично повну десорбцію катіонітів.

Визначено, що при електролізі розчину суміші іонів міді та цинку в однокамерному електролізері у нейтральному та кислих розчинах відбувається ефективне відновлення іонів міді при відносно стабільній концентрації іонів цинку при зростанні кислотності розчину, на величину еквівалентну виділеним іонам міді. Вихід за струмом міді сягає 90–99% і знижується по мірі зниження концентрації іонів міді. При цьому іони цинку можна потім виділяти у двокамерному електролізері з отриманням металевого цинку та сірчаної кислоти можна організовувати маловідходну технологію вилучення міді та цинку із розчину їх суміші.

Список літератури:

1. Долина Л.Ф. Современная техника и технологии для очистки сточных вод от солей тяжелых металлов: монография. Днепропетровск: Континент, 2008. 254 с.
2. Донченко М.І., Фроленкова С.В. Екологічна безпека гальванотехніки. Частина 1. Стічні води. Механічна та сорбційна очистка: навч. посіб. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 202 с.
3. Долина Л.Ф. Новые методы и оборудование для обеззараживания сточных вод и природных вод. Днепропетровск: Континент, 2003. 218 с.
4. Гомеля М.Д., Глушко О.В., Сагайдак І.С., Радовенчик В.М. Дослідження процесів очистки води від кадмію на катіоніті КУ-2-8. Экотехнологии и ресурсосбережение. 1998. №1. С.53 – 56.
5. Гомеля М.Д., Омельчук Ю.А., Глушко О.В., Камаєв В.С. Електрохімічне вилучення іонів нікелю з нейтральних та кислих регенераційних розчинів. Східно-европейський журнал передових технологій. 2011. №6/6(54). С. 26–29.
6. Вербич С.В., Брик М.Т. Вилучення йонів важких металів із водних розчинів. Наукові записки. 2002. 19. С. 32 – 35.
7. Макаренко І.М., Носачова Ю.В., Іваненко О.І. Оцінка впливу іонів твердості на ефективність очищення води від іонів міді. Вісник НТУУ «КНУ». Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2014. №1(12). С. 54 – 59.
8. Трохименко Г.Г., Гомеля М.Д. Захист природних водойм від забруднення іонами міді. Вісник НТУУ «КПІ» сер. хімічна інженерія, екологія і ресурсозбереження, зб. наукових праць. 2016. №1(15). С.93 – 97.
9. Гомеля Н.Д., Сагайдак И.С. Разработка экологически чистой технологии извлечения цинка из гальваностоков. Перспективные направления развития экологии, экономики, энергетики: Сб. науч. ст. ОЦНТЭИ. Одесса. 1999. С. 81 – 85.
10. Лурье Ю.Ю. Справочник по аналитической химии. Москва: Химия, 1989. 448 с.

ИЗУЧЕНИЯ ИОНООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ИОНОВ МЕДИ И ЦИНКА НА КАТИОНИТЕ КУ-2-8 И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ РЕГЕНЕРАЦИОННЫХ РАСТВОРОВ В СИСТЕМЕ CU-ZN

Исследованы процессы сорбции и десорбции смеси ионов меди и цинка концентрацией 0,02 и 0,05 н на сильнокислотном катионите КУ-2-8. Исследована эффективность регенерации катионита 8% и 10% серной кислотой. Определены условия электрохимического разделения смеси ионов меди и цинка в зависимости от кислотности раствора и плотности тока. Показано, что можно восстанавливать металлы из отработанных регенерационных растворов электролизом с получением чистого металлического порошка. При этом полученные концентраты кислот можно возвращать в технологический безотходный процесс.

Ключевые слова: *сорбция, десорбция, катионит, ионный обмен, регенерация, электролиз, плотность тока.*

THE STUDY OF ION-EXCHANGE PROCESSES OF EXTRACTING COPPER AND ZINC IONS BY THE CATION EXCHANGER KU-2-8 AND THE ELECTROCHEMICAL SEPARATION OF REGENERATION SOLUTIONS IN THE CU-ZN SYSTEM

The processes of sorption and desorption of the mixture of copper and zinc ions in the concentration of 0,02 and 0,05 N in highly acidic cation exchangers KU-2-8 are studied. The efficiency of regeneration of the cation exchanger with 8% and 10% sulfuric acid are investigated. The conditions of electrochemical separation of mixtures of copper and zinc ions depending on the acidity of the solution and the density of the current are determined. The study has shown that it is possible not only to extract these metals on strongly acidic cations from aquatic media with repeated use of resins, but also to restore processed regeneration solutions with the help of electrolysis to obtain pure metals – copper and zinc. Therefore, the solutions are suitable for reusing.

Key words: *sorption, desorption, cation exchanger, ion exchange, regeneration, electrolysis, current density.*

УДК 66

Кричковська Л.В.
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Дубоносов В.Л.
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

ОТРИМАННЯ ТОНКИХ ПЛІВОК МЕТОДОМ ДУАЛЬНОГО РОЗПИЛЮВАННЯ ТА ЇХ ДОСЛІДЖЕННЯ

Алмазоподібні вуглецеві (DLC) плівки і гібридні плівки алмазоподібного вуглецю з органічними полімерами (DLC-p-h) отримували з використанням методу магнетронного дуального розпилення, характеристики плівки вивчали методами комбінаційного світорозсіювання (RLS) і наноіндентифікації.

Ключові слова: *дуальне магнетронне розпилювання, алмазоподібні плівки, комбінаційне розсіювання, наноіндентифікація.*

У даний час на виробничих підприємствах мікроелектронної промисловості є потреба в нанесенні тонких металевих і діелектричних плівок на різні поверхні. Тонкі плівки широко застосовуються як ущільнюючі, світловідбиваючі, провідні і діелектричні покриття. Найчастіше дані види робіт ведуться для отримання та дослідження нових перспективних матеріалів для мікроелектронної промисловості, для пристроїв наноелектроніки та в машинобудуванні.

В останні роки завдяки інтенсивним експериментальним і теоретичним дослідженням у технології тонких плівок досягнуто значного прогресу. Залежно від задачі, що вирішується, у розпорядженні дослідників є різні методи отримання зразків, що гарантують відтворювальні та стабільні характеристики кінцевої продукції [1–2]. В основному покриття малих товщ використовуються для вивчення електричних властивостей нових матеріалів під час формування контактів; під час нанесення резистивних і провідних покриттів у промисловості та у виробництві елементів інтегральних мікросхем у мікроелектроніці [3–4]. Для отримання тонкошарових плівок використовують різні методи (табл. 1).

Перспективними покриттями, що використовуються для упрочнення ріжучого інструменту з високими швидкостями без охолодження, також можуть бути алмазні плівки. Вони зокрема цікаві, крім механічних властивостей, ще й структурними та електричними характеристиками на різних покриттях.

Процес отримання плівкових покриттів супроводжується низкою специфічних явищ. Зростання плівки відбувається у два етапи: утворення зародка на поверхні підкладки і зростання зародка. Під час взаємодії двох атомів один за одним між ними може виникнути хімічний зв'язок. У результаті, атоми довше залишаються на поверхні і встигають приєднати наступний атом тощо. Так утворюються скупчення адсорбованих атомів, більш тривалий час пов'язаних із підкладкою, що мають тенденцію до подальшого зростання, яке відбувається завдяки приєднанню атомів, що мігрують поверхнею. Отже, на поверхні формується мережа об'єднаних кластерів, потім вони об'єднуються й утворюється суцільна плівка. Водночас залежно від швидкості осадження, природи підкладки та типу матеріалу, що осаджується, можливі три типи росту плівки:

– острівцеве зростання;

– пошарове зростання;

– пошарово-острівцеве, або змішане зростання.

Тип зростання визначається взаємодією атомів плівки з атомами підкладки і один з одним. Острівцеве зростання відбувається коли атоми, що осаджуються на плівці, сильніше взаємодіють один з одним, ніж з атомами підкладки. Пошарове зростання відбувається за утворення великих за площею двовимірних зародків на поверхні підкладки внаслідок того, що атоми напилюваного матеріалу сильніше зв'язуються з атомами підкладки. Пошарово-острівцеве зростання має

Таблиця 1

Методи нанесення тонкошарових покриттів

Найменування методу	Умови реалізації методу	Основні види покриттів	Переваги методу	Недоліки методу
Термовакуумне (резистивне) випаровування	Робоче середовище: вакуум 10–2...10–3 Па. Випаровування металів резистивним нагрівом	Металеві покриття: Al, Ag, Cu, Zn, Cd, Cr, Ni, Co, Si	Висока швидкість осадження. Можливісить отримання товстих покриттів	Недостатньо щільна структура покриття. Невисокі механічні властивості
Електронно-променеве випаровування	Робоче середовище: вакуум 10–4...10–3 Па, реактивні гази N2, O2, CH4. Випаровування металів сфокусованим електронним пучком із додатковою	Металеві покритя: Al, Ag, Cu, Ti, Cr, Ni, Co, Si Керамічні покритя: TiN, ZrN, TiC, ZrC, TiCN, ZrCN, Al2O3, TiO2, SiO2, ZrO2, ZrO2/Y2O3	Висока швидкість осаджденння. Вірогідність отримання товстих покриттів (до 200 мкм). Висока чистота покриттів (мінімум домішок)	Важко забеспечити рівномірність товщини та стехіометрії на виробах складних конфигурацій. Низький ступінь завантаження виробами обсягу робочої камери
Лазерне випаровування (абляція)	Робоче середовище: вакуум 10–5...10–3 Па. Випаровування материалів різного складу лазерним імпульсом тривалістю від мкс до фс	Покриття для мікроелектроніки: Sb2S3, As2S3, SrTiO3, BaTiO3, GaAs. Алмазоподібні покриття (DLC) із високими характеристиками	Отримання покриттів складних поєднань. Висока чистота покритів (мінімум домішок)	Складність реалізації
Вакуумно-дугове випаровування	Робоче середовище: вакуум 10–3...10–2 Па. Реактивні гази N2, O2, CH4; P = 0,01...1 Па, T = 300...600°C. Випаровування металів у катодній плямі дугового розряду. Осадження покриттів із високим ступенем іонної дії	Металеві покриття: Ti, Zr, Hf, Cr, Ta, Ni, Co,Si, MCrAlY (M = Ni, Co). Керамічні покриття: TiN, ZrN, CrN, TiC, TiCN, ZrCN, TiAlN, AlCrN, TiO2, ZrO2. Нанокомпозити: TiAlN/Si3N4, AlCrN/Si3N4. Покриття DLC	Висока швидкість осадження. Відносна простота технічної реалізації. Ефективне іонне очищення виробів перед нанесенням покриттів. Високі властивості керамічних покриттів	Наявність у структурі покриття мікрокрапельної металевої фази. Відносно високі температури осадження покриттів
Магнетронне розпилення	Робоче середовище: чисті гази Ar, N2, O2, CH4; P = 0,05 – 1 Па, T = 60...6000°C. Іонне розпилення металів у магнетроному розряді	Повний спектр металевих покриттів: Al, Ag, Au, Cu, Zn, Sn, Cd, Ti, Zr, Hf, Cr, Ta, Ni, Co, Si, MCrAlY (M = Ni, Co) тощо. Керамічні покриття: TiN, ZrN, CrN, TiC, TiCN, ZrON, TiAlN, AlCrN, TiBN, CrAlTiYN, TiO2, ZrO2, Al2O3, SiO2. Нанокомпозити: 3D: TiAlN/Si3N4, TiN/BN, AlCrN/Si3N4, ZrN/Cu, ZrO2/Al2O3. 2D: TiN/NbN, TiN/CrN, TiN/AlN, CrN/AlN, TiN/CN. Покриття DLC	Щільна мікро-(нано-) кристалічна структура металевих і керамічних покритів за цілковитої відсутності крапельної фази. Можливість нанесення покриттів на термочутливі матеріали за низьких температур. Найбільш широкий спектр покриттів різного призначення; висока швидкість осадження; високі властивості металевих і керамічних покриттів	Відносна складність технічної реалізації методу за отримання реактивних (керамічних) покриттів. Відносно висока ціна обладнання

місце, коли острівці починають рости після того, як сформується плівка товщиною в кілька атомних моношарів.

Методи

Плівки отримували з використанням дуального магнетронного розпилювання. Робота магнетронного розпилювального пристрою заснована на властивостях катодної області аномального газового розряду, що тліє, в якій катод (мішень) розпорошується під дією іонного бомбардування.

Граничне розташування дуальних магнетронів – один проти одного [1–4] дозволяє осаджувати покриття на обидва боки об'ємної деталі, розташованої між магнетронами [3]. Крім того, завдяки відсутності одностороннього анода мішені уздовж магнетронів зношуються рівномірно.

Наявне в області катода магнітне поле, перпендикулярне електричному, дозволяє знизити робочий тиск плазмоутворюючого газу без зменшення інтенсивності іонного бомбардування і поліпшити умови транспортування розпилюючої речовини до підкладки. Це відбувається завдяки зменшенню розсіювання, викликаного зіткненнями з молекулами газу. Між катодом і підкладкою виникає зона низькотемпературної плазми. Розпорошені частки осідають у вигляді тонкого шару, а також частково розсіюються і осідають на стінках робочої камери.

Методами комбінаційного розсіювання світла (далі – КРС) та наноіндентування вивчалися алмазоподібні вуглецеві плівки (DLC) і гібридні плівки алмазоподібного вуглецю з органічним полімером (DLC-p-h). За даними ВРХ, алмазоподібні вуглецеві плівки являють собою тетраедричний аморфний вуглець (ta-C), а гібридне покриття можна віднести до гідрованого тетраедраїчного аморфного вуглецю (ta-C: H). Відповідно до даних, отриманих під час збудження світлом із довжиною хвилі 250 нм (УФ-ВРХ), частка sp3-зв'язків в алмазоподібних вуглецевих плівках становить від 40 до 50% залежно від зразка. У гібридній плівці частка sp3-зв'язків становить 20%. Отримані дані добре узгоджуються з виміряною твердістю і модулем Юнга.

Опис експерименту

Зразки плівок алмазоподібного вуглецю з органічним полімером (DLC-p-h) і алмазоподібні вуглецеві плівки (DLC), що не містять водню, були отримані методом осадження з використанням вакуумно-дугової плазми. Шорсткість поверхні і товщина покриттів контролювалася за допомогою профілометра. Гідрофобність покриттів визначалася за допомогою вимірювання кутів контакту і ковзання. Спектри КРС порушувалися двома довжинами хвиль: 514 та 257 нм.

Для отримання спектрів КРС використовувався спектрометр із набором коригувальних лінз і фільтрів, що відрізалися. Водночас використовувався мікроскоп, що дозволило отримувати збудливий лазерний пучок мікронного масштабу і забезпечувало великий кут збору розсіяного світла. Спектральне розширення становило майже 3 см – 1.

Механічні властивості, поверхневу топографію і шорсткість досліджували за допомогою скануючого нанотвердомера «НаноСкан» [5]. Голов-

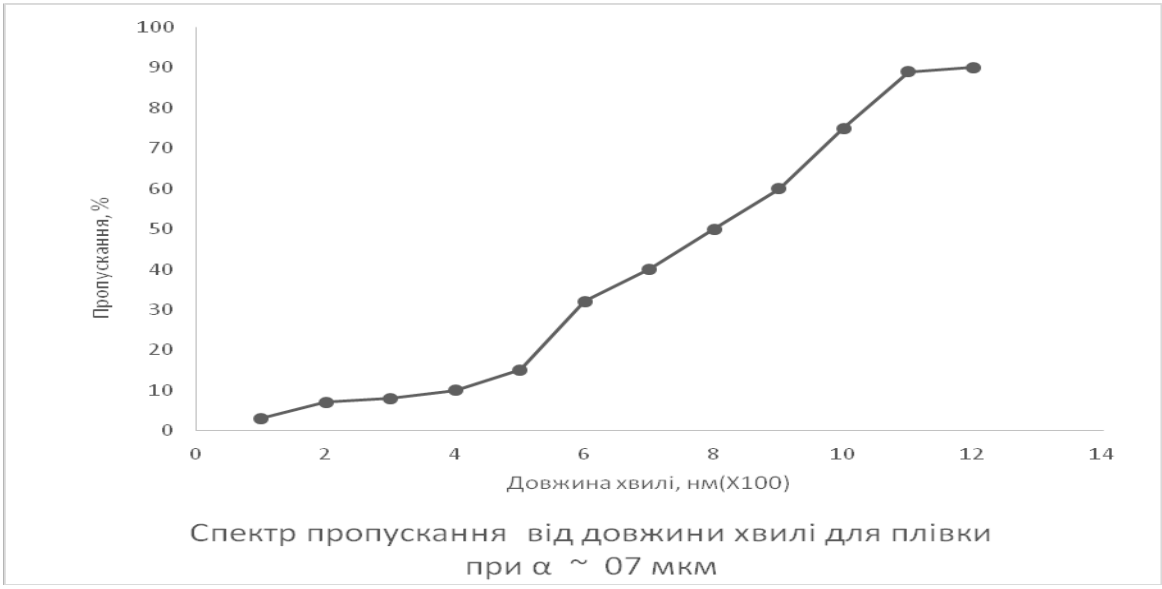


Рис. 1

ною особливістю «НаноСкана» є використання п'єзокерамічного датчика-кантілевера з високою вигібною жорсткістю (приблизно 20 кН/м). Особливості будови приладу дають можливість отримувати зображення топографії поверхні високої якості, яку можна порівняти з якістю атомносилового мікроскопа, і водночас дозволяють виробляти ідентифікування досліджуваної поверхні. Твердість і модуль пружності були виміряні методом динамічного наноіндентування. Крім того, було застосовано тест на дряпання для визначення твердості й умов відшарування покриття [6–7]. Тест на дряпання, після якого було отримано зображення поверхні, використовувався також для визначення товщини покриттів.

Результати та обговорення

3.1. Твердість.

У таблиці наведено механічні властивості зразків, отримані методом наноіндентування, а також результати тесту на дряпання, що використовувався для визначення товщини покриттів. Цей метод показав добру адгезію для найтонших зразків DLC-1 і DLC-PDMS, тоді як більш товсті зразки легше відшаровувалися з більшої площі навколо подряпини.

3.2. КРС Дослідження.

Спектри КРС плівок за збудження лазером із довжиною хвилі 257 і 514 нм представлені на рис. 1.

У разі збудження 514 нм у спектрах переважає G-лінія. Її положення залежить від складу матеріалу. Так, для зразка PDMS G-лінію спостерігали в області 1512 см-1, а для інших зразків – в області 1550 см-1. У спектрі зразка PDMS так само наявна лінія в області 1350 см-1 (D-лінія). Обидві лінії, D і G, пов'язані з наявністю графітового зв'язку і їхнє становище та напівширина можуть використовуватися для визначення параметрів осадження плівок, їхніх властивостей і структури також.

Варто зазначити, що використання збудження 514нм під час дослідження плівок мало сильне обмеження через те, що навіть невеликий вміст sp2-пов'язаних атомів вуглецю давав переважний внесок у спектри, перекриваючи складник, пов'язаний із sp3-гібридізованими атомами вуглецю. Це явище пов'язано з тим, що у видимому діапазоні перетин захоплення sp2-пов'язаних атомів вуглецю значно вище. УФ-ВРХ спектр зразка PDMS (рис. 1) складається з лінії G в області 1584 см-1. Цей спектр подібний спектру гідрованого, тетраедрічного, аморфного вуглецю (ta-C: H).

Спектри УФ-ВРХ складаються із Т-лінії в області 1100 см-1, що пояснюється наявністю атомів вуглецю зі sp3-зв'язками, і G-лінії в області 1630 (DLC-1), 1662 (DLC-2) і 1 654 см-1 (DLC-3), положення якої визначається концентрацією sp3-гібридізованих атомів вуглецю. Зіставлення інтенсивностей Т і G ліній часто використовується для обчислення цієї концентрації, хоча краще використовувати дисперсію G-лінії за порушення лазером у видимому і УФ-діапазонах спектра [4; 5].

Відповідно до отриманих даних, у зразку DLC-1 міститься приблизно 30% sp3-гібридізованих атомів вуглецю, у зразку DLC-2 – приблизно 40% sp3, у зразку DLC-3 – приблизно 37% sp3, а зразок PDMS містить майже 20% sp3. Ці концентрації добре узгоджуються з результатами наноіндентування.

У таблиці 1 для алмазоподібної плівки на Та наведені індекси кристалографічних площин Міллера (hkl), розраховані за відомою квадратичною формою для кубічної сингонії [8] для всіх спостережуваних рентгенівських рефлексів. Значення постійної кристалічної решітки а = 7,13 А. Розрахунок розмірів кристалітів плівки D проведено за формулою Селякова [7].

Таблиця 2

Індиціювання рентгенограми алмазоподібної плівки

2Θ	d (A)	$\frac{1}{a^{-2}}(\frac{1}{\Lambda^{-2}})$	$\frac{1}{a^{-2}}\rho(\frac{1}{\Lambda^{-2}})$	hkl	ε, %
21,3	4,10	0,060	0,061	111	0,1
48,2	1,85	0,280	0,275	321	2,0
54,1	1,70	0,348	0,354	330	1,7
107,1	0,95	1,086	1,106	638	1,4
136,8	0,86	1,469	1,441	6591	1,5

d – міжплощинні відстані, розраховані за формулою Брегга 2d sin Θ = nλ, де п – порядок відображення (п = 1); $\frac{1}{d^2}$ – досліджувані значення; $\frac{1}{d^2}\rho$ – значення, розрахованні за квадратичною формулою для індексів Мілера; ε – погрішність розрахунку у %.

Данні розрахунків наведено в табл. 3, з якої видно, що розмір кристалітів D алмазоподібної плівки становить ~ 500А.

Таблиця 3

Визначення розмірів кристалітів у плівці

2Θ	W	D(A)
21,75	0,95	100,2
47,27	0,20	535,0
53,92	0,21	470,1
105,2	0,25	605,3
136,8	0,45	593,8

Де W – напівширина діфракційного піка в градусах.

Отже, структура нанорозмірних алмазоподібних плівок залежить від підложки, на яку вони наносяться, та товщини шару. Більш однорідні нанокристаліти формуються на підложці за товщині шару > 3 мкм.

Висновки. За даними КРС, алмазоподібні вуглецеві плівки являють собою тетраедричний аморфний вуглець (ta-C), а гібридне покриття можна віднести до гідрованого тетраедраічного аморфного вуглецю (ta-C: H). Спостерігається в УФ-ВРХ зрушення G-піка, пов'язаного з різним вмістом sp3-гібридізованих атомів вуглецю. Відповідно до отриманих даних, частка sp3-зв'язків в алмазоподібних вуглецевих плівках становила від 40 до 50%, залежно від зразка. У гібридній плівці частка sp3-зв'язків становила ≅ 20%. Ці дані добре узгоджуються з результатами вимірювань методом наноіндентування.

Список літератури:

1. Sproul W. et al. High rate reactive sputtering in an opposed cathode closed-field unbalanced magnetron sputtering system. Surface and Coatings Technology. 1990. V. 43/44. P. 270–278.

2. Barshilia H., Yogesh K., Rajam K. Depositionof TiAlN coatings using reactive bipolar-pulsed direct current unbalanced magnetron sputtering. Vacuum. 2009. V. 83. P. 427–434.

3. Ronde S. et al. Effects of an unbalanced magnetron in a unique dual-cathode, high rate reactive sputtering system. Thin Solid Films. 1990. V. 193/194. P. 117–126.

4. O'Brien J., Kelly P. Characterization studies of the pulsed dual cathode magnetron sputtering process for oxide films. Surface and Coatings Technology. 2001. V. 142–144. P. 621–627.

5. Useinov A., Gogolinskiy K., Reshetov V. International Journal of Materials Research. 2009. № 7.

6. Ferrari A., Robertson J. Phil. Trans. R. Soc. London. 2004. A, 362: 2477.

7. Бродниченко А., Гончаков С., Рязанцев С., Сенкевич С. Влияние структуры напыляемых слоев TIN и AIN на свойства нанокомпозитных NiAIN покрытий. Известия РГПУ им. А.И. Герцена. 2006. № 6 (15). С. 64–65.

8. Бродниченко А., Долгинцев Д., Сенкевич С. О возможности определения толщины исследуемых пленок по рентгеновскому микроанализу на растровом электронном микроскопе: XVI российский симпозиум по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел. Черноголовка: ИПТМ РАН, 2009. С. 64–65.

9. Выровец И., Грицына В., Опаев О., Решетняк Е., Стрельницкий В. Нанокристаллические алмазные CVD-пленки: структура, свойства и перспективы применения. ФИП. 2010. № 1. Т. 8. С. 4–13.

10. Davies Ed. The Properties of Diamond and Diamond Films. London: Inst. of Electronical Engineer, 1994. P. 437.

ПОЛУЧЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК МЕТОДОМ ДУАЛЬНОГО РАСПЫЛЕНИЯ И ИХ ИССЛЕДОВАНИЕ

Алмазоподобные углеродные (DLC) пленки и гибридные пленки алмазоподобного углерода с органическими полимерами (DLC-p-h) получали с использованием метода магнетронного дуального распыления, характеристики пленки изучали методами комбинационного светорассеивания (RLS) и наноиндентификации.

Ключевые слова: *дуальное магнетронное распыление, алмазоподобные пленки, комбинационное рассеяние, наноиндентификация.*

THE PRODUCTION OF THIN FILMS BY THE DUAL-SPUTTERING METHOD AND THEIR INVESTIGATION

Almazopodbnyi Vuglecev (DLC) plivki i gybridnyi plivki diamond-studded volgecnye with organichnimi halfimerami (DLC-p-h) otrimul z vichoristannyam method of magnetron dual rozpilenya, the characteristics of the blend were made using the methods of combinational radiation (NLS) and nanoindentification.

Key words: *dual magnetron sputtering, diamond-like films, combination scattering, nano-identification.*

УДК 541.135:621.357.1:546.271

Малишев В.В.
Інститут загальної та неорганічної хімії Національної академії наук України

Габ А.І.
Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»

Косенко В.А.
Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»

Смірнов Ю.І.
Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»

ЕЛЕКТРООСАДЖЕННЯ ПОКРИВІВ ТИТАНУ ПОСТІЙНИМ ТА ІМПУЛЬСНИМ СТРУМОМ НА ВУГЛЕЦЕВІ СТАЛІ З ГАЛОГЕНІДНИХ РОЗПЛАВІВ

Доведено залежність кінетики і механізму електровідновлення титану від наявності фторидних сполук. Досліджено постійнострумове й уніполярне імпульсне електрохімічне осадження титану на сталеві матеріали. Підібрано умови одержання якісних покривів. Оцінено корозійну стійкість титанових осадів у розчинах хлориду натрію та азотної кислоти.

