

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ "ХПІ"

Серія: «Механіко-технологічні системи та комплекси»

№ 17(1189)2016

Збірник наукових праць

Видання засноване в 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2016

Вісник Національного технічного університету «ХПІ».Збірник наукових праць. Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х.: НТУ „ХПІ” – 2016р. - №17(1189) – 130 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ №5256 від 2 липня 2001 року

Мова статей – українська, російська, англійська.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого Постановою президії ВАК України від 26 травня 2010 р., № 1 – 05/4 (Бюлетень ВАК України, № 6, 2010 р., с. 3, № 20).

Координаційна рада:

Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф. (**голова**);

К. О. ГОРБУНОВ, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);

А. П. Марченко, д-р техн. наук, проф.; Є. І. Сокол, член-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф.; Є. Є. Александров, д-р техн. наук, проф.; А. В. Бойко, д-р техн. наук, проф.; Ф. Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.; М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.; А. І. Грабчснко, д-р техн. наук, проф.; В. Г. Данько, д-р техн. наук, проф.; В. Д. Дмитриєнко, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.; В. В. Єпіфанов, канд. техн. наук проф.; Ю. І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.; П.О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В.Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.; С. І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.; В. І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; Г. В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.; О. К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.; В. І. Ніколаєнко, канд. іст. наук, проф.; П. Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.; В. А. Пуляев, д-р техн. наук, проф.; М. І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.; Г. М. Сучков, д-р техн. наук, проф., Ю. В. Тимофієв, д-р техн. наук, проф., М. А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор: Дьомін Д. О., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»;

Заст. відповідального редактора: Акімов О. В., д-р техн. наук, НТУ «ХПІ», Харків,

Відповідальний секретар: Костик В. О., канд. техн. наук, НТУ «ХПІ»;

Члени редколегії: Березуцький В. В., д-р техн. наук, НТУ «ХПІ», Харків, Дмитрік В. В., д-р техн. наук, НТУ «ХПІ», Харків, Дудніков А. А., канд. техн. наук, ПДАА, Полтава, Заблоцький В. К., д-р техн. наук, ДДМА, Краматорськ, Заміховський Л. М., д-р техн. наук, ІФТУНГ, Івано-Франківськ, Євстратов В. О., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Харків, Погрібний М. А., проф., НТУ «ХПІ», Харків, Пономаренко О. І., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Харків, Соболь О. В., д-р фіз.-мат. наук, НТУ «ХПІ», Харків, Шоман О.В., д-р техн. наук, НТУ «ХПІ», Харків, Jozef Voynarovsky, проф., Сілезького політехнічного інституту, Польща, Rab Nawaz Lodhi, проф. Bahria University Islamabad Pakistan, Пакистан, Меркер Е. Е., д-р техн. наук, проф., Старооскольський технологічний інститут – філія Національного дослідницького технологічного інституту «Московський інститут сталі і сплавів», Росія

Рекомендовано до друку вченою радою НТУ „ХПІ”

Протокол № 3 від «08» квітня 2016 р.

©Національний технічний університет „ХПІ”, 2016

УДК 535.5; 535.347

О. О. ОЛІЙНИК

МОДУЛЯЦІЙНО-ПОЛЯРИЗАЦІЙНИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ВНУТРІШНІХ МЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ В МІКРОЕЛЕКТРОННИХ СТРУКТУРАХ SI-AL

В роботі описується дослідження мікроелектронного сенсора тиску, роль мембрани якого виконує кремнієва пластина з напиленими на неї алюмінієвими провідниками та тензорезистором. Показано, що в початковому стані на поверхні мембрани існує розподіл механічних напружень, який спричинений геометрією сенсора, а також є наслідком наплення алюмінієвих провідників та тензорезистора. Приведені результати теоретичних досліджень, на відміну від існуючих ідеалізованих, дозволяють безпосередньо вимірювати та розраховувати початкові параметри механічних напружень кремнієвих структур, а не приймати їх значення за нуль, що дозволяє поліпшити, таким чином, метрологічні параметри сенсорів.

Ключові слова: модуляційна поляриметрия, механічні напруження в кремнії, механічні напруження в Si-Al.

В работе описывается исследование микроэлектронного сенсора давления, мембрана которого, выполнена с кремниевой пластины с напыленными на нее алюминиевыми проводниками и тензорезистором. Показано, что в начальном состоянии на поверхности мембраны существует распределение механических напряжений, которые вызваны геометрией сенсора, а также являются следствием напыления алюминиевых проводников и тензорезистора. Приведены результаты теоретических исследований, которые в отличие от существующих идеализированных, позволяют непосредственно измерять и рассчитывать начальные параметры механических напряжений кремниевых структур, а не принимать их нулевые значения, что позволяет улучшить, таким образом, метрологические параметры сенсоров.

Ключевые слова: модуляционная поляриметрия, механические напряжения в кремнии, механические напряжения в Si-Al.

The paper describes the research of microelectronic pressure sensor membrane which is made of a silicon wafer with deposited aluminum conductors and strain gage. It is shown that there is a distribution of mechanical stresses on the membrane surface in the initial state, which are caused by the geometry of the sensor as well as aluminum conductors and strain gage deposition. The results of theoretical research, unlike idealized present, allow to measure directly and calculate the initial parameters of silicon structure stresses, and do not give them zero value. It can improve metrological parameters of sensors. Modulation polarization technique for stress measurement using reflected polarized radiation is described. Experimental results demonstrate a sufficient sensitivity of the measuring equipment to membrane internal stress redistribution caused by heating after operation power is applied to the integral pressure sensor.

Keywords: modulation polarimetry, mechanical stress in the silicon, the mechanical stresses in the Si-Al.

Вступ. В мікроелектромеханічних (MEMS) та мікроелектронних системах використовують геометричну форму і властивості тонких плівок для керування параметрами приладів, виготовлених на їх основі. Виникаючі неконтрольовані механічні напруження можуть спричинити виникнення невідтворюваних механічних характеристик приладів, до зміни форми пристрою, а також до непередбачуваних термомеханічним деформаціям. Крім цього, механічні напруження, які формуються в процесі наплення, осадження та обробки плівок, можуть призводити до розтріскування та відшаруванню плівок від підкладки [1].

При формуванні мікроелектронних структур мембранного типу, а також структур, які виконані у вигляді плівки без підкладки варто враховувати механічні напруження та форму отриманих структур. За ра-

хунок підбору значень механічних напружень можливо керувати геометрією мембрани і створювати 3D-структури для мікроелектронних систем. Зменшення механічних напружень мембрани дозволяє зменшити її жорсткість, а як результат – збільшити її чутливість збережені конструкцій та малих геометричних розмірів.

В залежності від причин виникнення механічні напруження в плівках (мембранах) можуть бути термічними або термомеханічними, фазовими, фізико-хімічними, структурними [2, 3].

Механічні напруження також використовуються для формування мікроструктур під дією стискаючих напружень (рис. 1), де підбір параметрів кристалічної ґратки епітаксialних плівок дозволяє створювати тривимірні мікро- та наноструктури на основі плівок [4]:

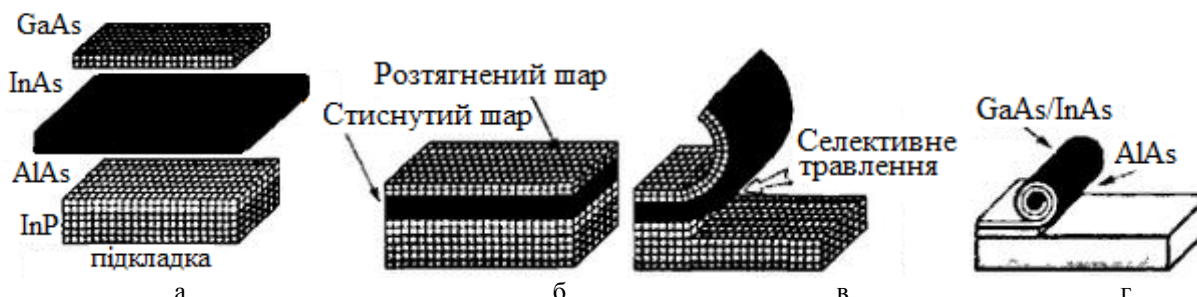


Рис. 1 – Схема формування нанотрубок: а – шари з різними постійними ґратки у вільному стані; б – шари, вирошені на підкладці, які повторюють кристалічну ґратку підкладки; в – вигин напруженої структури при селективному травленні, г – утворення нанотрубки [4]

Розвиток методів вимірювань механічних напружень обумовлено необхідністю контролювати величину механічних напружень в плівках різних матеріалів. Вимірювання механічних напружень може здійснюватись як в процесі отримання плівки, так і після його завершення. Вибір методу вимірювання визначається типом плівки, матеріалом підкладки та конструктивними особливостями.

Існуючі методи вимірювання механічних напружень можна класифікувати в залежності від застосованого фізичного явища: дифракційні методи (рентгєнівська або електронна), механічні (вимірювання деформації підкладки), електричні методи (вимірювання провідності, ємності та інших параметрів тонких плівок) [5]. Реєстрація деформації зазвичай здійснюється оптичними інтерференційними методами за умови достатньої деформації мембрани. Недоліком механічних методів є неможливість розділення механічних напружень кристалів і аморфних фаз, а рентгєнівська дифракція дає інформацію лише про напруження в кристалічній фазі [6]. Основні методи для дослідження кристалічних плівоч є: растрова електронна мікроскопія, просвітлюючі електронна мікроскопія, резерфордівське зворотне розсіювання, еліпсометрія, ПЧ-Фур'є спектроскопія, атомно-силова мікроскопія, спектроскопія комбінаційного розсіювання світла та інші [7].

Постановка проблеми. Проблемам вимірювання механічних напружень в твердих тілах присвячено безліч наукових публікацій, але відносно незначна їх частина присвячена прищезійним та надчутливим методам вимірювань, які дозволяють вимірювати такі механічні напруження, які не викликають деформації підкладки чи мембрани. В роботі [8] модуляційно-поляризаційний метод реєстрації механічних напружень в поверхневій плівці (порушений шар в процесі полірування кристалічного кварцу) демонструє високу виявну здатність завдяки фотопружному ефекту. Описаний взаємозв'язок між параметрами лазерного випромінювання, величиною приповерхневих механічних напружень та деформацією підкладки і плівки підходить лише для оптичнопрозорих підкладок, наприклад: кристалічного кварцу (елементи оптоелектроніки), сапфіру (елементи електроніки, оптики), полікарбонату (CD-DVD-BluRay диски), ніобату літїю (прилади на поверхневих акустичних хвилях в електроніці) та ін. У випадку підкладки з оптично непрозорих матерів: Si, Ge, GaAs, SiC, металеві плівки та ін., описаний метод не підходить і потрібно зібрати оптичну схему установки, яка реєструє оптичну (механічну) анізотропію не у пройдену крізь зразок випромінюванні, а у відбитому. Така оптична схема установки побудована за принципом інтерферометра Майкельсона, у якому додатково розташовано модулятор стану поляризації (рис. 2).

У випадку дослідження матеріалів з великим значенням показника поглинання відбита хвиля формується в приповерхневому шарі кристалу співрозмірному довжині поглинання. Якщо кристал хоча б на довжині поглинання має діелектричну анізотропію, то стан поляризації падаючого випромінювання зміниться після взаємодії зі зразком.

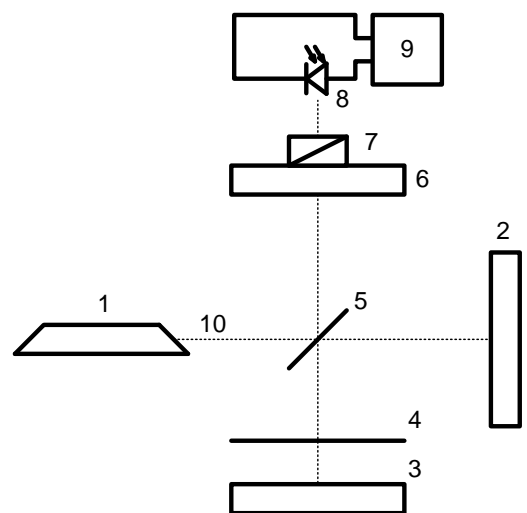


Рис. 2 – Оптична схема приладу для вимірювання поверхневих механічних напружень: 1 – лазер, 2 – зразок, 3 – дзеркало, 4 – чвертьхвильова фазова пластинка, 5 – напівпрозоре дзеркало, 6 – фотопружний модулятор, 7 – поляризатор, 8 – фотоприймач, 9 – синхронно-фазовий нановольтметр, 10 – поляризатор

Отже існує гостра необхідність у розробці нових методик вимірювання механічних напружень в елементах електроніки та техніки, зокрема в сенсорах тиску, деформації, акселерометрів, MEMS тощо. Актуальною є проблема вимірювання розподілу механічних напружень на поверхні мікроелектронних структур, які виникають після наплення металічних провідників та компонентної бази на кристалічну підкладку, зокрема – кремнієву. Не менш важливим є реєстрація стаціонарних дефектів, динаміки деформації підкладки, виникнення динамічних механічних напружень при роботі компонентів електроніки на поверхні та всередині інтегральних схем.

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є встановлення особливостей зміни механічних напружень шляхом їх безпосереднього вимірювання в найбільш характерній для сучасної електроніки структурі: Si-Al плівка при зміні температури мембрани під час подачі живлення на інтегральний тензорезистор. Задачами дослідження є виявлення оптичної анізотропії на поверхні кремнію з напленнями алюмінієвими доріжками, знайти систему параметрів необхідну для розрахунку механічних напружень з урахуванням шумових та дестабілізуючих факторів.

Теоретичний розрахунок зміни фази лазерного випромінювання, відбитого від анізотропної поверхні

На основі якісного розгляду фізики взаємодії лазерного випромінювання з кристалом, діелектричні властивості якого описуються діагональним тензором, а електрична та магнітна компоненти випромінювання не враховуються на довжині поглинання, то остаточний вираз для фази відбитої хвилі Δ має вигляд [8]:

$$\Delta = \arctg \left[\frac{2n'_y n''_y}{1 - (n'_y)^2 - (n''_y)^2} \right] - \arctg \left[\frac{2n'_x n''_x}{1 - (n'_x)^2 - (n''_x)^2} \right] \quad (1)$$

де n'_x, n'_y – дійсна та уявна частини комплексного показника заломлення вздовж y -координати; n''_x, n''_y – дійсна та уявна частини комплексного показника заломлення вздовж x -координати. Оскільки кристал Si має кубічну сингонію та набуває анізотропію діелектричних властивостей при одновісній деформації, то можна прийняти як модель лінійну залежність показників заломлення від одновісного механічного напруження:

$$\begin{aligned} n'_x &= n'_{0x} + C\sigma_x \\ n''_x &= n''_{0x} + C\sigma_x \\ n'_y &= n'_{0y} - \nu C\sigma_y \\ n''_y &= n''_{0y} - \nu C\sigma_y \end{aligned} \quad (2)$$

де C – константа фотопружності; ν – коефіцієнт Пуассона; σ_x, σ_y – механічні напруження вздовж координат.

Результати експериментальних досліджень. У якості об'єкту дослідження був вибраний сенсор тиску, який працює на поперечній тензоЕРС. Суть ефекту витікає із загальної властивості анізотропних напівпровідників, які полягають в не колінеарності електричних полів і струмів якщо до напівпровідника прикласти зовнішню механічну силу стискання або розтягнення. На рис. 3. показаний зовнішній вигляд такого сенсору, який складається з кремнієвої пластини з напрямом кристалу [100] і напрямом зовнішньої деформації вздовж [110], а також самого перетворювача виконаного у вигляді тензорезистора довжиною 200 мкм та шириною 100 мкм. Сам сенсор тиску складається з двох паралельних кремнієвих пластин, але оскільки вони розділені між собою повітряним зазором, структура нижньої мембрани, яка приймає на себе зовнішній тиск, не буде впливати на результати досліджень. Також слід відмітити і той факт, що нижня частина видимого кристалу кремнію витравлена у вигляді трапеційного профілю для підвищення еластичності.

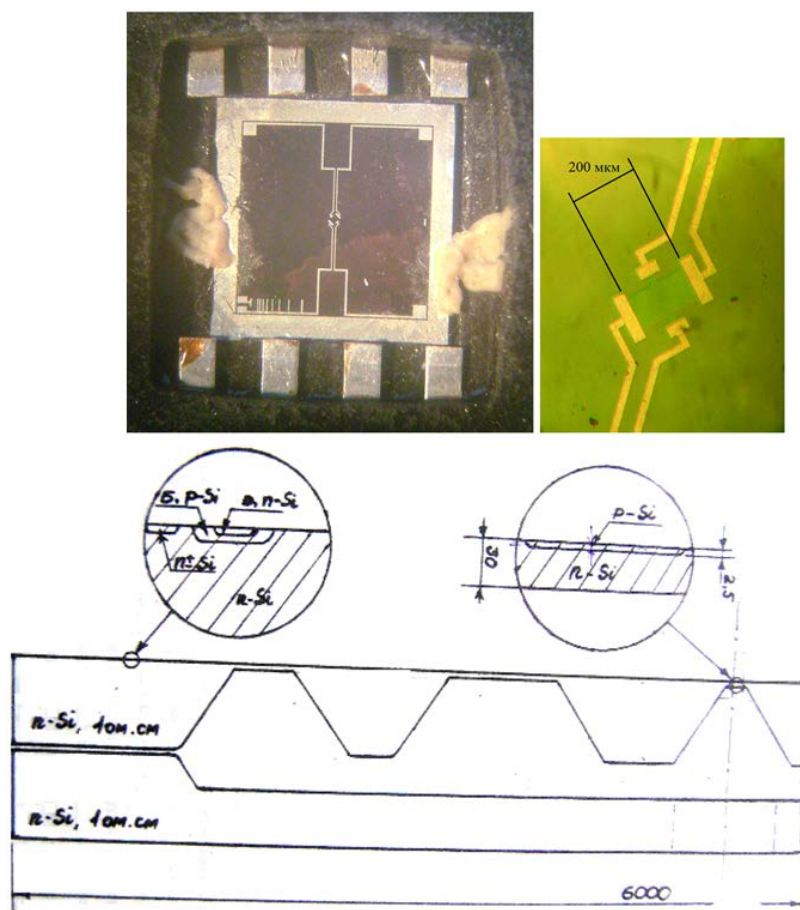


Рис. 3 – Зовнішній вигляд сенсора тиску, кристал Si розміром 6х6 мм (верхній лівий); тензорезистор виконаний методом дифузії на глибині 2,5 мкм, габарити 200х100 мкм, R=900 Ом (верхній правий), поперечна структура сенсора тиску (внизу)

Результати вимірювань представлені на рис.4. Суцільна тонка лінія показує вимірювану оптичну анізотропію поверхні кристалу кремнію з двома напиленими алюмінієвими провідниками у виключеному стані. При подачі живлення на тензорезистор напругою 5В та струм 100 мА він почав нагріватись та нагрівати саму мембрану разом з алюмінієвими доріжками, що

в свою чергу змінило оптичну анізотропію поверхні кристалу. Точковою лінією показаний новий розподіл оптичної анізотропії після 10 хв робочого режиму тензорезистора, наступні вимірювання не виявили прогресуючі зміни параметрів кристалу. Різниця між початковою та наведеною нагріванням тензорезистора оптичної анізотропії показана суцільною чорною лінією.

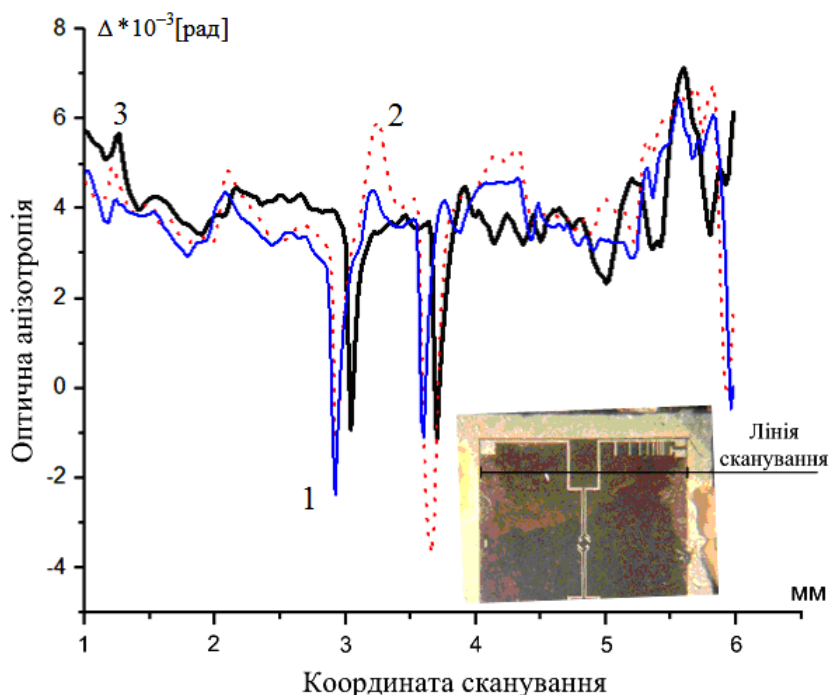


Рис. 4 – Розподіл стаціонарної (1), наведеної або нестационарної (2) оптичної анизотропії на довжині поглинання; різниця між стаціонарною та наведеною оптичною анизотропіями (3)

Скориставшись формулами (1) та (2) був розрахований розподіл механічних напружень на поверхні кремнієвої мембрани з урахуванням зміни коефіцієнта відбиття на границі Si-Al та інших електрофізичних та оптичних параметрів: показник поглинання кремнію $k=0,000225$; показник заломлення кремнію $n=3.8$; коефіцієнт Пуассона кремнію $\nu=0,4$ та алюмінію $\nu=0,34$; константа фотопружності $C=0,0007$ кг/см². Розрахунок проводився методом кінцевий різниць з допомогою САПР. Результати розрахунків показані на рис. 5.

Як видно з графіку, внаслідок температурного розширення мембрани на її краях та в околицях алюмінієвих провідників збільшується стискаюче механічне напруження, а під провідниками протилежне за значенням – розтягуюче механічне напруження.

Похибка розрахунків в значній мірі залежить від стабільності цілого ряду прийнятих параметрів, відхилення яких від середнього значення в рамках даної роботи не досліджувалось. Щодо інструментальної та методичної похибки вимірювання оптичної анизотропії, то вони не перевищувала 10 %.

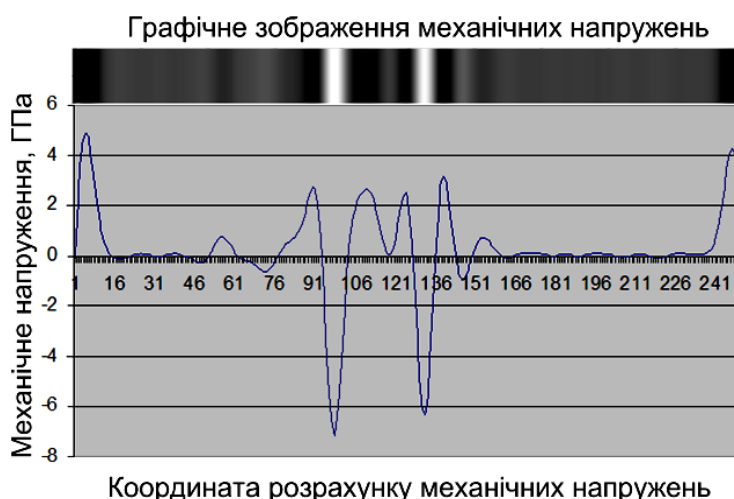


Рис. 5 – Залежність наведеного розподілу механічних напружень на поверхні кремнієвої мембрани від координати (крок розрахунків відповідає 23 мкм). Над графіком представлена еквівалентна діаграма з використанням чорно-білих півтонів

Висновки. Використавши високу виявну здатність модуляційної поляриметрії щодо оптичної анизотропії було зібрану установку, здатну реєструвати зміну механічних напружень на поверхні Si як в стаціонарному режимі так і в процесі експлуатації тензорезистивного сенсору тиску. Отримані результати пі-

дтверджують повільну кінетику перехідних процесів в електронній структурі, що дає змогу використати описаний метод дослідження для реєстрації нестационарних перехідних процесів (коли параметри системи не стабільні та змінюються з часом до моменту сталого режиму роботи) [9]. Також отримані експеримен-

тальні результати підтверджують теоретичні викладки стосовно нестационарної теплопровідності, яка докладно описаної в [10]. Слід відмітити високий ступінь якісного узгодження отриманих експериментальних результатів з теоретично передбачуваними, а саме як видно з рис.5. між краями мембрани та Al провідниками є знакозмінні коливання механічних напружень які не зникають після охолодження мембрани, а є відображенням протилежної витравленої поверхні як показано на рис.3. Оскільки довжина поглинання випромінювання з довжиною хвилі 630nm складає біля 2,4 мкм, то реєстрація механічних напружень, які викликані геометричною формою мембрани на глибині 140 мкм представляє додатковий інтерес та буде висвітлена в наступних роботах.

Список літератури:

1. Асташенкова, О. Н. Контроль физико-механических параметров тонких пленок [Текст] / О. Н. Асташенкова, А. В. Корляков // Нано- и микросистемная техника. – 2013. – No2. – С. 24–29.
2. Tamulevicius, S. Stress and strain in the vacuum deposited thin films [Text] / S. Tamulevicius // Vacuum. – 1998. – Vol. 51. No 2. – P. 127–139.
3. Механические напряжения в тонких пленках [Текст] // Обзоры по электронной технике. Сер. 2 Полупроводниковые приборы. – Вып. 8 (798). – 1981. – 63 с.
4. Принц, В. Я. Нанооболочки и прецизионные наносистемы на основе напряженных гетероструктур [Текст]: автореф. д. физ.-мат. наук: 01.04.10 / В. Я. Принц – Новосибирск, 2005. – 40 с.
5. Кривошеева, А. Н. Пассивные и активные мембраны для устройств микросистемной техники [Текст]: автореф. дисс. канд.тех. наук: 05.27.01 / А. Н. Кривошеева. – СПб., 2007. – 16 с.
6. Механические напряжения в тонких пленках [Текст] // Обзоры по электронной технике. Сер. 2 Полупроводниковые приборы. – Вып. 9 (799). – 1982. – 68 с.
7. Рындя, С. М. Особенности структуры тонких плёнок SiC, формируемых методом импульсного лазерного осаждения на подложках Si и Al₂O₃ [Текст]: дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.07 / С. М. Рындя. – М., 2014. – 143 с.
8. Сердега, Б. К. Модуляційна поляриметрія [Текст] / Б. К. Сердега // К.: Наук. Думка. – 2011. – 238 с.
9. Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных [Текст] / Дж. Бендат, А. Пирсол // Пер. с англ. / – М.: Мир, 1989. – 540 с.
10. Михеев, М. А. Основы теплопередачи [Текст] / М. А. Михеев, И. М. Михеева // Изд. 2-е, стереотип. М., «Энергия», 1977. – 344 с.

Bibliography (transliterated):

1. Astashenkova, O., Korlyakov, A. (2013) Kontrol fiziko-mekhanicheskikh parametrov tonkikh plenok. Nano- i mikrosistemnaya tekhnika, 2, 24–29.
2. Tamulevicius, S. (1998) Stress and strain in the vacuum deposited thin films // Vacuum, 51(2), 127-139.
3. Mekhanicheskiye napryazheniya v tonkikh plenkach (1981). Obzory po elektronnoy tekhnike. Ser. 2 Poluprovodnikovyye pribory, 8(798), 63.
4. Prints, V. (2005) Nanoobolochki i pretsizionnyye nanosistemy na osnove napryazhennykh geterostruktur: avtoref. d. ph.-math. nauk: 01.04.10/ V. Prints – Novosibirsk, 40.
5. Krivosheeva, A. (2007) Passivnyye i aktivnyye membrany dlya ustroystv mikrosistemnoy tekhniki: avtoref. diss. kand. tech. nauk: 05.27.01. SPb, 16.
6. Mekhanicheskiye napryazheniya v tonkikh plenkach (1982). Obzory po elektronnoy tekhnike. Ser. 2 Poluprovodnikovyye pribory, 9(799), 68.
7. Ryndya, S. (2014) Osobennosti struktury tonkikh plenok SiC formiruyemykh metodom impulsnogo lazernogo osazhdeniya na podlozhkakh Si i Al₂O₃: dis. kand. phis.-math. nauk: 01.04.07/ Moscow, 143.
8. Serdega, B. K. (2011). Modulyatsiyana polyarimetriya. Kiev: Nauk. Dumka., 238.
9. Bendat, Dzh., Pyrsol, A. (1989). Pрыkladnoy analiz sluchaynykh dannykh. Moscow: Myr., 540.
10. Mykheev, M. A., Mykheeva, Y. M. (1977). Osnovy teploperedachy. Moscow: «Enerhyya», 344.

Надійшла (received) 20.03.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Модуляційно-поляризаційний метод вимірювання внутрішніх механічних напружень в мікроелектронних структурах Si-Al / О. О. Олійник // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – No 17(1189). – С. 3–7. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Модуляционно-поляризационный метод измерения внутренних механических напряжений в микроэлектронных структурах Si-Al / О. О. Олейник // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – No 17(1189). – С. 3–7. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Modulation-polarization method for internal mechanical stresses measurement in microelectronic structures Si-Al / О. О. Oliinyk//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2015. – No 49 (1189).– P. 3–7. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Олійник Остап Олегович – аспірант, кафедра Електронних приладів та пристроїв, факультет електроніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»; вул. Політехнічна, 16, корпус No12. Київ, Україна, 03056; тел.: 066-310-36-20; e-mail: ostap.oliinyk@gmail.com.

Олейник Остап Олегович – аспірант, кафедра Електронних приборів та пристроїв, факультет електроніки, Национальный технический университет Украины «КПИ»; ул. Политехническая, 16, корпус No12. Киев, Украина, 03056; тел.: 066-310-36-20; e-mail: ostap.oliinyk@gmail.com.

Oliinyk Ostop Olegovych – PhD student, Department of Electronic Devices and Equipment, Faculty of Electronics, National Technical University of Ukraine "KPI"; 16 Polytechnique str, Kyiv, Ukraine, 03056; tel.: 066-310-36-20; e-mail: ostap.oliinyk@gmail.com.

УДК 621.791.052.5 – 412

А. В. ЛОЗА, В. В. ЧИГАРЁВ

ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТО-СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Рассмотрены вопросы надежности сварных соединений в комбинированных конструкциях. Определена возможность повышения качества лито-сварных соединений, изготовленных из углеродистых сталей с различной структурой. Проанализированы методы повышения механических и эксплуатационных свойств литых заготовок и их влияние на свойства сварного соединения. Показано, что выполнение специального промежуточного слоя с повышенными пластическими характеристиками в виде наплавки на литую заготовку приводит к уменьшению количества дефектов в околошовной зоне и повышению прочности металла в зоне сварного соединения в комбинированных стальных конструкциях.

Ключевые слова: сварные соединения, лито-сварные конструкции, углеродистая сталь, дефекты структуры, механические свойства.

Розглядаються питання надійності зварних з'єднань в комбінованих конструкціях. Встановлена можливість підвищення якості лито-зварних з'єднань, що виготовляються з вуглецевих сталей з різною структурою. Проаналізовані методи підвищення механічних та експлуатаційних якостей заготовок з литва та їх вплив на якості зварних з'єднань. Виконання спеціального проміжного шару з підвищеними пластичними характеристиками, як наприклад, наплавка на литу заготовку, призводить до зменшення числа дефектів в околошовній зоні та підвищенню міцності металу в зоні зварного з'єднання в комбінованих сталених конструкціях.

Ключові слова: зварні з'єднання, лито-зварні конструкції, вуглецева сталь, дефекти структури, механічні якості.

The article deals with the analysis of the properties of welded joints in combined structures. An opportunity of improving the quality of cast and welded, made of carbon steels with various structure was found out. Analyzed were the methods of improving mechanical and operational properties of cast blanks and their influence upon the properties of welded joints.

It was shown that application of a special intermediate layer with improved plastic characteristics deposited on a cast blank part could lead to a decrease in the number of defects in the vicinity of the weld's area and improvement of metal strength in the area of welded joints in combined steel structures.

Keywords: welded structures, cast and welded structures, carbon steel, defects of the structure, mechanical properties

Введение. Сварка является эффективным и надежным способом соединения конструктивно-сложных деталей в монолитные изделия при изготовлении оборудования различного назначения. Технология сварки разработана достаточно подробно для соединения широко применяемых сталей с однородной структурой. В то же время, при изготовлении некоторых видов специального оборудования экономически эффективным является применение лито-сварных конструкций, технология производства которых обладает рядом особенностей. Наибольший опыт по изготовлению лито-сварных и лито-деформированных конструкций накоплен в машиностроении для корпусных деталей, а также в авиастроении при изготовлении несущих узлов летательных аппаратов [1, 2]. Применение таких конструкций обусловлено стремлением повысить прочность изделий наиболее экономичным методом. Расширение номенклатуры изделий, изготавливаемых комбинированным способом, позволяет добиться значительного снижения металлоемкости и увеличения конструктивной прочности деталей и узлов в любой отрасли промышленности, что в современных условиях является важнейшей задачей любого производства, и в частности, в черной металлургии. В данной отрасли, несмотря на значительный технологический прогресс, часто встречаются случаи преждевременного выхода из строя крупногабаритных деталей по причине металлургических дефектов. Поэтому задача изготовления лито-сварных соединений с гарантированным качеством представляется как определенная проблема. В частности, такая проблема существует при соединении деталей и узлов из углеродистых сталей с различной структурой в единую конструкцию. Решение такой проблемы связано с оптимизацией конструкторских решений, технологии изготовления литых заготовок и сварочного производства.

Анализ исследований и публикаций. Практика показывает, что при использовании комбинированных изделий (например, лито-сварных) их качество и надежность зависят от большого числа факторов [3–5]. Суммарный ресурс работы конструкции может быть увеличен в случае выбора оптимальных инженерных решений на всех стадиях: конструирования, изготовления и также эксплуатации. Учет указанных этапов имеет особенно большое значение для изделий, которые играют роль силовых узлов. Для таких изделий первейшим вопросом является выбор материала, а также моделирование работы конструкции и выполнение прочностных расчетов. Например, в авиационной технике некоторые силовые рамы, узлы шасси и др. изготавливают сваркой литых и деформированных заготовок. При использовании различных материалов (сталей, алюминиевых, титановых, Al–Mg и Al–Li сплавов) неизбежно возникает проблема качества сварного соединения, которое определяется свойствами литых заготовок. При этом ни на одном этапе проектирования даже при наличии современных информационных технологий и вычислительной техники невозможно учесть особенности дефектов структуры литых заготовок, соединяемых в единый узел. Выполнение проекторочных и проверочных расчетов базируется на применении типовых схем нагружения для конструкций с однородными свойствами, которые задаются для каждого материала в среднем, в предположении отсутствия дефектов. Исследование разрушенных узлов показывает, что такой подход не всегда является верным. По этой причине сварные соединения в комбинированных конструкциях обычно являются слабым звеном в изделиях различного назначения.

В комбинированных сварных соединениях зона

© А. В. Лоза, В. В. Чигарёв .2016

структурной неоднородности представляет опасность с точки зрения понижения их качества и надежности. В углеродистых сталях зона структурной неоднородности может быть развита значительно, что оказывает существенное влияние на общую прочность лито-сварного изделия.

Цель статьи. Целью статьи является определение возможности повышения надёжности лито-сварных соединений, изготавливаемых из углеродистых сталей, которые наиболее часто используются в металлургии и машиностроении.

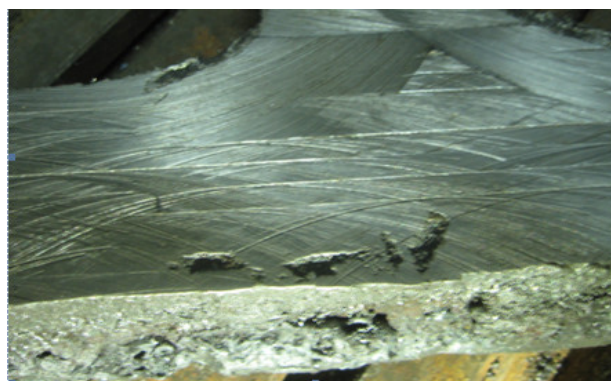
Изложение основного материала – особенности изготовления лито-сварных конструкций. В металлургии и машиностроении большое количество литых изделий и заготовок производят из сталей 30Л, 35Л. Это объясняется комплексом механических свойств, которые удовлетворяют требованиям по изготовлению типовых деталей и отражены в справочной технической литературе. Приведенные в справочниках свойства указанных сталей позволяют изготавливать рычаги, балансиры, муфты, шкивы, кронштейны, чаши, станины, балки, бандажы, маховики и другие детали, работающие под действием средних статических и динамических нагрузок. Однако при исследовании механических характеристик обращает на себя внимание тот факт, что свойства литых заготовок в краевой и центральной части отливок могут значительно отличаться. Сравнение механических свойств образцов, отобранных от разрушенных изделий в нескольких зонах, показывает, что различие прочностных свойств отдельных участков одного изделия может определяться для углеродистых сталей десятками процентов. Такая особенность литых заготовок существенным образом сказывается на длительности эксплуатации многих, и особенно массивных изделий. Особенно большую роль указанный факт играет в случае использования литой заготовки с нестабильными свойствами в лито-сварном соединении, что необходимо учитывать на стадиях проектирования и производства. В случае дальнейшей обработки литой заготовки, например, механической, или при выполнении сварочных операций дефекты металлургического происхождения могут оказаться близко к поверхности и значительно повлиять на прочность и надежность сварного соединения и всей конструкции. Это подтверждается при экспериментальном исследовании свойств образцов от литых заготовок. В заготовке из стали 35Л, которая использовалась как полуфабрикат для лито-сварной конструкции, уточняли распределение механических свойств и характер залегания внутренних дефектов. Макро-структуру изучали в отливках толщиной 50–100 мм. При исследовании оказалось, что в стальных отливках указанных толщин распределение свойств и расположение дефектов не всегда соответствует общепринятым положениям. Согласно теоретическим представлениям, известным в технической литературе, дефекты усадочного происхождения должны быть сосредоточены в тепловых узлах, в частности – в центральной зоне Т-образного сечения отливки [6]. Наличие таких дефектов должно автоматически приводить к снижению механических свойств от периферии к центру. В исследованных промышленных отливках толщиной

60 мм из стали 35Л (рис. 1, а) дефекты усадочного происхождения оказались распределенными в периферийной зоне Т-образного сечения. Наличие внутренних дефектов вне центральной зоны поперечного сечения предполагает возможность выхода их на поверхность (рис. 1, б), что значительно ослабляет прочность конструкции и сокращает ресурс её работы.