Ключові слова: *електроосадження, титан, корозійна стійкість, галогенідні розплави, сталеві матеріали/*

Постановка проблеми. Електроосадження титану є важливим методом захисту від корозії в морській воді та хімічних середовищах. Зроблено багато спроб для одержання титанових електроосадів з органічних, водних і розплавлених сольових середовищ, але чистий титан добуто лише з останніх, особливо зі хлоридних, фторидних і хлоридно-фторидних розплавів [1, с. 1019; 2, с. 59]. Зі хлоридних розплавів в основному утворюються порошкові або дендритні осади через наявність трьох малостійких окиснених станів титану та реакцій диспропорціонування [3, с. 219; 4, с. 925]. У фторидних розплавах наявні тільки два окиснені стани титану, висока стійкість титаново-фторидних комплексів приводить до відновленння титану у дві стадії [4, с. 927; 5, с. 675].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Щільні, однорідні осади чистого титану одержано постійнострумовим електролізом розплавів *NaF-*K_2TiF_6 за температури 1223–1273 K і *LiF-NaF-KF-*K_2TiF_6 за температури 973 K і за температури 1073 K [6, с. 297; 7, с. 127]. Проте такі покриви стають шорсткими й інколи дендритними, якщо зростають катодна густина струму і/або тривалість осадження. У хлоридно-фторидних розплавах щільні титанові покриви, як і порошкові та дендритні осади, можна одержати, варіюючи співвідношення $[F^-]/[Cl^-]$ [5, с. 673]. Залежно від металевої основи та температури електролізу в розплавлених солях під зовнішнім шаром титану можуть утворюватися інтерметаліди. Такі ж явища спостерігали на міді, нікелі та залізі. У технологічному аспекті варто враховувати агресивність фторидних і хлоридно-фторидних (зі значним вмістом фторидів) розплавів до конструкційних матеріалів електролізера.

Постановка завдання. Здійснити електроосадження титану за постійного та імпульсного струму електролізом розплаву KCl-NaCl-NaF-$TiCl_3$.

Виклад основного матеріалу дослідження. ***Електрохімічна поведінка Ti(III) у хлоридно-фторидному розплаві в основі його електроосадження.*** Введення до хлоридного розплаву, що містить тривалентний титан, іонів фтору в кількості, яка відповідає мольно-частковому співвідношенню $[Ti(III)] : [F^-] > 1 : 2$, веде до зменшення величини пікового струму хвилі перезаряду $Ti(III) \Leftrightarrow Ti(II)$, пропорційно вмісту фторид-іона в електроліті (рис. 1, крива 2). Під час зменшення

струму хвилі перезаряду пропорційно зростає струм хвилі розряду $Ti(II) \Leftrightarrow Ti(0)$. По досягненні мольного співвідношення $[Ti(II)] : [F^-] = 1 : 2$ хвиля перезаряду на вольтамперній кривій не спостерігається, розряд комплексів тривалентного титану стає одностадійним (рис. 1, крива 3). Одночасно зі зміною механізму процесу відбувається зсув потенціалів хвиль у бік електронегативніших значень.

Одержані експериментальні дані дозволяють зробити висновок, що зміна основності розплаву введенням до нього фторид-іонів спричиняє утворення змішаних фторидно-хлоридних комплексів. Заміна іонів хлору в комплексі $TiCl_6^{3-}$ на фтор, який має менший радіус, ніж хлор, приводить до зміцнення комплексу Ti(III) та зміни механізму його електровідновлення. Враховуючи, що зміна механізму відбувається за мольно-часткового співвідношення $[Ti(III)] : [F^-] = 1 : 2$, утворене комплексне угруповання титану має вигляд $TiCl_4F_2^{3-}$.

Хлоридно-фторидні комплекси титану пребувають у рівновазі з компонентами розплаву:

$$TiF_xCl_y^{3-} \Leftrightarrow TiF_x^{3-x} = yCl^- . \qquad (1)$$

Електровідновленню піддаються дисоційовані частки TiF_x^{3-x}, концентрація яких в об'ємі розплаву менша за загальну концентрацію титану в електроліті. Збідніння приелектродного шару, як результат розряду комплексів TiF_x^{3-x}, приводить до зсуву рівноваги реакції (1) у бік утворення електрохімічно активних часток. Підтвердженням наведеної схеми є залежність $i_p/V^{0,5} = f(V^{0,5})$, яка дозволяє визначити вплив попередньої реакції на електровідновлення.

Залежність потенціалу піка хвилі відновлення від швидкості поляризації, а також значення α_n, що дорівнює 0,95 ± 0,1, свідчать про сповільненість стадії перенесення заряду. Коефіцієнт дифузії титану дорівнює $(3,0 \pm 0,4)\cdot10^{-5}$ м^2·с$^{-1}$. Встановлено, що склад комплексу титану, який існує в розплаві за надлишку йонів фтору, виражається формулою $TiF_4Cl_2^{3-}$.

Постійнострумове електроосадження титану. Постійнострумове електроосадження здійснювали на сталевих пластинах за температури 1023–1223 К, катодної густини струму 25–80 мА·см$^{-2}$ протягом 1 год. Ефективність катодного струму виміряно для електролізів у 2,5% (мас.) розчині Ti(III). Найвищу ефективність (між 67 і 90%) одержали за температури 1073 К. За температури 1123 К найвищу ефективність (60%) отримали для дуже низької густини струму. За температури 1223 К ефективність завжди була нижче за 35%. Низькі значення ефективності струму, визначені за найвищих температур, можна пояснити більшим вкладом відновлення іонів калію в загальний струм. За температури 1073 К покриви були суцільними, але шорсткішими та більш дендритними, ніж за температури 1023 К.

Поперечні перерізи осадів являють собою один шар чистого титану після електролізів проведених за температури 1023–1073 К і три шари для електроосадження, проведеного за температури 1123–1173 К. Електроннозондовим мікроаналізом виявлено, що шари складаються з інтерметалічних сполук Fe_2Ti (біля сталевої основи), $FeTi$ (проміжний шар) і чистий титан (зовнішній шар). Область Кіркендала на межі поділу Fe_2Ti/сталь, яка утворена завдяки вищій швидкості дифузії заліза в титан, ніж навпаки, чітко помітна на титановому осаді, одержаному за температури 1223 К. Така область дефектів є характерною для щільно прилеглих покривів. Наявність тріщин у титанових покривах, одержаних за температури 1223 К, може бути зумовлена фазовим переходом титану з об'ємноцентрованої кубічної до гексагональної кристалічної гратки за температури 1155 К під час охолодження.

Уніполярне імпульсне електроосадження титану. Уніполярне імпульсне покривання полягає в періодичному застосуванні катодної густини струму i_k протягом часу τ за вимКлнення електричного живлення протягом часу τ_0. В основному використовували два методи: зміни i_k за сталих значень τ і струмової характеристики i_m, яка дорівнює $\frac{\tau \cdot i_k}{\tau + \tau_0}$, і зміни i_k за сталого значення добутку струмової характеристики i_m та суми часу застосування струму τ та часу його вимКлнення τ_0.

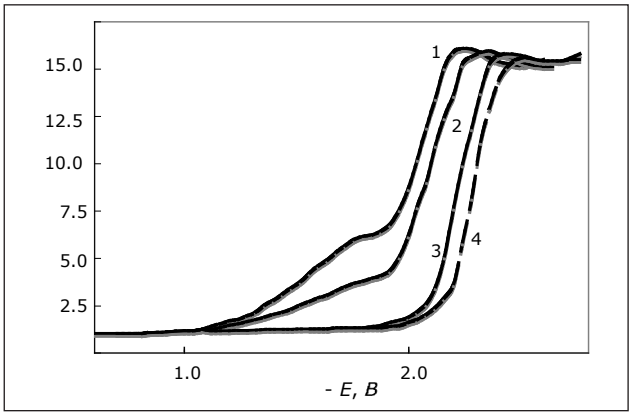


Рис. 1. Вольтамперограми електровідновлення іонів титану в розплаві KCl-NaCl-NaF-$TiCl_3$ за молярним співвідношенням $[Ti^{+3}] : [F^-]$, що дорівнює 1 : 0 (1), 1 : 1 (2), 1 : 2 (3) і < 1 : 2 (4). Т = 1000 К, швидкість поляризації – 1,0 В·с$^{-1}$, $[Ti^{+3}] = 1,55\cdot10^{-4}$ моль/л

За першим методом, зростання густини імпульсного струму i_k приводить до збільшення τ_0. Оскільки і i_k, і τ_0 впливають на кристалізацію осаду [8, с. 769], то незрозуміло, розмір зерен є результатом зміни i_k чи τ_0. Ми віддали перевагу другому методу, де τ_0 не дуже змінюється. Було використано уніполярне імпульснострумове електроосадження у 2,5% (мас.) розчинах *Ti(III)* протягом 3,5 год., застосовано електролітичні параметри, які давали найкращі результати за постійнострумового покривання: температура 1073 К і середня густина катодного струму i_m = 50 мА·см$^{-2}$. Електроосадження здійснювали на сталевих пластинах. Значення густини імпульсного заряду та густини імпульсного струму становили 20–120 мКл·см$^{-2}$ і 75–200 мА·см$^{-2}$ відповідно.

Ефективність катодного струму та морфологію осадів, одержаних імпульснострумовим покриванням, наведено в табл. 1. Для низького імпульсного заряду (20 мКл·см$^{-2}$) покриви складалися з дуже тонкого щільного титанового шару, вкритого численними дендритами. Значні коливання ефективності струму, очевидно, спостерігалися завдяки втраті дендритів протягом електролізу та відмивання. Для вищих імпульсних зарядів (70–120·мКл см$^{-2}$) покриви товщиною від 50 до 150 мКлм є гладкими і щільно прилягають до основи, дендрити інколи зустрічаються, проте в основному зосереджені на краях катодів. Ефективність катодного струму за 120 мКлл·см$^{-2}$ є вищою, ніж за 75 мКлл·см$^{-2}$, і не дуже залежить від імпульсної густини струму i_k для тих самих імпульсних зарядів. Ефективності струму, виміряні для імпульснострумових покривів, є вищими, ніж значення, одержані для постійнострумових покривів.

Відомо, що протягом імпульснострумового покривання постійний заряд-розряд (перезарядка) подвійного шару може впливати на осадження металу, особливо коли τ і τ^0 є нижчими або такого ж порядку, як час заряду τ_c і розряду τ_d [8, с. 771]. За таких умов катодний струм значно коливається, переваги імпульснострумового покривання можна втратити. Таке наближення імпульснострумового покривання до постійнострумового можна оцінити за ступенем згладження піка фарадеївського струму i_F:

$$\Delta = \frac{i_k \cdot \tau - \int_0 i_F \, dt}{iF \cdot \tau_0}. \qquad (2)$$

Значення Δ зростає від 0,1 до 0,9, коли τ змінюється від 10 τ_c до 0,1 τ_c.

Оцінку τ_c як функції i_k можна отримати з відношення [8, с. 772]:

$$\tau_c = \frac{4R \cdot T \cdot C}{\alpha \cdot n \cdot F \cdot i_k}, \qquad (3)$$

де R – універсальна газова стала; T – температура, К; C – ємність подвійного шару, мФ•см$^{-2}$; α – коефіцієнт перенесеня заряду; n – кількість перенесених електронів; F – стала Фарадея.

Використовуючи T = 1073 К, n = 3 та значення α і С із роботи [9, с. 290] 0,5 і 50 мФ·см$^{-2}$ відповідно, розрахували наближені значення τ_c для області ik від 100 до 200 мА·см$^{-2}$ (табл. 2). Значення ступеня згладження було апроксимовано із кривої $\Delta = f(\tau/\tau_c)$, запропонованої в роботі [8, с. 768], та наведено в табл. 3.

Таблиця 2

Приблизна тривалість зарядження τ_c для подвійного шару як функції густини імпульсного струму i_k, одержана з відношення (3)

i_k, мА·см$^{-2}$	20	70	120	170
τ_c, мс	0,25	0,18	0,13	0,09

Для експериментів, проведених за зарядом імпульсу 20 мКл·см$^{-2}$ та τ/τ_c менше 1, розрахова-

Таблиця 1

Ефективність катодного струму та морфологія осадів титану залежно від параметрів уніполярного імпульснострумового покривання (Т = 1073 К; τ = 3,5 год; i_m = 50 мА·см$^{-2}$)

i_m, τ, мК·см$^{-2}$	i_k, мА·см$^{-2}$	τ, мс	τ_0, мс	Ефективність катодного струму, %	Морфологія осаду
20	125	0,13	0,15	38	Розгалужені дендрити
	100	0,18	0,13	85	Розгалужені дендрити
	75	0,25	0,10	53	Дендрити
70	125	0,60	0,87	57	Гладкий з дефектами
	100	0,80	0,72	53	Гладкий із дендритами по краях
	75	1,15	0,40	65	Гладкий із дендритами по краях
120	175	0,70	2,15	68	Гладкий із дендритами по краях
	125	1,15	1,83	77	Гладкий із дендритами по краях
	100	1,40	1,60	70	Гладкий без дендритів
	75	2,10	0,85	63	Гладкий без дендритів

ний ступінь згладження є високим (0,45–0,67). Тому осаджуються дендрити, подібно до покривів, одержаних постійнострумовим нанесенням. З іншого боку, для імпульсних зарядів 70 і 120 мКл·см$^{-2}$, коли ступінь Δ є низьким (приблизно 0,1) очікували, що заряд подвійного шару матиме менший вплив. Підтвердженням цього є одержання бездендритних покривів титану імпульсно-струмовим методом.

Таблиця 3

Ступінь згладження Δ для імпульсно-струмових експериментів із табл. 1

$i_m (\tau + \tau_{вимКл})$, мКл·см$^{-2}$	$\tau/\tau_{зар}$	Δ
20	0,95	0,45…0,67
70	4,35	0,13…0,19
120	8,75	0,06…0,11

Фізико-механічні та хімічні властивості титанових покривів. За густини імпульсного струму 75 мА·см$^{-2}$ та імпульсному заряді 75 мКл·см$^{-2}$ не зазначено впливу імпульсного заряду на розмір зерен. Незначне зниження розмірів зерен спостерігали за зростання імпульсної густини струму. Всі осади являють собою добре кристалізовані зерна розміром 75–125 мКлм. У всіх випадках розмір титанового зерна для імпульсно-струмового покривання вищий, ніж для постійнострумового, на 30–60 мКлм.

Поперечні перерізи покривів, протравлених у 5% (мас.) розчині *HF* протягом 60 с, виявляють характерну стовпчасту структуру осадів важкоплавких металів, одержаних електролізом у розплавлених солях.

Впливу параметрів імпульсно-струмового покривання на мікротвердість титанових покривів не спостерігали. Середня мікротвердість, виміряна всередині поперечного перерізу осаду з навантаженням 25 г протягом 15 с (твердість за Вікерсом), становить 145 ± 15 МПа. Такі значення нижчі за значення, одержані для постійнострумових покривів (220 ± 20 МПа) і для технічно чистих титанових анодів (мікротвердість за Вікерсом 225 ± 5 МПа), які мають менші зерна. Також було зазначено, що мікротвердість осадів зменшується з поверхні сталь/титан до титанової поверхні, вказуючи на збільшення розмірів зерен.

Рентгенофазовий аналіз зразків імпульсно-струмових електроосадів титану, одержаних за імпульсного заряду 120 мКл·см$^{-2}$, дає піки (002), (011) і (012). Орієнтаційні індекси (*OI*) розраховано із залежності:

$$OI = \frac{\dfrac{I_{hkl}}{\sum I_{hkl}}}{\dfrac{I_{ASTM_{hkl}}}{\sum I_{ASTM_{hkl}}}}, \qquad (4)$$

де I_{hkl} і $I_{ASTM_{hkl}}$ – інтегральні інтенсивності з піка (*hkl*), одержані для титанових осадів і для титану випадкової текстури, відповідно [10, с. 836].

За низької густини струму титанові осади мають випадкову структуру. Для густини струму 125 мА·см$^{-2}$ у покриві переважають орієнтації (012) і (002), а для густни струму 175 мА·см$^{-2}$ – переважає орієнтація (012).

Хімічні аналізи титанових покривів, одержаних за температури 1073 K, виявляють нижчий вміст заліза ((3–8)·10^{-4} мас.%), ніж вихідна кон-

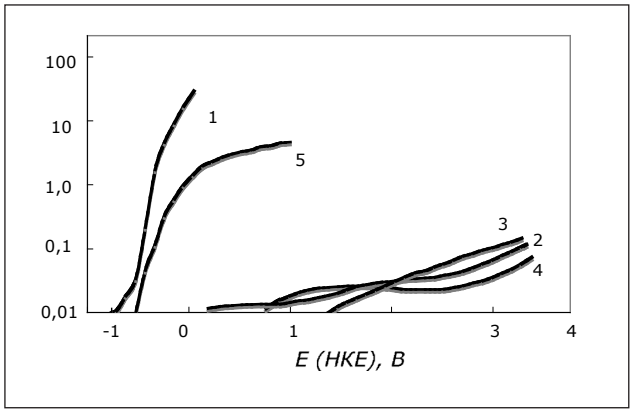


Рис. 2. Криві анодної поляризації вуглецевої сталі 3 (1), технічного титану (2) і титанових осадів (одержаних за 1073 К та імпульсно-струмового осадження: (3) 70, (4) 120, (5) 20 мК·см$^{-2}$) у 3% (мас.) розчині NaCl за 298 К і швидкості сканування 5 мВ·с$^{-1}$

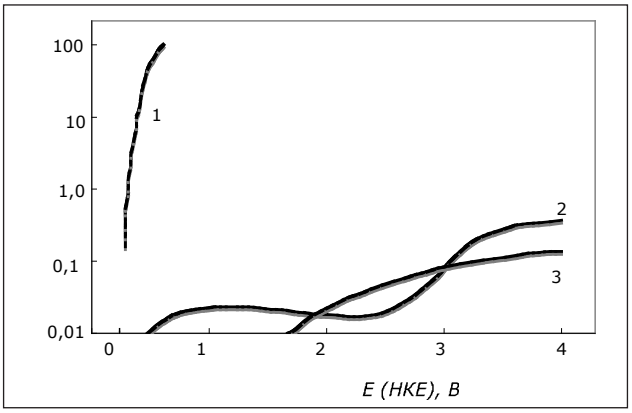


Рис. 3. Криві анодної поляризації вуглецевої сталі 3 (1), технічного титану (2) і титанових осадів (одержаних за 1073 К та імпульсно-струмового осадження з використанням 75 мК·см$^{-2}$) (3) у розчині HNO_3 30 % (мас.) за 298 К і швидкості сканування 5 мВ·с$^{-1}$

центрація заліза в анодах ($1{,}68 \cdot 10^{-2}$ мас.%), що підтверджує ефективність електролізів для титанового очищення. Добре відомо, що наявність заліза в титані навіть у малих кількостях значно знижує корозійну стійкість покриву. Вміст кисню в електроосадах ($0{,}135 \cdot 10^{-4}$ мас.%) нижчий, ніж в анодах ($0{,}27 \cdot 10^{-4}$ мас.%).

Поляризаційні криві сталі, технічного титану й імпульснострумового титанового електропокриву в розчинах 5% (мас.) хлориду натрію і 30% (мас.) азотної кислоти за кімнатної температури наведено на рис. 2 і 3. Варто зазначити, що титанові осади, одержані за імпульсного заряду 75 і 120 мКл·см$^{-2}$ (електропокриви 1 і 2) у розчинах *NaCl і* HNO_3, поводять себе подібно до технічного титану. Мікроскопічні дослідження поверхневих шарів не виявили локалізованої корозії. Ці результати показують, що імпульснострумові титанові електроосади, одержані за таких самих умов, можна використовувати як антикорозійні покриви. З іншого боку, висока густина анодного струму, виміряна для осадів, одержаних за 20 мКл·см$^{-2}$ (електропокрив 3) у розчинах *NaCl* допускає корозію основи. Зазначено кілька «центрів атаки», які утворюються з наявних в осаді дефектів. Дійсно, відмивання дендритних осадів після електроосадження зазвичай веде до руйнування дендритів, а іноді – до одночасного усунення покриву. Такі осади не забезпечують корозійний захист основи.

Висновки.

1. Електроосадження титану на вуглецевій сталі виконано постійнострумовим і уніполярним імпульсним електролізами в розплаві $K,Na//Cl,F\text{-}TiCl_3$.

2. Уніполярні імпульснострумові покриви за температури 1073 K із середньою густиною струму 50 мА·см$^{-2}$ покращують морфологію осадів.

3. Корозійна стійкість осадів оцінена із кривих «потенціал – струм», одержаних у розчинах 5% (мас.) NaCl і 30% (мас.) HNO_3 за кімнатної температури, та порівняна з такою для технічного титану.

Список літератури:

1. Шаповал В., Заруцкий И., Малышев В., Ускова Н. Современные проблемы электрохимии титана и бора, синтеза диборида титана и его интерметаллидов в ионных расплавах. Успехи химии. 1999. Т. 68. № 11. С. 1015–1028.

2. Малишев В. Високотемпературна електрохімія та електроосадження металів IV–VIA груп і їх сполук в іонних розплавах. Київ: Університет «Україна», 2004. 326 с.

3. Haaberg G.M., Rolland W., Sterten A., Thonstad J. Electrodeposition of Titanium from Chloride Melts. J. Appl. Electrochem. 1993. Vol. 23. № 3. P. 217–224.

4. Wei D., Okido M., Oki T. Characteristics of Titanium Deposits by Electrolysis in Molten Chloride-Fluoride Mixtures. J. Appl. Electrochem. 1994. Vol. 24. № 9. P. 923–929.

5. Ene N., Zuca S. Electrodeposition of Coherent Deposits of the refractory Metals. J. Appl. Electrochem. 1995. Vol. 25. P. 671–679.

6. de Lepinay J., Bouteillon J., Traore S., Renaud D. et al. Electroplating Silicon and Titanium in Molten Fluoride Media. J. Appl. Electrochem. 1987. Vol. 17. № 2. P. 294–302.

7. Robin A., de Lepinay J., Barbier M.J. Titanium Electrodeposition from Molten Salts. J. Electroanal. Chem. 1978. Vol. 230. P. 125–129.

8. Katagiri A., Suzuki M., Takehara Z. Electrodeposition of Tungsten in Electrodeposition of Tungsten in $ZnBr_2$-NaBr and $ZnCl_2$-NaCl Melts. Soc. 1991. Vol. 138. P. 767–773.

9. Robin A., de Lepinay J., Barbier M.J. Application de la voltampérométrie convolutionnele à la détermination du coefficient de diffusion des ions TiF_6^{3-} dans l'eutectique LiF-NaF-KF de 600°C a 900°C. J. Appl. Electrochim. 1990. Vol. 20. № 2. P. 289–293.

10. Massalski T.B., Okamoto H. Binary Alloy Phase Diagrams. ASM International, 1990. Vol. 2. 1118 p.

ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЕ ПОКРЫТИЙ ТИТАНА ПОСТОЯННЫМ И ИМПУЛЬСНЫМ ТОКОМ НА УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ИЗ ГАЛОГЕНИДНЫХ РАСПЛАВОВ

Доказана зависимость кинетики и механизма электровосстановления титана от наличия фторидных соединений. Исследовано постояннотоковое и униполярное импульсное электрохимическое осаждение титана из галогенидных расплавов на стальные материалы. Подобраны условия для получения качественных покрытий. Оценена коррозионная стойкость титановых осадков в растворах хлорида натрия и азотной кислоты.

Ключевые слова: *электроосаждение, титан, коррозионная устойчивость, галогенидные расплавы, стальные материалы.*

ELECTRODEPOSITION OF TITANIUM COATINGS BY CONSTANT AND PULSE CURRENT ON CARBON STEAL FROM HALIDE MELTS

The dependence of titanium electroreduction kinetics and mechanism from fluoride compounds presence was proved. Direct and pulse current electrochemical titanium deposition from halide melts on steel materials was investigated. Conditions for qualitative coatings were elaborated. Titanium deposits corrosion resistance in aqueuos solutions of sodium chloride and nitric acid was estimated.

Key words: *electrodeposition, titanium, corrosion resistance, halide melts, steel materials.*

УДК 541.138+541.135.3+546.821+546.883

Малишев В.В.
Інститут загальної та неорганічної хімії Національної академії наук України

Шахнін Д.Б.
Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»

Терещенко О.Я.
Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»

Ускова Н.М.
Інститут загальної та неорганічної хімії Національної академії наук України

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОВІДНОВЛЕННЯ ІОНІВ ГАДОЛІНІЮ В ГАЛОГЕНІДНИХ РОЗПЛАВАХ

Проведено дослідження електровідновлення гадолінію в галогенідних розплавах. Доведено інертність матеріалів електродів до гадолінію. Встановлено, що електровиділення гадолінію з галогенідних розплавів є первинним електрохімічним процесом. Вивчено особливості електрохімічного відновлення гадолінію за зміни аніонного складу електроліту.

Ключові слова: *гадоліній, електровідновлення, розплав, електрод, механізм.*

Постановка проблеми. З кожним роком зростає інтерес дослідників і попит споживачів до гадолінію та сполук на його основі, що пояснюється різноманітністю унікальних властивостей, які відкривають їм широку дорогу в сучасну техніку. Гадоліній і його сполуки використовують в ядерній енергетиці, атомній техніці, радіоелектроніці, хімічній і космічної промисловості, металургії. Вони застосовуються як конструкційні матеріали в ядерній техніці, як термоелектричні матеріали в теплових двигунах, атомних і ядерних реакторах, у виготовленні постійних магнітів і напівпровідникових діодів, спеціальних стекол, які поглинають люмінесцентне й інфрачервоне випромінювання, стартерів тліючого розряду, кольорових телевізорів і стільникових телефонів, тензочутливих датчиків [1, с. 289, 2, с. 167].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сьогодні одним з основних перспективних способів отримання матеріалів різного функціонального призначення, зокрема й боридів і силіцидів рідкісноземельних металів, є метод високотемпературного електрохімічного синтезу в сольових розплавах [3, с. 425; 4, с. 14]. Керування процесом електрохімічного синтезу сполук гадолінію і його ефективне використання можливе тільки за знання механізму електровідновлення іонів гадолінію і процесів спільного електровиділення гадолінію з компонентами синтезованих сполук з іонних розплавів. Огляд робіт за цією тематикою здійснено в [4, с. 14; 5, с. 44].

Постановка завдання. Дослідити кінетику та механізм електровідновлення гадолінію в галогенідних розплавах за зміни складу електроліту.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для вивчення процесів електрохімічного відновлення гадолінію й електровідновлення іонів гадолінію, бору і кремнію на фоні галогенідних розплавів використано лінійну і циклічну вольтамперометрію [6, с. 453; 7, с. 349]. Експерименти проводили у кварцовій триелектродній комірці в атмосфері очищеного й осушеного аргону.

Електрохімічне відновлення іонів гадолінію в хлоридному розплаві

Електрохімічне відновлення іонів гадолінію в розплаві KCl-NaCl (1 : 1) за 973 K. Виявлено, що серед досліджуваних електродів (W, Ag, скловуглець) інертним є лише вольфрамовий, що підтверджено у [8]. Значення потенціалу хвилі відновлення іонів гадолінію на срібному й алюмінієвому електродах перебуває в більш позитивній області потенціалів (приблизно на 200 мВ і 300 мВ відповідно). Зсув потенціалу хвилі відновлення на цих електродах у позитивну область пов’язаний із

процесами сплавоутворення й утворення інтерметалічних сполук. На рис. 1 наведено вольтамперні залежності електрохімічного відновлення іонів гадолінію на вольфрамовому електроді в розплаві NaCl-KCl (1 : 1). За концентрації $GdCl_3$ у розплаві приблизно $1{,}0\cdot10^{-4}$ моль/см^3 з'являється хвиля електровідновлення за E = – (2,25–2,35) В щодо скловуглецевого квазіоборотного електрода порівняння.

Характер вольтамперних залежностей, знятих за різних швидкостей поляризації (0,01 В/с < V < 1,0 В/с), дозволяє дійти висновку, що в разі зміни режиму поляризації від стаціонарного до нестаціонарного появи дифузійного піка не відбувається. Це можна пояснити близькістю потенціалу відновлення комплексних хлоридних іонів гадолінію і потенціалів розряду лужних металів. Також варто зазначити, що висота анодної хвилі на графіках вольтамперних залежностей збільшується з підвищенням концентрації деполяризатора в розплаві.

Зіставлення вольтамперних кривих, отриманих із використанням квазіоборотного скловуглецевого і хлорсрібного електродів порівняння, демонструє гарний збіг із тією лише різницею, що хвиля відновлення іонів гадолінію в розплаві KCl-NaCl (1 : 1) щодо хлорсрібного електрода розташована приблизно на 200 мВ у більш позитивній області потенціалів, ніж щодо квазіоборотного скловуглецевого електрода.

Електрохімічне відновлення іонів гадолінію в евтектичному розплаві KCl-NaCl-CsCl на вольфрамовому електроді за 823 K. На вольтамперних залежностях, знятих на вольфрамовому електроді за 823 K щодо квазіоборотного скловуглецевого електрода порівняння, спостерігається добре відтворювана хвиля відновлення іонів гадолінію за потенціалів – (2,25–2,45) В. Зростання концентра-

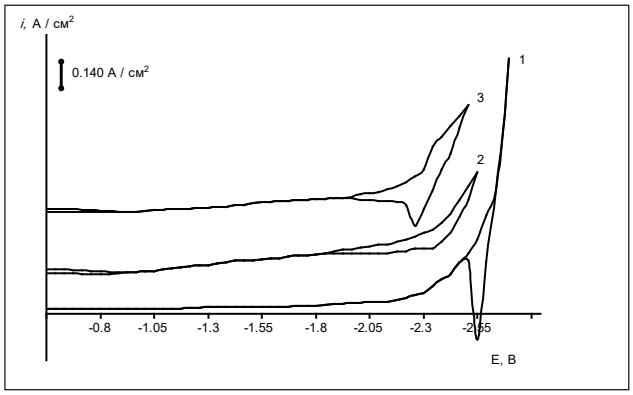


Рис. 1. Циклічні вольтамперні залежності розплаву NaCl-KCl-$GdCl_3$ за C $(GdCl_3)\cdot10^{-4}$, моль/см^3: *1* – 0; *2* – 1,5; *3* – 2,8. Катод – W, T = 973 K, V = 0,05 В/с. Електрод порівняння – скловуглець

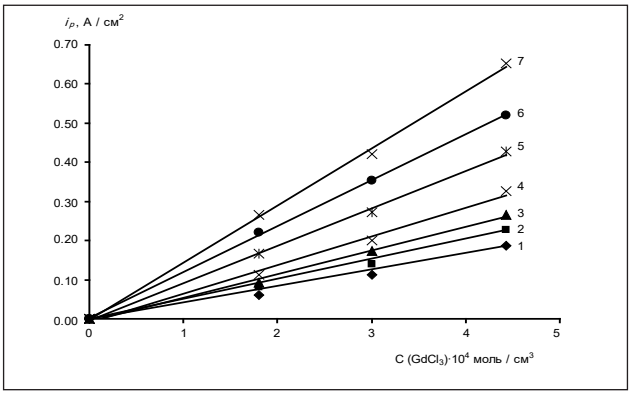


Рис. 2. Залежність струму електровідновлення від концентрації $GdCl_3$ у розплаві KCl-NaCl (1 : 1). Швидкість поляризації, В/с: 1 – 0,02; 2 – 0,05; 3 – 0,07; 4 – 0,1; 5 – 0,2; 6 – 0,5; 7 – 1,0. Катод – W, T = 973 K

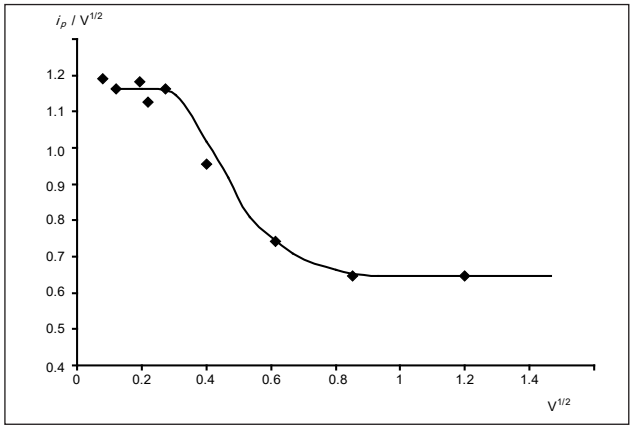


Рис. 3. Залежність $i_p/V^{1/2}$ від $V^{1/2}$ електровідновлення гадолінію в розплаві KCl-NaCl за C $(GdCl_3)$ = $4{,}0\cdot10^{-4}$ моль/см^3. Катод – W

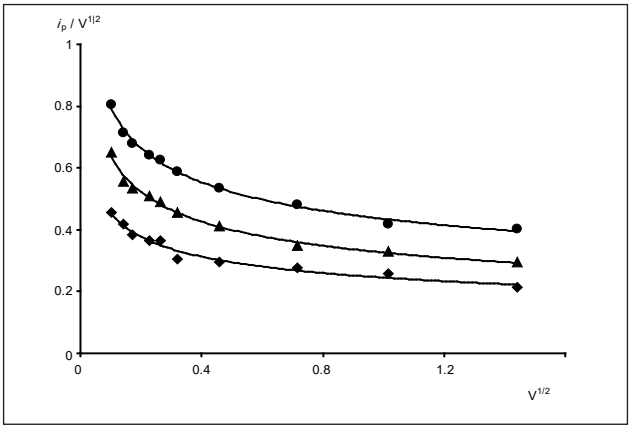


Рис. 4. Залежність $i_p/V^{1/2}$ від $V^{1/2}$ для процесу електровідновлення іонів гадолінію ($Gd^{3+} \rightarrow Gd^0$) на W електроді в розплаві NaCl-KCl-CsCl-$GdCl_3$ за T = 823 K і C $(GdCl_3)\cdot10^4$, моль/см^3: 1 – 2,75; 2 – 3,75; 3 – 4,75

ції трихлориду гадолінію в розплаві спричинює зростання хвилі відновлення. Зміна швидкості поляризації в інтервалі 0,01–1,0 В/с приводить до зміщення значень потенціалу піка і напівпіка в бік більш негативних потенціалів, також збільшується висота хвилі. За значення потенціалу повернення – 2,4 В на анодній гілці спостерігається одна хвиля окиснення виділеного металевого гадолінію.

Електрохімічне відновлення іонів гадолінію на скловуглеці. Особливістю вольтамперних залежностей для іонів гадолінію на скловуглецевому електроді в еквімольном розплаві KCl-NaCl за температури 973 K є те, що хвилі відновлення перебувають у більш позитивній області потенціалів – (1,6–1,8) Відносно хлорсрібного електрода порівняння. Хвилі відновлення на скловуглеці розтягнуті по осі потенціалів. Також має місце істотна різниця між потенціалами піків катодного й анодного процесів. Накопичувальний електроліз за потенціалів відновлення іонів гадолінію на скловуглецевому електроді та подальше вилуговування продуктів електролізу приводить до газовиділення й утворення вуглеводнів (переважно ацетилену). Цей експериментальний факт підтверджує утворення сполук гадолінію з вуглецем (карбідів), що пояснює істотну деполяризацію під час електровідновлення іонів гадолінію на скловуглецевому електроді.

У низькотемпературному евтектичному розплаві KCl-NaCl-CsCl потенціал хвилі відновлення гадолінію на скловуглецевому електроді перебуває в більш негативній області потенціалів. Спостерігається зменшення різниці потенціалів піків катодного й анодного процесів, порівняно з такими в еквімольному розплаві KCl-NaCl. У процесі електровідновлення на скловуглецевому електроді в евтектичному розплаві KCl-NaCl-CsCl (823 K) не відбувається утворення сполук вуглецю і гадолінію.

Аналіз вольтамперних залежностей процесу електрохімічного відновлення гадолінію в хлоридних розплавах

Механізм електровідновлення трихлориду гадолінію на вольфрамовому електроді в розплаві KCl-NaCl за 973 K. Для встановлення характеру і механізму електродного процесу електровідновлення іонів гадолінію в хлоридному розплаві розраховано деякі кінетичні параметри: густину струму, потенціали піка і напівпіка, напівширину піка за різних C ($GdCl_3$) і швидкостях поляризації за загальновідомими діагностичними критеріями. Граничний струм електровідновлення іонів гадолінію прямо пропорційно зростає зі збільшенням концентрації $GdCl_3$ у розплаві (рис. 2).

Ці дані можуть свідчити про дифузійний контроль електрохімічного відновлення в розплаві KCl-NaCl за стаціонарних умов поляризації. На дифузійний контроль електродного процесу вказує і значення співвідношення i_d/nFC = $(1{,}0–3{,}0)\cdot10^{-3}$ см/с для стаціонарних швидкостей поляризації, яке співвимірне з константою дифузії $\chi = D/\delta$, що характеризує спосіб доставки електроактивних часток до поверхні електрода. Характер залежності $i_p/V^{1/2}$ від $V^{1/2}$ дозволяє зробити висновок про дифузійний контроль електро-

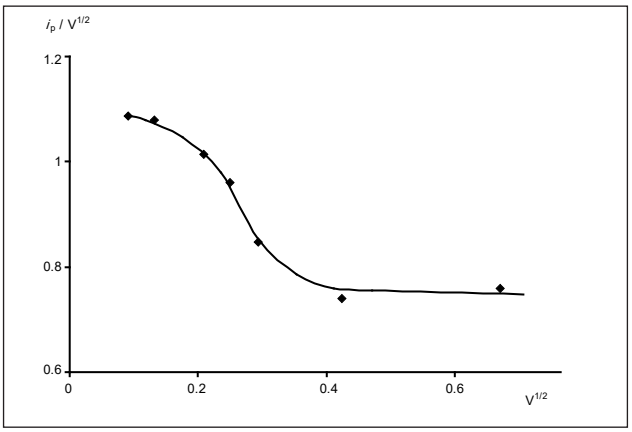


Рис. 5. Залежність ip/$V^{1/2}$ від $V^{1/2}$ для процесу електровідновлення іонів гадолінію в розплаві CsCl-KCl-NaCl на срібному електроді за 823 K. C ($GdCl_3$) = $3{,}5\cdot10^{-4}$ моль/см³. Електрод порівняння – скловуглець

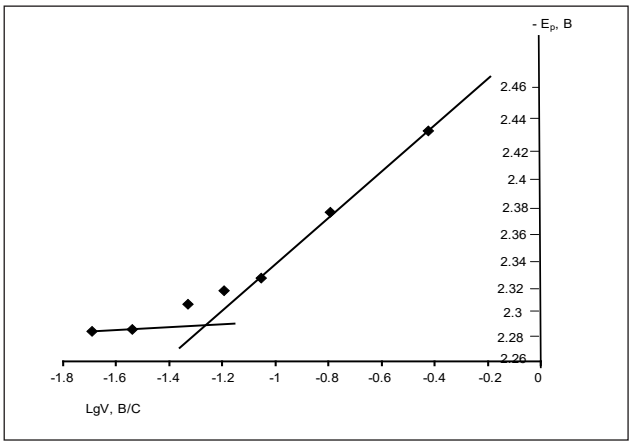


Рис. 6. Графік залежності E_p від lgV для електровідновлення іонів гадолінію ($Gd^{3+} \rightarrow Gd^0$) на вольфрамовому електроді в розплаві NaCl-KCl-$GdCl_3$-NaF за 973 K. C ($GdCl_3$) = $3{,}5\cdot10^{-4}$ моль/см³, C (NaF) = $1{,}5\cdot10^{-4}$ моль/см³, катод – W, Електрод порівняння – скловуглець

дного процесу. Як видно з розрахункових даних (рис. 3), за швидкості поляризації 0,01–0,1 В/с співвідношення $i_p/V^{1/2} – V^{1/2}$ залишається сталим.

Для визначення кількості електронів, які переносяться в електродному процесі, виконано аналіз стаціонарних вольтамперних кривих за рівнянням Гейровського-Ільковича [6, с. 129; 7, с. 234]. Використання цього рівняння виправдано нижчезазначеним: по-перше, експериментальна стаціонарна вольтамперна крива має S-подібну форму; по-друге, у розплаві міститься лише окиснена форма; по-третє, металевий гадоліній, який виділився, може розчинятися в хлоридному розплаві, що містить іони $GdCl_6^{3-}$. Під час аналізу вольтамперних кривих за рівнянням Гейровского-Ільковича в координатах $E – lg[i/(i_d – i)]$ отримано значення $n = 3,1$.

Значення відношення струмів піків I_{pa} і I_{pc} за електровідновлення на вольфрамовому електроді до швидкостей поляризації 0,1 В/с близьке до 1,0, що є характерним для оборотного електродного процесу.

Розраховані за загальновідомими діагностичними критеріями з напівширини піків $(E_{p/2} – E_p = 2,2RT/nF)$ значення числа електронів, які переносяться в електродному процесі, близькі до трьох для інтервалу швидкостей поляризації до 0,1 В/с. Збільшення швидкості поляризації приводить до збільшення ширини хвилі. Під час аналізу напівширини піків для швидкостей поляризації $V > 0,1$ В/с за діагностичними критеріями Мацуди-Аябе $E_{p/2} - E_p = 1,857\frac{RT}{\alpha n_\alpha F}$ [6, с. 133; 7, с. 238] одержали значення $\alpha n_\alpha = 1,4–1,6$.

Отже, електрохімічне відновлення хлоридних комплексних іонів гадолінію на вольфрамовому електроді в стаціонарних і нестаціонарних умовах поляризації за швидкості поляризації до 0,1 В/с у хлоридних розплавах лімітується стадією дифузійної доставки і за $V > 0,5$ В/с (нестаціонарні умови поляризації) – швидкістю переносу заряду.

Виходячи з даних [5, с. 46] щодо будови хлоридних розплавів, до складу яких входять іони гадолінію, електровідновлення $GdCl_6^{3-}$ на вольфрамовому електроді можна представити таким рівнянням реакції: $GdCl_6^{3-} + 3e = Gd + 6Cl^-$.

Виконано розрахунок коефіцієнта дифузії для комплексних іонів $GdCl^{63-}$ на основі такого співвідношення:

$$I_p = 0,446\frac{F^{3/2}}{R^{1/2}T^{1/2}}n^{3/2}C_{ox}D_{ox}^{1/2}V^{1/2}.$$

Коефіцієнт дифузії іонів $GdCl_6^{3-}$ розраховано для інтервалу швидкостей поляризації, коли значення $i_p/V^{1/2}$ є сталим і електродний процес є оборотним. Розраховані значення коефіцієнта дифузії іонів $GdCl_6^{3-}$ $(0,9 \pm 0,2)\cdot10^{-5}$ см^2/с мають один порядок із такими для іонів гадолінію в евтектичному розплаві KCl-LiCl [8, с. 49].

Механізм електровідновлення трихлориду гадолінію на вольфрамовому і срібному електродах за 823 К. Прямопропорційна залежність струму піка від концентрації $GdCl_3$ у досліджуваному розплаві на вольфрамовому і срібному електродах із використанням скловуглецевого електрода порівняння і значення співвідношення $i_d/nFC = (0,2–0,4)\cdot10^{-3}$ см/с, яке є співвимірним із величиною дифузійної константи χ, свідчить про дифузійний контроль електрохімічного відновлення гадолінію за даних (нестаціонарних) режимів поляризації.

На рис. 4 і 5 наведено залежності відношення $i_p/V^{1/2}$ від $V^{1/2}$ для процесу електровідновлення Gd^{3+} на вольфрамовому і срібному електродах відповідно (щодо скловуглецевого електрода порівняння) в евтектичному розплаві K,Na,Cs|Cl. За нестаціонарного режиму поляризації електрода до швидкостей розгортки потенціалу 0,1 В/с спостерігається квазіоборотний процес. За подальшого збільшення швидкості розгортки співвідношення $i_p/V^{1/2}$ прямує до сталого значення, що вказує на перехід до необоротного характеру стадії переносу заряду.

На графіку залежності $E_p – lgV$ зазначено несталість E_p від швидкості поляризації в інтервалі (0,01–0,1) В/с і зміщення потенціалу електровідновлення іонів гадолінію в область негативних значень із ростом швидкості розгортки потенціалу ($V > 0,2$ В/с), що свідчить про зміну характеру електродного процесу.

Розрахунок числа електронів, які переносяться в електродному процесі, для швидкостей поляризації в інтервалі $V = (0,01–0,05)$ В/с, коли процес оборотний, виконували з даних аналізу нестаціонарних вольтамперограм за рівнянням:

$$\Delta E = -\frac{2,2RT}{nF} \qquad (1)$$

За швидкостей поляризації > 0,2 В/с під час переходу до необоротного процесу значення αn_α розраховували за рівнянням Мацуди-Аябе:

$$\Delta E = -\frac{1,857RT}{\alpha n_\alpha F} \qquad (2)$$

З даних нестаціонарних вимірювань в умовах, коли електродний процес оборотний ($V < 0,1$ В/с), було розраховано коефіцієнт дифузії іонів гадолінію з використанням рівняння Рендлса-Шевчика [6; 7]:

$$I_p^c = 0,4463F^{3/2}R^{-1/2}T^{-1/2}n^{3/2}ACD^{1/2}V^{1/2} \qquad (3)$$

(I_p^c – струм катодного піка, А; A – площа зануреної частини електрода, см^2; C – концентра-

ція трихлориду гадолінію в розплаві, моль/см^3; D – коефіцієнт дифузії, см^2/с; V – швидкість розгортки потенціалу, В/с).

Особливості електрохімічного відновлення гадолінію за зміни аніонного складу електроліту. У хлоридних розплавах іони гадолінію існують у вигляді комплексних іонів $GdCl_6^{3-}$, а в хлоридно-фторидних розплавах залежно від концентрації фторид-іонів можливе утворення змішаних комплексів складу $GdFCl_5^{3-}$, $GdF_2Cl_4^{3-}$, $GdF_3Cl_3^{3-}$, $GdF_4Cl_2^{3-}$, GdF_5Cl^{3-} і GdF_6^{3-}. Введення F-іонів у хлоридний розплав приводить до розтягування хвиль на катодній і анодній гілках вольтамперограм уздовж осі потенціалів. З ростом концентрації фторид-іонів спостерігається зникнення хвилі $Gd^{3+} \rightarrow Gd^0$. Подальші дослідження показали, що за збільшення швидкості поляризації відбувається зміна значення потенціалу відновлення електроактивної частки. Воно зсувається в область більш негативних значень. Хвиля відновлення іонів гадолінію водночас зміщується в більш негативну область потенціалів, зливаючися із хвилею розкладання фонового електроліту. Наявне на вольтамперних кривих розширення катодної хвилі розряду $Gd^{3+} \rightarrow Gd^0$, на наш погляд, може свідчити про те, що у відновленні беруть участь кілька електрохімічно активних часток із близькими потенціалами відновлення.

Наведені вище вольтамперні криві, зняті на вольфрамовій основі, та їхній аналіз дозволяють дійти висновку, що зростання C (NaF) у розплаві практично не впливає на струм піка хвилі відновлення гадолінію. Значення співвідношення $i_p/V^{1/2}$ у широкому інтервалі швидкостей поляризації є сталим для електровідновлення іонів гадолінію в хлоридно-фторидному розплаві на вольфрамі.

Із графіка залежності $E_p - lgV$ (рис. 6) видно несталість потенціалу залежно від швидкості поляризації в інтервалі (0,02–0,5) В/с і зміщення потенціалу електровідновлення іонів гадолінію в область негативних значень із ростом швидкості розгортки потенціалу (V > 0,2 В/с), що свідчить про зміну характеру електродного процесу.

Залежність потенціалу відновлення іонів гадолінію від концентрації фторид-іонів обумовлена зміною будови комплексних іонів гадолінію, склад яких змінюється від хлоридних до змішаних хлоридно-фторидних комплексів. Координація іонів гадолінію зі фторид-іонами під час титрування фторидом натрію визначає зміни в процесі електровиділення комплексних іонів гадолінію. Введення фторид-іонів у розплав приводить до стабілізації в ньому комплексних іонів GdF_6^{3-}.

Вивільнені F-іони в результаті розряду таких комплексів на електроді залишаються біля поверхні катода, що приводить, у свою чергу, до утворення комплексів із ще більшим заміщенням за F-іонами. Даний факт, на наш погляд, є причиною розтягування хвилі відновлення гадолінію по осі потенціалів. У результаті, за великого надлишку F-іонів утворюються комплексні іони GdF63.

Висновки.

1. Під часи електровідновлення хлоридних комплексів гадолінію в еквімольному KCl-NaCl (973 K) і евтектичному KCl-NaCl-CsCl (823 K) розплавах срібний і алюмінієвий електроди взаємодіють із гадолінієм, який виділяється. На скловуглевому електроді спостерігається утворення сполук карбону з гадолінієм. Вольфрамовий електрод є індиферентним електродним матеріалом.

2. Електровиділення металевого гадолінію з галогенідних розплавів на всіх електродах є первинним електрохімічним процесом і відбувається за більш позитивних потенціалів, ніж потенціали розкладу фонового електроліту. Електровідновлення хлоридних комплексів гадолінію за стаціонарних і нестаціонарних режимів поляризації до $V < 0{,}1$ В-с$^{-1}$ лімітується стадією дифузії, а за вищих швидкостей розгортки потенціалу швидкість визначає стадія переносу заряду.

3. Додавання фторид-іонів до хлоридного розплаву приводить до утворення змішаних хлоридно-фторидних і фторидних комплексів гадолінію. За стаціонарних умов поляризації спостерігається перехід від оборотного (за електровідновлення хлоридних комплексів) до необоротного (за електровідновлення фторидних комплексів) процесу.

4. Запропонований механізм електровідновлення гадолінію в галогенідних розплавах дозволить обґрунтовано підійти до вирішення питання електрохімічного синтезу його боридів і силіцидів.

Список літератури:

1. Зеликман А., Коршунов Б. Металлургия редких металлов. М.: Металлургия, 1991. 432 с.

2. Зарецкий А., Иванова Т. Промышленные технологии и инновации. Санкт-Петербург: ООО «Питер-Пресс», 2014. 480 с.

3. Wildgoose G., Giovanelli D., Lawrence N., Compton R.High-Temperature Electrochemistry: A Review. Electroanalysis. 2004. V. 16. P. 421–433.

4. Малишев В. Високотемпературна електрохімія та електроосадження металів IV–VI А груп і їх сполук в іонних розплавах. Київ: Університет «Україна», 2004. 423 с.

5. Малишев В., Ускова Н., Шахнін Д., Риженко О. Будова й електрохімічна поведінка розплавлених галогенідних систем, що містять йони гадолінію. Металургія. Збірник наукових праць. Запоріжжя: ЗДІА, 2016. Вип. 2 (36). С. 43–48.

6. Галюс З. Теоретические основы электрохимического анализа; пер. с англ. М.: Мир, 1974. 552 с.

7. Плэмбек Д. Электрохимические методы анализа; пер. с англ. М.: Мир, 1985. 496 с.

8. Кушхов Х., Узденова А., Салех М., Узденова Л. Исследование электровосстановления ионов гадолиния на различных электродах в расплаве KCl-NaCl-CsCl при 823 К. Расплавы. 2014. № 3. С. 43–54.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОВОССТАНОВЛЕНИЯ ИОНОВ ГАДОЛИНИЯ В ГАЛОГЕНИДНЫХ РАСПЛАВАХ

Проведено исследование электровосстановления гадолиния в галогенидных расплавах. Доказана инертность материала электродов к гадолинию. Установлено, что электровыделение гадолиния из галогенидных расплавов является первичным электрохимическим процессом. Изучены особенности электрохимического восстановления гадолиния при изменении анионного состава электролита.

Ключевые слова: *гадолиний, электровосстановление, расплав, электрод, механизм.*

STUDY OF GADOLINIUM IONS ELECTROREDUCTION IN HALIDE MELTS

A study of the electroreduction of gadolinium in halide melts was carried out. The inertness of the electrodes material to gadolinium was proven. It was established that the electrodeposition of gadolinium from halide melts is the primary electrochemical process. The specific features of the gadolinium electroreduction with changing anionic composition of the electrolyte were studied.

Key words: *gadolinium, electrodeposition, melt, electrode, mechanism.*

УДК 541.135.3:546.26

Малышев В.В.
Открытый международный университет развития человека «Украина»,
Институт общей и неорганической химии НАН Украины

Шахнин Д.Б.
Открытый международный университет развития человека «Украина»

Косенко В.А.
Открытый международный университет развития человека «Украина»

Смирнов В.И.
Открытый международный университет развития человека «Украина»

ЭЛЕКТРОВОССТАНОВЛЕНИЕ КОМПЛЕКСОВ ВОЛЬФРАМА И ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЕ ВОЛЬФРАМА В ХЛОРИДНОМ РАСПЛАВЕ

Методами циклической вольтамперометрии, хронопотенциометрии и потенциостатического электролиза изучен механизм электровосстановления $K_3W_2Cl_9$ в эквимолярном расплаве KCl-NaCl. Восстановление осуществляется в две стадии, осложненные реакцией диспропорционирования W_2^{6+}/ W^{3+}. Рассчитаны коэффициенты диффузии, числа переноса и количество электронов, участвующих в различных стадиях процесса. Изучено электроосаждение вольфрама на неэлектропроводящие материалы из хлоридных расплавов.

Ключевые слова: *электровосстановление, электроосаждение, вольфрам, комплексы вольфрама, хлоридный расплав,*

Постановка проблемы. Тугоплавкие металлы, в частности молибден и вольфрам, являются жаропрочными, жаростойкими и твердыми, а при содержании малых количеств примесей углерода, кислорода и азота – пластичными. Механические свойства тугоплавких металлов в значительной мере зависят от их чистоты. Эти металлы имеют большое значение для современной науки и техники. Применение гальванопокрытий тугоплавкими металлами является одним из наиболее распространенных методов защиты изделий от коррозии, повышения их износостойкости, электропроводности, жаропрочности, поверхностной твердости. Электровыделение вольфрама из водных, водно-органических и органических растворов не нашло практического применения, поскольку качество осадков и сложность технологий не удовлетворяют условиям производства. Одним из наиболее перспективных методов получения вольфрама, особенно при нанесении покрытий, является, очевидно, метод осаждения из расплавов.

Анализ последних исследований и публикаций. Электрохимическое поведение галогенидных комплексов вольфрама изучали в различных расплавах с использованием разнообразных методов электрохимического анализа [1, с. 768; 2, с. 2528; 3, с. 3; 4, с. 520; 5, с. 1108]. В качестве фонового электролита авторы использовали в основном эвтектическую смесь *LiCl-KCl,* являющуюся не совсем практичной ввиду значительной гигроскопичности. Отличительной особенностью этих расплавов является присутствие в них вольфрама в виде широкого ассортимента частиц, начиная от простых мономерных WCl_6, WF_6 до сложных полимерных W_6Cl_{12}. В отличие от хрома и молибдена, вольфрам не образует мономерных трехвалентных анионов типа WCl_6^{3-} [1, с. 769; 2, с. 2529]. В этом случае образуются димерные анионы $W_2Cl_9^{3-}$, содержащие W^{3+}, что отражает тенденцию этого металла к образованию соединений со связью «металл – металл», как было отмечено нами при изучении галогенидно-оксидных и оксидных [5, с. 1109, 6, с. 38] расплавов.

Постановка задачи. Цель статьи – изучить электрохимическое поведение галогенидных вольфрамовых частиц в расплавах галогенидов щелочных металлов применительно к эквимо-

лярному расплаву *KCl-NaCl* и обосновать возможность его применения для электроосаждения вольфрама и синтеза соединений на его основе.