При исследовании металла в поперечном сечении рассматриваемых образцов обнаружена значительная химическая неоднородность, связанная, по видимому, с послойным характером кристаллизации стальной отливки. Зафиксирован разброс механических свойств металла на участках, свободных от макродефектов: предел прочности изменялся от 460 до 740 МПа (отклонение составляет 60 % от средних значений).



а



б

Рис. 1 – Дефекты макроструктуры в сечении литой заготовки из стали 35Л: а – макротемплет поперечного сечения детали, б – вид с торца заготовки

Такой разброс свойств и распределение дефектов, возможно, связаны с нарушением технологии литья, например, на стадиях заливки металла в формы и дальнейшего охлаждения. На участках с внутренними дефектами макроструктуры образцы имели значение σ_b 230–270 МПа. Анализируя структуру литых заготовок, нужно отметить, что при любой поточной технологии стального литья металл имеет повышенное количество неметаллических включений [7]. В крупных литых заготовках влияние этого негативного явления ещё более усиливается при малой скорости охлаждения отливок. Укрупнение и скопление неметаллических включений, что особенно проявляется при замедленной скорости кристаллизации, значительно ухудшает структуру стали (рис. 2) и негативно влияет на её механические свойства, прежде всего – на показатели пластичности. При испытаниях на растяжение (рис. 3) образцы из литой стали разрушаются хрупко,

без площадки текучести. Недостаток пластических свойств служит одной из причин преждевременного образования трещин в конструкциях, особенно в условиях циклического нагружения.

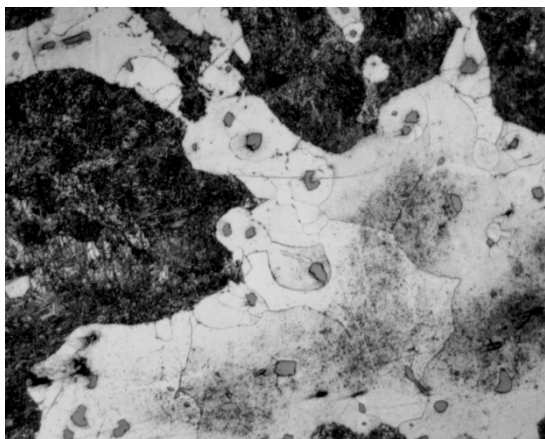


Рис. 2 – Структура литой стали 35Л с повышенным количеством неметаллических включений

В практике металлургического производства могут быть использованы промышленные методы по улучшению структуры металла литых заготовок и повышению их механических свойств. Путем увеличения скорости кристаллизации жидкой стали достигается существенное измельчение зерна и более плотная структура металла, что повышает его механические свойства. При этом технологам необходимо откоррек-

тировать технологию литья таким образом, чтобы обеспечить минимальное содержание неметаллических включений, вредных примесей и газов (прежде всего – H_2) в тех областях заготовки, которые находятся максимально близко к зоне предполагаемой сварки. Эксперименты подтверждают положительное влияние технологии дополнительной обработки расплава на снижение содержания водорода в зоне сварного соединения.

Другим эффективным методом повышения механических и эксплуатационных свойств стальных литых заготовок является их комплексное микролегирование и модифицирование. Например, РЗМ, обладая большим сродством к примесям железоуглеродистых сплавов (S, N, O), связывают их в нерастворимые сульфиды, нитриды и оксиды. Это уменьшает негативное влияние примесей на свойства стали. Кроме того, мелкодисперсные продукты взаимодействия РЗМ с кислородом, азотом и серой увеличивают количество активных центров кристаллизации, которые влияют на скорость затвердевания и характер структуры углеродистых сталей, измельчая зерно металла. При этом создание дополнительных центров кристаллизации может увеличивать скорость затвердевания стали в 2–2,5 раза. Примером комплексного влияния нескольких химических элементов на механические свойства литой среднеуглеродистой стали может быть легирование её ванадием, марганцем и азотом (табл. 1).

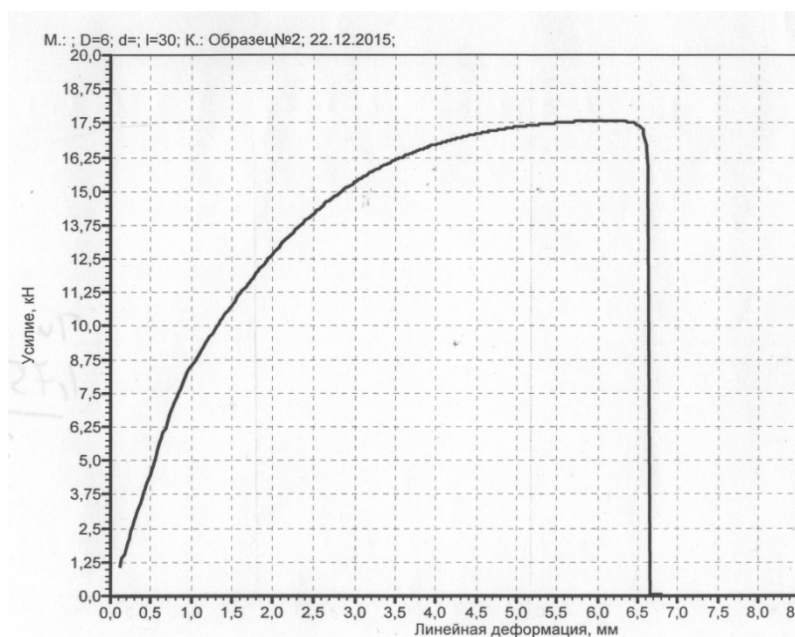


Рис. 3 – Диаграмма растяжения литой стали 35Л

Таблица 1 – Механические свойства исследованных сталей 35Л, 35ФЛ [8]

Марка стали	σ_b , кг/мм ²	σ_T , кг/мм ²	δ , %	ψ , %	НВ	a_n , кгс /см ² при ⁰ С		
						+20	-40	-60
35Л	60,1	37,2	28,0	30,0	160	3,9	2,6	1,7
35ФЛ	67,6	43,1	20,4	35,6	186	3,6	2,2	1,4

Анализ механических свойств, представленных в табл. 1, показывает, что легированием можно обеспечить повышение механических свойств на 10–20 % (по литературным данным – до 30 %), что не может компенсировать снижение механических характеристик (50 % и более) от внутренних физических неоднородностей.

Особенность литой структуры проявляется в том, что при наличии микродефектов и неметаллических включений в области ОШЗ комбинированного сварного соединения вблизи линии сплавления возникает неоднородность в виде цепочки рядом со швом (рис. 4), что значительно влияет на прочность металла. В сварных соединениях механическая неоднородность, как правило, ухудшает их прочность [9]. При сложных условиях нагружения деталей разрушение металла может проходить по области наибольшего скопления включений, которые являются дополнительными концентраторами напряжения.

Расположение неметаллических включений в виде цепочки существенно ослабляет зону сварного соединения, а повышенная газонасыщенность приводит к диффузии H_2 из основного металла в сварной шов. В связи с этим, при производстве комбинированных конструкций должны быть применены методы увеличения прочности зоны сварного соединения. В комбинированных конструкциях из разнородных сталей [10] переходная зона имеет более низкие показатели прочности и пластичности по сравнению с другими областями металла. В таких условиях значительную роль играет выбор материала композиции в комбинированной конструкции и режим выполнения сварки. При этом задача обеспечения прочности сварного со-

единения заключается в обеспечении таких свойств шва и околошовной зоны, чтобы они превышали механические свойства менее прочного металла в композиции (рис. 5).

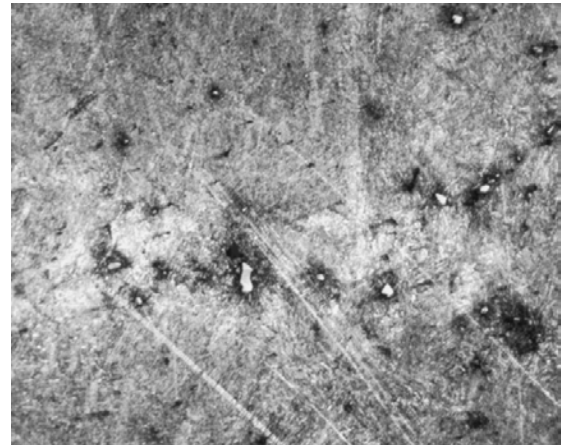


Рис. 4 – Дефекты литой заготовки из стали 35Л в зоне сварного шва

В этом случае разрушение комбинированной конструкции будет происходить не по зоне структурной неоднородности в сварном соединении, а по основному металлу с более низкими механическими свойствами (рис. 6).

Одним из способов упрочнения является выполнение специального промежуточного слоя с повышенными пластическими характеристиками. Такой слой может быть создан наплавкой с применением электродов УОНИ 13/45, 13/55.

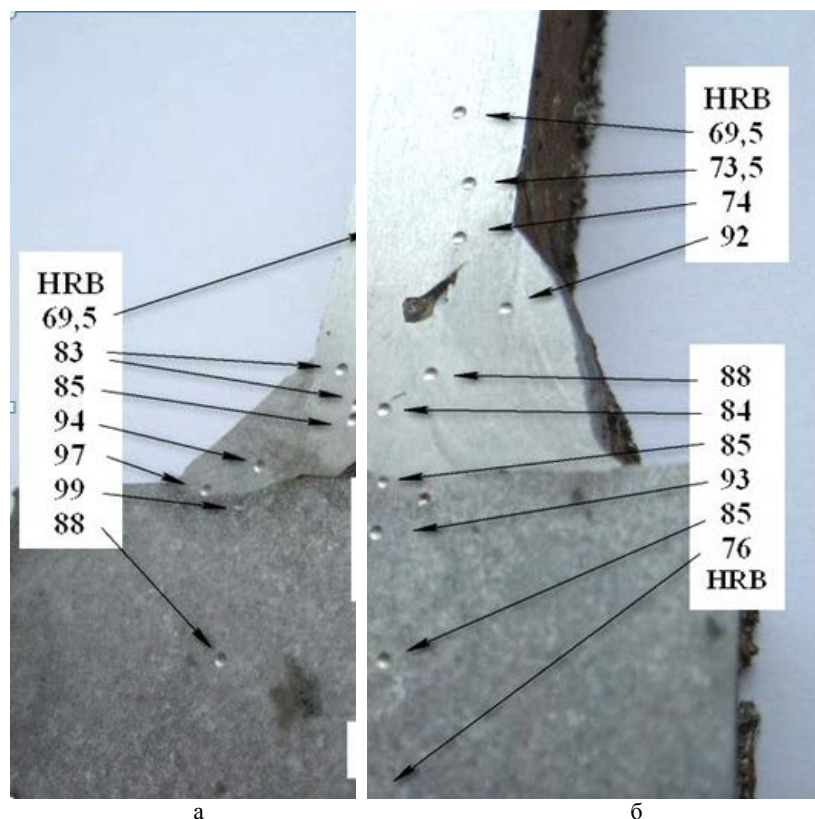


Рис. 5 – Распределение твердости в лито-сварном соединении (ребро жесткости из стали 09Г2С на основном металле литой заготовки из стали 35Л) при различных режимах сварки: а – режим 1, б – режим 2



Рис. 6 – Разрушение разрывных образцов в сварных соединениях композиции 35Л-09Г2С: а – шов Т10, б – шов Т8

При этом достигается изменение структуры литого металла в зоне соединения, а также могут быть заплавлены возможные дефекты макроструктуры в приповерхностных слоях заготовки (рис. 7). При выполнении промежуточного слоя отмечается значительно меньшее содержание неметаллических включений в сварном шве, что увеличивает его прочность. При испытании на растяжение цилиндрических образцов разрыв происходит не по зоне сплавления, а по основному металлу. Уровень прочности всей конструкции определяется свойствами менее прочной составляющей. Значительное влияние на качество и надежность лито-сварного соединения оказывает химический состав литья в зоне сварки. При содержании углерода по верхнему пределу в стали 35Л при сварке возможно возникновение трещин. Для предупреждения их возникновения необходимо применение предварительного подогрева литых заготовок перед сваркой.



Рис. 7 – Фрагмент опытного образца из стали 35Л с наплавленным промежуточным слоем на заготовке с литейными дефектами

Выводы

1. Для повышения качества лито-сварных соединений из углеродистых сталей необходимо регламентировать в технической документации свойства литых заготовок, содержание примесей и размер макродефектов в зоне сварного соединения.
2. При соблюдении специальной технологии выполнения сварного соединения прочность лито-сварной конструкции из углеродистых сталей лимитируется свойствами её менее прочной составляющей.

Для увеличения прочности металла в сварном соединении необходимо применение специального промежуточного слоя с повышенными пластическими свойствами по отношению к литому металлу. Такой слой может быть выполнен путем наплавки.

3. Выбор материала в комбинированной конструкции, а также режима сварки определяет её прочность и характер разрушения. Работу конструкций из разнородных сталей можно прогнозировать, если их разрушение будет происходить не по зоне структурной неоднородности, а по основному металлу с заданным уровнем механических свойств.

Список литературы:

1. Братухин, А. Г. Прогрессивные методы производства комбинированных конструкций и свойства алюминиевых лито-деформированных сварных соединений [Текст] / А. Г. Братухин, Н. С. Постников // Вестник машиностроения. – 1992. – № 8–9. – С. 35–37.
2. Фридляндер, И. Н. Высокопрочные, жаропрочные и коррозионностойкие алюминиевые и магниевые сплавы, композиционные материалы на их основе [Текст] / И. Н. Фридляндер // Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ: Юбилейный сборник. – М.: МИСИС, ВИАМ, – 2002. – С. 198–220.
3. Братухин, А. Г. Концепция и металлургические особенности производства лито-деформированных конструкций [Текст] / А. Г. Братухин, Е. Б. Глотов, В. И. Лукин // Сварочное производство. – 1993. – С. 2–4.
4. Моисеенко, В. П. Материалы и их поведение при сварке: учебное пособие для вузов [Текст] / В. П. Моисеенко. – Ростов н/Д: Изд-во Феникс. – 2009. – 300 с.
5. Земзин, В. Н. Сварные соединения разнородных сталей: Монография [Текст] / В. Н. Земзин. – М.: Машиностроение, 1966. – 232 с.
6. Жегур, А. А. О питании Т-образных термических узлов при литье по выплавляемым моделям [Текст] / А. А. Жегур, С. И. Репях // Литейное производство. – 2010. – № 12. – С. 15–19.
7. Чигарев, В. В. Повышение качества отливок из углеродистых сталей [Текст] / В. В. Чигарев, Д. А. Рассохин, А. В. Лоза // Металл и литьё Украины. – 2012. – № 1 (224). – С. 23–26.
8. Филиппенков, А. А. Влияние ванадия, азота и марганца на механические свойства и кинетику роста зерна аустенита литой стали 35Л [Текст] / А. А. Филиппенков, Г. С. Кудрявцев и др. // Литейное производство. – 1973. – № 6. – С. 19–20.
9. Дильман, В. Л. Напряженное состояние и прочность сварных соединений с механической неоднородностью [Текст] / В. Л. Дильман, А. А. Остемин // Сварочное производство. – 1998. – № 5. – С. 15–17.
10. Готальский, Ю. Н. Сварка разнородных сталей: Монография [Текст] / Ю. Н. Готальский. – Киев, Изд-во «Техніка», 1981. – 184 с.

Bibliography (transliterated):

1. Bratukhin, A. G., Postnikov, N. S. (1992). Progressivnyye metody proizvodstva kombinirovannykh konstruktсий i svoystva alyuminievykh lito-deformirovannykh svarnykh soedineniy. Vestnik mashinostroeniya., 8–9, 35–37.
2. Fridlyander, I. N. (2002). Vysokoprochnyye, zharoprochnyye i korroziionnostoykie alyuminievye i magnievye splavy, kompozitsionnyye materialy na ikh osnove Aviatsionnyye materialy. Izbrannyye trudy VIAM: Yubileynyy sbornik. Moscow: MISIS, VIAM, 198–220.
3. Bratukhin, A. G., Glotov, E. B., Lukin V. I. (1993). Kontseptsiya i metallurgicheskie osobennosti proizvodstva lito-deformirovannykh konstruktсий. Svarochnoe proizvodstvo, 2–4.
4. Moiseenko, V. P. (2009). Materialy i ikh povedenie pri svarke: uchebnoe po-sobie dlya vuzov. Rostov n/D: Izd-vo Feniks, 300.
5. Zemzin, V. N. (1966). Svarnyye soedineniya raznorodnykh staley: Monografiya. Moscow, Mashinostroenie, 232.
6. Zhegur, A. A., Repyakh, S. I. (2010). O pitanii T-obraznykh termicheskikh uzlov pri lit'e po vyplavlyаемым modelyam. Liteynoe proizvodstvo, 12, 15–19.
7. Chigarev, V. V., Rassokhin, D. A., Loza, A. V. (2012). Povyshenie kachestva otlivok iz uglerodistykh staley. Metall i lit'ye Ukrainy, 1 (224), 23–26.
8. Filippenkov, A. A., Kudryavtsev, G. S. i dr. (1973). Vliyaniye vanadiya, azota i margantsa na mekhanicheskie svoystva i kinetiku rosta zerna austenita litoy stali 35L. Liteynoe proizvodstvo, 6, 19–20.
9. Dil'man, V. L., Ostsemin, A. A. (1998). Napryazhennoe sostoyaniye i prochnost' svarnykh soedineniy s mekhanicheskoy neodnorodnost'yu. Svarochnoe proizvodstvo, 5, 15–17.
10. Gotal'skiy, Yu. N. (1981). Svarka raznorodnykh staley: Monografiya. Kiev, Izd-vo «Tekhnika», 184.