Изложение основного материала исследования. Механизм электровосстановления $K_3W_2Cl_9$ в эквимолярном расплаве *KCl-NaCl* изучен методами циклической вольтамперометрии, хронопотенциометрии и потенциостатического электролиза. Методики эксперимента описаны ранее в работе [5, с. 1111].

Вольтамперометрические исследования. На вольтамперограмме расплава *KCl-NaCl-*$K_3W_2Cl_9$ наблюдали две волны восстановления. Первая – с растянутым катодным пиком при потенциале – 0,36 В соответствовала необратимой стадии ввиду отсутствия анодного пика при обратной развертке. При дальнейшей катодной развертке появлялся второй катодный пик при потенциале – 0,68 В с соответствующим анодным пиком при потенциале – 0,59 В.

Потенциостатический электролиз на платиновых пластинках был проведен при – 0,33 и – 0,65 В относительно хлорсеребряного электрода сравнения при температуре 973 К и концентрации $K_3W_2Cl_9$ в расплаве 10^{-6} моль/см^3. Согласно данным рентгенофазового анализа, в первом случае несцепленный черный осадок не содержал металлического вольфрама, а во втором – осаждался металлический вольфрам.

Результаты потенциостатического электролиза при потенциале – 0,33 В показали, что первой стадии электровосстановления соответствует около 2,9 моль электронов на моль $K_3W_2Cl_9$. Суммарному процессу электровосстановления (потенциостатический электролиз при потенциале –0,65 В) соответствует около 6,1 моль электронов на моль $K_3W_2Cl_9$.

Как следует из зависимостей измеряемых параметров, величина потенциала катодного пика второй волны $E^c_{p(2)}$ практически не зависит от скорости развертки (рис. 1) и концентрации $K_3W_2Cl_9$.

Величина разности потенциалов катодного пика и полупика первой волны составляет 0,055–0,064 В (α_n = 2,45…2,82). В диапазоне (0,4–0,9)i_p логарифмическая зависимость E – lg $[(i_p^c(1) - i)/i]$ имеет линейный характер с углом наклона 14,52 при температуре 973 К, что соответствует значению α_n = 2,80. Эти результаты подтверждают необратимый характер процесса электровосстановления. Величина разности потенциалов катодного пика и полупика второй волны $E_p^c(2) - E_{p/2}^c{}_{(2)}$ возрастает с увеличением скорости развертки от 56 мВ при V = 20 мВ/с до 135 мВ при V = 0,1 В/с.

Величины катодных пиковых токов обеих волн $i^p_{c(1)}$ и $i^p_{c(2)}$ линейно возрастают, исходя из нулевых значений (рис. 2). Значения $i_p/V^{1/2}$ остаются практически постоянными с увеличением скорости развертки (рис. 3). Эти результаты показывают, что электродный процесс контролируется диффузией.

Соответствующие значения потенциалов анодного пика $E^a_{p(2)}$ смещаются в положительную область с увеличением скорости развертки на 60 мВ для десятикратного ее увеличения.

Значения отношений величин токов катодных пиков второй и первой волн остаются практически постоянными и составляют 0,56–0,63 в исследуемом диапазоне скоростей развертки.

С увеличением температуры расплава до 1023 К они несколько уменьшаются до значений 0,51–0,59. Значения отношений величин токов анодного и катодного пиков для второй волны $i^a_{p(2)}/i^c_{p(2)}$ больше единицы и с увеличением скорости развертки потенциала возрастают в интервале 1,02–1,46.

Логарифмическая зависимость $E - lg\,[(i^c_{p(2)} - i)/i]$ в диапазоне (0,4–0,9)i_p также имеет линейный характер с углом наклона 10,89 при температуре 973 К, что соответствует значению α_n = 2,10.

Результаты вольтамперометрических исследований при уменьшении концентрации $K_3W_2Cl_9$ в интервале 10-6–10^{-7} моль/см^3 и скорости развертки потенциала 0,1 В/с показали, что значение $i^c_{p(2)}/i^c_{p(1)}$ возрастает с уменьшением концентрации. Причем это возрастание становится более заметным в более разбавленных расплавах. Результаты

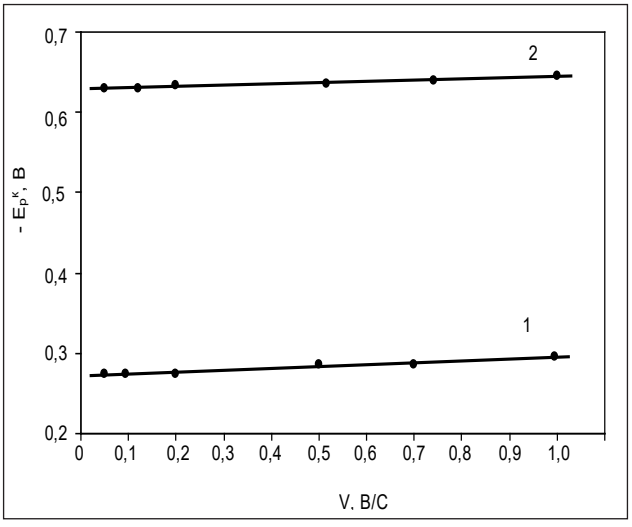


Рис. 1. Зависимость потенциалов катодных пиков в расплаве KCl-NaCl – $5\cdot10^{-6}$ моль/см^3 $K_3W_2Cl_9$ от скорости поляризации для первой (1) и второй (2) волн электровосстановления

вольтамперометрических исследований при увеличении концентрации $K_3W_2Cl_9$ в интервале 10^{-6}–10^{-7} моль/см^3 при скорости развертки потенциала 0,1 В/с показали, что значение $i^c_{p(2)}/i^c_{p(1)}$ уменьшается с увеличением концентрации. Причем это уменьшение становится более заметным для более высоких концентраций. Эти факты, по-видимому, соответствуют положению, при котором при низких концентрациях $K_3W_2Cl_9$ вторая стадия является определяющей, в то время как при высоких концентрациях определяющей становится первая стадия.

Хронопотенциометрические исследования. Хронопотенциометрические зависимости получали при плотности тока 2,5–35,0 мА/см^2. При низких ее значениях (менее 7,5 мА/см^2) наблюдали одну волну восстановления, при более высоких значениях плотности тока отчетливо наблюдали и вторую волну.

Уравнение Санда для первой стадии процесса имеет вид [6, с. 237]:

$$i \cdot \tau^{0,5} = 0,5\pi^{0,5} \cdot n \cdot F \cdot A \cdot D^{0,5} \cdot C, \qquad (1)$$

где i – плотность тока, n – количество электронов, принимающих участие в электродном процессе, F – постоянная Фарадея, A – постоянная уравнения Санда, D – коэффициент диффузии, C – концентрация деполяризатора, τ – переходное время.

С использованием экспериментальных данных по уравнению (1) был рассчитан коэффициент диффузии ионов $W_2Cl_9^{3-}$ – (1,6 ±0,2)·10^{-5} см^2·с$^{-1}$ при температуре 973 К. Зависимость E – τ для первой стадии процесса соответствует отношению:

$$E = \frac{2,3R \cdot T}{\alpha \cdot n \cdot F} \cdot \log\left(\frac{n \cdot F \cdot C \cdot K}{i}\right) + \frac{2,3R \cdot T}{\alpha \cdot n \cdot F} \cdot \log\left(\frac{\tau^{0,5} - t^{0,5}}{\tau^{0,5}}\right), \qquad (2)$$

где R – универсальная газовая постоянная, α – коэффициент переноса, K – условная гетерогенная константа скорости процесса восстановления при потенциале, равном нулю относительно платинового электрода сравнения; t – время с момента начала поляризации электрода. При температуре 973 К значения, рассчитанные из угловых коэффициентов зависимости E – log $[(\tau^{1/2} - t^{1/2})/\tau^{1/2}]$, составляют 2,96–3,21. Эти величины совпадают со значениями, рассчитанными из вольтамперометрических данных. При t = 0 выражение (2) принимает вид

$$E = \frac{2,3R \cdot T}{\alpha \cdot n \cdot F} \cdot \log\left(\frac{n \cdot F \cdot C \cdot K}{i}\right). \qquad (3)$$

Используя уравнение (3), можно определить значение константы скорости K = 5,4·10^{-5} см/с.

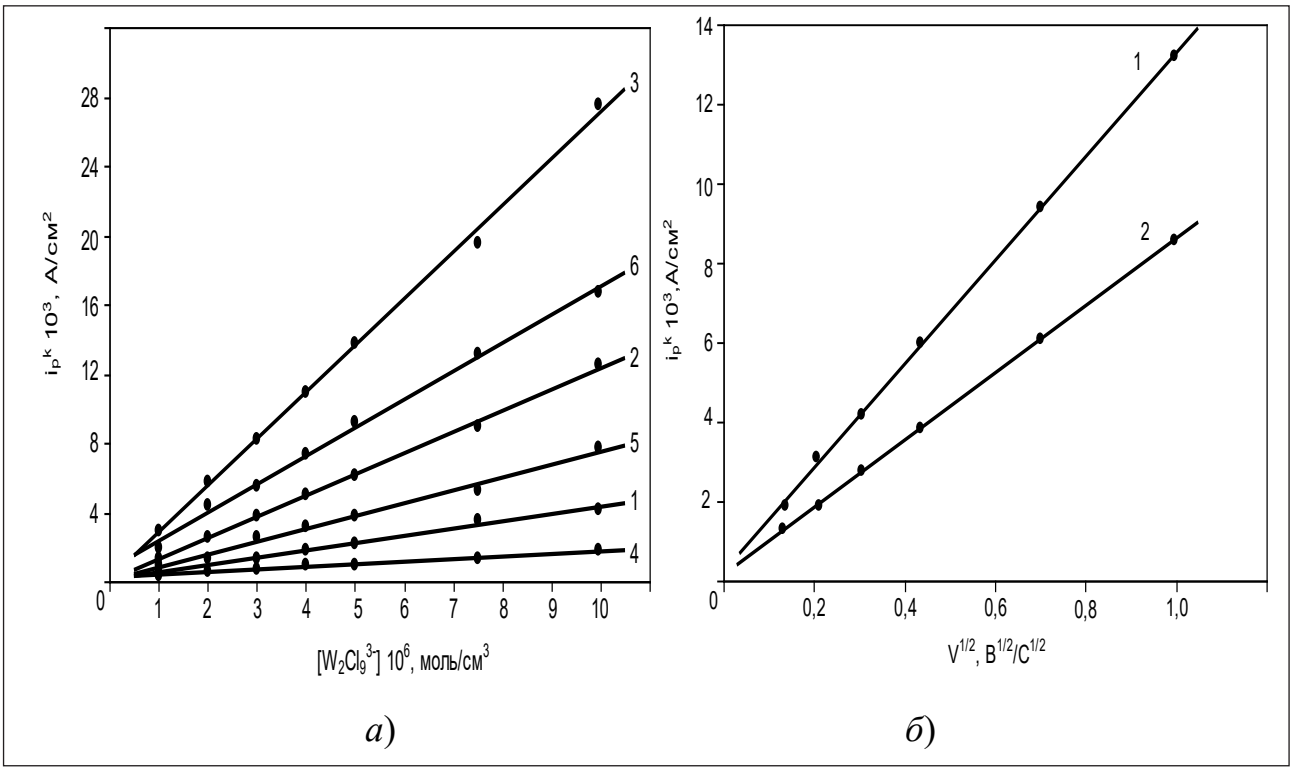


Рис. 2. Зависимость величины катодных пиковых токов в расплаве KCl-NaCl-$K_3W_2Cl_9$ от концентрации $K_3W_2Cl_9$ (а) и в расплаве KCl-NaCl – 5·10^{-6} моль/см^3 от скорости поляризации (б): а) кривые 1–3 – первые волны электровосстановления; кривые 4–6 – вторые; кривые 1, 4 – скорость поляризации 0,02 В/с; кривые 2, 5 – 0,2 В/с; кривые 3, 6 – 1,0 В/с; б) кривая 1 – первая волна электровосстановления, кривая 2 – вторая волна

Как было показано в работе [6, с. 346], уравнение Санда для второй стадии выглядит следующим образом:

$$(\tau_1 + \tau_2)^{0,5} - \tau^{0,5} = \frac{\pi^{0,5} \cdot n \cdot F \cdot A \cdot D^{0,5} \cdot C}{2i}, \quad (4)$$

где τ_1 и τ_2 – переходное время первой и второй стадии электродного процесса соответственно. Линейная зависимость $1/i$ относительно $[(\tau_1 + \tau_2)^{1/2} - \tau_1^{1/2}]$ для второй стадии подтверждает диффузионную контролируемость электродного процесса. Результаты измерений также показали, что значение отношений $i\tau^{0,5}$ в области концентраций $K_3W_2Cl_9$ $5 \cdot 10^{-7}$–10^{-6} моль/см^3 увеличивается с возрастанием концентрации. Такое поведение переходного времени соответствует описанному выше поведению плотностей пиковых токов при вольтамперометрическом изучении.

Таким образом, результаты исследования электрохимического поведения $K_3W_2Cl_9$ в расплаве KCl-NaCl при 973–1023 К, проведенного методами циклической вольтамперометрии и хронопотенциометрии, коррелируют между собой и позволяют сделать вывод, что электровосстановление димерных комплексов вольфрама осуществляется в две стадии:

$$W_2^{6+} + 3e \Rightarrow W^{3+} + W\ , \quad (5)$$

$$W^{3+} + 3e \Rightarrow W\ . \quad (6)$$

Первая трехэлектронная стадия (5) представляет необратимый диффузионно-контролируемый процесс, вторая (6) – соответствует квазиобратимому диффузионно-контролируемому процессу. При низких концентрациях $K_3W_2Cl_9$ определяющей является вторая стадия, а при высоких – первая.

Экспериментальные данные отражают замедленное взаимодействие ионов $W_2Cl_9^{3-}$ с анионами Cl^- с образованием мономерных ионов WCl_6^{3-}:

$$W_2Cl_9^{3-} + 3Cl^- \Rightarrow 2WCl_6^{3-}. \quad (7)$$

Поэтому отличительной особенностью галогенидных вольфрамсодержащих расплавов является наличие в них димерных анионов, что отражает тенденцию этого металла к образованию координационных соединений со связью «металл – металл». Возможность образования соединений такого типа подтверждается изучением поведения вольфрама в расплавах хлоридов щелочных металлов методами спектроскопии комбинационного рассеяния и электрохимического анализа [7, с. 530].

Электроосаждение вольфрама на неэлектропроводящие материалы из хлоридных расплавов. При изучении электрохимического поведения галогенидных димерных комплексов вольфрама в расплаве KCl-NaCl-$K_3W_2Cl_9$ было обнаружено, что при электроосаждении вольфрама металлическое покрытие осаждается и на неэлектропроводные конструкционные материалы (керамику и кварц). Особенно это явление становилось заметным при их соприкосновении с катодом. Покрытия характеризовались значительной неравномерностью. Разъяснение этого явления потребовало отдельного изучения предэлектролизной подготовки поверхности керамики и кварца. Эксперименты проводили в герметичной кварцевой ячейке. Электролитом служил расплав KCl-NaCl-$K_3W_2Cl_9$. Исследуемые образцы представляли собой пластинки из плавленого кварца, оксида циркония (IV) и алунда Al_2O_3 площадью 3–5 см^2 на вольфрамовом токоподводе. В ячейке поддерживали атмосферу аргона.

При выдержке образцов оксида циркония (IV) и алунда в расплаве без тока они постепенно покрывались металлическим проводящим слоем. Слой характеризовался неравномерностью, хотя на отдельных участках его толщина составляла до 5–10 мкм (рис. 4). Рентгеноструктурный анализ показал наличие в слое металлического вольфрама. На образцах кварца металлической фазы не обнаружено, изменений они практически не претерпевали. Снижение температуры с 1023 ниже 973 К значительно замедляет образование осадка.

Образцы, металлизированные без тока, подвергали последующему электролизу при температуре 1023 К и катодной плотности тока 0,15–0,10 А/см^2. Причем последнюю рассчитывали на всю поверхность образца с учетом вольфрамового токоподвода. При этом осаждалось вольфрамовое покрытие. Неметаллизированные образцы, как и

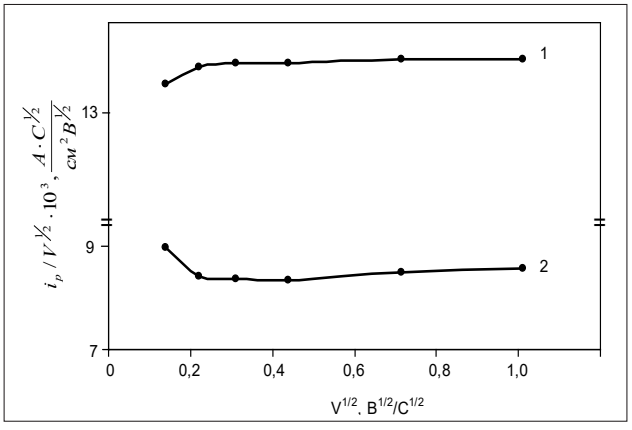


Рис. 3. Зависимость величины $i_p/V^{1/2}$ от скорости поляризации $V^{1/2}$ в расплаве KCl-NaCl – $5 \cdot 10^{-6}$ моль/см^3 $K_3W_2Cl_9$, для первой (1) и второй (2) волн электровосстановления

кварцевые, покрывались металлической пленкой лишь в месте контакта с вольфрамовым токоподводом.

Анализ экспериментальных данных позволяет предположить следующий механизм образования первичного проводящего слоя. Как было показано нами, в расплавах $KCl\text{-}NaCl\text{-}K_3W_2Cl_9$ вольфрам находится преимущественно в виде ионов *W (III)*. В хлоридном расплаве они находятся в равновесии с вольфрамом. При появлении в хлоридном расплаве ионов кислорода в результате растворения кислородсодержащей керамики возможно протекание реакции диспропорционирования ионов *W (III)* на металл и оксианионы более высокой валентности:

$$2\ W^{3+} + 4\ O^{2-} \Leftrightarrow W + WO_4^{2-}, \quad (8)$$

$$W_2^{6+} + 4\ O^{2-} \Leftrightarrow W + WO_4^{2-}. \quad (9)$$

Выводы.

1. Корреляция электрохимических методов исследования подтверждает двустадийность электровосстановления димерных анионов в хлоридном расплаве.

2. Показана перспективность расплава $KCl\text{-}NaCl\text{-}K_3W_2Cl_9$ для осаждения вольфрамовых покрытий.

Список литературы:

1. Katagiri A., Suzuki M., Takehara Z. Electrodeposition of Tungsten in $ZnBr_2$-NaBr and $ZnCl_2$-NaCl Melts. J. Electrochem. Soc. 1991. Vol. 138. P. 767–773.

2. Sequeira C.A.C. Electroanalytical Study of the Reduction of Chloride Complexes in Molten LiCl-KCl Eutectic. J. Electrochem. Soc. 1993. V. 140. P. 2526–2531.

3. Malyshev V., Gab A., Uskova N., Soloviev V. Chemistry and Electrochemistry of Tungsten-Containing Ionic Melts. Molten Salts. Bulletin. 2004. № 2. P. 1–10.

4. Malyshev V., Gab A., Uskova N., Soloviev V. Structure and Electrochemistry of Tungsten-Containing Ionic Melts. Proceedings of International Symposium of Ionic Liquids in Honour of Marcelle Gaune-Escard. Carry le Rouet, France, June 26–28, 2003. Carry le Rouet, France, 2003. P. 517–532.

5. Шаповал В., Заруцкий И., Малышев В. Механизм образования и разряда ЭХАЧ при электрохимическом синтезе диборида титана в хлоридно-фторидном расплаве. Электрохимия. 1998. Т. 34. № 10. С. 1107–1113.

6. Плэмбек Д. Электрохимические методы анализа; пер. с англ. М.: Мир, 1985. 496 с.

7. Carauntzob G., Hasiotis C., Kontoyannis C. Raman-Spectroscopy Investigations of tungsten-containing chloride melts. Electrochemical Society Proceedings. 1996. Vol. 96–7. P. 530–531.

ЕЛЕКТРОВІДНОВЛЕННЯ КОМПЛЕКСІВ ВОЛЬФРАМУ ТА ЕЛЕКТРООСАДЖЕННЯ ВОЛЬФРАМУ В ХЛОРИДНОМУ РОЗПЛАВІ

Методами циклічної вольтамперометрії, хронопотенціометрії та потенціостатичного електролізу вивчено механізм електровідновлення $K_3W_2Cl_9$ в еквімолярному розплаві KCl-NaCl. Відновлення здійснюється у дві стадії, ускладнені реакцією диспропорціонування $W_2^{6+}/\ W^{3+}$. Розраховано коефіцієнти дифузії, числа переносу та кількість електронів, що беруть участь на різних стадіях процесу. Вивчено електроосадження вольфраму на неелектропровідні матеріали із хлоридних розплавів.

Ключові слова: *електровідновлення, електроосадження, вольфрам, комплекси вольфраму, хлоридний розплав.*

ELECTROREDUCTION OF TUNGSTEN COMPLEXES AND TUNGSTEN ELECTROREDUCTION IN CHLORIDE MELT

The mechanism of $K_3W_2Cl_9$ electroreduction in equimolar KCl-NaCl melt was studied by cyclic voltammetry, chronopotentiometry and potentiostatic electrolysis methods. Electroreduction is realized in two stages, complicated by disproportional reaction $W_2^{6+}/\ W^{3+}$. Diffusion coefficients, numbers of transfer and numbers of electrons which take part in different stages of process were calculated. Tungsten electroreduction on nonconductive materials from ionic melts was studied.

Key words: *electroreduction, electrodeposition, tungsten, tungsten complexes, chloride melts.*

УДК 661.18:637.115

Онищенко В.О.
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

Стороженко Д.О.
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

Сененко Н.Б.
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

Бунякіна Н.В.
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

ЗАСІБ КИСЛОТНИЙ ДЛЯ МИТТЯ ТА ДЕЗІНФЕКЦІЇ ДОЇЛЬНИХ АПАРАТІВ МЕТОДОМ БЕЗРОЗБІРНОЇ ЦИРКУЛЯЦІЙНОЇ МИЙКИ

Розроблений і представлений кислотний засіб для мийки та дезінфекції обладнання підприємств харчової промисловості. Запропонована рецептура суміші та методика її приготування виключає застосування прекурсорів, а також надає можливість використання розчинів кислот дозволених концентрацій і водопровідної води. Засіб рекомендований для мийки внутрішніх поверхонь доїльних апаратів, різних ємностей для транспортування молока, трубопроводів, зокрема методом безрозбірної циркуляційної мийки (Clean In Place – CIP-мийки) після обробки лужним розчином. Внаслідок низької собівартості є доступним не тільки для великих підприємств молочної промисловості, але й для малих ферм. Крім того, основними перевагами запропонованого засобу є: висока якість мийки та дезінфекції внутрішніх поверхонь технологічного обладнання молочної промисловості в безрозбірному стані в автоматичному режимі; безпечне використання; відсутність неприємних запахів; можливість використання водопровідної води; доступність сировини та простота приготування.

Ключові слова: *розчин кислотний, pH, доїльні апарати, молочний камінь, собівартість.*

Постановка проблеми. Однією із задач становлення України як успішної держави є розвиток агропромислового сектора, забезпечення населення якісними продуктами харчування. Передумовами успішного просування молочної продукції на ринок у сучасних умовах є її якість, високі смакові властивості та безпека для споживача. Безпеку розуміють як відсутність шкідливих хімічних і біологічних домішок, зокрема, патогенних мікроорганізмів і отруйних продуктів їхньої життєдіяльності, а мікробіологічну стійкість – як потенційну можливість зберігання продукту без псування [1, с. 8, 9]. Особлива увага приділяється сучасним технологіям переробки та виробництва молочної продукції. Тому головним напрямом забезпечення ефективного й економічного розв'язання проблеми миття та дезінфекції технологічного обладнання стало застосування принципу безрозбірної циркуляційної мийки (Clean In Place – CIP мийки) [1, с. 8]. Тут найбільшою проблемою є миття та дезінфекція внутрішніх поверхонь через їхню важкодоступності.

Молочні забруднення мають певні особливості, які визначають специфіку санітарної обробки [2, с. 6, 10, 19]. Саме тому звичайне ополіскування водою і навіть миття миючими засобами недостатні. Необхідно проводити саме санітарну обробку в найкоротший проміжок часу після використання інвентаря, закінчення процесу та звільнення обладнання. У разі безперервної роботи санітарну обробку необхідно проводити після закінчення робочого циклу або через певні інтервали часу, визначені спеціальними інструкціями з обслуговування обладнання та результатами досліджень [2, с. 21; 3, с. 7, 10].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Під час вивчення засобів для миття доїльних апаратів, які пропонує український і світовий ринки,

ми визначили основні пріоритети – якість, безпеку та низьку собівартість. Виробники не наводять концентраційний вміст компонентів сумішей через комерційну таємницю [4–9]. Дослідження авторами цих сумішей указує на досить високу їхню собівартість і низку недоліків, пов'язаних із токсичністю, різкими і неприємними запахами: "Ultra acid" (Франція) – оброблені інгібітором кислоти, інгібітори повторного осадження, ПАР, речовини для контролю піни; "CircoSuper SFM" (Німеччина) – кислотний засіб; «Інтол» (фірма «Росток-Агро. Х», м. Дніпро) – кислотний засіб. Засоби для миття виробництва Франції, Естонії, Швеції й Німеччини мають належну миючу здатність, але високу ціну, що значно підвищує вартість сировини.

Відомі кислотні мийні засоби, які використовують у CIP-мийці для попереднього оброблення технологічного обладнання [10, с. 1]. Вони містять переважно органічні кислоти C_6 – C_{12} з обов'язковим додаванням окиснювачів зі вмістом пероксиду водню, пероксикарбонової кислоти та їх сумішей. У засобах із використанням неорганічних кислот зазначені фосфатна, нітратна, сульфатна кислота, а органічних – молочна, оцтова, оксиоцтова, лимонна, глютамінова, глутанова та глюконова кислоти. Зазначено, що кількість кислоти в розчині попереднього оброблення становить від 0,25 мас.% і не перевищує 10 мас.%, але найбільш рекомендовані зі вмістом кислоти від 0,5 до 1,5 мас.%. Кількість окиснювача в розчині попереднього оброблення становить щонайменше 0,01 мас.% і не перевищує 1 мас.%. Прийнятні кількості окиснювача – від 0,01 до 0,50 мас.% (0,3 мас.% є найбільш бажаним). Оптимальні кількості окиснювача щодо будь-якого кислотного джерела зазвичай – від 1 : 1 до 1 : 10, від 1 : 3 до 1 : 7 або від 1 : 20 до 1 :5 0. Особливо придатні розчини від 0,25 до 10 мас.% фосфатної кислоти зі вмістом 50–5 000 ppm (від 0,005 до 0,5 мас.%) перекису водню. У патенті зроблений акцент на методиці очищення, але аналіз усіх наведених кислотних розчинів визначив їхні спільні недоліки: значну собівартість, наявність різких запахів, що значно погіршують можливість їх застосування на виробництві та здебільшого унеможливлюють використання водопровідної води з допустимою жорсткістю, вони потребують застосування дистильованої води внаслідок можливого утворення осаду, що є неприйнятним. Крім того, така дезінфекція потребує суворого дотримання концентраційних меж, оскільки в разі її заниження та зменшення експозиції може не відбутися повного відмирання бактеріальних клітин, а за занадто високих концентрацій розчину дезінфектанту можлива корозія технологічного обладнання, а також виділення отруйних речовин, шкідливих для здоров'я людини.

Відомий також мийний засіб, де кислотна композиція містить такі складники у вказаних пропорціях: фосфатна кислота – 30,0–50,0%, кислотно-стійкий секвестрант – 2,0–15,0%, стабілізатор – 0,1–2,0%, пероксид – 2,0–20,0%, вода – до 100,0%. Рекомендована в патенті рецептура: фосфатна кислота (81% розчин) – 49,4%, Dequest 2010 (50% фосфонат) – 0,5%, дипіколінова кислота – 0,2%, льодяна оцтова кислота (99,6% золь) – 6,0%, перекис водню (35% золь) – 8,6%, вода – до 100,0% [11, с. 1–3]. Недоліком такого засобу є значна кількість компонентів, а отже, більш складна методика приготування і висока собівартість. Суттєвим недоліком є необхідність використання під час приготування концентрованих розчинів кислот, особливо таких, що мають надзвичайно різкий запах.

Відомі кислотні композиції з антимікробною дією, зазначені в [12, с. 1–3], в якому рекомендовано використання кислих препаратів: а) однієї або більше кислот, вибраних із мурашиної, оцтової, пропіонової, глюконової, молочної, лимонної, глікольової, фосфатної, алкансульфонової, нітратної та сульфатної; б) алкенкарбонової кислоти або алкінкарбонової кислоти, що містить від 8 до 14 атомів вуглецю і принаймні один подвійний або потрійний зв'язок в алкеновому або алкіновому ланцюзі, водночас відповідні ланцюжки вуглецю можуть містити ефір, спирт, альдегід, кетогрупи, а решта (до 100 мас.%) являють собою воду та/або допоміжні речовини, та/або активні речовини для чищення, та/або дезінфекції твердих поверхонь. У висновках зазначено, наприклад, що до фосфатної кислоти потрібно додавати ундецилову кислоту. Недоліком вищезгаданої кислотної композиції є широкий спектр запропонованих кислот, досить дорогих, що значно підвищує собівартість композиції, складність приготування. А суттєвим недоліком є використання фосфатної кислоти, оскільки це спричиняє необхідність застосування тільки дистильованої води як під час приготування засобу, так і під час промивання технологічного обладнання після кислотної обробки, оскільки вода з мінімальною жорсткістю може спричинити утворення осаду.

Подібним є кислотний засіб, рекомендований у [13, с. 1]. Хімічний склад основної композиції: від 1 до 80 мас.% фосфатної кислоти; від

0,1 до 40 мас.% органічної карбонової кислоти; від 0,1 до 40 мас.% розчинника, що містить вуглеводневий ефір або вуглеводневий спирт; від 0,1 до 40 мас.% секвестранту; від 0,1 до 40 мас.% ефірної амінової композиції. На підставі цієї композиції рекомендовані різні варіації кислотних засобів для видалення вуглеводних і білкових відкладень. Очевидними недоліками є значна кількість складних компонентів високої вартості, складність у приготуванні і знову ж таки основою є фосфатна кислота, що спричиняє незручності через необхідність використання дистильованої води як для приготування композиції, так і в процесі мийки.

Кислотний засіб [14, с. 1–3] для очищення молочного та кондитерського обладнання з кислотною реакційною композицією, за описом, здатний видаляти відкладення молока, захищені плівкою коагульованого молочного білка. У винаході рекомендована рецептура концентрату, який потім можна розбавити, щоб утворити розчин бажаної концентрації. Хімічний склад запропонованих концентратів кислотних мийних композицій для одержання в розчині pH від приблизно 1,0 до 1,3: від 10% до 30% органічної кислоти сильнішої, ніж оцтова, і слабшої, ніж мінеральна кислота (лимонна, молочна, винна, мурашина, хлороцтова, дихлороцтова та ін.), від 3% до 10% фосфатної кислоти, від 3% до 10% сульфату лужного металу, від 2% до 10% змочувального агента, сумісного з вищезгаданими інгредієнтами, що реагують із кислотою, та до 100% води. Недоліком запропонованого кислотного мийного засобу є значна кількість складових компонентів, отже, значна собівартість, використання фосфатної кислоти, оскільки необхідне застосування тільки дистильованої води в процесі приготування засобу і в процесі його використання, що значно обмежує можливість його застосування у фермерських господарствах та під час миття технологічного обладнання підприємств молочної галузі.

Насамперед ми створювали рекомендовані розчини, але під час експериментального дослідження їхніх основних фізико-хімічних властивостей було виявлено низку недоліків: різкий запах; невідповідний pH; обмежений термін зберігання, наслідком чого є утворення осадів; неможливість використання для приготування та під час промивання водопровідної води навіть середньої жорсткості. Розчини, які відповідали всім вимогам якості, зазвчиай мали високу собівартість.

Постановка завдання. Метою роботи було створення дешевого кислотного мийного засобу для ефективного миття та дезінфекції внутрішніх поверхонь технологічного обладнання молочної промисловості в безрозбірному режимі (Clean In Place – CIP-мийки).

Головне завдання – розробити рецептуру ефективного кислотного мийного засобу для розчинення відкладень після обробки лужним розчином і дезінфекції технологічного обладнання підприємств молочної промисловості.

Виклад основного матеріалу дослідження. Молочні забруднення мають деякі особливості, які визначають специфіку санітарної обробки [2, с. 21; 3. с. 2, 3]. Забруднення, які залишаються на поверхні обладнання, поділяють на три групи: 1) забруднення від контакту холодного молока з поверхнею (це молочна плівка, основними складниками якої є жир і білок); 2) забруднення, які утворюються після підігрівання молока до 80ºС (в основному м'який осад, що складається з фосфатів кальцію та денатурованого білка); 3) забруднення, які залишаються після теплової обробки молока за температури, вищої за 80ºС. Остання група забруднень – це комплекс сироваткових білків і неорганічних речовин. Вони характеризуються високою міцністю, а з підвищенням температури їхня міцність тільки збільшується. Отже, ступінь міцності та характер забруднення залежать від температури та тривалості обробки молочної сировини. Характер осаду також залежить від кислотності молочної сировини й температури обробки. У разі підвищення кислотності молока кількість осаду збільшується в декілька разів.

Миючі засоби використовують у вигляді розчинів, які повинні мати такі властивості: низький поверхневий натяг, добре змочування, здатність видаляти молочний білок і нерозчинні кальцієві солі, емульгувати залишки жиру, не мати токсичної дії, не викликати корозії обладнання та добре змиватися з поверхні обладнання [2, с. 22, 23].

Оскільки основними компонентами забруднюючих речовин є білки, жири й неорганічні речовини в комплексі з білками, то необхідно, щоб миючі розчини були лужними та кислотними. Білки й жири гідролізуються в сильно лужному середовищі, а комплекси неорганічних речовин розчиняються та видаляються з поверхні обладнання кислотами [2, с. 23; 3, с. 3]. Робочі кислотні розчини засобу повинні мати pH ~ 1,6.

Поставлена задача вирішується тим, що запропонований авторами кислотний мийний засіб складається з нітратної кислоти, хлоридної кислоти і води, що забезпечує високу активність кислотних розчинів, задовільну мийну здатність і дезінфі-

каційні властивості приза невеликих концентрацій. Склад запропонованого нами засобу: кислота нітратна – від 17 мас.% до 23 мас.%, кислота хлоридна – від 3 мас.% до 10 мас.%, вода – до 100%.

У процесі роботи було підтверджено, що для ефективного видалення забруднень необхідно застосовувати кислотні розчини, що мають pH нижче критичного значення 1,8. Доцільно використовувати складні суміші, оскільки вони мають широкий спектр дії та кращий миючий ефект. Використання суміші двох найбільш сильних кислот, які практично не утворюють осадів, стало основою винаходу. Використання суміші розчинів оптимально підібраних концентрацій нітратної та хлоридної кислот дає змогу одержати мийний засіб, який надає низьке значення pH та забезпечує необхідний мийний і дезінфекційний ефект протягом тривалого часу.

Під час підготовки мийного засобу нами було виявлено, що концентрація розчину переважно варіюється залежно від типу обладнання, яке необхідно очистити. Неіржавіюча сталь і скло, з яких виготовлено технологічне обладнання підприємств молочної промисловості, є хімічно інертними до мийного розчину, який має pH у діапазоні від 1,0 до 1,8. Густина запропонованого нами розчину за 20°С становить 1,23–1,27 г/см^3. Розчин прозорий, безбарвний. Оскільки засіб безпінний, його можна використовувати в CIP-мийках під високим тиском.

Авторами було проведено серію дослідів із видалення свіжих (1 доба) та застарілих (1 тиждень) молочних забруднень («молочного каменю»), попередньо витриманих як за 20°С, так і за 80°С (умови лужної обробки [2, с. 34]), з поверхонь у важкодоступних місцях (циліндри з нержавіючої сталі та скла) із застосуванням запропонованого у винаході мийного засобу за температур 20°С, 30°С, 40°С, 50°С, 60°С та 70°С із різним часом експозиції без механічного втручання. Ефективність мийної дії визначали ваговим методом. Було виявлено цілковите видалення забруднень. Найбільша ефективність досягнута в разі нагрівання до 70°С (100% очищення протягом 5 хвилин). Оскільки необхідний термін мийки залежить від маси забруднення, то авторами підтверджується необхідність 25-хвилинної обробки запропонованим мийним засобом.

Під час створення рецептури кислотного розчину було враховано той факт, що хлоридна кислота є прекурсором за певних концентрацій, тому авторами розроблена методика приготування кислотної суміші із загальнодоступного та загальнодозволеного 13%-го розчину хлоридної кислоти. Крім того, пропонується методика приготування кислотної суміші з використанням 51%-го розчину нітратної кислоти.

Собівартість 1 л кислотного засобу для миття і дезінфекції доїльних апаратів методом безрозбірної циркуляційної мийки становить 4 грн.

Перевагами одержаного розчину порівняно з відомими є доступність і низька собівартість складових компонентів, простота приготування, відсутність різких і неприємних запахів з одночасною відповідністю всім вимогам до мийних та дезінфікуючих засобів, можливість використання водопровідної води як для приготування засобу, так і під час його застосування для промивання обладнання.

Методика використання запропонованого миючого розчину є стандартна й енергозберігаюча [2, с. 23, 24]:

– перед миттям обладнання ззовні ополіскують водою зі шланга;

– теплою (кімнатної температури) або холодною водопровідною водою змивають залишки молока та молочних продуктів (тривалість ополіскування залежно від залишків на поверхні обладнання становить 5–7 хв);

– після ополіскування обладнання миють лужним розчином за температури 55–80ºС (тривалість лужного миття залежить від виду обладнання і становить у середньому до 10–15 хв.);

– після миття лужним розчином обладнання споліскують теплою чи гарячою водою до видалення залишків лугу протягом 5–15 хв. Ефективність споліскування перевіряють за наявністю лугу в промивних водах (за фенолфталеїном).

З метою профілактики, а також для дезінфекції та видалення нерозчинних у воді осадів обладнання після споліскування від залишків лужного розчину миють кислотним розчином (температура – 70–85ºС, тривалість – 25–30 хв).

Висновки. Запропоновано кислотний засіб для миття та дезінфекції доїльних апаратів методом безрозбірної циркуляційної мийки. Перевагами запропонованого кислотного засобу та способу його приготування є висока якість мийки та дезінфекції внутрішніх поверхонь технологічного обладнання молочної промисловості в безрозбірному стані в автоматичному режимі; безпека під час використання; відсутність неприємних запахів; можливість використання водопровідної води; доступність сировини; простота приготування; низька собівартість; можливість

застосування як на великих підприємствах молочної промисловості, так і на малих фермах.

Одержаний кислотний засіб дозволяє вирішити проблему миття й дезінфекції технологічного обладнання молочної промисловості в безрозбірному режимі, а також на різних етапах виробництва незалежно від складностей технологічних процесів.

Список літератури:

1. Розробка інструкції щодо технологічної мийки та санітарної обробки обладнання молочних підприємств звіт про НДР: 89.09. (ДР 0109U002638) К.: Технологічний інститут молока та м'яса НАНУ, 2010. 14 с.

2. Шульга Н.М., Млечко Л.А. Санітарія та гігієна: навч. посіб. для студ. ВНЗ. К.: Міносвіти і науки, молоді та спорту України ІПДО НУХТ, 2011. 34 с.

3. Инструкция по санитарной обработке оборудования на предприятиях молочной промышленности. М.: Библиотека нормативно-правовых актов СССР, 1978. 45 с. URL: http://www.libusst.ru/doc_ussr/usr_9628/htm.

4. Каталог товаров компании «Лакта Люкс». URL: http://lactalux.com.ua/ru/stati/moyushchee-sredstvo-dlya-doilnyh-apparatov_ss.html.

5. Прайс ООО «АТ Техника». URL: http://at-technika.com.ua/index.php/gigienaystanovok/kislotnue.

6. Каталог продукции частного предприятия «Росток-Агро. Х». URL: http://rostok-agro.com.ua/ru/kormlenie/kontsentrirovannoe-kislotnoe-moyushchee-sredstvo-rinol-kk.html.

7. Prombaza 77: международный отраслевой портал. URL: http://cherkassy.prombaza77.com/products/schelochnoe-moyuschee-sredstvo-basix-ot-delaval.

8. Farm Services 2014 – 2015: каталог сопутствующих товаров. URL: http://animalcentr.ru/templates/Katalog%20Farm%20Services%20_2014_2015.pdf.

9. Продукція науково-виробничого підприємства «Фармакос». URL: http://farmakos.ua/.

10. Method for cleaning industrial equipment with pre-treatment: пат. US8114222 B2 USA: заявл. 25.10.05; опубл. 14.02.12. 13 с.

11. Dairy system cleaning preparation and method: пат. 0751211 A1 EP: заявл. 28.06.96; опубл. 02.01.97. 5 с.

12. Acid preparations for cleaning and disinfecting surfaces: пат. WO 2002010325 A1 Henkel Ecolab Gmbh&Co.Ohg; заявл. 18.07.01; опубл. 07.02.02. 9 с.

13. Antimicrobial acid cleaner for use on organic or food soil: пат. US 5998358 A USA: заявл. 23.03.99; опубл. 07.12.99. 8 с.

14. Acid cleaner and detergent: пат. US 2593259 A USA; заявл. 13.02.48: опубл. 15.04.52. 3 с.

СРЕДСТВО КИСЛОТНОЕ ДЛЯ МОЙКИ И ДЕЗИНФЕКЦИИ ДОИЛЬНЫХ АППАРАТОВ МЕТОДОМ БЕЗРАЗБОРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ МОЙКИ

Разработано и представлено кислотное средство для мойки и дезинфекции оборудования предприятий пищевой промышленности. Предложенная рецептура смеси, методика ее приготовления исключает использование прекурсоров, а также предоставляет возможность использования растворов кислот разрешенных концентраций и водопроводной воды. Средство рекомендовано для мойки внутренних поверхностей доильных аппаратов, различных емкостей для транспортировки молока, трубопроводов, в том числе методом безразборной циркуляционной мойки (Clean In Place – CIP-мойки) после обработки щелочным раствором. Благодаря низкой себестоимости является доступным не только для больших предприятий молочной промышленности, но и для малых ферм. Кроме того, основные преимущества предложенного средства – отличная отмывающая способность и дезинфекция внутренних поверхностей технологического оборудования молочной промышленности в безразборном автоматическом режиме; безопасность при использовании; отсутствие неприятных запахов; доступность сырья и простота приготовления.

Ключевые слова: *раствор кислотный, pH, доильные аппараты, молочный камень, себестоимость.*

ACID COMPOSITION FOR WASHING AND DISINFECTION OF MAILKNG MACHINES BY THE CIP-CLEANING PRINCIPLE

The acidic composition for washing and disinfection of food processing equipment has been developed and presented. The proposed formulation of the mixture and the method of its preparation excludes the using of precursors, and also allows the use of acid solutions of permitted concentrations and tap water. The composition is recommended for the washing of the interior surfaces of milking machines, various containers and pipelines for the transport of milk, including the method of Clean In Place (CIP-cleaning) after treatment with alkaline solution. Due to its low cost, the proposed composition is available not only for large dairy enterprises, but also for small farms. In addition, the main advantages of the proposed remedy are the excellent quality of the washing and disinfection of the internal surfaces of the technological equipment of the dairy industry in a state of play in an automatic mode; safety when using; the absence of unpleasant odors; the possibility of using tap water; availability of raw materials and ease of preparation.

Key words: *acid solution, pH, milking machines, milk stone, cost price.*

УДК 544.723

Сабадаш В.В.
Національний університет «Львівська політехніка»

ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД У ПОЛІ ДІЇ НАДВИСОКОЧАСТОТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Проблема очищення стічних вод від органічних забруднень дуже часто супроводжується труднощами, пов'язаними з невисокою ефективністю вилучення колоїдних частинок. За наявності білкових сполук у стічних водах виникає небезпека не тільки нецільової втрати цінних поживних речовин, але й створення поживного середовища для патогенної мікрофлори, що ускладнюватиме процес очищення стічних вод.

Ключові слова: *стічні води, білок, денатурація, надвисокочастотне випромінювання, теплообмін.*

Постановка проблеми. Серед галузей промисловості, що скидають значну кількість забруднених органічними речовинами стічних вод, одне з перших місць займають біотехнологічні виробництва [1, с. 133; 2, с. 233]. Відомо, що стічні води, наприклад, дріжджового виробництва найбільш забруднені органічними речовинами, що впливає на фауну та флору природних водойм.

Стічні води дріжджових заводів сильно забруднені органічними та мінеральними речовинами [2, с. 234]. Це – дріжджові клітини, білки, вуглеводи, залишки масел, хлориди, фосфати, калій, азот; БПК загального стоку становить 1 500–5 000 мг/л.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У літературних джерелах міститься багато даних про способи вилучення білків із водних розчинів, зокрема і сорбційні методи із застосуванням природних та синтетичних сорбентів. Досягнення вищих показників якості очищення стічних вод потребує розробки новітніх технологій, зокрема застосування техніки надвисоких частот (далі – НВЧ). Використання НВЧ-випромінювання у різних галузях за останні десятиліття поширилося завдяки можливостям ефективного миттєвого нагріву, висушування, стерилізації, швидкого розігріву замороженої сировини і т. д. [2, с. 233].

Надвисокі електромагнітні хвилі проникають в об'єм матеріалу, що обробляється, і діють швидко та рівномірно. Сухі матеріали не підігріваються, а ті, що містять воду, можуть повністю залишитися без вологи. Після обробки НВЧ структура матеріалу не змінюється. Ефективність перетворення енергії електромагнітного поля на тепло зростає прямо пропорційно частоті коливань і квадрату напруженості поля. Важлива перевага НВЧ-нагріву – відсутність теплової інерційності, тобто можливість практично миттєвого включення і виключення теплового впливу на сировину, яка обробляється. Це дозволяє підтримувати високу точність регулювання процесу нагріву. ККД перетворення енергії НВЧ на тепло наближається до 100% [3, с. 29; 4, с. 172].

Виклад основного матеріалу дослідження. Було проведено серію дослідів із метою вивчення процесу денатурації розчинів білка, що моделюють стічні води підприємств харчової промисловості, у мікрохвильовій печі при дії НВЧ-випромінювання з частотою 2 450 Гц. Аналіз отриманих експериментальних даних дозволив встановити оптимальний час оброблення дисперсії альбуміну та казеїну з масовою часткою сухих речовин (СР) 5% у полі НВЧ за потужності 800 Вт. Контроль за процесом здійснювали за зміною оптичної густини досліджуваних розчинів.

Як видно з результатів дослідження, під дією НВЧ-поля відбувається зменшення концентрації білків у модельному розчині за рахунок утворення осаду денатурованого білка. У процесі денатурації спостерігається зміна оптичної густини розчину. Результати дослідження приведені на рис. 2.

Процес нагрівання модельного розчину в лабораторній установці нестаціонарний. Температура змінюється по осях X та Z.

Скляний контейнер, виготовлений із кварцового скла, у якому відбувається нагрівання, пропускає електромагнітне випромінювання і є неполярним діелектриком.

Поверхня контейнера контактує в конвективному і радіаційному теплообміні з навколишнім середовищем, що має більш низьку температуру.

Теплофізичні та оптичні характеристики матеріалів залежать від температури.

Вплив НВЧ випромінювання на досліджуваний об'єкт призводить до виділення тепла, що рівномірно розподіляється в об'ємі розчину [5, с. 333; 6, с. 15].

Спочатку визначимо зв'язок між напруженістю електромагнітного поля, що генерується в резонаторній НВЧ-камері, та потужністю НВЧ-генератора. Для цього скористаємося загальновідомими рівняннями електродинаміки [4, с. 172; 7, с. 45].

Питома потужність П (Вт/м2), що переноситься електромагнітною хвилею в довільному середовищі, визначається за формулою:

$$П = \nu\varepsilon\varepsilon_0 E^2 \qquad (1)$$

де ν – частота, Гц, $\nu = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$;

с – швидкість світла у середовищі, м/с;

$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$ – швидкість світла у вакуумі м/с;

μ0 – магнітна стала μ0 = 4р·10^{-7} Гн/м;

μ – відносна магнітна проникність середовища.

У вільному робочому об'ємі НВЧ-камери електромагнітна хвиля переміщується зі швидкістю світла у вакуумі, а для повітря, як і для вакууму, ε = м = 1.

За умови оптимального навантаження резонаторної НВЧ-камери, питому потужність можна визначити за формулою [7, с. 312]:

$$П = \frac{P}{S} \qquad (2)$$

де P – потужність НВЧ-генератора, Вт;

S – площа поверхні продукту, м^2.

Порівнюючи праві частини виразів (1) і (2), отримаємо формулу для визначення напруженості електромагнітного поля Е0 на поверхні продукту:

$$E_0 = \sqrt{\frac{P}{\varepsilon_0 cS}} \qquad (3)$$

Під впливом НВЧ-променів конфігурація білків руйнується. Змінений у такий спосіб білок називають денатурованим; він втрачає свою біологічну активність і зазвичай стає нерозчинним. Добре знайомі всім приклади денатурованого білка – варені яйця або збиті вершки. Невеликі білки, що містять близько сотні амінокислот, здатні повертати свою структуру, тобто знову набувати вихідної конфігурації. Але більшість білків перетворюється на масу поплутаних поліпептидних ланцюгів і колишню конфігурацію не відновлює.

На підставі (1) отримуємо:

$$\nu\varepsilon\varepsilon_0 E_{i0}{}^2 = c\varepsilon\varepsilon_0 E_0^2, \qquad (4)$$

де E_{i0} – напруженість електромагнітного поля, яка проникає в продукт.

Звідси, з урахуванням $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$ та (3), отримуємо:

$$E_{i0}{}^2 = \frac{P}{\sqrt{\varepsilon}\varepsilon_0 cS} \qquad (5)$$

Оскільки для експерименту використовували контейнер із кварцового скла, що має значно меншу діелектричну проникність, ніж водні розчини, то нагріванням контейнера знехтуємо. Далі потрібно врахувати ефект поглинання електромагнітної енергії у продукті від поверхні до його центру, тобто розрахувати густину потужності внутрішніх джерел теплоти (рис. 2). Для цього запишемо баланс потужності для довільного внутрішнього шару продукту об'ємом dV із площиною поверхні SV. На підставі (1) та (4) маємо:

$$\omega dV = -S_V dП. \qquad (6)$$

де ω – потужність внутрішніх джерел теплоти, Вт/м^3,

$$\omega = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon \cdot tgl \cdot E^2; \qquad (7)$$

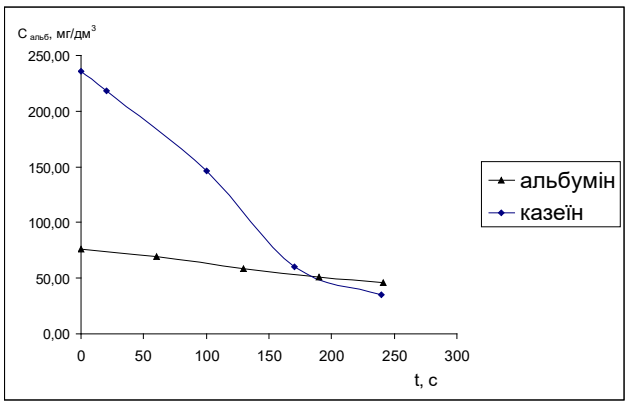


Рис. 1. Кінетика вилучення білків із модельного розчину

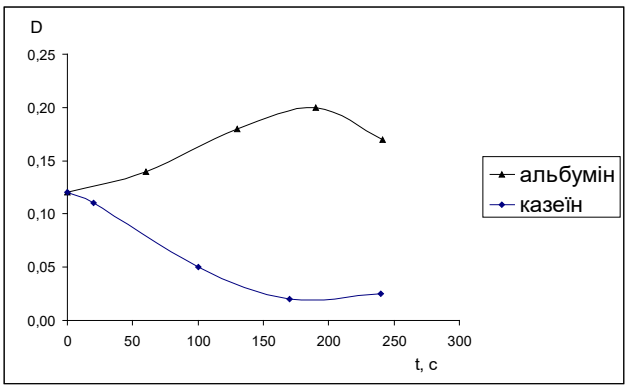


Рис. 2. Зміна оптичної густини розчинів білка

де ε_0 –діелектрична стала (ε_0 = 8,85·10-12 Ф/м);

f – частота електромагнітних коливань, Гц;

ε – відносна діелектрична проникність середовища (дійсна частина);

tg l – тангенс кута втрат;

E – напруженість електричного поля в продукті, В/м.

Проінтегрувавши (6), одержимо:

$$\int_0^V \omega dV = -\int_0^{\Pi} S d\Pi \qquad (8)$$

$$\omega = -\frac{S\Pi}{V} = -\frac{P}{V}$$

Знак «мінус» вказує на те, що напруженість внутрішнього електромагнітного поля E_i зменшується внаслідок перетворення енергії випромінювання на теплоту.

Враховуючи (4) і те, що $v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$ [4, стор. 172], одержимо:

$$2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon \cdot tgl \cdot E^2 dV = -c\varepsilon_0 \varepsilon \sqrt{\varepsilon} S_V dE^2 \qquad (9)$$

Глибина проникнення НВЧ-енергії в діелектрик (l, м) [3, с. 105]: $l = \frac{c}{2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon \cdot tg\delta}$. Розрахуємо температурний розподіл досліджуваного об'єкта та на підставі (9) отримаємо таке диференційне рівняння:

$$\frac{dE^2}{E^2} = -\frac{1}{l}\frac{dV}{S} = -\frac{1}{l}dr \qquad (10)$$

де r – поточна відстань по нормалі від поверхні до внутрішнього шару продукту dV.

Рішення (10) за граничної умови $E|_{r=0} = E_0$ має вигляд:

$$E^2 = E_0^2 e^{-\frac{r}{l}} \qquad (11)$$

Підставивши (11) у (7), з урахуванням (5) та $l = \frac{c}{2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon \cdot tg\delta}$, отримуємо розрахункову формулу для густини джерел теплоти за внутрішнім об'ємом продукту під час його НВЧ-обробки, яка описує розподілення напруженості електромагнітного поля за внутрішнім об'ємом досліджуваного розчину. На підставі (7) середнє значення питомої потужності внутрішніх джерел теплоти визначимо інтегруванням [7, с. 80]:

$$\omega = \frac{P}{lS}\frac{1}{R}\int_0^R e^{-\frac{r}{l}} dr = \frac{P}{V}\frac{l}{R}\left(1 - e^{-\frac{R}{l}}\right) \qquad (12)$$

де $R = V/S$ – відношення об'єму продукту до площі його поверхні, м.