Поступила (received) 30.03.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Особенности изготовления лито-сварных конструкций из углеродистых сталей/ А. В. Лоза, В. В. Чигарёв// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С8–13. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Особенности изготовления лито-сварных конструкций з вуглецевих сталей/ А. В. Лоза, В. В. Чигарёв // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.8–13. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Peculiarities of manufacturing of cast and welded structures of carbon steels/ A. V. Loza, V. V. Chigarev//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 17 (1189).– P.8–13. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Лоза Аркадій Васильевич – старший преподаватель, Кафедра теоретической и прикладной механики, Приазовский государственный технический университет, пер. Университетский, 7, г. Мариуполь, Украина, 87500; тел.: 097-338-29-75; e-mail: loza_a_v@pstu.edu.

Лоза Аркадій Васильович – старший викладач, Кафедра теоретичної і прикладної механіки, Приазовський державний технічний університет, пров. Університетський, 7, м. Маріуполь, Україна, 87500; тел. : 097-338-29-75; e-mail: loza_a_v@pstu.edu.

Loza Arkadiy Vasilyovich – Lecture of the department of theoretical and applied Mechanics of Pryazovskyi State Technical University, vul. Universytetska, 7, Mariupol, 87500 Ukraine; tel: 097-338-29-75; e-mail: loza_a_v@pstu.edu.

Чигарёв Валерий Васильевич – Академик АИНУ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Металлургия и технология сварочного производства», Приазовский государственный технический университет, пер. Университетский, 7, г. Мариуполь, Украина, 87500; тел.: 068-780-40-35; e-mail: chigarew07@rambler.ru.

Chigarev Valeriy Vasilyovich – Doctor of technical sciences, professor of Pryazovskyi State Technical University, vul. Universytetska, 7, Mariupol, 87500 Ukraine; tel: 068-780-40-35; e-mail: chigarew07@rambler.ru

Чигарёв Валерій Васильович – Академік АІНУ, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Металургія і технологія зварювального виробництва», Приазовський державний технічний університет, пров. Університетський, 7. Маріуполь, Україна, 87500; тел. 068-780-40-35; e-mail: chigarew07@rambler.ru.

УДК 548.31

С. Р. АРТЕМЬЕВ, В. П. ШАПОРЕВ

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫХ ВОЛОКОН НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ

В статье анализируются некоторые методы получения непрерывных волокон нитевидных кристаллов, а именно – метод волочения и метод вытяжки (Тейлора). Представлены схематические описания проведения обоих процессов, обращено внимание на качественные показания полученных итоговых результатов. Проанализированы технологические операции, которые составляют методику проведения процесса волочения и роль каждой из них. Представлены итоговые показатели прочности кристалла в зависимости от его вида при проведении обоих методов получения. Полученные результаты могут быть использованы в широком спектре применения различных групп нитевидных кристаллов, в том числе в вопросах охраны окружающей среды.

Ключевые слова: нитевидные кристаллы, метод волочения, метод Тейлора, прочность кристалла, термическая обработка.

У статті проведено аналіз деяких методів отримання безперервних волокон ниткоподібних кристалів, а саме – метод волочіння та метод витягання (Тейлора). Надано схематичний опис проведення обох процесів, зосереджено увагу на якісних показниках отриманих підсумкових результатів. Проаналізовано операції технологічного процесу, які є складовою частиною методики проведення процесу волочіння, вказана роль кожної з операцій. Представлено підсумкові показники міцності кристалу залежно від його виду під час здійснення обох методів отримання. Отримані результати можуть бути використані у широкому спектрі застосування різних груп ниткоподібних кристалів, у тому числі і в питаннях охорони довкілля.

Ключові слова: ниткоподібні кристали, метод волочіння, метод Тейлора, міцність кристалу, термічна обробка.

In the second half of past century scientists more often began to speak to the questions of lead through of researches of such group of crystals, as threadlike. And if before it more touched foreign sources, in the USSR this question becomes more actual exactly in the indicated interval of time, not going down and to today. First, the so called, theoretical durability of threadlike crystals was expected practically 90 years back and remains actual until now. First, the so-called, theoretical durability of threadlike crystals was expected practically 90 years back and remains actual until now. The conducted literary review rosined on that in the certain amount of scientific editions, in most foreign, the questions of lead through of mechanical researches of threadlike crystals are represented. One methods of receipt of continuous fibres of threadlike crystals are analysed in the article, namely – the method of dragging and method is you-severe (Teylora). Schematic descriptions of lead through of both processes are presented, paid regard to high-quality testimonies the got aggregate results. Technological operations are analysed, this make the method of lead through of process of dragging and roll each of them. The total scores of durability of crystal are presented depending on his kind during the lead through of both methods of receipt. Can be drawn on the got results in the wide spectrum of application of the once-personal groups of threadlike crystals, including in the questions of guard of environment.

Keywords: threadlike crystals, method of dragging, method of Teylora, durability of crystal, heat treatment.

Введение. Ни для кого не является секретом тот факт, что нитевидные кристаллы обладают рядом свойств, которые существенно отличают их, например, от макрокристаллов. В первую очередь, хочется обратить внимание на упругость и прочность [1]. Следует заметить тот факт, что оценка данной группы свойств нитевидных кристаллов была углубленно проведена лишь в середине прошлого века [2].

В данной научной статье анализируются методы получения непрерывных волокон нитевидных кристаллов именно с точки зрения показателей их прочности. За основу анализа взяты методы волочения и метод вытяжки. Представлены схематические описания проведения обоих процессов, обращено внимание на качественные показания полученных итоговых результатов. Проанализированы технологические операции, которые составляют методику проведения указанных процессов и роль каждого из них. Представлены практические показатели прочностей различных кристаллов при использовании обоих методов.

Анализ литературных данных и постановка проблемы. Во второй половине прошлого столетия ученые все более часто стали обращаться к вопросам проведения исследований такой группы кристаллов, как нитевидные. И если ранее это более касалось зарубежных источников, то в СССР данный вопрос становится более актуальным именно в указанный промежуток времени, не снижаясь и до сегодняшнего дня.

Впервые, так называемая, теоретическая прочность нитевидных кристаллов была рассчитана практически 90 лет назад [3] и в дальнейшем данный вопрос нашел свое отражение в различных источниках и, в частности, в [4, 5].

Проведенный литературный обзор показал на то, что в определенном количестве научных изданий, в большинстве своем зарубежных, отображены вопросы проведения механических исследований нитевидных кристаллов.

Так, теоретическая прочность кристаллов была рассчитана Френкелем [3] для простейшей модели еще в 1926 году. Она также была рассчитана другими исследователями на основании рассмотрения электростатического взаимодействия между ионами [4] с учетом Вандерваальсовых сил, о чем было указано в источнике [5]. При проведении исследований учеными были получены различные значения прочностей различных групп нитевидных кристаллов, в том числе и металлических, что отображено было в таких источниках как [6,7]. В то время как впрочем, и сейчас основная задача была сведена к получению такого значения прочности, которое было бы близко к, так называемому, «теоретическому».

Однако следует заметить, что такое получалось не часто, но было. В частности, проведенный обзор показал, что в решении проблемы увеличения показателя прочности данной группы кристаллов существенное значение имели работы советского ученого А.В. Степанова, который еще в 50-х годах прошлого столетия разработал физическую теорию разрушения периодически неоднородных анизотропных сред.

Если говорить о данной группе кристаллов, то помимо прочности они имеют еще и достаточно мощное сопротивление образованию трещин, высокую стойкость при проведении химических процессов взаимодействия, что было, в частности, указано в [8].

© С. Р. Артемьев, В. П. Шапоров. 2016

Именно для данной группы кристаллов прочность, причем уникально высокая – является наиболее важным свойством, которая в разы превосходит такую же прочность, например, у монокристаллов и поликристаллов. Данный показатель, прежде всего, объясняется совершенством структуры нитевидного кристалла и меньшим количеством различных дефектов [9 – 13].

Если анализировать источники последних 10 лет, то следует отметить, что указанные вопросы рассматривались во время проведения научных конференций и семинаров, что указано в [14 – 16].

Именно поэтому с позиции показателя прочности рассматриваются методы получения непрерывных волокон нитевидных кристаллов в данной статье.

Цели и задачи исследования. Целью данной научной статьи является проведение анализа таких методов получения непрерывных волокон нитевидных кристаллов, как метод волочения и метод вытяжки (Тейлора).

Задачи статьи:

1. Описание проведения обеих процессов с позиции получения качественных показателей прочности кристаллов.

2. Анализ технологических операций, которые составляют методику проведения процесса волочения и роль каждой из них.

3. Исследование использования метода порошковой металлургии в процессе получения различных проволок нитевидных кристаллов.

Анализ методов волочения и вытяжения (Тейлора) в процессах получения непрерывных волокон нитевидных кристаллов. Волочением получают высокопрочные металлические проволоки, являющиеся одним из самых распространенных видов непрерывных волокон, применяемых для армирования матриц различных композитов.

Волочение – это процесс обработки давлением, в ходе которого пластическая деформация исходной заготовки (2) (в холодном или горячем состоянии) осуществляется за счет ее протягивания через постоянно сужающееся отверстие в инструменте (1), называемом волокой или фильерой (рис. 1) [17].

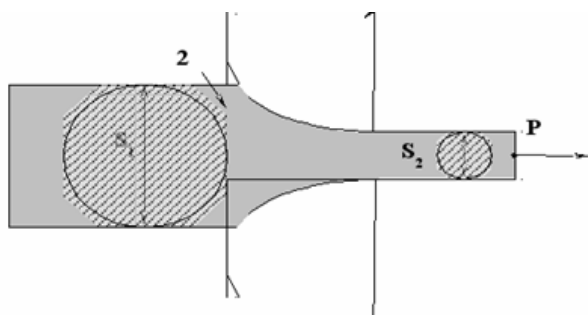


Рис. 1 – Схематическое изображение процесса волочения: 1 – фильера (волока), 2 – заготовка (пруток), S_1 и S_2 – площадь поперечного сечения прутка до и после волочения, \rightarrow – направление приложения усилия P для волочения.

Ее, как правило, изготавливают из твердого сплава. При волочении площадь поперечного сечения (S) заготовки уменьшается, а длина увеличивается. Отношение величины S до волочения к таковому зна-

чению после волочения называется коэффициентом вытяжки.

Стальные проволоки изготавливают путем реализации следующих последовательных операций:

1. Термическая обработка заготовки (прутка или катанки) для устранения наклепа, полученного ею при прокатке.

2. Щелочно-кислотное травление для удаления с поверхности оксидов (окалины).

3. Нанесение смазочного покрытия.

4. Непосредственно «волочение».

5. Термообработка для придания проволоке дополнительного упрочнения или пластичности.

Высокоуглеродистые стальные проволоки после волочения могут иметь предел прочности на разрыв 2800 – 3000 МПа. Однако их высокая прочность сохраняется лишь до температуры 200 – 250 °С. При дальнейшем ее повышении прочность таких проволок резко уменьшается.

В этом случае целесообразно применять проволоки из мартенситно-старяющихся и нержавеющих сталей. Скорость волочения стальной проволоки может составлять 30 – 120 м /мин. при давлении обжатия 25 – 75 МПа.

В частности проволоки из вольфрама и молибдена получают методами порошковой металлургии [18]. Для этого из указанных металлических порошков прессуют штабики под давлением 400 – 600 МПа и 320 – 370 МПа – для вольфрама и молибдена соответственно. Порошки перед прессованием увлажняются небольшим количеством глицерина в спирте для лучшей прессуемости. Сечение штабиков составляет от 8 x 8 до 40 x 40 мм, а длина может варьироваться от 280 до 600 мм.

Далее их спекают при температуре 1000 – 1300 °С в атмосфере сухого водорода. При этом снимаются внутренние напряжения, заложенные на этапе прессования, выгорает добавка глицерина, а также восстанавливаются оксидные пленки на поверхности частиц металла.

Затем получают заготовки с минимальной пористостью (5 – 15 %) путем высокотемпературного спекания (также называемого сваркой) штабиков в водороде за счет пропуска через них электрического тока.

Вольфрамовые штабики спекают по ступенчатому режиму: сначала при температуре 2000 – 2200 °С, окончательно – при 2900 – 3000 °С. Спекание молибдена ведут в вакууме при температуре 2300 °С, либо в водороде при температуре 1950 °С.

Спеченные штабики подвергают ротационной ковке с последующим волочением для получения проволоки. Перед ковкой вольфрамовые штабики нагревают до температуры 1450 °С в атмосфере водорода для предотвращения хрупкого разрушения. Волочение вольфрама начинают с диаметра 2,75 мм и ведут до 0,01 мм. На начальных стадиях деформации температура волочения составляет около 1000 °С, ее снижают до 400 – 600 °С на заключительных стадиях.

Нагрев ведут с помощью электрических нагревательных элементов, либо используют пламя газовой горелки. Проволоки с диаметром 0,3 мм и более изготавливают при помощи твердосплавных фильер, а при

меньших диаметрах проволоки используются алмазные фильеры.

В качестве смазки при волочении используют аквадаг – суспензию графита в воде. В процессе изготовления вольфрамовую проволоку подвергают нескольким промежуточным отжигам.

Первый проводят в газовой печи при температуре 800 °С и диаметре 0,5 мм для придания поверхности проволоки некоторой шероховатости, позволяющей лучше удерживать аквадаг. Следующие промежуточные отжики проводят в трубчатой электрической печи при температуре 600 – 750 °С с одновременным волочением через фильеру на диаметрах 0,3; 0,12; 0,05 мм.

При этом часть внутренних напряжений в проволоке снимается, и она становится более пластичной. Метод получения молибденовой проволоки аналогичен, описанному ранее. Отличие заключается лишь в том, что термообработку более пластичного молибдена (по сравнению с вольфрамом) ведут при температурах на 100 – 300 °С ниже.

Предел прочности промышленных не отожженных вольфрамовых проволок марок ВЧ, ВА, ВМ и ВТ зависит от диаметра и составляет, например, при диаметре 0,01 – 0,05 мм, 4500 – 3500 МПа.

Для молибденовой проволоки марки МЧ диаметром 0,05 – 0,1 прочность составляет 2500 – 2000 МПа [19].

При нагреве до температуры 1200 °С предел прочности проволок снижается и составляет, например, 740 МПа (для марки ВА) и 1390 МПа (для, например, марки ВР).

Бериллиевую проволоку изготавливают методом порошковой металлургии. Для этого из порошка бериллия путем прессования и последующего спекания получают бериллиевые заготовки. Перед волочением их, в случае необходимости, можно подвергать прокатке и ковке.

Собственно волочение бериллиевой проволоки проводят с подогревом или в металлической оболочке из пластичного металла, например, из никеля. Это связано со значительными силами трения, возникающими при протягивании бериллиевой заготовки через фильеру вследствие высокой жесткости Ве (модуль упругости $E=32 \cdot 10^4$ МПа).

Нагрев ведут до температуры 400 – 480 °С, так как при этих температурах пластичность Ве высока и находится на уровне малоуглеродистых сталей. В качестве смазок используют суспензию мелкодисперсного графита на водяной или масляной основе, либо графитовый порошок с добавками дисилицида молибдена.

Величина обжатия за один проход составляет 12 – 35 %, а скорость волочения – 70 м/мин. После изготовления проволоку отжигают (температура 700 – 730 °С, в течение часа с охлаждением на воздухе) для снятия внутренних напряжений, либо для увеличения пластичности (785 – 815 °С, 30 минут).

Следует заметить, что стравливание металлической оболочки путем химической полировки с применением ультразвука приводит к сглаживанию поверхности проволоки и, как следствие, увеличению ее предела текучести на 50 – 140 МПа.

Предел прочности бериллиевой проволоки диаметром 1,8 мм составляет 1120 МПа, а при ее диаметре 0,051 мм – 1455 МПа.

Вытяжка волокна из капли – метод Тэйлора. Данный метод позволяет получать весьма тонкие (менее 50 мкм) непрерывные металлические волокна – нити. Для его реализации (рис. 2) металлический стержень (1), запаянный в стеклянной оболочке (2), при помощи механизма подачи (3) перемещают в зону индукционного нагрева (4) [20].

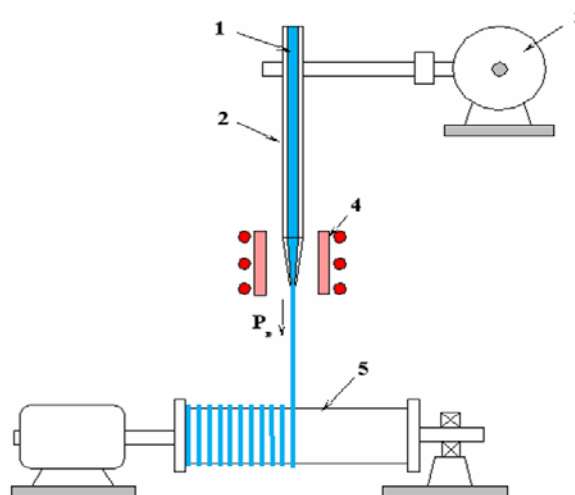


Рис. 2 – Схематическое изображение установки для получения металлических волокон по методу Тейлора: 1 – металлический стержень в стеклянной оболочке (2), 3 – механизм подачи, 4 – зона индукционного нагрева, 5 – намоточное устройство, $\downarrow P_v$ – направление вытягивающего усилия.

Здесь происходит одновременное расплавление металла и размягчение стеклянной оболочки. При этом вследствие воздействия вытягивающего усилия (P_v), приложенного к стеклянной оболочке, имеет место совместная вытяжка металла и стекла.

Размягченная стеклянная оболочка удлиняется, образуя капилляр, который заполняется металлическим расплавом в результате действия капиллярной силы. Объем расплавленного металла в зоне нагрева невелик, условно говорят о капле расплава (отсюда и название метода).

Таким образом, после охлаждения получают металлическую нить в стеклянной изоляции. Используя механизм подачи (3) и намоточное устройство (5) можно получать проволоки диаметром 1 – 30 мкм и длиной в несколько километров.

Метод Тэйлора эффективно используется для изготовления металлических нитей из Sn, Ag, Au, Cu, Ni, Co, Fe, а также из латуни и нержавеющей стали. Получаемые волокна имеют следующую прочность (МПа): Sn – 150, Ag – 650, Cu – 400, Fe – 2800.

Выводы

1. Проведено схематическое описание обеих методов получения непрерывных волокон нитевидных кристаллов и их влияние на показатель прочности. Метод Тейлора по сравнению с методом волочения

позволяє отримувати більш високий показник міцності кристала, наприклад, Sn – 150, Ag – 650, Cu – 400, Fe – 2800 і др.

2. Критично проаналізовані технологічні операції, які становлять методику проведення процесу волочіння і роль кожної з них. К основним з них відносять термічну обробку, яку застосовують як для зняття наклепів, так і для надання дроту додаткової міцності, що достатньо суттєво для кінцевого показника міцності, нанесення змазочного покриття, травлення і безпосередньо сам процес «волочіння».

3. Метод порошкової металургії дозволяє отримувати різні дроти нитевидних кристалів з високим кінцевим показником міцності.