Потужність нагрівання тіла довільної форми в момент часу τ:

$$P = c' m \frac{(T_2 - T_1)}{\tau}, \qquad (13)$$

де m – маса об'єкта, що піддається нагріву, кг;

T_1 і T_2 – початкова та кінцева температури досліджуваного об'єкта С;

с' – теплоємність, Дж/(кг*К);

t – час, с.

Таким чином, рівняння (12) матиме такий вигляд:

$$\omega = \frac{cm(T_2 - T_1)}{\tau V}\frac{l}{R}\left(1 - e^{-\frac{R}{l}}\right)$$

Температура нагрівання тіла довільної форми в момент часу τ після впливу НВЧ-поля дорівнюватиме:

$$T_2 = \frac{\omega V \tau R}{cml\left(1 - e^{-\frac{R}{l}}\right)} + T_1, \text{ або} \qquad (14)$$

$$T_2 = \frac{P\tau R}{cml\left(1 - e^{-\frac{R}{l}}\right)} + T_1$$

Для перевірки теоретичних даних ми дослідили зміну температури досліджуваного об'єкта. Порівняння теоретичних та експериментальних даних (рис. 4) свідчить, що наведена модель дозволяє визначати теплофізичні параметри процесу до 100°С (або для діелектриків із низьким вмістом вологи) з достатньою точністю.

Висновки. Отже, аналіз результатів наукових даних щодо використання НВЧ-енергії показав, що хвилі НВЧ можуть успішно використовуватися для вилучення білків із водних розчинів, зменшення енергозатрат, скорочення тривалості

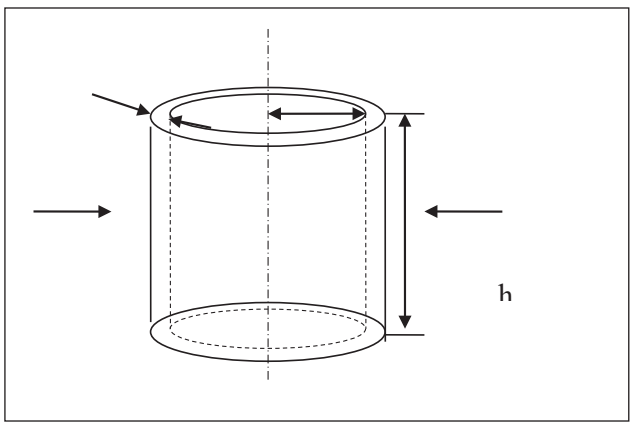


Рис. 3. Схема досліджуваного об'єкта

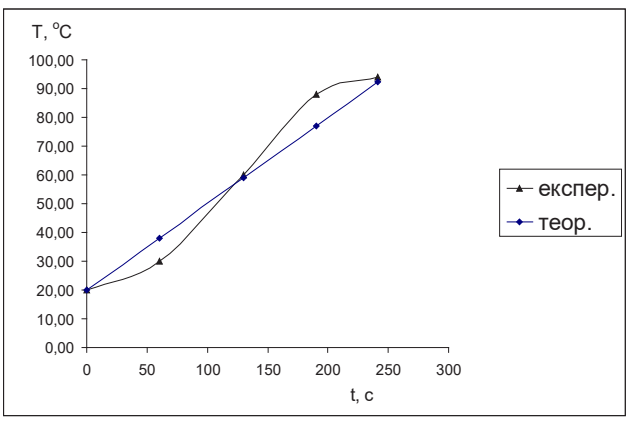


Рис. 4. Зміна температури розчинів білка під впливом НВЧ

процесу обробки, забезпечення мікробіологічної стабільності продукції. Нами було встановлено, що процес адсорбції білків відбувається тільки на зовнішній поверхні сорбента та макропор. Встановлено, що сорбційна ємність цеоліту щодо альбуміну становить тільки 14 мг/г. адс. Перспективи більш широкого застосування НВЧ-випромінювання пов'язані з розробкою і впровадженням НВЧ-установок нового покоління.

Список літератури:

1. Гумницький Я.М., Гивлюд А.М., Сабадаш В.В. Кінетика адсорбції альбуміну природним сорбентом. Наукові праці ОНАХТ. Одеса, 2015. Вип. 47. Т. 1. С. 133–139.
2. Beszedes S., Szabo G., Geczi G. Application of thermal and microwave pre-treatments for dairy wastewater sludge. International Journal of Engineering. 2012. № 10. C. 231–235.
3. Соколов С.В., Писаренко Л.Д., Журба В.О. Теорія електромагнітного поля і основи техніки НВЧ: навч. посіб. / за заг. ред. Г.С. Воробйова. Суми: Сумський державний університет, 2011. 393 с.
4. Калинин Л.Г. Применение метода регулярного режима для определения электро- и теплофизических характеристик дисперсных систем. Наук. праці. ОНХАТ. Одеса, 2010. Вип. 37. С. 170–173.
5. Nagursky O., Gumnitsky Ya. Mass exchange of dispersed materials encapsulating in quasi-liquefaction state. Chemistry & Chemical Technology. 2015. Vol. 9. № 3. P. 333–336.
6. Кудряшов Ю.Б., Перов Ю.Ф., Рубин Ф.Б. Радиационная биофизика: радиочастотные и микроволновые электромагнитные излучения: учебник. М.: Физматлит, 2008. 184 с.
7. Диденко А.Н. СВЧ-энергетика. Теория и практика. М.: Наука, 2003. 447 с.

ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД В ПОЛЕ ДЕЙСТВИЯ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Проблема очистки сточных вод от органических загрязнений очень часто сопровождается трудностями, связанными с невысокой эффективностью извлечения коллоидных частиц. В случае наличия белковых соединений в сточных водах возникает опасность не только нецелевой потери ценных питательных веществ, но и возникновения питательной среды для патогенной микрофлоры, которая будет затруднять процесс очистки сточных вод.

Ключевые слова: *сточные воды, белок, денатурация, сверхвысокочастотное излучение, теплообмен.*

WASTEWATER TREATMENT IN THE FIELD OF MICROWAVE RADIATION

The problem of wastewater treatment from organic contamination is often accompanied by difficulties associated with the low efficiency of colloidal particles removal. In the case of the presence of protein compounds in wastewater, there is a danger of non-purposeful loss of not only valuable nutrients, but also the danger of creating a nutrient medium for pathogenic microflora, which would impede the process of wastewater treatment.

Key words: *sewage, protein, denaturation, microwave radiation, heat exchange.*

УДК 541.135:620.193:669.295

Ускова Н.Н.
Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Украины

Габ А.И.
Открытый международный университет развития человека «Украина»

Малышев В.В.
Инженерно-технологический институт
Открытого международного университета развития человека «Украина»,
Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Украины

Бинг Ли
Восточно-Китайский университет науки и технологии

ПОВЫШЕНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ТИТАНА НАНЕСЕНИЕМ ВОЛЬФРАМОВЫХ ГАЛЬВАНОПОКРЫТИЙ ИЗ ВОЛЬФРАМАТНО-ПИРОСУЛЬФАТНЫХ РАСПЛАВОВ

Рассмотрена возможность повышения коррозионной стойкости титана посредством нанесения гальванопокрытий вольфрама из расплавов. Методами потенциометрии, вольтамперометрии, потенцио- и гальваностатического электролиза изучено електрохимическое поведение вольфраматно-пиросульфатных расплавов. Показано, что в расплаве Na_2WO_4-$Na_2S_2O_7$ можно реализовать многоэлектронные равновесия и процессы с участием дивольфрамат-ионов. Гальваническое покрытие вольфрамом титана переводит титан в пассивное состояние и уменьшает скорость его коррозии в H_2SO_4 (9,5 м.д.) при 70–80°С в 200–4 000 раз. Анодное и катодное поведение образцов титана с вольфрамовым покрытием определяется электрохимическими свойствами вольфрама. Эффективность катодного процесса на покрытии выше, чем на самом вольфраме, что позволяет перевести титан в пассивное состояние и обеспечить электрохимическую защиту.

Ключевые слова: *вольфрам, электролиз, расплав, покрытие, коррозия.*

Постановка проблемы. В связи с широким применением вольфрама в качестве компонентов коррозионностойких сталей и сплавов, покрытий на различных материалах, для поверхностного модифицирования металлов, значительно возрос интерес к изучению коррозионно-электрохимического поведения вольфрама в агрессивных средах. Для поверхностного модифицирования титана используют различные методы. Например, нанесение покрытий металлов платиновой группы повышает коррозионную стойкость титана в горячих растворах кислот на несколько порядков. Однако применение такого способа защиты ограничено стоимостью благородных металлов.

Анализ последних исследований и публикаций. В работах [1, с. 1997; 2, с. 123] показана перспективность легирования титана молибденом. Однако для достижения высокой коррозионной стойкости уровень легирования должен быть не ниже 20–25%. Успешно он достигается, например, поверхностным легированием титановых образцов молибденом методом вакуумного напыления [3, с. 23]. В [4, с. 350] показано, что метод высокотемпературного электрометаллургического синтеза (далее – ВЭС) из ионных расплавов позволяет снизить температуру легирования титана молибденом, вольфрамом и их карбидами до 800–900°С и существенно сократить продолжительность процесса.

Возможность электроосаждения различных типов структур вольфрама из вольфраматных расплавов определяется регулированием их кислотно-основных свойств [4, с. 347; 5, с. 1425; 6, с. 351]. Как конструкционный материал, вольфрам не

нашел широкого промышленного применения по причине дефицитности, но весьма важен как легирующий компонент при нанесении покрытий.

Постановка задачи. Изучить влияние кислотной добавки пиросульфата натрия на образование электроактивных частиц в вольфраматном расплаве, состав и структуру катодных осадков, электрохимическое и коррозионное поведение титана с вольфрамовым покрытием.

Изложение основного материала исследования. Методом потенциометрии в равновесных условиях изучена ЭДС следующих ячеек:

$Pt,O_2|(1\text{-}x)Na_2WO_4\text{-}xNa_2S_2O_7||Na_2WO_4\text{-}0{,}2WO_3|O_2,Pt$, (1)

$W|(1\text{-}x)Na_2WO_4\text{-}xNa_2S_2O_7||Na_2WO_4\text{-}0{,}2WO_3|O_2,Pt$, (2)

где х – мольная доля $Na_2S_2O_7$ в этом расплаве.

Методика потенциометрических исследований и устройство платино-кислородного электрода сравнения описаны в [4, с. 312]. Анализ и оценку кинетических параметров электродного процесса проводили по теории стационарных и нестационарных электродных процессов [7, с. 349; 8, с. 8].

Экспериментальный ход зависимости потенциала платино-кислородного электрода от концентрации $Na_2S_2O_7$ (рис. 1а) можно объяснить развиваемой нами ионной моделью строения вольфраматного расплава. Как известно, в вольфраматном расплаве существует равновесие:

$$W_2O_7^{2-} + O^2 \leftrightarrow 2WO_4^{2-} \qquad (3)$$

с константой равновесия $K = [WO_4^{2-}]^2/[O^{2-}][W_2O_7^{2-}]$.

При добавлении акцепторов кислородных ионов $Na_2S_2O_7$ к расплаву вольфрамата натрия возможна реакция:

$$WO_4^{2-} + S_2O_7^{2} \leftrightarrow W_2O_7^{2-} + SO_4^{2-} \qquad (4)$$

Вероятность протекания этой реакции подтверждается термодинамическим расчетом ее свободной энергии Гиббса. Используя справочные данные [9, с. 412], рассчитали ΔG при температуре 1 173 К, которая составила - 55,82 кДж/моль.

Уравнение зависимости потенциала платино-кислородного электрода от концентрации пиросульфата натрия имеет вид:

$$E_{O^{2-}/O_2} = E^* + \frac{2{,}3RT}{2F} lg \frac{K \cdot nS_2O_7^{2-}}{(1 - 2nS_2O_7^{2-})^2} = \\ = E^* + \frac{2{,}3RT}{2F} lg \frac{nS_2O_7^{2-}}{(1 - 2nS_2O_7^{2-})^2} \qquad (5)$$

Согласно (5), предлогарифмический коэффициент зависимости $E(O^{-2}/O_2) - lg(nS_2O_7^{2-})/(1\text{-}2nS_2O_7^{2-})^2$ должен составить 0,116 В при температуре 1 173 К. Экспериментальные данные показывают, что в исследуемом диапазоне концентраций пиросульфата натрия предлогарифмический коэффициент составляет 0,112–0,121 В (рис. 1а). Из этого следует, что в данной области концентраций пиросульфата натрия возможно протекание реакции (4).

Сопоставление колебательных ИК-спектров и диффракционных рентгеновских спектров индивидуальных плавов солей Na_2WO_4, $Na_2W_2O_7$, $Na_2S_2O_7$ и смеси Na_2WO_4-$Na_2S_2O_7$ подтверждает появление дивольфрамат-ионов в вольфраматном расплаве при добавлении в него пиросульфата натрия.

Значение константы равновесия К определяли решением уравнения (5), взятого для двух значений $E(O^{-2}/O_2)$ для стехиометрического Na_2WO_4 и расплава Na_2WO_4 – 1 мол.% $Na_2S_2O_7$. Решая эту систему, получили, что $K = 10^{9,7}$; $E^*(O^{-2}/O_2) = -1{,}061$ В; $nO^{2-} = 10^{-4,85}$. Полученные результаты согласуются с данными работ [4, с. 341; 5, с. 1427; 6, с. 352].

Выражение для потенциала вольфрамового электрода (ЭДС цепи (2)), согласно нашей модели ионного состава расплава, может быть записано следующим образом:

$$4W_2O_7^{2-} + 6e \leftrightarrow W + 7WO_4^{2-} \qquad (6)$$

Количество электронов, приходящееся на одну электроактивную частицу, вычисленное из предлогарифмического коэффициента зависимости $dE/dlgC(Na_2S_2O_7)$ (рис. 1б), равно 1,5. Этому значению количества электронов соответствует электродная реакция (6).

На графиках стационарных и нестационарных вольтамперных зависимостей вольфраматного расплава, содержащего пиросульфат натрия, наблюдалась волна восстановления при потенциалах - (1,1-1,2) В (рис. 2). Процесс восстановления протекает в одну стадию. Увеличение скорости поляризации до 10 В/с не позволяет обнаружить стадийность процесса. Продуктом электролиза расплава при потенциалах - 1,2 В является металлический вольфрам.

Зависимость тока пика от концентрации пиросульфата натрия при различных скоростях поляризации носит прямо пропорциональный характер. Значения $i_p/V^{1/2}$ остаются практически постоянными в интервале скоростей поляризации 0,05–2 В/с (рис. 3). Значение кинетической константы i_p/nFC для стационарных волн составляет $(0{,}74–0{,}91)\cdot10^{-4}$ см/с и соизмеримо со значениями для диффузионной доставки реагирующих веществ к поверхности электрода. Пропорциональная зависимость $i_p – C(Na_2S_2O_7)$, постоянство

значений $i_p/V^{1/2}$ в широком диапазоне скоростей поляризации и значение i_p/nFC дают возможность говорить о лимитировании электродного процесса диффузией электроактивных частиц к поверхности электрода.

Пиросульфат натрия, как акцептор кислородных ионов, смещает равновесие (3) влево. Концентрация электроактивных частиц $W_2O_7^{2-}$ в расплаве повышается, при этом их восстановление происходит при потенциалах - (1,1–1,2) В, что положительнее, чем восстановление вольфраматионов при - (1,8–2,0) В. Суммарный электродный процесс имеет вид (4).

Для выяснения характера стадии переноса заряда (4) и определения количества электронов, участвующих в электродном процессе, стационарные вольтамперные зависимости проанализировали в полулогарифмической системе координат $E - \lg(i_d\text{-}i)$. Наклон зависимости $E - \lg(i_d\text{-}i)$ для исследуемых концентраций пиросульфата натрия составляет 36–42 мВ, а значение n = 5,6–6,2. Теоретическое значение наклона для шестиэлектронной обратимой реакции равно 39 мВ. Близость значений экспериментального и теоретического наклона свидетельствует об обратимом характере стадии переноса заряда (6), который подтверждается также следующими экспериментальными данными: потенциал выделения и потенциал полуволны не зависят от скорости поляризации вплоть до 0,2–0,5 В/с , концентрационная зависимость потенциала равновесия

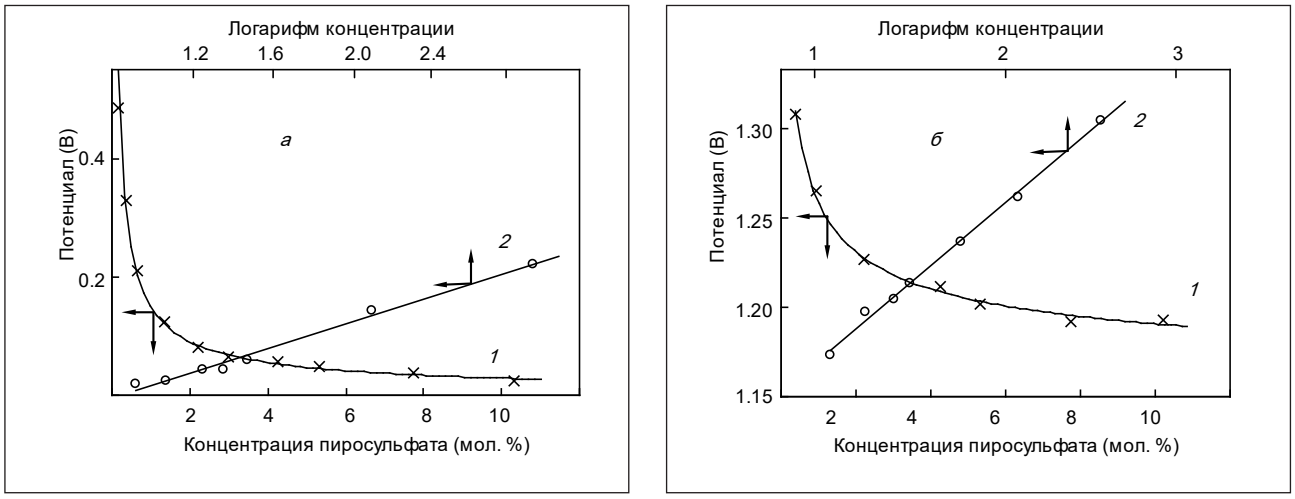


Рис. 1. Зависимость потенциала платино-кислородного (*а*) и вольфрамового (*б*) электродов от концентрации $Na_2S_2O_7$ (*1*) и ее анализ в логарифмических координатах (*2*) в расплаве вольфрамата натрия

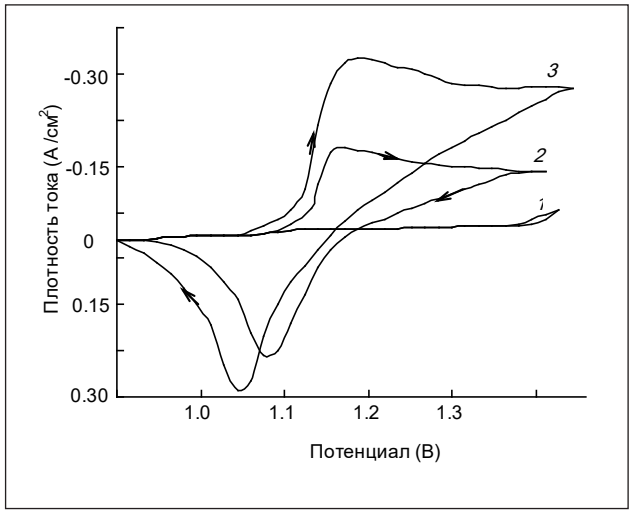


Рис. 2. Вольтамперные зависимости вольфраматного расплава при $C(Na_2S_2O_7)\cdot10^4$, равной 0 (*1*), 3 (*2*) или 22,5 (*3*) моль/см³ при Т = 1 173 К, катод – серебро, скорость поляризации 0,5 В/с

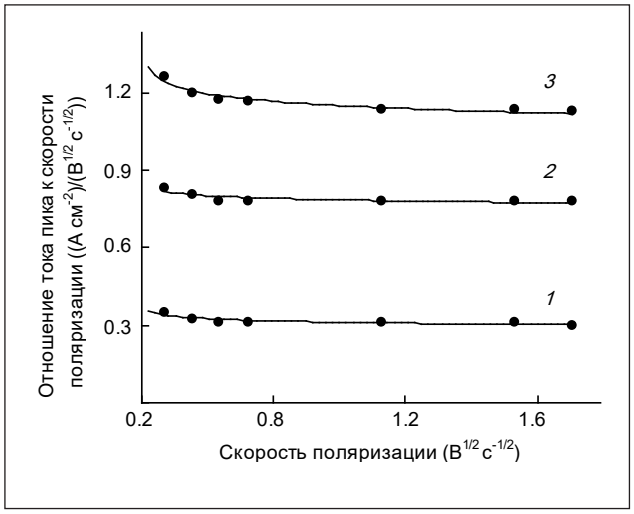


Рис. 3. Зависимость отношения тока пика к скорости поляризации от скорости поляризации для процесса электровосстановления вольфрамсодержащих анионов при $C(Na_2S_2O_7)\cdot10^4$: 6 (*1*); 24 (*2*); 30 (*3*) моль/см³ и Т = 1 173 К

(6) описывается уравнением Нернста. Количество электронов, участвующих в электродном процессе, определено также из полуширины пиков нестационарных вольтамперных зависимостей по критерию Мацуды-Аябе. Для разных скоростей поляризации (0,04–0,2 В/с), значение n = 5,8–6,1.

Увеличение скорости поляризации более чем на 0,5 В/с приводит к переходу от обратимого электродного процесса к квазиобратимому. Это подтверждается также отклонением зависимости $i_p - V^{1/2}$ от прямолинейной и зависимостью потенциала пика и полупика от скорости поляризации.

Вольфраматно-пиросульфатный расплав был использован для электроосаждения вольфрамовых покрытий. Оптимальная концентрация $Na_2S_2O_7$ составляла 2,5–15,0 мол.%. Сплошные покрытия образуются при температурах 800–975°С и плотностях тока до 0,15 А/см^2. Толщина покрытий на графите, меди, никеле, сталях достигает 150 мкм. Микротвердость покрытия составляет 360–420 кГ/мм^2.

Таблица 1

Изменение потенциалов коррозии титана, вольфрама и титана с вольфрамовым покрытием во времени

Время, ч	0	5	10	15	20
Потенциал коррозии титана, В	-0,58	-0,60	-0,63	-0,65	-0,67
Потенциал коррозии вольфрама, В	0,33	0,32	0,31	0,30	0,29
Потенциал коррозии титана с вольфрамовым покрытием, В	0,30	0,26	0,22	0,18	0,14

Рис. 4. Зависимость скорости коррозии титана (г·м$^{-2}$·ч$^{-1}$) от потенциала коррозии (В)

Для успешного осуществления нанесения покрытия важным условием является то, что потенциал коррозии должен быть положительнее потенциала осаждения вольфрама. Для этого были измерены стационарные потенциалы титана в расплаве Na_2WO_4 – 15 мол.% WO_3. Стационарные потенциалы титана не устанавливались в течение длительного времени. По-видимому, это связано с растворением кислорода в поверхностном слое электрода. Изучение титановых образцов после потенциометрических исследований показало наличие оксидных фаз в слабо сцепленном поверхностном слое образцов.

Для получения сцепленных покрытий необходимо было устранение оксидных фаз титана. Поэтому перед осаждением вольфрама на титан последний подвергался никелированию из водных растворов или поверхностному азотированию в атмосфере нагретого до 600–700°С азота.

На микрофотографиях шлифов поперечного сечения азотированного титанового образца с покрытием вольфрама и на сколах этих образцов отчетливо наблюдалось отсутствие непокрытых участков. Фазовый анализ поверхностного слоя образцов после нанесения покрытий показал наличие интенсивных линий вольфрама. Микротвердость вольфрама составляла 4,0–4,2 ГПа. Значения микротвердости прилегающих к покрытию слоев подложки возрастают, что свидетельствует о взаимной диффузии элементов покрытия и основы. Дополнительным доказательством наличия диффузионной зоны, обеспечивающей адгезию покрытия с основой, явля-

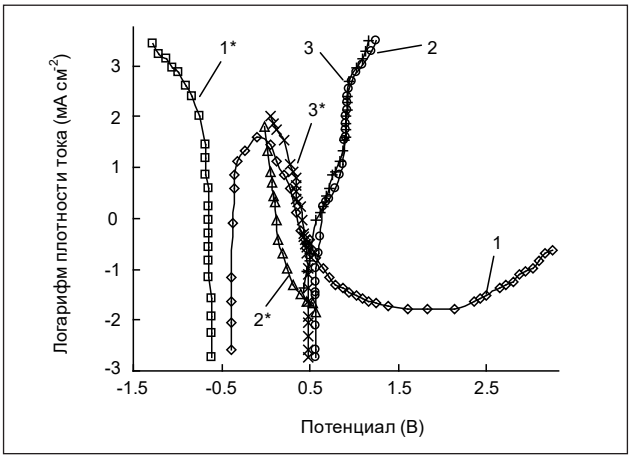


Рис. 5. Зависимости логарифма плотности тока (мА·см$^{-2}$) от потенциала (В относительно н. в. э.) для анодной (*1-3*) и катодной (*1*-3) поляризации титана (*1, 1**), вольфрама (*2, 2**) и титана с вольфрамовым покрытием (*3, 3**) в растворе серной кислоты (9,5 м. д.) при 75°С. Скорость поляризации – 50 мВ/с**

ются результаты анализа шлифов на рентгеновском микроанализаторе MS-46 «Cameca». Концентрационные кривые распределения титана и вольфрама аналогичны. Они плавно изменяются от максимума до минимума (фона) в противоположных направлениях, свидетельствуя о наличии диффузионной зоны между покрытием и основой. Протяженность диффузионной зоны составляет 5–8 мкм.

Коррозионные испытания образцов титана, вольфрама и титана с вольфрамовым покрытием проводили в растворе серной кислоты (9,5 м. д.) при 70–80°С, регистрируя во времени изменение потенциала и скорости коррозии (рис. 4). Скорость коррозии определяли фотоколориметрически (по количеству титана и вольфрама в растворе). Также изучали анодную и катодную поляризацию титана, вольфрама и титана с вольфрамовым покрытием при скорости развертки 50 мВ/с (рис. 5). Все потенциалы пересчитаны относительно нормального водородного электрода.

Потенциал коррозии титана с покрытием вольфрама существенно возрастает с - (0,59–0,61) В до (0,26–0,31) В, переходя в пассивно-активную область титана (см. табл. 1), и всего лишь на 0,02–0,04 В не достигая потенциала коррозии вольфрама. Средняя скорость растворения титана для образца с покрытием постоянна и составляет 0,005–0,01 г/(м^2·ч). Скорость растворения титана при потенциале свободной коррозии равнялась 19,1–19,3 г/(м^2·ч). В результате нанесения покрытия скорость растворения титана уменьшается в 2 000–4 000 раз. Скорость растворения титана без покрытия при потенциале, устанавливающемся на образцах с вольфрамовым покрытием (0,30–0,31 В), составляла 0,41–0,50 г/(м^2·ч) (рис. 4). Средняя скорость коррозии вольфрамового покрытия с увеличением длительности коррозионных испытаний уменьшалась с 0,03–0,04 г/(м^2·ч) в первые 5 ч до 0,007–0,011 г/(м^2·ч) через 20 ч.