Список літератури:

1. *Бережкова, Г. В.* Нитевидні кристали [Текст] / Г. В. Бережкова. – М.: Госиздат, 1969. – 158 с.
2. *Gordo, J. E.* Endeavour [Text] / J. E. Gordo, 1964. – No 23. – P. 8.
3. *Fraenkel, I. Z.* Phys. [Text] / I. Fraenkel, 1926. – No 37. – P. 572.
4. *Zwicky, F. Z.* Phys. [Text] / F. Zwicky, 1923. – No 24. – P. 131.
5. *De Boer, J. H.* Trans. Faraday Soc. [Text] / J. H. De Boer, 1936. – No 32. – P. 10.
6. *Mackenzie, J. K.* Thesis Univ. Bristol [Text] / J. K. Mackenzie, 1948. – No 11. – P. 21–24.
7. *Orowan, E.* Proc. Roy. Soc. [Text] / E. Orowan, 1940. – No 52. – P. 8.
8. *Keller, E.* Industr. And Engng. Chem. [Text] / E. Keller, 1964. – No 56. – P. 9.
9. *Hoffmann, G. A.* J. Metals [Text] / G. A. Hoffmann, 1958. – No 10. – P. 591.
10. *Hoffmann, G. A.* Astronautics [Text] / G. A. Hoffmann, 1958. – No 3. – P. 31.
11. *Hoffmann, G. A.* Neu Sci. [Text] / G. A. Hoffmann, 1961. – No 9. – P. 40.
12. *Levett, A. P.* Mater. Res. and Standarts [Text] / A. P. Levett, 1966. – No 6. – P. 64.
13. *McCreight, L. R.* Ceramic and Graphite Fibers and Whiskers [Text]: L. R. McCreight, H. W. Rauch, W. H. Sutton. – N.Y. – London, Acad. Press, 1965. – 244 p.
14. Нитевидні кристали [Текст] : матеріали всеросійської конференції «Дослідження і розробки по пріоритетному напрямку розвитку науки, технологій і техніки «Індустрія наносистем і матеріали», 18–19 січня 2007 року, г. Москва / редкол.: Е. А. Гуділін. – Москва. – ФГУ «Російський науковий центр «Курчатівський інститут».
15. *Шишелова, Т. І.* Нитевидні кристали [Текст] / Т. І. Шишелова, Н. Е. Степанова, Д. А. Пльнська, М. А. Беляєва // Успехи сучасного естествознания. – 2009. – No 8. – С. 12–13.
16. Нитевидні кристали [Текст]: матер. всерос. конф. / Дослідження і розробки по пріоритетному напрямку розвитку науки, технологій і техніки «Індустрія наносистем і матеріали». – Москва. ФГУ «Російський науковий центр «Курчатівський інститут», 2007.
17. *Дерягин, Б. В.* УНФ ДАН СССР [Текст] / Б. В. Дерягин, Д. В. Федосеев, В. М. Лукьянович, Б. В. Синицин, В. А. Рябов, А. В. Лаврентьев. – М.: Госиздат, 1968. – No 5. – С. 1094.
18. *Mc Aleer W. J., J.* Electrochem. Soc. [Text] / W. J. Aleer, H. R. Barkemeyer, P. J. Pollak, 1961. – No 108. – P. 1168.
19. *Wagner, R. S. J.* Metals [Text] / R. S. Wagner, C. I. Doherty, W. C. Ellis, 1964. – No 16. – P. 761.
20. *James, D. V. F.* Brit. J. Appl. Phys. [Text] / D. V. F. James, C. Levis, 1965. – No 16. – P. 1089.

Bibliography (transliterated):

1. Berezchkova, G. V. (1969). Nitevidnye kristally. Moscow: Gosizdat, 158.
2. Gordo, J. E. (1964). Endeavour, 23, 8.
3. Fraenkel, I. Z. (1926). Phys., 37, 572.
4. Zwicky, F. Z. (1923). Phys., 24, 131.
5. De Voer, J. H. (1936). Trans. Faraday Soc., 32, 10.
6. Mackenzie, J. K. (1948). Thesis Univ. Bristol, 11, 21–24.
7. Orowan, E. (1940). Proc. Roy. Soc., 52, 8.
8. Keller, E. (1964). Industr. And Engng. Chem., 56, 9.
9. Hoffmann, G. A. (1958). J. Metals, 10, 591.
10. Hoffmann, G. A. (1958). Astronautics, 3, 31.
11. Hoffmann, G. A. (1961). Neu Sci., 9, 40.
12. Levett, A. R. (1966). Mater. Res. and Standarts, 6, 64.
13. McCreight, L. R., Rauch, H. W., Sutton, W. H. (1965). Ceramic and Graphite Fibers and Whiskers. N.Y. London, Acad. Press, 244.
14. Gudilin, E. A. (2007). Nitevidnye kristally: materialy vserossijskoj konferencii «Issledovaniya i razrabotki po prіoritetnomu napravleniyu razvitiya nauki, texnologij i texniki «Industriya nanosistem i materialy». Moskva Moskva. FGU «Rossijskij nauchnyj centr «Kurchatovskij institut».
15. Shishelova, T. I., Stepanova, N. E., Plynskaya, D. A., Belyaeva M. A. (2009). Nitevidnye kristally. Uspexi sovremennogo estestvoznaniya, 8, 12–13.
16. Nitevidnye kristally: mater. vseros. konf. Issledovaniya i razrabotki po prіoritetnomu napravleniyu razvitiya nauki, texnologij i texniki «Industriya nanosistem i materialy». Moskva. FGU «Rossijskij nauchnyj centr «Kurchatovskij institut», 2007.
17. Deryagin, B. V., Fedoseev, D. V., Lukyanovich, V. M., Sinicin, B. V., Ryabov, V. A. Lavrentev, A. V. (1968). UNF DAN SSSR. Moscow: Gosizdat, 5, 1094.
18. Mc Aleer W. J., Barkemeyer, H. R., Pollak, P. J. (1961). J. Electrochem. Soc., 108, 1168.
19. Wagner, R. S. J., Doherty, C. I., Ellis, W. C. (1964). Metals, 16, 761.
20. James, D. V. F., Levis, C. (1965). Brit. J. Appl. Phys, 16, 1089.

Поступила (received) 17.03.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Аналіз методів отримання неперервних волокон нитевидних кристалів/ С. Р. Артем'єв, В. П. Шапоров// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.14–18. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Аналіз методів отримання безперервних волокон ниткоподібних кристалів/ С. Р. Артем'єв, В. П. Шапоров// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С. 14–18. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Analysis of methods of receipt of continuous fibers of threadlike crystals/ //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 17 (1189).– P.14–18. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.S. Artemev, V. Shaporev

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Артем'єв Сергій Робленович – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет цивільного захисту України, завідувач кафедри охорони праці та техногенно-екологічної безпеки, вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023; тел.: 067-928-75-59; e-mail: sergey.artemev.1967@mail.ru.

Артемов Сергей Робленович – кандидат технических наук, доцент, Национальный университет гражданской защиты Украины; заведующий кафедрой охраны труда и техногенно-экологической безопасности, ул. Чернышевская, 94, г. Харьков, Украина, 61023; тел.: 067-928-75-59; e-mail: sergey.artemov.1967@mail.ru.

Artem'ev Sergey Roblenovich – Ph.D., Associate Professor, National University of Civil Defense of Ukraine; Head of the Department of Labour Protection and man-caused environmental security, st. Chernyshevskaya, 94, Kharkov, Ukraine, 61023; tel.: 067-928-75-59; e-mail: sergey.artemov.1967@mail.ru.

Шаповрев Валерий Павлович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; завідувач кафедри хімічної техніки та промислової екології, вул. Фрунзе, 21, м. Харків, Україна, 61002.

Шаповрев Валерий Павлович – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; заведующий кафедрой химической техники и промышленной экологии, ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002.

Shaporev Valery Paul – PhD, Professor, National Technical University 'Kharkov Polytechnic Institute'; head of the department of chemical engineering and industrial ecology Str. Frunze, 21, Kharkov, Ukraine, 61002.

УДК 621.039.53

А. И. КОМИР

РЕКОНСТРУКЦИЯ СТРУКТУРЫ ЯДЕРНОГО ГРАФИТА МЕТОДАМИ МНОГОТОЧЕЧНОЙ СТАТИСТИКИ

Представлен разработанный алгоритм реконструкции трехмерной структуры ядерного графита на основе металлографических изображений. В качестве модельного материала был использован ядерный графит марки АРВ. Проведен гистограммный и вариограммный анализ приведенной методики и отдельно алгоритма реконструкции двух- и трехмерных структур. Показано точность воспроизведения структуры – 4–5 % отклонения при реконструкции материала трехмерной структуры ядерного графита и 15 % отличие в коллинеарности структуры на расстояниях в половину размера реконструируемой структуры.

Ключевые слова: sGems, многоточечная статистика, 3D реконструкция, ядерный графит.

Наведено розроблений алгоритм реконструкції тривимірної структури ядерного графіту на основі металографічних зображень. У якості модельного матеріалу був використаний ядерний графіт марки АРВ. Наведено гістограмний і вариограммний аналіз наведеної методики і окремо алгоритму реконструкції двох-і тривимірних структур. Показано точність відтворення структури – 4–5 % відхилення при реконструкції матеріалу тривимірної структури ядерного графіту і 15 % відміну в колінеарності структури на відстанях в половину розміру реконструюється структури.

Ключевые слова: sGems, багатоточкова статистика, 3D реконструкция, ядерний графіт.

Presents the developed algorithm of a three-dimensional reconstruction the structure of nuclear graphite based on metallographic images using methods of multipoint statistic. Currently used algorithm SNESIM as method for formation 2D structures. As model material was used nuclear graphite grade ARV with porosity about 20 %. The histogrammic and variogram analysis of the given technique and separately algorithm of reconstruction two – and three-dimensional structures is carried out. It is shown the accuracy of reproduction of structure – 4–5 % the variation in the reconstruction of three-dimensional material structure of nuclear graphite and a 15 % difference in the collinear structure at distances of half the size of the reconstructed structure. Presented algorithm can be based on different methods of reconstruction 2D structure using hard data points and training image and used for reconstruction structure of different materials.

Keywords: sGems, multi-point statistics, 3D reconstruction, nuclear graphite.

Введение. В 1963 Джорж Матерон ввел понятие кригинг (kriging) метод также известный как оптимальный или лучшей несмещенный прогноз (optimal or best linear unbiased prediction) [1], термины лучшее линейное предсказание были известны и ранее в работах Wold Н. в 1938 году [2] и А. Н. Колмогорова [3]. Однако именно Джоржу Матерону удалось формализовать и существенно углубить данную теорию.

Разработка методов оценки проницаемости структуры и количества определенной фазы в исследуемой структуре существенно поддерживалось различными нефте- и газодобывающими и сервисными компаниями, такими как Schlumberger, разработавшими платформу Ocean Software Development Framework [4], к которой в 2013 году был написан плагин TI Factory [5], являющийся одним из немногих реализаций реконструкции формирования трехмерной структуры на основе двумерной структуры методами многоточечной статистики.

Для решения задач определения газо- и гидропроницаемости среды, применялись методы форми-

рования структуры сети связанных пор M.J. Blunt et al. [6]. И метод решетчатых уравнений Больцмана [7], однако для данных методов требуется знание внутренней микроструктуры, в виде абстракции и вокселизованной структуры соответственно.

В последнее двадцать лет развитие статистических методов, направленных на формирование двух- и трехмерной структуры материалов на основе статистических данных, ускорило в связи с увеличением расчетных мощностей.

В последнее время исследования трехмерной структуры, а также моделирование на основе трехмерной структуры ядерного графита начинают набирать популярность. На основе трехмерной структуры образцов были проведены исследования газопроницаемости, в качестве источника данных о структуре использовался рентгеновский микротомограф [8], что дает существенный вклад в последующее развитие и дополнение моделированием газодинамики теории

© А. И. Комир. 2016

окисления при различных температурах. Данный подход сложно заменить любым из известных подходов, поскольку исследования данного типа основываются на структуре материала и развитой внутренней пористости, которая достаточно сложно аппроксимируется с помощью теоретических подходов [9]. И при использовании теоретических аппроксимаций требуется определение аппроксимирующих кривых для каждого материала отдельно, что требует существенных затрат на эксперименты. Также следует учитывать, что плотность ядерного графита может изменяться в пределах 10 % в рамках одной заготовки, что в виду нелинейной зависимости плотности от механических характеристик может внести крайне существенное влияние на отличие в результатах теоретического моделирования прочности и механических свойств материала.

Анализ литературных данных и постановка проблемы. Использование реконструкции трехмерных структур на анализе двумерного изображения было использовано [10–12]. Исследователи использовали двухточечную статистику для реконструкции.

Далее исследователи использовали увеличение разрешения для получения лучших результатов исследований, основываясь на методах двуточечной статистики [13–17].

Использование последовательных двумерных слоев для формирования трехмерной структуры являлись достаточно сложными из-за ограничения ширины среза слоя около 10 мкм [18].

Также использовался для формирования срезов ионный луч [19], позволяющий сделать меньшие расстояния между срезами по сравнению с механическими методами и увеличить разрешение трехмерной структуры.

Наиболее успешным методом является неразрушающая рентгеновская микротомография использованная в работах [20–22] на данный момент данный метод настолько развит, что позволяет получать трехмерные структуры с разрешением около 1 микрона без контрастного вещества и около 50 нм с контрастным веществом [23].

Использование многоточечной статистики в качестве инструмента было использовано [24, 25] для реконструкции структуры пористости в песчаных породах.

В 2005 Н. Okabe и М. J. Blunt [26] был предложен общий подход к реконструкции трехмерного изображения на основе двумерного изображения при помощи многоточечной статистики, он основывался на расчете средней вероятности события в моделируемой точке при учете известных событий в трех перпендикулярных плоскостях, моделируемая точка находится при этом в точке пересечения плоскостей.

Первый коммерческий продукт был разработан в 2009 году Straubhaag и Renard и назван Impala [27].

Однако свободно распространяемого общедоступного алгоритма реконструкции трехмерной структуры материала на основе двумерных изображений на данный момент нет.

Цель и задачи исследования. Целью исследования была разработка алгоритма, позволяющая формировать трехмерную структуру ядерного графита на

основе двумерных металлографических изображений.

Для достижения цели исследования были решены следующие задачи:

- разработка методов формирования трехмерного изображения с минимизацией статистического отклонения от характеристик исходного изображения;
- верификация результатов моделирования с помощью методов вариационного анализа и сравнения гистограмм слоев.

Алгоритм формирования трехмерной структуры. В качестве реализованных методов многоточечной статистики был использован пакет sGems, алгоритм SNESIM. Данная библиотека обладает возможностью преобразования двумерного и трехмерного изображения в статистические данные, которые впоследствии, могут быть использованы программой для реконструкции необходимых двумерных и трехмерных изображений соответственно.

Алгоритм SNESIM (single normal equation simulation) был разработан Strebelle [28]. Принцип алгоритма состоит из следующих основных частей:

1. Формирование поискового дерева на основе событий.
2. Создание произвольного пути обхода всех точек создаваемой структуры.
3. Для каждой точки:
 - a. Сбор данных окрестности точки.
 - b. Расчет вероятности вычисляется из уравнения Байеса.

Формула Байеса:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)},$$

где $P(A)$ – априорная вероятность гипотезы А;

$P(A|B)$ – вероятность гипотезы А при наступлении события В;

$P(B|A)$ – вероятность наступления события В при истинности гипотезы А;

$P(B|A)$ – полная вероятность наступления события В.

Был предложен метод итеративного формирования трехмерной структуры на основе многоточечной статистики двумерного изображения с учетом данных полученных при предыдущих итерациях.

Схематическое представление алгоритма реконструкции трехмерных объектов показано на рис. 1, визуальное представление алгоритма формирования представлено на рис. 2. Рис. 2, а визуализирует шаг формирования первичного изображения на гранях куба, следующие изображения рис. 2, б, в, представляют цикл последовательного формирования слоев находящихся посередине наиболее удаленных сформированных слоев.

Методами оценки промоделированных структур были методы двухточечной статистики, так называемые вариограммы и отклонения от фазовой концентрации исходного изображения.

Метод расчета вариограмм использует следующее выражение:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2|N(h)|} \sum_{N(h)} (z_i - z_j)^2,$$

для $i, j \in D$, где z – значение функции в точке, i и j – пространственные значения.

В литературе принято называть $\gamma(h)$ – полувариограммой, [29, 30].

Вариационный анализ является достаточно общим и широко используемым инструментом анализа изображений и их структурных зависимостей [31, 32].

Используемый алгоритм оценки гистограмм и вариограмм предоставленный К. Mahmud и G. Mariethoz и был использован в статье [32].

В ходе моделирования было использовано исходное изображение, приведенное к размеру пикселя,

соответствующему 2 микрометрам, рис. ИИ. Также в ходе работы программного обеспечения исходные данные преобразуются в градации серого со значениями в диапазоне от 0 до 255. Матрица сбора многоточечной статистики в методе SNESIM была размером 25x25 точек. В качестве исходного изображения был использован металлографический снимок, представленный на рис. 3.

В качестве критериев оценки вариограмм были взяты основные параметры извлекаемые из данных, такие как: самородок, порог, диапазон.

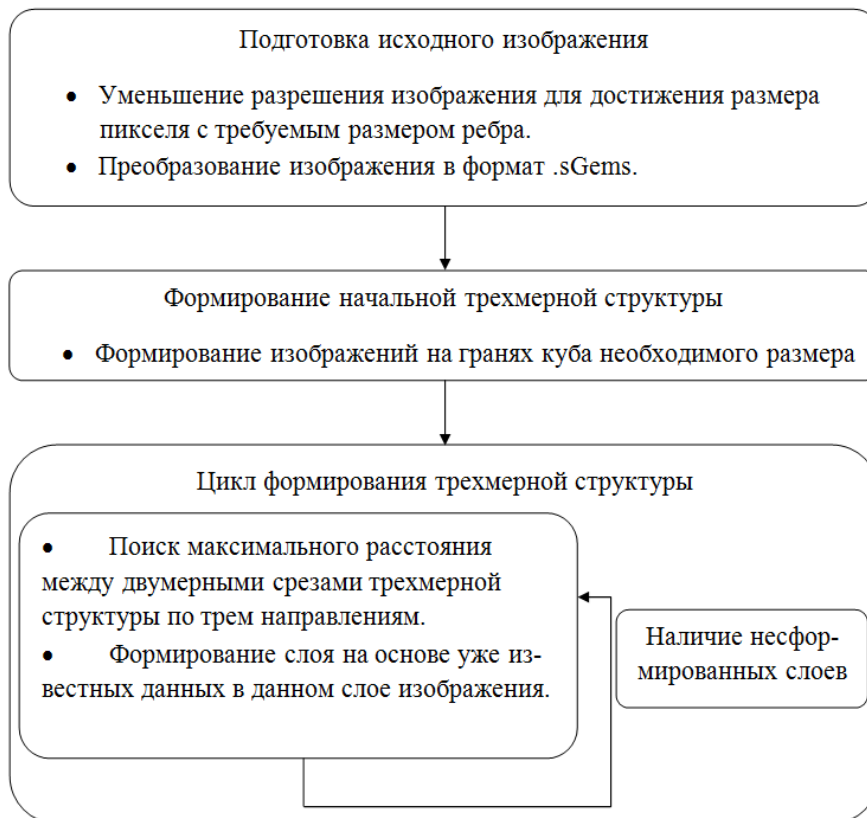


Рис. 1 – Схематическое представление формирования трехмерных объектов на основе двумерных изображений.