Согласно кривым анодной поляризации (рис. 5), потенциал свободной коррозии титана в условиях эксперимента составляет – (0,59÷0,61) В. Он характеризуется областью активного растворения с относительно низким критическим потенциалом пассивации (-(0,27÷0,29) В) и большим критическим током (10–100 А/см^2). Для образца вольфрама область активного растворения отсутствует, и он пассивен вплоть до потенциала перепассивации. Кривая анодной поляризации титана с вольфрамовым покрытием подобна кривой для вольфрамового образца и практически совпадает с ней при потенциале более 0,8 В. Потенциал образца с покрытием близок к потенциалу перепассивации вольфрама. Анодный ток в пассивной и транспассивной областях обусловлен, в основном, окислением вольфрама до оксидных соединений W(VI).

Согласно катодным поляризационным кривым (рис. 5), плотности тока катодных процессов на вольфрамовом образце и титане с покрытием из него значительно выше, чем на непокрытом титане. Катодная кривая вольфрама пересекает анодную кривую практически в самом начале активно-пассивной области.

Поэтому при соизмеримых площадях электродов вольфрамовое покрытие на титане не позволяет завершить пассивацию титанового анода. Катодная кривая вольфрамового покрытия пересекает анодную кривую титана в непосредственной близости от пассивной области. Поэтому покрытие более эффективно как катод.

Выводы. 1. В равновесных и неравновесных условиях в расплаве Na_2WO_4-$Na_2S_2O_7$ можно реализовать многоэлектронные равновесия и процессы с участием дивольфрамат-ионов.

2. Гальваническое покрытие вольфрамом титана переводит титан в пассивное состояние и уменьшает скорость его коррозии.

3. Эффективность катодного процесса на покрытии выше, чем на самом вольфраме, что позволяет перевести титан в пассивное состояние и обеспечить электрохимическую защиту.

Список литературы:

1. Schiff N., Grosgogeat B., Lissac M., Dalard F. Influence of fluoride content and pH on the corrosion resistance of titanium and its alloys. Biomaterials. 2002. Vol. 23. Iss. 9. P. 1995–2002.

2. Mabilleau G., Bourdon S., Joly-Guillou M.L., Filmon R. Influence of fluoride, hydrogen peroxide, and lactic acid on the corrosion resistance of commercially pure titanium. ActaBiomaterialia. 2006. Vol. 2. Iss. 1. P. 121–129.

3. Касаткин А.В., Корниенко Л.П., Чернова Г.П., Андрюшин С.Г. Электрохимическое и коррозионное поведение титана с молибденовым покрытием, нанесенным методом вакуумного напыления. Защита металлов. 1998. Т. 34. № 1. С. 21–25.

4. Малышев В.В. Механизмы электровосстановления и электроосаждение покрытий металлов VIA группы из ионных расплавов. Физико-химия поверхности и защита металлов. 2009. Т. 45. № 4. С. 339–357.

5. Kuznetsov S.A. Electrochemistry of Refractory Metals in Molten Salts: Application for the Creation of New and Functional Materials. Pure Appl. Chem. 2009. Vol. 81. № 8. P. 1423–1439.

6. Malyshev V. Electrodeposition of different types of tungsen cathode deposits from ionic melts. Materials Science. 2011. Vol. 47. № 3. P. 345–354.
7. Fundamentals of Electrochemistry / V.S. Bagotsky, ed. New York: J. Wiley & Sons, 2005. 752 p.
8. Bier A. Electrochemistry Theory and Practice. Hach Company, 2011. 13 p.
9. Chase M.W., Curnutt J.L., Hu A.T., Prophet H. JANAF Thermodynamical Tables. J. Phys. Chem. Ref. Data. 1974. Vol. 3. № 2. P. 311–480.

ПІДВИЩЕННЯ КОРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ТИТАНУ НАНЕСЕННЯМ ВОЛЬФРАМОВИХ ГАЛЬВАНОПОКРИТТІВ ІЗ ВОЛЬФРАМАТНО-ПІРОСУЛЬФАТНИХ РОЗПЛАВІВ

Розглянуто можливість підвищення корозійної стійкості титану за допомогою нанесення гальванопокриття вольфраму з розплавів. Методами потенціометрії, вольтамперометрії, потенціо- і гальваностатичного електролізу вивчено електрохімічну поведінку вольфраматно-піросульфатних розплавів. Показано, що в розплаві Na_2WO_4-$Na_2S_2O_7$ можна реалізувати багатоелектронні рівноваги і процеси за участю дивольфрамат-іонів. Гальванічне покриття вольфрамом титану переводить титан у пасивний стан і зменшує швидкість його корозії в H_2SO_4 (9,5 м.ч.) при 70–80°С в 2 000–4 000 разів. Анодна і катодна поведінка зразків титану з покриттям вольфрамом визначається електрохімічними властивостями вольфраму. Ефективність катодного процесу на покритті вище, ніж на самому вольфрамі, що дає змогу перевести титан у пасивний стан і забезпечити електрохімічний захист.

Ключові слова: *вольфрам, електроліз, розплав, покриття, корозія.*

INCREASING OF TITANIUM CORROSION RESISTANCE BY TUNGSTEN COATINGS DEPOSITION FROM TUNGSTATE-PYROSULFATE MELTS

The possibility of increasing the corrosion resistance of titanium by applying tungsten electroplating from melts is considered. The electrochemical behavior of tungstate-pyrosulfate melts has been studied by potentiometry, voltammetry, potentio- and galvanostatic electrolysis. It is shown that many-electron equilibria and processes involving di-tungstate ions can be realized in the melt Na_2WO_4-$Na_2S_2O_7$. The galvanic coating with tungsten titanium transforms titanium into a passive state and reduces the rate of its corrosion in H_2SO_4 (9.5 ppm) at 70–80°C in 2 000–4 000 times. The anodic and cathodic behavior of titanium-coated samples with tungsten is determined by the electrochemical properties of tungsten. The efficiency of the cathodic process on the coating is higher than on the tungsten itself, which makes it possible to transfer the titanium into a passive state and provide electrochemical protection.

Key words: *tungsten, electrolysis, melt, coating, corrosion.*

УДК 628.331

Фролова Л.А.
ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет»

Анисимова Л.Б.
Институт проблем природопользования Национальной академии наук Украины

ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ГОМОГЕННОГО ОСАЖДЕНИЯ ПРИ УТИЛИЗАЦИИ ТРАВИЛЬНЫХ РАСТВОРОВ

В статье представлены результаты исследований по определению условий образования гетита, лепидокрокита и магнетита из отработанных травильных растворов. Рассмотрена взаимосвязь между фазовым составом осадка и основными технологическими параметрами процесса: природа осадителя, соотношение осадитель/катион, температура, скорость подачи воздуха, pH.

Ключевые слова: *травильные растворы, карбамид, пигмент, магнетит, гетит.*

Постановка проблемы. Одной из главных проблем человечества является утилизация и переработка отходов, в том числе отработанных травильных растворов. Они образуются в большом количестве на предприятиях машиностроительной и металлургической отраслей промышленности. К тому же, после травления черных металлов серной кислотой отработанные травильные растворы содержат достаточное количество железа без дополнительных примесей, которое может быть использовано как вторичное сырье для получения мелкодисперсных железосодержащих порошков, используемых в качестве пигментов, магнитоносителей, катализаторов [1–3].

Современные тенденции по разработке природоохранных технологий направлены на поиск путей улучшения свойств известных материалов. Опыт многих авторов, работающих в этом направлении, показал, что травильные растворы являются дешевым перспективным сырьем по получению пигментов различной цветовой гаммы. Окисление водных растворов солей железа (II) или суспензии гидроксида железа (II) атмосферным кислородом лежит в основе промышленного процесса синтеза оксидных и оксигидроксидных соединений Fe (II) и Fe (III). Многообразие возможных фазовых превращений, зависящих от степени окисления железа и модификации получаемых продуктов в изучаемых системах, уже многие годы привлекает исследователей. Анализ полученных результатов показывает некоторую противоречивость. Особенно это касается условий получения целевых продуктов – магнетита и гетита [4; 5].

Процессы получения оксидов и оксигидроксидов железа осаждением аммиаком и свойства таких осадков подробно рассматривались [6]. Использование аммиака не всегда оправдано вследствие его токсичности и сложности обеспечения безопасной эксплуатации оборудования. Использование карбамида, медленно гидролизующегося при температуре 50–100^{0}C, дает возможность избежать локальных превышений pH, предотвращает точечные пересыщения в растворе, обеспечивает возможность регулирования процесса. Известно, что гомогенное осаждение в присутствии карбамида ведет к образованию гидроксидов железа, алюминия, циркония, кальция. Поэтому эти исследования были направлены на изучение влияния параметров процесса осаждения карбамидом на фазовый состав образующихся соединений.

В работах установлено, что фазовый и дисперсный состав полученных продуктов зависит от температуры, исходного pH, исходной концентрации катионов железа, природы окисляющего агента и скорости окисления, порядка подачи осадителя [5; 7–10]. В работе [3] было показано, что при pH-статическом режиме фазовый состав изменяется в последовательности γ-FeOOH→α-FeOOH→Fe_3O_4, при повышении температуры в pH-динамическом режиме зависимость фазового состава и размера кристаллитов от скорости подачи окислителя несколько другая – α-FeOOH→Fe_3O_4.

В работах авторы приводят диаграммы, на которых отсутствует магнетит [11–13]. До сих пор дискуссионным является вопрос о том, какие из них из этих параметров синтеза являются определяющими [14], что не позволяет оптимизировать условия синтеза.

Постановка задания. Цель данной работы – построение диаграмм фазообразования в зависимости от природы осадителя и условий проведения синтеза. В качестве гидролизующих агентов использовали карбамид и карбонат аммония.

Методика проведения эксперимента. Для эксперимента использовались сульфат железа $FeSO_4$ $7H_2O$ марки «ч», карбонат аммония (NH_4CO_3) марки «ч» и карбамид $(NH_2)_2CO$ (ГОСТ 6691-77). Исследования по изучению кинетики проводились в термостатируемом реакторе, оснащенном барботёром, с обратным холодильником. Готовились модельные растворы с концентрацией сульфата железа, соответствующей травильным растворам. Для исследований были приняты следующие условия: концентрация $FeSO_4$ – 0,5 моль/дм^3, концентрация $CO(NH_2)_2$, NH_4CO_3 – 1,0 моль/дм^3, температура – 20-100^{0}C, скорость подачи воздуха 2–10 мин$^{-1}$. Молярное отношение (n) начальных концентраций осадителя к сульфату железа(II) составляло n ==1-12. Карбамид добавлялся к раствору $FeSO_4$ после достижения им заданной температуры. Концентрация сульфата железа (II) определялась перманганатометрическим методом. Концентрация карбамида определялась фотометрическим методом, основанным на измерении оптической плотности окрашенного раствора при длине волны *l*=420 нм. Для измерения оптической плотности использовался спектрофотометр UV-5800PC. Фазовый состав образующихся соединений определяли с помощью рентгенофазового анализа на дифрактометре ДРОН-2.

Фазовые диаграммы строили на основании анализа полученных при различных условиях порошкообразных образцов.

Результаты и их обсуждение. Общую схему образования оксидов и оксигидроксидов железа (III) гомогенным осаждением из сульфатных растворов железа (II) можно представить следующим образом. Гидролиз карбамида проходит по реакциям с образованием цианата аммония с последующим гидролизом цианата до карбоната аммония, который разлагается на аммиак и углекислый газ. Поскольку мольное соотношение варьировалось, количество гидроксил групп изменялось прямо пропорционально.

Для полного осаждения солей железа в виде малорастворимых соединений необходимо, чтобы карбамид присутствовал в избытке в реакционной смеси, поскольку исходные растворы железа (II) имеют pH=1,5-2,0. Таким образом, первой стадией является нейтрализация свободной кислоты образующимся гидроксидом аммония. Реакция гидролиза карбамида проходит при температуре 50–100°C в несколько стадий (1–3). Коэффициенты абсорбции углекислого газа и аммиака в 100 г воды составляют соответственно 0,335 и 89,5 при температуре 10°C, с повышением температуры растворимость газов снижается. Выделяющийся свободный аммиак мгновенно реагирует с водой с образованием аммиачной воды, с другой стороны, углекислый газ образует угольную кислоту в значительно меньших количествах, поскольку равновесие сильно сдвинуто в сторону разложения кислоты. Таким образом, реакцией образования карбоната железа можно пренебречь.

$$CO(NH_2)_2 = NH_4CNO, \quad (1)$$

$$2NH_4CNO+5H_2O = (NH_4)_2CO_3 + 2NH_4OH+CO_2, \quad (2)$$

$$(NH_4)_2CO_3 + H_2O = 2NH_4OH+CO_2, \quad (3)$$

Суммарная реакция:

$$2CO(NH_2)_2 +6H_2O = 4NH_4OH+2CO_2$$

Вторым этапом является образование гидроксида железа (II) или основного сульфата железа (II) в зависимости от мольного соотношения карбамид/железо (II):

$$2NH_4OH + FeSO_4 \rightarrow Fe(OH)_2 + (NH_4)_2SO_4, \quad (4)$$

Третья стадия – окисление соединений двухвалентного железа до трехвалентного по нескольким возможным схемам:

$$4Fe(OH)_2+O_2=4\alpha\text{-}FeOOH + 2H_2O, \quad (5)$$

$$3Fe(OH)_2+1/2O_2= Fe_3O_4 + 3H_2O, \quad (6)$$

Таким образом, состав полученного продукта в значительной степени зависит от начального pH, температуры, мольного соотношения карбамид/железо (II). Однако можно предположить, что эти факторы опосредовано влияют на фазовый состав за счет изменения скорости окисления, которая является определяющей при формировании продукта. Результаты изучения влияния соотношения карбамид/железо (II) при разных температурах представлены на рис. 1. При увеличении n от 1 до 12 и при фиксированных параметрах синтеза существует следующая последовательность фазообразования: α-FeOOH→γ-FeOOH+Fe_3O_4.→ Fe_3O_4. В интервале температур 0–30°C не происходило осадкообразования, раствор зеленого цвета

(присутствовал $FeSO_4$), в интервале 30–60°С происходит окисление до $Fe_2(SO_4)_3$.

С увеличением температуры при взаимодействии соли железа (II) с продуктами гидролиза карбамида образуются малорастворимые соединения железа α-FeOOH→γ-FeOOH →Fe_3O_4 (в диапазоне температур 80–90°С). При фиксированных условиях проведения процесса (температура 90–100°С) с увеличением значения *n* наблюдается следующая последовательность образования фаз: α-FeOOH→Fe_3O_4. Было установлено, что оптимальными условиями получения магнетита является температура 82^{0}С, молярное соотношение карбамида к соли железа (II) 9.

Очевидно, что влияние температуры в этом случае носит двойственный характер, с одной стороны, ускоряет процесс окисления до трехвалентного железа, с другой стороны, за счет гидролиза карбамида повышается значение pH. Поскольку pH раствора изменяется в процессе гидролиза от 1,5 до 11, в зависимости от полноты протекания процесса, то фазовый состав зависит и от продолжительности процесса. Поэтому образование магнетита происходит при значениях n=8-12, обеспечивающих не только высокие значения pH, но и избыток гидроксил-ионов.

Для выяснения закономерностей изменения фазового состава полученных оксидных соединений железа при изменении температуры и скорости подачи воздуха были проведены исследования при n=8, температурный интервал 20−60°С и скорость подачи воздуха 4−12 мин$^{-1}$.

Анализ полученной диаграммы показывает, что высокие скорости окисления, соответствующие скорости подачи воздуха 8–10 мин$^{-1}$ приводят к образованию гетита, низкие скорости окисления приводят к образованию магнетита. Температурный интервал процесса – 60–100°С. Можно сделать вывод, что оптимальными условиями получения магнетита являются скорость подачи воздуха 4–6 мин$^{-1}$ и температура реакционной среды 65–100°С.

Учитывая то обстоятельство, что промежуточным продуктом разложения карбамида является карбонат аммония, интересен сравнительный анализ фазовых диаграмм. Гидролиз карбоната

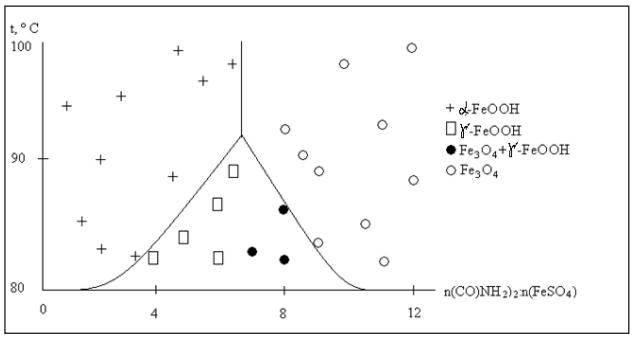


Рис. 1. Зависимость фазового состава получаемого осадка в системе $FeSO_4$ - $CO(NH_2)_2$ - H_2O - O_2 от температуры и мольного соотношения *n*

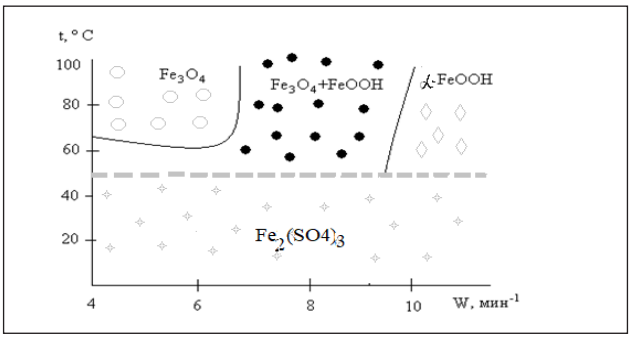


Рис. 2. Зависимость фазового состава получаемого осадка в системе $FeSO_4$-$CO(NH_2)_2$-H_2O-O_2 от температуры и скорости подачи воздуха (*n*= 8)

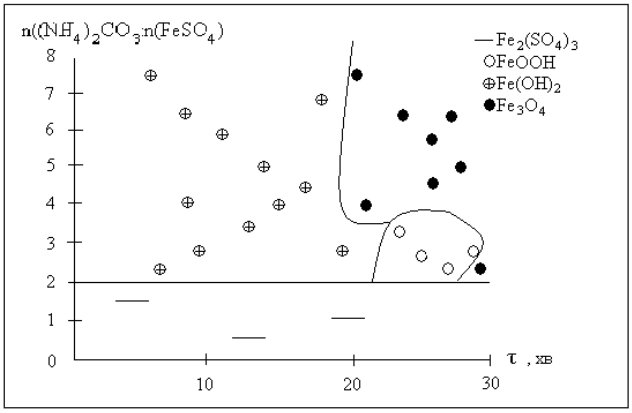


Рис. 3. Зависимость фазового состава получаемого осадка в системе $FeSO_4$ - $(NH_2)_2CO_3$ - H_2O - O_2 от температуры и продолжительности процесса

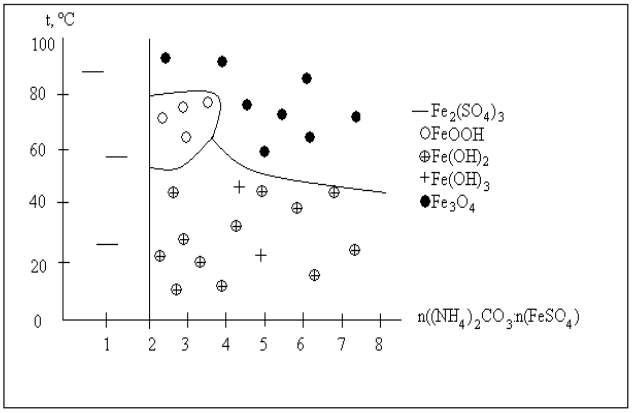


Рис. 4. Зависимость фазового состава получаемого осадка в системе $FeSO_4$ - $(NH_2)_2CO_3$ - H_2O - O_2 от температуры и мольного соотношения *n*

аммония проходит с повышением pH среды по реакции:

$$(NH_4)_2CO_3 + H_2O = 2NH_4OH + CO_2, \quad (7)$$

во всем исследуемом диапазоне температур.

При исследовании влияния скорости подачи воздуха и кислотности среды на процесс осаждения было установлено (рис. 3, 4), что фазовый состав получаемого продукта в значительной степени зависит от температуры раствора, мольного соотношения реагирующих компонентов и продолжительности процесса. В диапазоне t = 15–25°C и при n = 2–5,5 образуется темно-зеленый осадок $Fe(OH)_2$ (время продувки воздухом 25–30 минут), при t = 60–90^{0}C и при n = 2–3,75 продуктом будет оксигидроксид железа (25–30 минут подачи воздуха), при более высокой температуре и большем мольном соотношении образуется магнетит Fe_3O_4. При n<2 образуется раствор $Fe_2(SO_4)_3$.

Диаграммы (рис. 3, 4) свидетельствуют, что при указанных условиях при взаимодействии соли железа (II) с карбонатом аммония возможно получение двух целевых продуктов – черного и желтого железооксидных пигментов. Причем область образования магнетита значительно больше.

Выводы. Таким образом, в результате проведенных исследований было установлено, что фазовый состав оксидных соединений железа, полученных путем гомогенного осаждения карбамидом приводит к образованию основных целевых продуктов гетита и магнетита. При этом области их образования практически одинаковы. Образование магнетита происходит при n=8–12. При использовании карбоната аммония преобладающей фазой является магнетит (n=2–8), что связано с быстрым гидролизом карбоната и резким повышением pH. Сравнительный анализ фазовых диаграмм позволил установить, что определяющей в случае получения целевых продуктов является скорость осаждения и последующего окисления.

Список литературы:

1. Legodi M.A., De Waal D. The preparation of magnetite, goethite, hematite and maghemite of pigment quality from mill scale iron waste. *Dyes and Pigments*. 2007. T. 74. № 1. C. 161–168.
2. Ali K., Javed Y., Jamil Y. Size and Shape Control Synthesis of Iron Oxide–Based Nanoparticles: Current Status and Future Possibility. *Complex Magnetic Nanostructures*. Springer, Cham, 2017. C. 39–81.
3. Frolova L. A. Production conditions of iron oxide black from pickle liquors. *Metallurgical & Mining Industry*. 2014. № 4. C. 1–4.
4. Šutka A., Lagzdina S., Käämbre T., Pärna R., Kisand V., Kleperis J., Maiorov M., Kikas A., Kuusik I. Jakovlevs D. Study of the structural phase transformation of iron oxide nanoparticles from an Fe^{2+} ion source by precipitation under various synthesis parameters and temperatures. *Materials Chemistry and Physics*. 2015. T. 149. C. 473–479.
5. Larese-Casanova P., Kappler A., Haderlein S. B. Heterogeneous oxidation of Fe (II) on iron oxides in aqueous systems: Identification and controls of Fe (III) product formation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2012. T. 91. C. 171–186.
6. Шабанова Н.А., Попов В.В., Саркисов П.Д. Химия и Технология нанодисперсных оксидов: учебное пособие для вузов. ИКЦ «Академкнига», 2006. 309 с.
7. Alibeigi S., Vaezi M. R. Phase transformation of iron oxide nanoparticles by varying the molar ratio of Fe^{2+}: Fe^{3+}.*Chemical engineering & technology*. 2008. T. 31. № 11. C. 1591–1596.
8. Mizukoshi Y., Shuto T., Masahashi N., Tanabe S. Preparation of superparamagnetic magnetite nanoparticles by reverse precipitation method: contribution of sonochemically generated oxidants. *Ultrasonics sonochemistry.* 2009. T. 16. № 4. C. 525–531.
9. Perez O.P., Umetsu Y., Sasaki H. Precipitation and densification of magnetic iron compounds from aqueous solutions at room temperature. *Hydrometallurgy*. 1998. T. 50. № 3. C. 223–242.
10. Mahmed N., Heczk, O., Söderber, O., Hannul, S. P. Room temperature synthesis of magnetite ($Fe_{3-\delta}O_4$) nanoparticles by a simple reverse co-precipitation Method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – IOP Publishing, 2011. T. 18. №. 3. C. 032020.
11. Толчев А.В., Багаутдинова Р.Р., Клещев Д.Г. Кристаллохимический аспект фазообразования в системе γ-FeOOH–H_2O–NaOH. *Журнал прикладной химии.* 2001. Т. 74. № 1. С. 389–394.
12. Клещев Д.Г., Толчев А.В., Первушин В.Ю. Фазообразование в системах α(δ)-FeOOH-$M(OH)_2$-H_2O (M-Mn, Co, Zn). *Неорганические материалы*. 2004. Т. 40. № 3. С. 317–322.
13. Клещева Р.Р., Клещев Д.Г., Толчев А.В., Попов М.А., Первушин В.Ю. Влияние параметров синтеза на фазообразование в системе $FeSO_4$-H_2O-H^+/OH^--O_2 (3.5≤ pH≤ 13). *Журнал прикладной химии.* 2003. Т. 76. № 9. С. 1419–1423.
14. Kovacheva D., Ruskov T., Krystev P., Asenov S., Tanev N., Mönch I., Koseva R., Wolff U., Gemming T., Markova-Velichkova M., Nihtianova D., Arndt K.-F. Synthesis and characterization of magnetic nano-sized Fe_3O_4 and $CoFe_2O_4$. *Bulgarian Chemical Communications*. 2012. T. 44. C. 90–97.

ФАЗОВІ ПЕРЕТВОРЕННЯ В УМОВАХ ГОМОГЕННОГО ОСАДЖЕННЯ ПРИ УТИЛІЗАЦІЇ ТРАВИЛЬНИХ РОЗЧИНІВ

У статті представлені результати досліджень умов утворення гетиту, лепідокроките і магнетиту з відпрацьованих травильних розчинів. Розглянуто взаємозв'язок між фазовим складом осаду і основними технологічними параметрами процесу: природа осаджувача, співвідношення осаджувач/катіон, температура, швидкість подачі повітря, pH.

Ключові слова: *травильні розчини, карбамід, пігмент, магнетит, гетит.*

PHASE TRANSFORMATIONS UNDER CONDITIONS BY HOMOGENEOUS PRECIPITATION WITH UTILIZATION OF PICKLE LIQUORS

In article the research results of conditions of formation of goethite, lepidocrocite and magnetite from pickle liquor are presented. Interrelation between phase composition of precipitate and basic technological parameters of the process: nature precipitant, relation precipitant/cation, temperature, speed of air delivery, pH is considered.

Key words: *pickle liquors, urea, pigment, magnetite, goethite.*

УДК 628.164

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

Гомеля М.Д.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Шаблій Т.О.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РЕАГЕНТІВ ДЛЯ СТАБІЛІЗАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ ВОДИ

Проведено дослідження оцінки ефективності реагентів щодо стабілізації водних середовищ у разі різних температурних умов. Як стабілізатори накипоутворення використовували відомі та синтезовані реагенти. Для порівняння застосовували оксиетилідендифосфонову кислоту. Серед відомих реагентів досліджували гіпан, карбоксиметилцелюлозу, лимонну та винну кислоти, нітрилтриметилфосфонову кислоту. Синтезовано антискалант метилдисульфонат натрію, перевірено його ефективність.

Ключові слова: *стабілізація води, антискалант, жорсткість води, стабілізаційний ефект.*

В Україні планомірно проводяться та реалізуються заходи з охорони водних ресурсів від забруднення та їх раціональне використання. У промисловості останнім часом широкого поширення набули системи оборотного та повторно-послідовного водопостачання, які показують, наскільки раціонально та ефективно можна використовувати водні ресурси [1, с. 528].