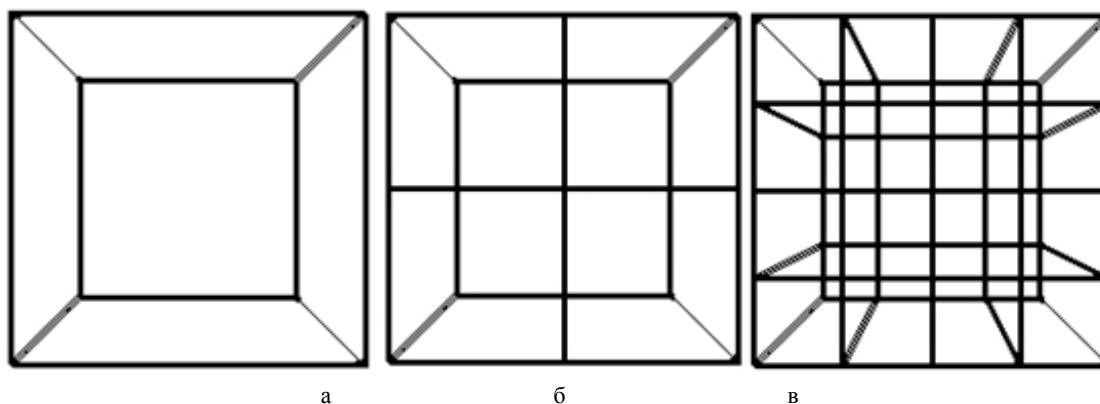


Рис. 2 – Представление последовательного формирования слоев трехмерного изображения в сечении плоскости x-y: а – формирование исходного изображения на краях куба; б, в – формирование внутренних слоев структуры, б – первая итерация, в – вторая итерация.

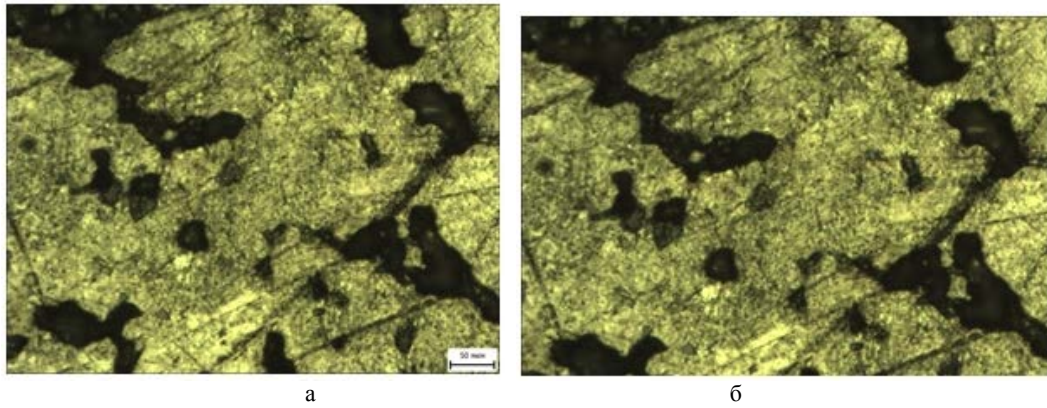


Рис. 3 – Пример использованного изображения, а – с размерной шкалой, б – используемое при расчетах.

Результаты моделирования трехмерной и двумерной структуры ядерного графита марки АРВ

В ходе моделирования было получено 10 образцов 3-х мерной структуры, два примера которых приведены на рис. 4а,4б. Размеры структуры составляли 100x100x100 вокселей.

Используя вариограммный анализ, были проанализированы 150 изображений реконструированных при помощи алгоритма SNESIM и проведен сравнительный анализ с вариограммой и гистограммой исходного изображения, рис. 5, 6.

Используя вариограммный анализ, были получены результаты, представленные в табл. 1.

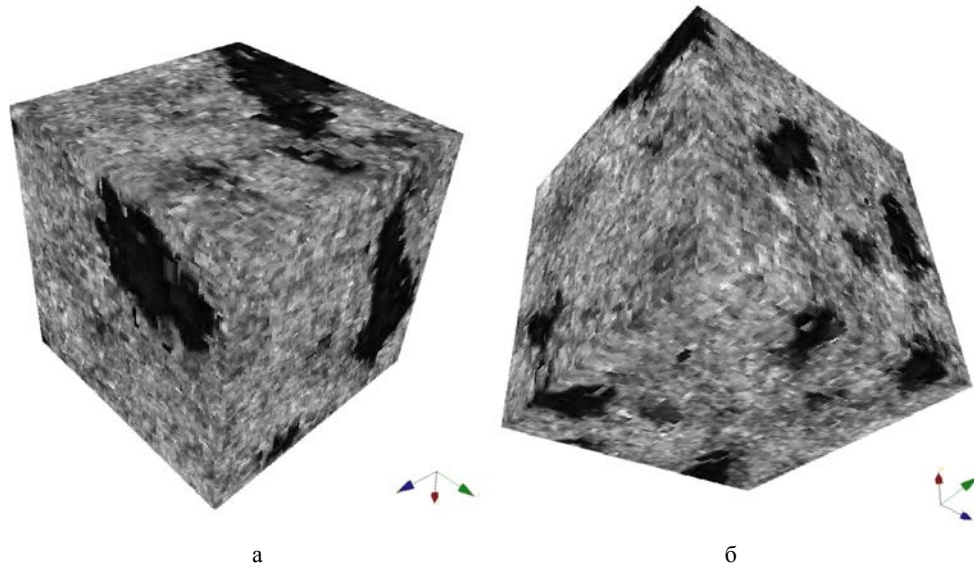


Рис. 4 – Результаты моделирования 3-х мерной структуры.

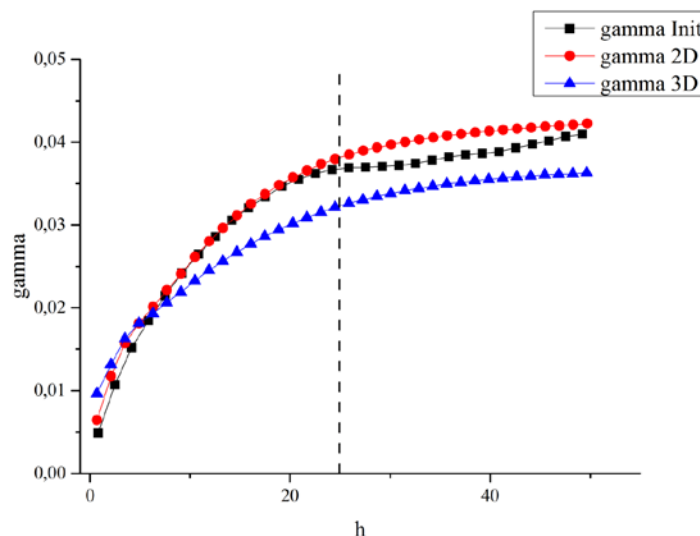


Рис. 5 – Вариограмма исходного изображения, усредненная вариограмма 2-х мерной и 3-х мерной реконструкции

Таблиця 1 – Данніе полученные из вариограммного анализа

Название	Для исходного изображения	Для 2D реконструированной модели	Для 3D реконструированной модели
Самородок (Nugget)	0,00489	0,00646	0,00966
Порог (Sill)	0,04097	0,04226	0,03631

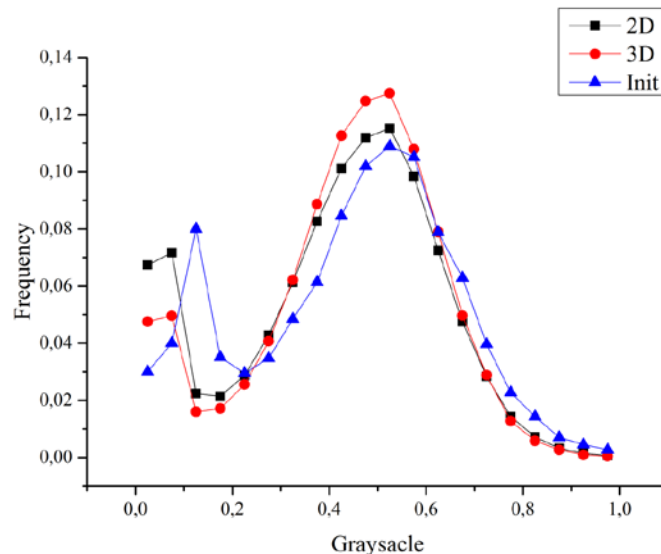


Рис. 6 – Гистограмма исходного изображения, усредненная гистограмма 2-х мерной и 3-х мерной реконструкции

Выводы

1. Был предложен алгоритм моделирования трехмерной структуры на основе двумерных изображений с помощью методов многоточечной статистики.

2. Были проанализированы результаты моделирования с помощью вариограммного и гистограммного анализа: рассчитаны методом особенности трехмерной структуры при реконструкции: наличие неточности в коллинеарности в диапазоне 5–7 вокселей и меньшее значение порога на 15 %. Указано отклонение – 4–5 % материала при аналогичном пороге относительно исходного изображения (20 %).

Список литературы:

- Matheron, G. Principles of Geostatistics [Text] / G. Matheron // Economic Geology, 1963. – Vol. 58. – P. 1246–1266.
- Wold, H. A Study in the Analysis of Stationary Time Series [Text] / H. Wold // Stockholm: Almqvist & Wiksell. – 1938. – P. 295–298.
- Колмогоров, А. Н. “Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей” [Текст] / А. Н. Колмогоров // Изв. АН СССР. Сер. матем., 1941. – С. 3–14.
- Schlumberger, Ocean [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.ocean.slb.com/en> – Заголовок с экрана.
- Ephesia. TI Factory [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.ocean.slb.com/en/plug-ins/plugindetails?ProductId=PTFF-B1> – Заголовок с экрана.
- Blunt, M. J. Detailed physics, predictive capabilities and macroscopic consequences for pore-network models of multiphase flow [Text] / M. J. Blunt, M. D. Jackson, M. Piri, P. H. Valvatne // Advances in Water Resources. – 2002. – Vol. 25. – P. 1069–1089.
- Chen, S. Lattice Boltzmann method for fluid flows [Text] / S. Chen, G. D. Doolen // Annual Review of Fluid Mechanics. – 1998. – Vol. 30. – P. 329–364.
- Shi-Pei, Jing. 3D microstructures of nuclear graphite: IG-110, NBG-18 and NG-CT-10 [Text] / Shi-Pei Jing, Can Zhang, Jie Pu, Hong-Yan Jiang, Hui-Hao Xia, Fang Wang, Xu Wang, Jian-Qiang Wang, Chan Jin // Nuclear Science and Techniques. – 2016. – Vol. 27:66. – 8 p.
- Robert, P. W. Penetration depth and transient oxidation of graphite by oxygen and water vapor [Text] / P. W. Robert, D. B. Timo-

- thy, I. C. Cristian // Journal of Nuclear Materials. – 2009. – Vol. 393. – P. 518–521.
- Quiblier, J. A. A new three-dimensional modeling technique for studying porous-media [Text] / Journal of Colloid and Interface Science. – 1984. – Vol. 98 (1). – P. 84–102.
- Adler, P. M. Flow in simulated porous-media [Text] / P. M. Adler, C. G. Jacquin, J. A. Quiblier // International Journal of Multiphase Flow. – 1990. – Vol. 16 (4). – P. 691–712.
- Adler, P. M. The formation factor of reconstructed porous-media [Text] / P. M. Adler, C. G. Jacquin, J. F. Thovert // Water Resources Research. – 1992. – Vol. 28 (6). – P. 1571–1576.
- Roberts, A. P. Statistical reconstruction of three-dimensional porous media from two-dimensional images [Text] / A. P. Roberts // Physical Review E. – 1997. – Vol. 56 (3). – P. 3203–3212.
- Roberts, A. P. Chord-distribution functions of three-dimensional random media: approximate firstpassage times of Gaussian processes [Text] / A. P. Roberts, S. Torquato // Physical Review E. – 1999. – Vol. 59 (5). – P. 4953–4963.
- Yeong, C. L. Y. Reconstructing random media: II. Three-dimensional media from two-dimensional cuts [Text] / C. L. Y. Yeong, S. Torquato // Physical Review E. – 1998. – Vol. 58 (1). – P. 224–233.
- Manwart, C. Stochastic reconstruction of sandstones [Text] / C. Manwart, S. Torquato, R. Hilfer // Physical Review E. – 2000. – Vol. 62 (1). – P. 893–899.
- Talukdar, M. S. Stochastic reconstruction of particulate media from two-dimensional images [Text] / M. S. Talukdar, O. Torsaeter, M. A. Ioannidis // Journal of Colloid and Interface Science. – 2002. – Vol. 248 (2). – P. 419–428.
- Dullien, F. A. L. Porous Media: Fluid Transport and Pore Structure [Text] / Academic Press. – 1992. – San Diego. – 574 p.
- Tomutsa, L. Focussed ion beam assisted three-dimensional rock imaging at submicron-scale [Text] / L. Tomutsa, V. Radmilovic // International Symposium of the Society of Core Analysts. – 2003. – SCA2003–47.
- Dunsmuir, J. H. X-ray microtomography. A new tool for the characterization of porous media [Text] / J. H. Dunsmuir, S. R. Ferguson, K. L. D’Amico, J. P. Stokes // SPE 22860. Proc. Annual Technical Conference. – Dallas, Texas, 1991. – P. 423–430.
- Spanne, P. Synchrotron computed microtomography of porous-media-topology and transports [Text] / P. Spanne, J. F. Thovert, C. J. Jacquin, W. B. Lindquist, K. W. Jones, P. M. Adler // Physical Review Letters. – 1994. – Vol. 73 (14). – P. 2001–2004.
- Coles, M. E. Developments in synchrotron X-ray microtomogra-

- phy with applications to flow in porous media [Text] / M. E. Coles, R. D. Hazlett, K. W. Jones et al. // SPE Reservoir Evaluation and Engineering. – 1998. – Vol. 1 (4). – P. 288–296.
23. ZEISS, X-ray Microscopes [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.zeiss.com/microscopy/en_de/products/x-ray-microscopy/xradia-810-ultra.html – Заголовок с экрана.
 24. Caers, J. Geostatistical reservoir modelling using statistical pattern recognition [Text] / Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2001. – Vol. 29 (3–4). – P. 177–188.
 25. Strebelle, S. Modeling of a deepwater turbidite reservoir conditional to seismic data using principal component analysis and multiple-point geostatistics [Text] / K. Payrazyan, J. Caers // SPE Journal. – 2003. – Vol. 8 (3). – P. 227–235.
 26. Okabe, H. Pore space reconstruction using multiple-point statistics [Text] / H. Okabe, M. J. Blunt // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2005. – Vol. 46. – P. 121–137.
 27. Impala Multiple Point Statistics in JewelSuite™ [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.jewelsuite.com/media/Impala%20MPS%20in%20JewelSuite.pdf> – Заголовок с экрана.
 28. Strebelle, S. Sequential simulation drawing structure from training images [Text] / S. Strebelle // Ph.D. dissertation, Stanford University, 2000. – 166 p.
 29. Wackernagel, H. Multivariate Geostatistics: An Introduction with Applications [Text] / H. Wackernagel // Springer Science & Business Media. – 2003. – 388 p.
 30. Webster, R. Geostatistics for Environmental Scientists [Text] / R. Webster, M. A. Oliver // 2nd Edition. – 2007. – 330 p.
 31. Wackernagel, H. Basics in Geostatistics. Geostatistical structure analysis: The variogram [Text] / MINES ParisTech. – 2013. – 37 p.
 32. Mahmud, K. Simulation of Earth textures by conditional image quilting [Text] / K. Mahmud, G. Mariethoz, J. Caers, P. Tahmasebi, A. Baker // Water Resources Research. – 2014. – Vol. 50, I. 4. – P. 3088–3107.
 11. Adler, P. M., Jacquin, C. G., Quiblier, J. A. (1990). Flow in simulated porous-media. International Journal of Multiphase Flow 16 (4), 691–712.
 12. Adler, P. M., Jacquin, C. G., Thovert, J. F. (1992). The formation factor of reconstructed porous-media. Water Resources Research 28 (6), 1571–1576.
 13. Roberts, A. P. (1997). Statistical reconstruction of three-dimensional porous media from two-dimensional images. Physical Review E 56 (3), 3203–3212.
 14. Roberts, A. P., Torquato, S. (1999). Chord-distribution functions of three-dimensional random media: approximate firstpassage times of Gaussian processes. Physical Review E 59 (5), 4953–4963.
 15. Yeong, C. L. Y., Torquato, S. (1998). Reconstructing random media: II. Three-dimensional media from two-dimensional cuts. Physical Review E 58 (1), 224–233.
 16. Manwart, C., Torquato, S., Hilfer, R. (2000). Stochastic reconstruction of sandstones. Physical Review E 62 (1), 893–899.
 17. Talukdar, M. S., Torsaeter, O., Ioannidis, M. A. (2002). Stochastic reconstruction of particulate media from two-dimensional images. Journal of Colloid and Interface Science 248 (2), 419–428.
 18. Dullien, F. A. L. (1992). Porous Media: Fluid Transport and Pore Structure. Academic Press, San Diego.
 19. Tomutsa, L., Radmilovic, V. (2003). Focussed ion beam assisted three-dimensional rock imaging at submicron-scale. International Symposium of the Society of Core Analysts: SCA2003-47.
 20. Dunsmuir, J. H., Ferguson, S. R., D'Amico, K. L., Stokes, J. P. (1991). X-ray microtomography. A new tool for the characterization of porous media, SPE 22860. Proc. Annual Technical Conference, Dallas, Texas, October 6–9, 423–430.
 21. Spanne, P., et al. (1994). Synchrotron computed microtomography of porous-media-topology and transports. Physical Review Letters 73 (14), 2001–2004.
 22. Coles, M. E., et al. (1998). Developments in synchrotron X-ray microtomography with applications to flow in porous media. SPE Reservoir Evaluation and Engineering 1 (4), 288–296.
 23. ZEISS, X-ray Microscopes, from http://www.zeiss.com/microscopy/en_de/products/x-ray-microscopy/xradia-810-ultra.html
 24. Caers, J. (2001). Geostatistical reservoir modelling using statistical pattern recognition. Journal of Petroleum Science and Engineering, 29 (3–4), 177–188.
 25. Strebelle, S., Payrazyan, K., Caers, J. (2003). Modeling of a deepwater turbidite reservoir conditional to seismic data using principal component analysis and multiple-point geostatistics. SPE Journal, 8 (3), 227–235.
 26. Okabe, H., Blunt, M. J. (2005). Pore space reconstruction using multiple-point statistics. Journal of Petroleum Science and Engineering 46, 121–137.
 27. Impala Multiple Point Statistics in JewelSuite™, from <http://www.jewelsuite.com/media/Impala%20MPS%20in%20JewelSuite.pdf>
 28. Strebelle, S. (2000). Sequential simulation drawing structure from training images: Ph.D. dissertation, Stanford University, 166.
 29. Wackernagel, H. (2003). Multivariate Geostatistics: An Introduction with Applications. Springer Science & Business Media, 388.
 30. Webster, R., Oliver, M. A. (2007). Geostatistics for Environmental Scientists, 2nd Edition, 330.
 31. Wackernagel, H. (2013). Basics in Geostatistics 1 Geostatistical structure analysis: The variogram. MINES ParisTech, 37.
 32. Mahmud, K. Mariethoz, G. Caers, J. Tahmasebi, P. Baker, A. (2014). Simulation of Earth textures by conditional image quilting. Water Resources Research, 50:4, 3088–3107.

Bibliography (transliterated):

1. Matheron, G. (1963). Principles of Geostatistics. Economic Geology, 58, 1246–1266.
2. Wold, H. (1938). A Study in the Analysis of Stationary Time Series. Stockholm: Almqvist & Wiksell.
3. Kolmogorov, A. N. (1941). Interpolirovanie i ekstrapolirovanie stacionarnykh sluchaynykh posledovatelnostey, Izv. AN SSSR. Ser. matem., 5:1, 3–14.
4. Schlumberger, Ocean, from <https://www.ocean.slb.com/en>
5. Ephesia. TI Factory, from <https://www.ocean.slb.com/en/plug-ins/plugindetails?ProductId=PTFF-B1>
6. Blunt, M. J., Jackson, M. D., Piri, M., Valvatne, P. H. (2002). Detailed physics, predictive capabilities and macroscopic consequences for pore-network models of multiphase flow. Advances in Water Resources 25 (8–12), 1069–1089.
7. Chen, S., Doolen, G. D. (1998). Lattice Boltzmann method for fluid flows. Annual Review of Fluid Mechanics 30, 329–364.
8. Shi-Pei, Jing, Can, Zhang, Jie, Pu, Hong-Yan, Jiang, Hui-Hao, Xia, Fang, Wang, Xu, Wang, Jian-Qiang, Wang, Chan, Jin. (2016). 3D microstructures of nuclear graphite: IG-110, NBG-18 and NG-CT-10. Nuclear Science and Techniques, 27:66.
9. Wichner, R. P., Burchell, T. D., Contescu, C. I. (2009). Penetration depth and transient oxidation of graphite by oxygen and water vapor. Journal of Nuclear Materials, 393, 518–521.
10. Quiblier, J. A. (1984). A new three-dimensional modeling technique for studying porous-media. Journal of Colloid and Interface Science 98 (1), 84–102.

Поступила (received) 06.03.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Реконструкція структури ядерного графіту методами багатоточкової статистики/ А. І. Комір// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.18–24. – Бібліогр.: 32 назв. – ISSN 2079-5459.

Реконструкция структуры ядерного графита методами многоточечной статистики/ А. И. Комир// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.18–24. – Бібліогр.: 32 назв. – ISSN 2079-5459.

Reconstruction of nuclear graphite structure by multipoint statistics/ A. I. Komir// Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 17 (1189).– P.18–24 – Bibliogr.:32. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Комір Антон Ігорович – аспірант, молодший науковий співробітник, Науково-виробничий комплекс Відновлювані джерела енергії та ресурсозберігаючі технології, Національний науковий центр Харківський фізико-технічний інститут, вул. Академічна, 1, м. Харків, Україна, 61108; e-mail: komir@kipt.kharkov.ua.

Комір Антон Ігорович – аспірант, младший научный сотрудник, Научно-производственный комплекс Возобновляемые источники энергии и ресурсосберегающие технологии, Национальный научный центр Харьковский физико-технический институт, ул. Академическая, 1, м. Харьков, Украина, 61108; e-mail: komir@kipt.kharkov.ua.

Komir Anton – postgraduate student, junior researcher, National Science Center Kharkov Institute of Physics and Technology, Science and Production Establishment Renewable Energy Sources and Sustainable Technologies; Str. Academic, 1, Kharkiv, Ukraine, 61108; e-mail: komir@kipt.kharkov.ua.

УДК 621.793 (045)

В. П. БАБАК, В. В. ЩЕПЕТОВ, С. Д. НЕДАЙБОРЦ

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТРЕНИЯ И ИЗНОСА В ВАКУУМЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ Cr-Si-B, СОДЕРЖАЩИХ ДИСУЛЬФИД МОЛИБДЕНА

Приведены результаты испытаний в условиях вакуума характеристик трения и износа разработанных детонационных покрытий Cr-Si-B, которые дополнительно в качестве антифрикционного компонента содержат добавку твердой смазки в виде диспергированного дисульфида молибдена. Исследуемые детонационные покрытия Cr-Si-B, показали высокие триботехнические характеристики во всем диапазоне испытаний, моделирующих работу узла трения в условиях разреженной атмосферы. При этом, средством регулирования износа и обеспечения высокой антифрикционности покрытий в вакууме является применение в их составе твердосмазочного материала.

Ключевые слова: детонационное покрытие, интенсивность изнашивания, износостойкость, поверхностный слой, структурная приспособляемость, легирование.

Наведено результати випробувань в умовах вакууму характеристик тертя і зносу розроблених детонаційних покриттів Cr-Si-B, які додатково містять антифрикційний компонент добавку твердого мастила у вигляді диспергованого дисульфиду молибдену. Розроблені для практики, досліджувані детонаційні покриття Cr-Si-B, показали високі триботехнічні характеристики у всьому діапазоні випробувань, що моделюють роботу вузла тертя в умовах розрідженої атмосфери. При цьому, засобом регулювання зносу і забезпечення високої антифрикційності покриттів у вакуумі є застосування в їх складі твердо мастильного матеріалу.

Ключові слова: детонаційне покриття, інтенсивність зношування, зносостійкість, поверхневий шар, структурна пристосованість, легування.

This article presents the results of tests under vacuum conditions characteristics of friction and wear, elaborated detonation coating Cr-Si-B, as the anti-friction additive component contains a solid lubricant in dispersed form of molybdenum disulfide. Results of research and characteristic of a friction and intensity of the wear process of the investigated coatings were compared with the wear resistance of detonation coatings of carbide type VK15 and surface layers obtained from the thermal diffusion alloying with boron, vanadium and chromium. It was noted the high wear resistance of coatings containing molybdenum disulfide. With the help of using modern physical methods of analysis was reviewed qualitative and quantitative composition of the surface layers. The work presents the photomicrographs of the friction surfaces, while studying the surface layer, in which processes of activation are under way, used electron-diffraction analysis. It was stressed that solid lubricating surface film except for anti-friction action has anti-wear properties. It had been established that wear-resistant coatings is provided by the creation of the surface of the thin film separating of juvenile object, representing the product anoxic structures based intermetallic phases chemical elements included in the coating composition. Developed for the practices, investigated detonation coating Cr-Si-B, showed high tribological characteristics in the whole range of tests, modeling work of the friction unit in a rarefied atmosphere. In doing so, means to regulate of wear and ensure a high anti-friction coatings in vacuum is application in their structure of the solid material, through the structure influences the level of adaptation of the friction due to the modified surface layers that can block the destruction and shielded the unacceptable setting processes.

Keywords: detonation coating; wear-out rate; wear resistance; surface layer; structural adaptability; alloying.

Введение. Уровень качества и надежность машин и механизмов в значительной степени определяется поверхностной прочностью и износостойкостью используемых материалов. Проблема поверхностной прочности материалов при трении остается одной из наиболее сложных научно-технических областей знаний, так как она теоретическими и прикладными методами изучает вопросы, которые приходится решать в повседневной инженерной практике. Несмотря на достигнутые результаты, ее прикладное решение отстает от современных требований. При этом особенно

важными остаются вопросы обеспечения износостойкости и поверхностной прочности в экстремальных условиях эксплуатации, к которым относятся не только предельно высокие нагрузки и скорости перемещения, но и влияния окружающей среды, в частности, вакуума, где применение традиционных смазок ограничено [1].

Анализ литературных данных и постановка проблемы. В научной литературе нет достаточного количества обоснованных сведений о влиянии отдельных структурных составляющих композиционных

порошковых материалов на прочностные свойства детонационных покрытий. И практически отсутствуют данные, отражающие влияние дисульфида молибдена на износостойкость детонационных покрытий в условиях вакуума. До настоящего времени основным способом разработки покрытий остается эмпирический поиск оптимальных соотношений состава и свойств.

В летательных аппаратах к деталям подвижных сопряжений, работающим в условиях разреженной атмосферы, относятся: подшипники, зубчатые и фрикционные передачи, направляющие скольжения, торцевые опоры, пары с возвратно-поступательным перемещением, шарнирно-болтовые сопряжения, детали систем управления [2]. Обслуживание и поддержание их эксплуатационной готовности является одной из важнейших инженерно-технических задач систем обслуживания и ремонта авиационной техники [3].

Цель и задачи исследования. Целью работы является анализ и обсуждения результатов испытаний в условиях вакуума разработанных детонационных покрытий системы Cr-Si-B, которые дополнительно содержат в качестве антифрикционного компонента добавки твердой смазки в виде диспергированного дисульфида молибдена.

Материалы и методы исследования закономерности трения и износа в вакууме детонационных покрытий Cr-Si-B, содержащих дисульфид молибдена. Материалы для напыления готовили по методике, изложенной в работе [4]. Частицы твердой смазки, соответствующие фракциям 3-10 мкм, смешивали мокрым способом с исходными металлическими порошками, затем смесь сушили, до полного удаления влаги. Детонационно-газовое напыление покрытий осуществлялось по технологии и на оборудовании, разработанном в ИПМ НАНУ. Толщина напыленного слоя после обработки составляла 0,20-0,25 мм, шероховатость $R_a=0,63-0,32$, прочность сцепления с основой $\sigma_{сц}=87,5$ МПа. Испытания в условиях вакуума проводились на установке, предназначенной для

лабораторно-экспериментальной оценки триботехнических характеристик и контроля качества триботехнических материалов [5]. Исследование поверхностной прочности покрытий при трении, их склонность к схватыванию и степень трибоактивации оценивались по интенсивности износа в вакууме (при разрежении $1,33 \cdot 10^{-5}$ Па). Характеристики трения и изнашивания исследуемых композиционных покрытий анализировались и сравнивались с полученными значениями износостойкости покрытий типа ВК15 и поверхностных слоев, полученных в результате термодиффузионного легирования бором, ванадием и хромом.

При сравнении с данными испытаний покрытий в условиях нормального атмосферного давления [6] с результатами исследования их износостойкости в вакууме, следует отметить, что в связи с увеличением разрежения воздуха и уменьшением пассивирующей способности среды проявляются качественные отличия закономерностей трения, которые обуславливают значительные количественные изменения триботехнических процессов, протекающих в контактной зоне.

Результаты исследований закономерности трения и износа в вакууме детонационных покрытий Cr-Si-B, содержащих дисульфид молибдена. Исследования закономерностей процессов трения и износа при отсутствии кислорода воздуха имеют актуальное значение, так они позволяют создать теоретические предпосылки для решения практических задач по изысканию и созданию износостойких материалов покрытий и наиболее рационального их сочетания в парах трения, работающих в условиях вакуума. Результаты испытаний представлены на рис. 1 в виде зависимости интенсивности изнашивания как функции значений скорости скольжения при нагрузке равной 2,5 МПа, позволяющей максимально приблизить процессы физико-химической механики трения к реальным условиям эксплуатации.

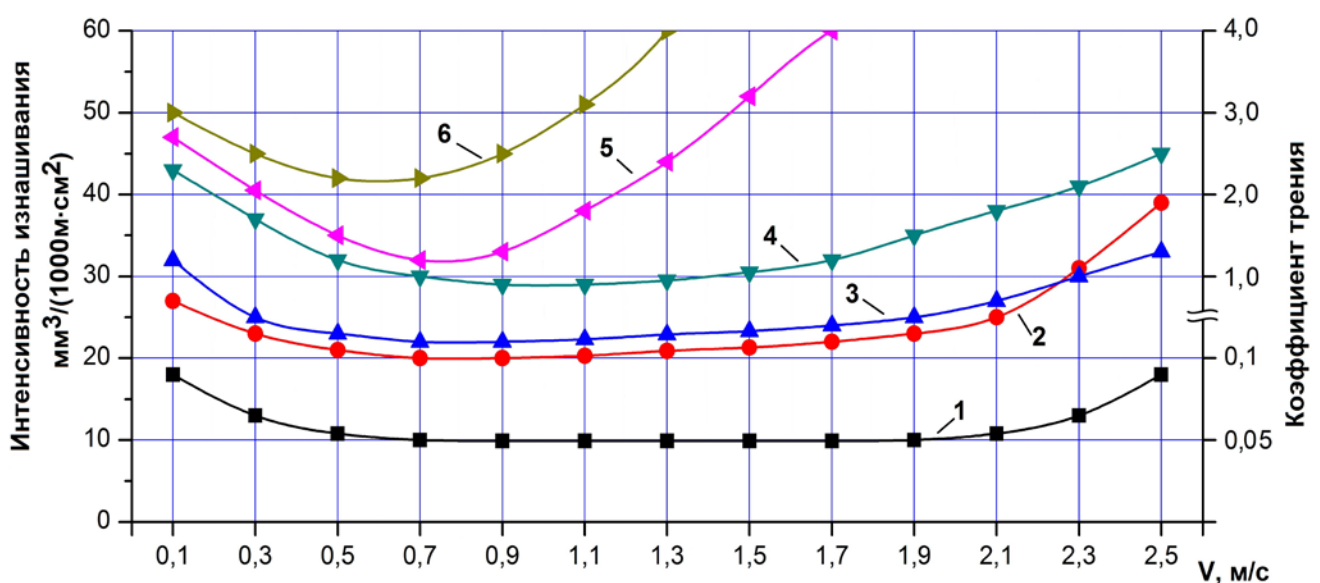


Рис. 1 – Зависимость интенсивности изнашивания от скорости скольжения ($P=2,5$ МПа): 1 – покрытие Cr-Si-B-MoS₂, 2 – покрытие твердого сплава ВК15, 3 – ванадиевые образцы, 4 – хромированные образцы, 5 – покрытие Cr-Si-B, 6 – борированные образцы.

Высокая износостойкость при данных условиях трения покрытий Cr-Si-B-MoS₂, (рис. 1, кривая 1) обусловлена структурной приспособляемостью, которая как универсальное явление реа-

лизуется, во-первых, за счет структурно-свободного дисульфида молибдена, который обеспечивает в процессе трения создание защитной пленки (рис. 2).

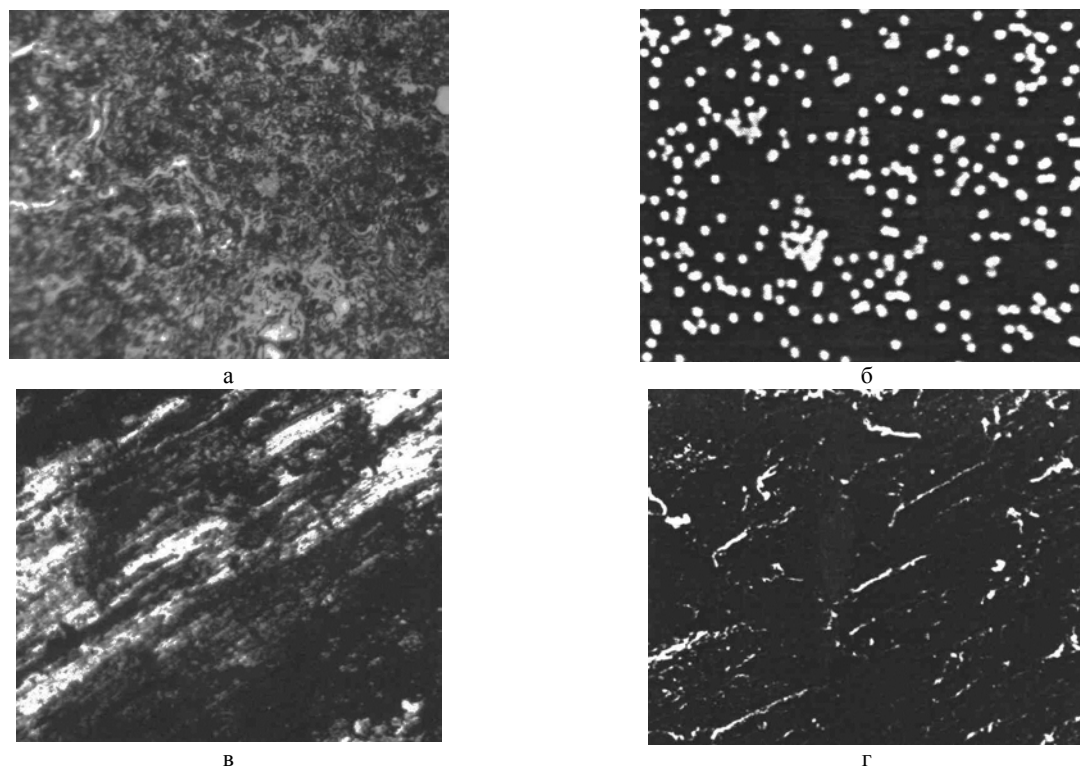


Рис. 2 – Поверхность трения покрытия Cr-Si-B-MoS₂: а – исходное состояние; б – микрорентгеноспектральное распределение MoS₂, x650; в – после испытаний на трение при V=0,3 м/с, x320, г – после испытаний на трение при V=2,3 м/с, x320.

Данные металлографического анализа и изучение поверхностей трения подтверждают наличие пассивирующей твердофазной смазочной пленки дисульфида молибдена, препятствующей адгезионному взаимодействию ювенильных поверхностей, при этом отдельные очаги разрушений локализируются в тонких приповерхностных слоях и аннигилируют в процессе зернограничного скольжения, исключая любые виды повреждаемости.

Во-вторых, склонность покрытия к пассивации обеспечивается протеканием в данных условиях трения диффузионных и твердофазных трибохимических реакций компонентов с образованием ультрадисперсных нанофаз (рис. 3).

На представленной микродифракционной картине видны кристаллические области – электронограмма содержит четкие рефлексы, соответствующие мелкокристаллической ориентированной структуре. При изучении характера и закономерностей образования приповерхностного слоя, обуславливающего сопротивление износу, было установлено, что он представляет композиционную тонкодисперсную квазислоистую структуру на основе MoS₂, армированную интерметаллидами Cr₅Si, CrSi, Cr₃Si, CrSi₂. Кроме того, халькогенид молибдена в результате трибохимического взаимодействия с деформированным поверхностным слоем образует сульфиды CrS, что создает благоприятные предпосылки к существенному повышению износостойкости и, как установлено, увеличению несущей способности.