Найбільш прогресивний спосіб збереження водних ресурсів – це оборотне водопостачання. Зважаючи на наявний рівень технологій водопідготовки, можна оцінити максимально можливий коефіцієнт використання оборотної води. У хімічній промисловості, де близько 25% води витрачається як розчинник та екстрагент, він відповідає значенню 0,9–0,92, де навіть при повторному використанні води витрати свіжої води великі і становлять у середньому на 1 т продукції 50–130 м^3. В целюлозно-паперовій промисловості вони сягають 30–200 м^3. Звідси випливає одне з головних завдань у промисловому водоспоживанні – зниження норм споживання і відведення води через впровадження систем оборотного водопостачання і послідовного використання води, перехід виробництва на водозберігаючі (безстічні) технології [2, с. 280].

Підвищувати ефективність використання води в оборотних системах можна як шляхом пом'якшення води, що подається в системи, так і при використанні інгібіторів накипоутворення. Через економічну ситуацію в Україні на діючих підприємствах введення в дію додаткових ліній водопідготовки практично неможливе. Тому перспективним є напрям використання антискалантів та інгібіторів корозії у воді. Головними вимогами до інгібіторів накипоутворення, якщо враховувати великі об'єми води, що використовується в оборотних системах, є забезпечення високої стабільності води при невеликих дозах інгібіторів та невисоких цінах. У зв'язку з цим пошук недорогих, ефективних стабілізаторів накипоутворення у воді є досить актуальним [3, с. 996–1013].

На сьогодні досить актуальною є проблема стабілізаційної обробки води для водоциркуляційних систем охолодження в промисловості та енергетиці. Через підвищення якості водопідготовки знижуються обсяги води, які скидаються під час продування систем, що, в свою чергу, призводять до забруднення природних водойм. Ще одним ключовим фактором є те, що завдяки зменшенню обсягів води, що скидається на

продувку, зменшується забір природної води. Отже, постає питання успішного вирішення проблем стабілізаційної обробки води. Ця проблема вирішується завдяки переходу до замкнутих систем охолодження, захисту трубопроводів від корозії, ресурсозбереження та раціонального використання води, захисту природних водойм від техногенного впливу [4, с. 55–61].

Для вирішення проблем стабілізаційної обробки води застосовуюсь інгібітори. Такі інгібітори, що використовуються в водооборотних системах охолодження, мають не тільки істотно знижувати швидкість відкладення накипу на поверхні теплообмінного обладнання, а й забезпечувати захист металів від корозії [5, с. 158–160].

Найбільш широко оборотне водопостачання застосовується в самих водомістких системах, а саме в системах охолодження в промисловості та енергетиці [6].

У замкненому циклі вода від первинного джерела подається тільки у кількості, необхідній для поповнення безповоротних втрат у системі (на виробничі потреби, випаровування, крапельне винесення і т.п.).

Оборотна система якнайповніше відповідає вимогам водного законодавства про раціональне використання водних ресурсів: зменшення витрати води з джерел, граничне зменшення або повне припинення скидів відпрацьованих і стічних вод у водоймища. Суттєво можна зменшити об'єми водоспоживання в промисловості під час застосування антискалантів.

Інгібітори зменшують кількість відкладень шляхом того, що в об'ємі розчину утворюють дрібні кристали, які залишаються в потоці води і транспортуються ним [7, с. 33–39], а не осідають на поверхні теплообміну. На сьогодні відомі хімічні сполуки, які проявляють ефективні властивості інгібіторів щодо солей жорсткості [8, с. 50; 9, с. 554]: неорганічні полі- і метафосфати, ефіри фосфорної кислоти та їх солі, фосфонові та амінофосфонові кислоти, їх солі, полімерні інгібітори і композиції змішаного типу [10, с. 47–51].

Найбільш поширеними інгібіторами відкладень осадів є поліфосфати та різноманітні фосфонові кислоти [3, с. 996–1013]. Недоліком поліфосфатів є їх здатність до гідролізу при підвищених температурах, стимулювання процесів біообростання. Фосфонові кислоти є дорогими реактивами. Їх висока ціна зумовлена високою вартістю головного компоненту їх синтезу – фосфористої кислоти. Для синтезу інших комплексонів, типу етилендиамінтетраоцтової кислоти, використовують дорогі поліалкіленполіаміни та монохлороцтову кислоту.

Необхідність у розробці нових інгібіторів полягає в тому, що відомі реагенти далеко не зовсім відповідають наявним вимогам. Одні з них малоефективні, інші – нестійкі, а треті – надто дорогі.

Вивчення процесів накипоутворення і корозії металів у системі вода-метал є метою цієї роботи для створення високоефективних інгібіторів корозії і накипоутворення, що будуть забезпечувати надійний захист обладнання і трубопроводів водоциркуляційних систем охолодження і будуть сприяти значному зменшенню рівня водоспоживання в енергетиці і промисловості.

Для досягнення цієї мети було поставлено такі задачі:

– оцінити ефективність ряду реагентів щодо відкладання осаду сульфату кальцію з розчинів;

– дослідити процеси стабілізації модельних розчинів, близьких за складом до концентратів зворотньоосмотичного опріснення морської води, щодо осадковідкладень при використанні різноманітних антискалантів;

– визначити можливість застосування відомих та синтезованих реагентів для стабілізації водних розчинів при підвищених температурах.

У роботі було використано відомі та синтезовані реагенти. Для порівняння за ефективністю застосовували відомий антискалант – оксиетилідендифосфонову кислоту (ОЕДФК). Серед відомих реагентів були досліджені гіпан, карбоксиметилцелюлоза (КМЦ), лимонна та винна кислоти, нітрилтриметилфосфонова кислота (НТМФК) та синтезований нами антискалант – метилдисульфонат натрію (МДСН-Ф).

Антискалант МДСН-Ф синтезували із сульфіту натрію та формальдегіду. Для підкислення розчину до нейтрального використовували ОЕДФК.

Як середовища використовували водопровідну воду ($Ж_{поч}$ = 4,2 мг-екв/дм^3), модельний розчин сульфату кальцію, який отримували змішуванням рівних частин розчинів хлориду кальцію, з концентрацією 300 мг-екв/дм^3, та сульфату натрію з такою самою концентрацією (зрештою, отримували розчин з концентрацією сульфату кальцію 150 мг-екв/дм^3, при цьому концентрація хлориду натрію також сягала 150 мг-екв/дм^3). Крім того, для оцінки ефективності антискалантів при зворотньоосмотичному знесоленні води використовували модельний розчин, близький за складом до концентрату, що утворився б при зворотньоосмотичному знесоленні води з Азовського моря.

Для проведення досліджень з оцінки ефективності стабілізаторів накипоутворення використовувався модельний розчин, який містив Ca^{2+}, Na^{+}, Cl^{-}, SO_4^{2-} в концентрації 150 мг-екв/дм^3. Інгібітори вносили в розчин $CaCl_2$ перед його змішуванням із розчином Na_2SO_4. Реагенти застосовували в концентраціях: 0, 5, 10, 20, 30, 50 мг/дм^3. Дослід проводився протягом 48 годин при температурі 25 ºС. Послідовність приготування модельної суміші була така: до 50 см^3 розчину додавали певну дозу антискаланта, після перемішування додавали 50 см^3 розчину. Після закінчення експозиції пробу води відфільтровували та визначали в ній залишкову жорсткість.

Розрахунок стабілізаційного ефекту (СЕ, %) проводили за такою формулою [4, с. 55–61]:

$$CE = \left(1 - \frac{\Delta Ж_i}{\Delta Ж}\right) \cdot 100 \ , \qquad (1)$$

де $\Delta Ж_i$ – різниця між вихідним значенням $Ж_0$ і виміряним значенням після нагрівання жорсткості в присутності інгібітора $Ж_i$, мг-екв/дм^3; $\Delta Ж$– різниця між вихідним значенням $Ж_0$ і виміряним значенням жорсткості після нагрівання в пробі без інгібітору Ж, мг-екв/дм^3.

У разі стабілізаційної обробки високомінералізованих розчинів, що містили іони кальцію та сульфат-іони, найефективнішим стабілізатором накипоутворення виявився НТМФК.

За концентрації НТМФК 5 мг/дм^3 залишкова жорсткість зменшувалася лише зі 150 мг-екв/дм^3 до 143 мг-екв/дм^3. Ця концентрація НТМФК є оптимальною, бо при подальшому її збільшенні залишкова жорсткість тримається практично на постійному рівні.

Варто зазначити, що інші інгібітори значно поступались НТМФК. Так карбоксиметицелюлоза (КМЦ) та гіпан вели себе однаково, тобто з ростом їх концентрації збільшувалася залишкова жорсткість розчину. У діапазоні концентрацій 5–30 мг/дм^3 значення залишкової жорсткості в разі використання КМЦ були вищі за гіпан, хоча за концентрації 50 мг/дм^3 вони стали майже однаковими, 139,5 та 137 мг-екв/дм^3 відповідно.

Як стабілізатор лимонна кислота при малих концентраціях (5–10 мг/дм^3) працює неефективно. Максимальне значення залишкової жорсткості розчину (105 мг-екв/дм^3) було досягнуто за концентрації реагенту 20 мг/дм^3. При подальшому збільшенні концентрації лимонної кислоти цей реагент втрачає свої стабілізаційні властивості, залишкова жорсткість розчину зменшується до 88 мг-екв/дм^3 при дозі інгібітора 50 мг/дм^3.

Майже однаково себе проявили відомий стабілізатор накипоутворення ОЕДФК та синтезований нами інгібітор МДСН-Ф. Ці реагенти працюють лише при високих концентраціях, на рівні 50 мг/дм^3. Крім того, було виявлено, що залишкова жорсткість розчину в разі використання ОЕДФК при малих концентраціях була навіть нижчою за холості проби. Так залишкова жорсткість розчину в холостій пробі становила 55 мг-екв/дм^3, а при застосуванні ОЕДФК в концентраціях 5–30 мг/дм^3 вона коливалася в межах 50–51,8 мг/дм^3.

У цілому величини стабілізаційних ефектів різних реагентів пропорційні значенням залишкової жорсткості оброблених розчинів. У такому разі кращі результати були отримані при використанні НТМФК. Стабілізаційний ефект при її використанні сягав 92% при дозі 5 мг/дм^3 та 100% – при дозі 10 мг/дм^3.

Синтезований інгібітор МДСН-Ф проявив себе в сульфатних розчинах неефективним за концентрацій до 10 мг/дм^3. У разі збільшення концентрації стабілізаційний ефект підвищився до 43,2%.

Під час стабілізації водопровідної води використані реагенти, окрім гіпана, були досить ефективними. Залишкова жорсткість в усіх пробах води вже при концентрації інгібіторів 0,5 мг/дм^3 почала зростати.

При концентрації 1 мг/дм^3 стабілізатори ОЕДФК, МДСН-Ф мали найбільші значення залишкової жорсткості (4,1 мг-екв/дм^3 та 3,5 мг-екв/дм^3 відповідно). Крім того, зі збільшенням їх концентрацій вони поводили себе однаково, тобто залишкова жорсткість знизилась до певного рівня і такою залишалася.

Стабілізатор гіпан проявив себе дещо інакше: найбільшого значення залишкової жорсткості було досягнуто при концентрації інгібітора 2 мг/дм^3, після чого почався різкий спад.

Порівняно неефективним при малих концентраціях виявився стабілізатор КМЦ, але вже при концентрації 10 мг/дм^3 залишкова жорсткість води різко зросла до рівня НТМФК (4 мг-екв/дм^3). А що стосується самого НТМФК, то зі зростанням його концентрації збільшувалася залишкова жорсткість води, і при концентрації інгібітора 5 мг/дм^3 досягла максимуму (4,2 мг-екв/дм^3), а далі почала повільно спадати.

Високу ефективність стабілізації водопровідної води до осадовідкладень, як показали дослідження, забезпечили більшість інгібіторів. Яскраво виражено зростання стабілізаційного ефекту антискаланта НТМФК, який за концентрації 5 мг/дм^3 досяг 100%, однак за більшої концентрації інгібітора стабілізаційний ефект знизився до 83–89%.

Стабілізаційний ефект відомого інгібітора ОЕДФК та синтезованого МДСН-Ф мав порівняно однаковий характер. За концентрації 1 мг/дм^3 він дося максимального значення: ОЕДФК – 94,4% та МДСН-Ф – 61%. Далі стабілізаційний ефект антискалантів суттєво знизився.

Якщо розглядати інгібітори гіпан та КМЦ, то вони поводяться не так, як інші. Гіпан порівняно добре працює лише за концентрації 2 мг/дм^3, при цьому стабілізаційний ефект становить 61%. З подальшим збільшенням концентрації гіпану стабілізаційний ефект не спостерігається. Інгібітор КМЦ виявився ефективним лише при великих його концентраціях, тобто при концентрації 10 мг/дм^3 стабілізаційний ефект становив 89%.

Також були проведені дослідження щодо визначення ефективності лимонної та винної кислот як стабілізаторів накипоутворення при підвищених температурах. Однак вони не показали позитивних результатів у цих умовах.

Щодо оцінки ефективності антискалантів у модельному розчині, близькому за складом до концентратів, що утворюються під час зворотньосмотичного опріснення морської води, результати були неоднозначними. Проблемою було те, що жорсткість у модельному розчині без інгібіторів при зберіганні протягом двох діб практично не змінювалась. Сумарне зниження жорсткості, порівняно з теоретично розрахованим значенням, досягало 14 мг-екв/дм^3, що не більше 15% від вибраного рівня жорсткості. Тому на отримані результати значною мірою впливала похибка в проведенні аналізів. Очевидно, для більш точного визначення ефективності інгібіторів у подальшому будуть вибрані більш жорсткі умови щодо стабільності розчину.

Відомий антискалант ОЕДФК загалом характеризувався невисоким значенням стабілізаційного ефекту – до 50% при дозах від 5 до 50 мг/дм^3. Дещо вищу ефективність мав інший фосфонатний інгібітор НТМФК. При його використанні було досягнуто стабілізаційного ефекту на рівні 28–53%, при чому кращі результати отримано при менших дозах інгібітору. Значно вищою була ефективність цих інгібіторів по стабілізаційному ефекту по іонах кальцію. Саме вони здатні утворювати нерозчинні карбонати та сульфати. Так, по кальцію стабілізаційний ефект для ОЕДФК сягав 36,4–90,9%, для НТМФК – 36–80%, а при дозі 5 мг/дм^3 сягав 63,6%.

Зазвичай у зворотньоосмотичному опрісненні води використовують антискаланти, що містять як функціональні карбоксильні групи. Частіше за все, це олігомери акрилової, метакрилової кислот та інші такі сполуки. Тому нами були використані як інгібітори винна та лимонна кислоти, а також гіпан (гідролізований поліакрилонітріл) та гідролізований поліакриламід (ПАА), карбоксиметилцеллюлоза, які також є полікарбоксильними сполуками.

Із розглянутих речовин лише винна та лимонна кислота забезпечували задовільну ефективність. За загальною жорсткістю стабілізаційний ефект для них сягав 60–70%, а за кальцієм сягав 91%. Застосування гіпану, гідролізованного ПАА та карбоксиметилцеллюлози було неефективним у цій серії дослідів.

Висновки. У роботі було проведено дослідження оцінки ефективності реагентів щодо стабілізації водопровідної води та модельних розчинів при різних температурних умовах.

Визначено ефективність ряду реагентів щодо відкладання осаду $CaSO_4$ із концентрованих розчинів. Високу стабільність розчинів забезпечує стабілізатор накипоутворення НТМФК, який ефективно працював вже за низьких концентрацій. Стабілізаційний ефект за концентрації 10 мг/дм^3 досяг 100%. Прямопропоріційна залежність залишкової жорсткості від дози реагенту була виявлена в інгібіторів КМЦ та гіпан.

Проведено оцінку можливості застосування відомих та синтезованих реагентів для стабілізації води при підвищених температурах. Стабілізатори накипоутворення проявили себе досить ефективно. Вже за малих концентрацій (0,5 мг/дм^3) залишкова жорсткість при використанні усіх інгібіторів, за винятком гіпану, була досить високою. Кращими були інгібітори КМЦ та НТМФК. 100% стабілізаційний ефект було досягнуто для стабілізатора НТМФК за концентрації 5 мг/дм^3. КМЦ при концентрації 10 мг/дм^3 забезпечує стабілізаційний ефект на рівні 89%.

Список літератури:

1. Зінь Е.А. Регіональна економіка: підручник. К.: «ВД «Професіонал», 2007. 528 с.
2. Іванов С.В., Манчук Н.М., Борсук П.С. Загальна хімічна технологія: промислові хіміко-технологічні процеси: навч. посібник. Київ: НАУ, 2010. 280 с.
3. Пилипенко А.Т., Вахнин И.Г., Максин В.И. и др. Методы предотвращения накипеобразования при опреснении соленых вод. Химия и технология воды. 1991. № 11. С. 996–1013.

4. Рудковская Е.В., Омельчук Ю.А., Гомеля Н.Д. Разработка стабилизаторов накипеобразования для ресурсосберегающих водооборотных систем охлаждения. Збірник наукових праць Севастопольського національного університету ядерної енергії та промисловості. 2011. № 4 (40). С. 55–61.

5. Тыр С.Г., Бобошко З.А., Глушко И.Д. Оценка эффективности ингибиторов в средах оборотного водоснабжения. Защита металлов. 1993. № 29 (1). С. 158–160.

6. Применение ингибиторов в системах водоподготовки на основе обратноосмотических установок. URL: http://www.mediana-filter.com.ua/water_ingibitor_use.html (дата обращения: 25.01.2018).

7. Goeldner R.W. Scale control inhibitor performance at 100 ºC under boiling conditions. WSIA J. 1983. № 2. P. 33–39.

8. Емков А.А. Методы борьбы с отложениями неорганических солей в оборудовании подготовки нефти. М.: ВНИИОЭНГ, 1988. 50 с.

9. Дятлова Н.М., Темкина В.Я., Попов К.И. Комплексоны и комплексонаты металлов: учебник. М.: Химия, 1988. 554 с.

10. Рудковская Е.В., Омельчук Ю.А., Гомеля Н.Д. Оценка эффективности стабилизаторов накипеобразования для ресурсосберегающих водооборотных систем охлаждения. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2011. № 6. С. 47–51.

ИССЛЕДОВАНИЯ И ОЦЕНКА ЭФФЕКИВНОСТИ РЕАГЕНТОВ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ВОДЫ

Проведена оценка эффективности реагентов по стабилизации водных растворов при различных температурных условиях. Как стабилизаторы накипеобразования использовали известные и синтезированные реагенты. Для сравнения применяли оксиэтилидендифосфоновую кислоту. Среди известных реагентов исследовали гипан, карбоксиметилцеллюлозу, лимонную, винную, нитрилтриметилфосфоновую кислоты. Синтезирован антискалант метилдисульфонат натрия, проверена его эффективность.

Ключевые слова: *стабилизация воды, антискалант, жесткость воды, стабилизационный эффект.*

RESERCH AND EVALUATION OF REAGENT EFFICIENCY FOR STABILIZING WATER TREATMENT

The problem of stabilizing treatment of water for cooling systems in the energy industry and is very relevant. With increasing water quality will reduce the volume of water discharged during purging systems. And this, in turn, leads to a reduction in the pollution of natural water bodies. In this work used known and synthesized reagents. Oxyethylidenediphosphonic acid was used to compare the efficacy of antiscalants. Among the known reagents were investigated gipan, carboxymethylcellulose, citric and tartaric acid, nitriletrimethylphosphonic acid. A study evaluating the effectiveness of agents to stabilize the tap water and model solutions with different mineralization under different temperature conditions. Efficiency on a number of agents delaying CaSO4 scale from concentrated solutions. The evaluation of the possibility of using known and synthesized reagents for stabilization of water at higher temperatures was investigated. Tartaric and citric acid are relatively effective stabilizers in concentrates reverse osmosis seawater desalination. A new inhibitor of precipitation of sodium methyldisulfonate on the basis of sodium sulfite and formaldehyde was synthesized and its effectiveness was evaluated.

Key words: *stabilization of water, antyskalant, water hardness, stabilizing effect.*

Відомості про авторів

Абдулін М.З. – кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Анісімова Л.Б. – кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник Інституту проблем природокористування НАН України;

Бєляєв В.К. – кандидат технічних наук, доцент Навчально-наукового інституту енергетики, автоматики та енергозбереження Національного університету біоресурсів і природокористування України;

Бінг Лі – кандидат наук, доцент Східно-Китайського Університету Науки і Технології;

Брунеткін О.І. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних технологій автоматизації Одеського національного політехничного університету;

Бунякіна Н.В. – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімії Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка;

Бунько В.Я. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри енергетики і автоматики Відокремленого підрозділу Національного університету біоресурсів і природокористування «Бережанський агротехнічний інститут»;

Василишин В.Я. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної та комп'ютерної графіки Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу;

Великий С.С. – аспірант кафедри автоматизації і управління електротехнічними комплексами Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Велит І.А. – кандидат технічних наук, доцент Полтавської державної аграрної академії;

Габ А.І. – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри сучасної інженерії та нанотехнологій Відкритого міжнародного університету розвитку людини «Україна»;

Гого В.Б. – доктор технічний наук, професор Індустріального інституту ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»;

Гомеля М.Д. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри екології та технології рослинних полімерів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Денисюк І.І. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу інтенсифікації обмінних процесів Інституту геофізики імені С.І. Субботіна НАН України;

Дубоносов В.Л. – старший викладач кафедри органічного синтезу та нанотехнологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;

Жихаревич В.В. – кандидат фізико-математичних наук, доцент Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича;

Жученко О.А. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації хімічних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Забулонов Ю.Л. – доктор технічних наук, член-кореспондент НАН України, завідувач відділу ядерно-фізичних технологій Інституту геохімії навколишнього середовища НАН України;

Загриценко А.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри гідрогеології та інженерної геології ДВНЗ «Національний гірничий університет»;

Зінченко Н.Ю. – старший викладач кафедри харчової хімії Національного університету харчових технологій;

Кишенько В.Д. – кандидат технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації та інтелектуальних систем керування Національного університету харчових технологій;

Колєгова А.С. – аспірант Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова;

Корнага Я.І. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технічної кібернетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Косенко В.А. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автотранспорту та соціальної безпеки Відкритого міжнародного університету розвитку людини «Україна»;

Кричковська Л.В. – доктор біологічних наук, професор, завідувач кафедри органічного синтезу та нанотехнологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;

Лемешко В.А. – аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Лисюк О.В. – магістр, аспірант кафедри комп'ютерних технологій автоматизації Одеського національного політехничного університету;

Максименко А.О. – магістр, аспірант кафедри комп'ютерних технологій автоматизації Одеського національного політехничного університету;

Максимов М.В. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних технологій автоматизації Одеського національного політехничного університету;

Малишев В.В. – доктор технічних наук, професор, директор Інженерно-технологічного інституту Відкритого міжнародного університету розвитку людини «Україна», провідний науковий співробітник Інституту загальної та неорганічної хімії НАН України;

Маріяш Ю.І. – магістр 6 курсу кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Михайлов О.І. – студент Індустріального інституту ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»;

Нагорний В.П. – доктор технічних наук, професор, завідувач відділу інтенсифікації обмінних процесів Інституту геофізики імені С.І. Субботіна НАН України;

Онищенко В.О. – доктор економічних наук, професор, ректор Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка;

Остапов С.Е. – доктор фізико-математичних наук, професор Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича;

Паненко О.М. – асистент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Пантєлєєва І.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри фізики, електротехніки і електроенергетики Української інженерно-педагогічної академії;

Паньков Д.В. – аспірант, асистент кафедри автоматизації та інтелектуальних систем керування Національного університету харчових технологій;

Парталян А.С. – заступник начальника відділу екологічної безпеки та цивільного захисту Управління екологічної безпеки та протимінної діяльності Міністерства оборони України;

Пасько В.П. – кандидат технічних наук, доцент кафедри технічної кібернетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Петров С.В. – доктор технічних наук, старший науковий співробітник відділу плазменних технологій Інституту газу НАН України;

Письменний О.В. – головний спеціаліст з проектування кар'єрів ТОВ «МЕТІНВЕСТ ІНЖИНІРІНГ»;

Попова І.В. – кандидат технічних наук, доктор філософських наук, доцент, доцент кафедри харчової хімії Національного університету харчових технологій;

Репін М.В. – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Реуцький М.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електромеханіки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Розен В.П. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації і управління електротехнічними комплексами Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Сабадаш В.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри екології та збалансованого природокористування Національного університету «Львівська політехніка»;

Савченко Н.П. – старший викладач кафедри «Підйомно-транспортні, будівельні, дорожні машини і обладнання», «Автомобілі та автомобільне господарство» Донбаської національної академії будівництва і архітектури;

Сененко Н.Б. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри хімії Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка;

Сироватченко В.О. – інженер Індустріального інституту ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»;

Сімурова Н.В. – кандидат хімічних наук, доцент кафедри харчової хімії Національного університету харчових технологій;

Сірий О.А. – кандидат технічних наук, старший викладач Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Слободянюк В.К. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри відкритих гірничих робіт Криворізького національного університету;

Смирнов В.І. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автотранспорту та соціальної безпеки Відкритого міжнародного університету розвитку людини «Україна»;

Смірнов Ю.І. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автотранспорту та соціальної безпеки Відкритого міжнародного університету розвитку людини «Україна»;

Стенін О.А. – доктор технічних наук, професор кафедри технічної кібернетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Степанець О.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Стороженко Д.О. – кандидат хімічних наук, доцент, завідувач кафедри хімії Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка;

Т. Яшар Катірджи оглу – доктор філософії в хімії, генеральный директор та експерт з плазм компанії АРТЕКС (ARTECS), Туреччина;

Терещенко О.Я. – старший викладач кафедри сучасної інженерії та нанотехнологій Відкритого міжнародного університету розвитку людини «Україна»;

Тільняк Ю.Я. – магістр кафедри технічної кібернетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Трет'як А.В. – старший викладач кафедри «Підйомно-транспортні, будівельні, дорожні машини і обладнання», «Автомобілі та автомобільне господарство» Донбаської національної академії будівництва і архітектури;

Трохименко Г.Г. – кандидат біологічних наук, доцент, заступник завідувача кафедри екології та природоохоронних технологій Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова;

Ускова Н.М. – кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник Інституту загальної та неорганічної хімії НАН України;

Фомін О.О. – кандидат технічних наук, доцент Одеського національного політехнічного університету;

Фролова Л.А. – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології неорганічних речовин та екології ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»;

Химко О.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету «Львівська політехніка»;

Цапар В.С. – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації хімічних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Чекурін В.Ф. – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач відділу математичних проблем механіки неоднорідних тіл Інституту прикладних проблем механіки і математики імені Я.С. Підстригача НАН України;

Чумаченко С.М. – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу «Науковий центр аналітичних випробувань стану параметрів довкілля» Державної установи «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України»;

Шаблій Т.О. – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Шаруда С.С. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інтегрованих автоматизованих систем управління Національного університету харчових технологій;

Шахнін Д.Б. – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри сучасної інженерії та нанотехнологій Відкритого міжнародного університету розвитку людини «Україна»;

Шевченко С.Ю. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;

Шитікова І.Г. – кандидат технічних наук, науковий співробітник Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України;

Шумиляк Л.М. – Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича;

Шуриберко М.М. – аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Юшицина Я.О. – молодший науковий співробітник відділу інтенсифікації обмінних процесів Інституту геофізики імені С.І. Субботіна НАН України.

НОТАТКИ

Науковий журнал

ВЧЕНІ ЗАПИСКИ
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО

Серія: Технічні науки

Том 29 (68) № 1 2018

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. 17,76. Ум.-друк. арк. 24,18. Зам. № 0318/22
Підписано до друку 30.03.2018. Наклад 150 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»
73034, 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 № 4392 від 20.08.2012 р.