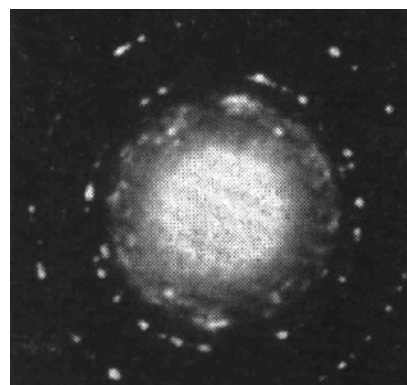


Рис. 3 – Электронограмма от поверхности трения покрытия Cr-Si-B-MoS₂, испытанного при V=1,5 м/с.

Изменение структуры твердофазных поверхностных пленок обуславливает значение коэффициента трения, который во всем диапазоне испытания (рис. 1, кривая 1) составляет 0,05-0,07. По мнению авторов, в данных условиях значения коэффициента трения являются не столько функцией нормальной нагрузки, сколько зависимостью трибофизических процессов, возникающих в результате аддитивного сочетания нагрузки, скорости скольжения, температуры и обобщенного вектора параметров трения (материалов, среды, условий и т. п.). Таким образом, твердосмазочная поверхностная пленка или активный надповерхностный слой, кроме антифрикционного

действия обладает и антиизносными свойствами, что в данных условиях трения обеспечивает высокую стойкость покрытий Cr-Si-B-MoS₂ против износа в вакууме.

Для покрытий Cr-Si-B, в составе которых отсутствует дисульфид молибдена (рис. 1, кривая 5), характер изменения интенсивности изнашивания и зависимость коэффициента трения от скорости существенно изменяется.

С целью изучения поверхностного слоя, в котором протекают процессы активирования, использован электронографический анализ, выполненный на установке типа ЭРМ (съемка на отражение при $U=35$ кВ). Электронограмма (рис. 4), фиксирующая изменение тонкой структуры, показывает, что в поверхностном слое происходит диспергирование с измельчением кристаллитов. Исследуемый тонкопленочный объект представляет ультрадисперсную ориентированную структуру тонкого поверхностного слоя, соответствующего 100-500 нм.

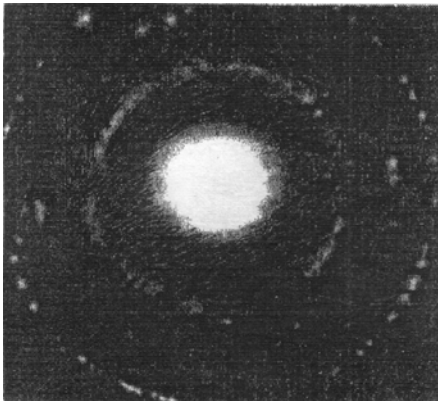


Рис. 4 – Электронограмма от поверхности трения покрытия Cr-Si-B.

Необходимо отметить, что для покрытий Cr-Si-B при скоростях скольжения менее 0,9 м/с имеют место минимальные параметры трения. Износостойкость покрытий обеспечивается при этом созданием разделяющего ювенильные поверхности тонкопленочного объекта, представляющего продукт безкислородных структур на основе металлических фаз химических элементов, входящих в состав покрытия. Природа организации данных объектов в условиях дефицита кислорода, по нашему мнению связана, с фазовыми превращениями, когда в результате механотермического легирования и фрикционной закалки формируются безкислородные поверхностные структуры по механизму образования и свойствам близкие к строению мартенситных фаз. При этом поверхностные структуры, образованные в экстремальных температурно-временных и нагрузочных условиях по мартенситному механизму, по механическим свойствам отличаются от свойств мартенсита закалки, полученного традиционной термообработкой. Так, твердость мартенсита после термической обработки составляет ~7,5-9,5 ГПа, а соответствующие значения для мартенситных структур, образованных на поверхностях трения, достигают ~10,5-13,5 ГПа.

При скоростях испытаний более 1,0 м/с нарушается термодинамический баланс системы трения и происходят необратимые изменения свойств твердофазной поверхностной пленки в результате деструкции и распада поверхностного мартенсита, что приводит к утрате защитных функций тонкопленочного объекта и потере экранирующей способности. В данных условиях трения ведущим видом изнашивания покрытий, не содержащих MoS₂, становится развивающийся процесс схватывания. На рис. 5 представлена кинетика разрушения поверхностных слоев покрытия Cr-Si-B в зависимости от скорости испытаний.

Высоким сопротивлением износу обладают покрытия, напыленные порошком твердого сплава типа ВК15 (рис. 1, кривая 2). Как известно, покрытия ВК15 представляют собой классическую структуру антифрикционного материала [7]. Повышенная износостойкость твердосплавных покрытий обусловлена как природой входящих в них компонентов, так и структурой. Однако при скоростях скольжения более 1,0 м/с на стойкость покрытий начинает оказывать влияние температура как основной сильнодействующий рабочий параметр [8].

Из образцов, подвергнутых диффузионному легированию, наименьший износ соответствует ванадированным поверхностям трения (рис. 1, кривая 3), что связано с образованием рабочего слоя, насыщенного карбидами ванадия, характеризующегося высокими механическими свойствами, в частности твердостью и тугоплавкостью [9]. Наряду с карбидами VC образуются карбиды V₂C, обладающие гексагональной плотноупакованной кристаллической решеткой, кроме того в поверхностном слое возникают сжимающие напряжения, также способствующие повышению прочности.

Характер, изнашивая стальных образцов, упрочненных путем термодиффузионного хромирования (рис. 1, кривая 4), аналогичен общим закономерностям изнашивания ванадированных сталей. Повышенные значения износа хромированных образцов обусловлены склонностью к схватыванию, вызванной сравнительно невысокой поверхностной прочностью при трении в вакууме [10].

Трудности получения и накопления методически оправданных и статически достоверных триботехнических исследований сдерживают разработку и внедрение покрытий и представляются на сегодня актуальной частью общей проблемы повышения надежности и ресурса в авиационной технике. Основное влияние на развитие прикладных аспектов науки оказывают требования практики. Разработанные для нужд практики, исследуемые детонационные покрытия Cr-Si-B-MoS₂ показали высокие триботехнические характеристики во всем диапазоне испытаний, моделирующих работу узла трения в условиях разреженной атмосферы. При этом средством регулирования износа и обеспечения высокой антифрикционности покрытий в вакууме является применение в их составе твердосмазочного материала, через структуру оказывающего влияние на уровень адаптации при трении за счет модифицированных поверхностных слоев, способных блокировать разрушение и экранировать недопустимые процессы схватывания.

В заключении отметим, что разработка трибо-технических материалов покрытий на базе отечественных минерально-сырьевых ресурсов и их испытание с целью определения оптимальных технико-

экономических условий применения, несмотря на экономические трудности, является необходимой составляющей технического и социального развития, как науки, так и общества в целом.

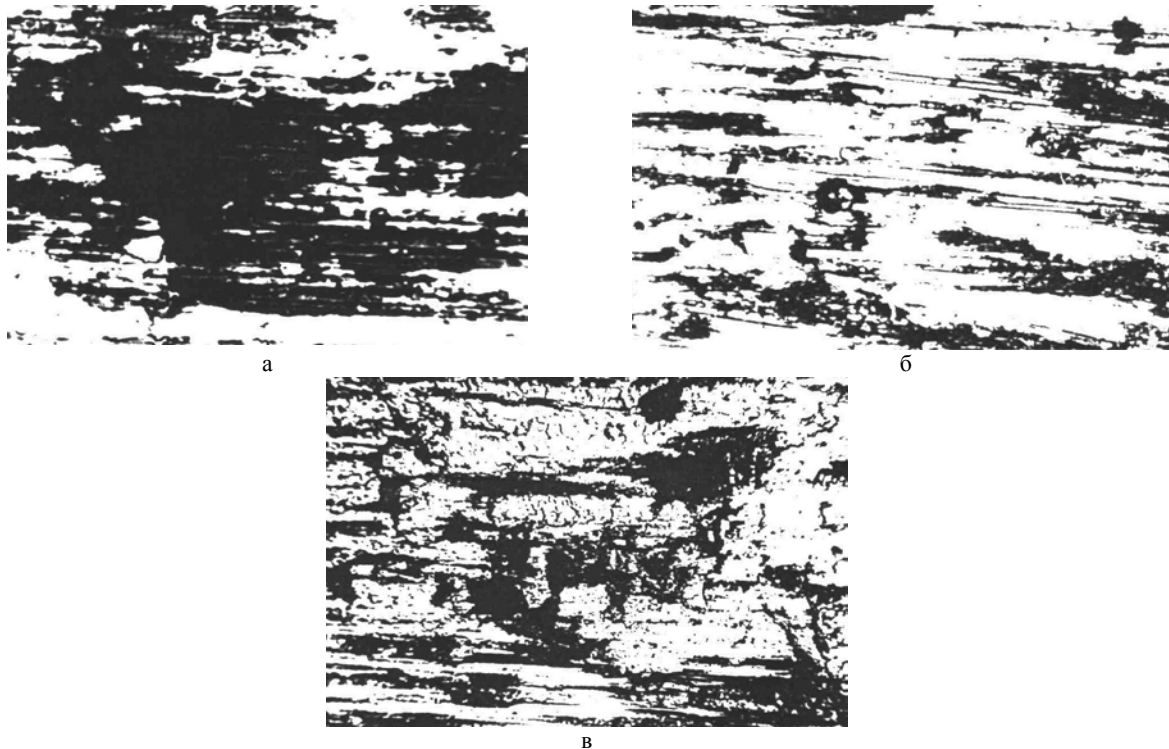


Рис. 5 – Поверхность трения покрытия Cr-Si-B, испытанного при: а – 0,4 м/с, б – 0,6 м/с, в – 1,0 м/с (x320).

Выводы. В результате проведенных исследований установлено:

1. Установлена правомерность используемых методологий и алгоритмов проведения в условиях вакуума экспериментальных исследований гетерогенных покрытий на основе Cr-Si-B, состав которых дополнительно в качестве антифрикционного компонента содержит структурно свободный дисульфид молибдена, как модифицирующую добавку, выполняющую роль твердой смазки.

2. Установлено высокое сопротивление износу исследуемых покрытий Cr-Si-B-MoS₂ за счет создания пассивирующей твердофазной смазочной пленки дисульфида молибдена, препятствующей взаимодействию ювенильных поверхностей. При этом отмечено, что отдельные очаги разрушений, локализующиеся в приповерхностных слоях, аннигилируют в процессе зернограничного скольжения, блокируя в данном диапазоне испытаний любые виды повреждаемости.

3. При изучении характера и закономерностей, обуславливающих склонность покрытий к пассивации отмечено, что ее реализация обусловлена также за счет твердофазных трибохимических и диффузионных процессов формирования квазислоистых поверхностных структур на основе MoS₂ и тонкодисперсных интерметаллидов из компонентов, входящих в состав покрытия.

4. Определено, что защитная тонкопленочная поверхностная структура способствует уменьшению адгезионной составляющей силы трения, а ее пласти-

ческое деформирование не связано со значительными тепловыми затратами и способствует минимальной степени энергетических потерь. При этом характер зависимости и значения коэффициента трения согласуются с закономерностью изнашивания, определяемой свойствами поверхностных структур, а его стабильность свидетельствует о высокой работоспособности покрытий.

Список литературы:

1. Носовский, И. Г. Влияние газовой среды на износ металлов [Текст] / И. Г. Носовский. – К.: Техника, 1988. – 179 с.
2. Гаркунов, Д. Н. Повышение износостойкости деталей конструкции самолетов [Текст] / Д. Н. Гаркунов, А. А. Полякова. – М.: Машиностроение, 1989. – 200 с.
3. Пугачев, А. И. Техническая эксплуатация летательных аппаратов [Текст] / А. И. Пугачева. – М.: Транспорт, 1989. – 374 с.
4. Носовский, И. Г. Авиационные материалы и покрытия [Текст] / И. Г. Носовский, В. В. Щенетов. – К.: КИ ВВС, 1999. – 165 с.
5. Полотай, В. В. Машина трения М-22ПВ [Текст] / В. В. Полотай. – К.: Знание, 1988. – 20 с.
6. Недайборц, С. Д. Закономерности и механизм изнашивания детонационных покрытий Cr-Si-B при трении в отсутствие смазки [Текст] / С. Д. Недайборц // Проблемы тертя та зношування. – 2010. – Вип. 54. – С. 163–171.
7. Bowden, F. Friction and Wear Characteristics of Dry Lubricants [Text] / F. Bowden, W. Hickam // Machine Design. – 2009. – Vol. 35. Issue 16. – P. 195–199.
8. Hinsley, G. Frictional properties of Metall [Text] / G. Hinsley, A. Male // Oxides at High Temperatures Wear. – 2011. – Vol. 11, Issue 9. – P. 233–238.
9. Clauss, F. Materials of Lubricated Systems Materials [Text] / F. Clauss // Wesley Publishing Company Inc. – 2005. – Issue 2. – P. 209–215.

10. Zeman, K. Friction and Wear of Refractory Compounds [Text] / K. Zeman, I. Coffin // ASLE Trans. – 2012. – Vol. 3, Issue 5. – P. 191–199.
11. Ларук, Ю. В. Исследование эрозионной стойкости покрытий при микроударном нагружении [Текст] / Ю. В. Ларук, В. Е. Левицкий // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Том. 6. No11(72). – С. 4–8. doi: 10.15587/1729-4061.2014.29890
5. Polotaj, V. V. (1988). Mashina treniya M-22PV. Kiev: Znanie, 20.
6. Nedayborshch, S. D. (2010). Zakonomernosti i mexanizm iznashivaniya detonacionnyh pokrytij Cr-Si-B pri trenii v otsutstvii smazki. Problemi tertya ta znoshuvannya, 54, 163–171.
7. Bowden, F. & Hickam, W. (2009). 'Friction and Wear Characteristics of Dry Lubricants', Machine Design., 35, 16, 195–199.
8. Hinsley, G. & Male, A. (2011). 'Frictional properties of Metall Oxides at High Temperatures Wear', Machine Design, 11, 9, 233–238.
9. Clauss, F. (2005). 'Materials of Lubricated Systems Materials', Wesley Publishing Company Inc., 2, 209–215.
10. Zeman, K. & Coffin, I. (2012). 'Friction and Wear of Refractory Compounds', ASLE Trans, 3, 5, 191–199.
11. Laruk, Y. V. (2014). 'Yssledovanye erozyonnoi stoikosty pokryti pry mykroudarnom nahrzheny'. "Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6, 11(72), 4–8. doi: 10.15587/1729-4061.2014.29890

Bibliography (transliterated):

1. Nosovskyi, I. G. (1988). 'Vliyanie gazovoi sredy na iznos metsllov', Technika, 165.
2. Garcunov, D. N., Poljkov, A. A. (1989). 'Povyshenie iznosostoykosti detalej samoletov', Mashinostroenie, 200.
3. Pugachev, A. I. (1999). 'Technicheskaj ekspluatacija letatelnich apparatov', Transport, 374.
4. Nosovskij, I. G., Shchepetov, V. V. (1999). 'Aviacionnye materialy i pokriji', KI VVS, 165.

Поступила (received) 10.03.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Закономерности трения и износа в вакууме детонационных покрытий Cr-Ci-b, содержащих дисульфид молибдена/ В. П. Бабак, В. В. Щепетов, С. Д. Недайборщ // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.24–29. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.

Закономірності тертя та зношування в вакуумі детонаційних покриттів Cr-Si-B, що містять дисульфід молібдену/ В. П. Бабак, В. В. Щепетов, С. Д. Недайборщ // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.24–29. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.

Wear resistance in vacuum detonation coatings Cr-Si-B coating the molibdenum disulphide/ V. Babak, V. Shchepetov, S. Nedayborshch//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 17 (1189).– P. 24–29. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бабак Виталій Павлович – член-корреспондент НАН України, доктор технічних наук, професор, завідувачий відділенням, Інститут технічної теплофізики НАНУ, ул. Желябова, 2а, г. Київ, Україна, 03057, тел: 067-422-04-91; e-mail: vdoe@ukr.net.

Бабак Віталій Павлович – член-корреспондент НАН України, доктор технічних наук, професор, завідувач відділенням, Інститут технічної теплофізики НАНУ, вул. Желябова, 2а, м Київ, Україна, 03057, тел: 067-422-04-91; e-mail: vdoe@ukr.net.

Babak Vitaliy Pavlovich – corresponding member of National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department, Institute of Engineering Thermophysics NASU, ul. Zhelyabova, 2a, Kiev, Ukraine, 03057, tel: 067-422-04-91; e-mail: vdoe@ukr.net.

Щепетов Виталій Владимирович – доктор технічних наук, професор, с.н.с., Інститут технічної теплофізики НАНУ, ул. Желябова, 2а, г. Київ, Україна, 03057, тел: 067-299-76-53; e-mail: vvs2020@ukr.net.

Щепетов Віталій Володимирович – доктор технічних наук, професор, с.н.с., Інститут технічної теплофізики НАНУ, вул. Желябова, 2а, м Київ, Україна, 03057, тел: 067-299-76-53; e-mail: vvs2020@ukr.net.

Shchepetov Vitaly Vladimirovich – doctor of technical sciences, professor, senior researcher, Institute of Engineering Thermophysics NASU, ul. Zhelyabova, 2a, Kiev, Ukraine, 03057, tel: 067-299-76-53; e-mail: vvs2020@ukr.net.

Недайборщ Сергей Дмитриевич – технолог, Государственное предприятие «ЗАВОД 410ГА», пр. Воздухофлотский, 94, г. Киев, Украина, 03151, тел: 097-299-97-03; e-mail: nanoavia@ukr.net.

Недайборщ Сергій Дмитрович – технолог, Державне підприємство «ЗАВОД 410ГА», пр. Повітрофлотський, 94, м Київ, Україна, 03151, тел: 097-299-97-03; e-mail: nanoavia@ukr.net.

Nedayborsch Sergey Dmitriyevich – technologist, State Enterprise "Plant 410GA", etc. Povitroflotskyi, 94, Kiev, Ukraine, 03151, tel: 097-299-97-03;. e-mail: nanoavia@ukr.net.

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА УПРАВЛІННЯ МЕХАНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИМИ СИСТЕМАМИ ТА КОМПЛЕКСАМИ

УДК 004.942+621.57.673:61

*Е. В. ВЫСОЦКАЯ, Л. И. РАК, А. П. ПОРВАН, К. В. ЦАПЕНКО, Е. А. ГАВРЮШИНА***ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ СНИЖЕНИЯ АДАПТАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ У ПОДРОСТКОВ С СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТЫМИ ЗАБОЛЕВАНИЯМИ**

Работа посвящена определению вероятности снижения адаптационных возможностей у подростков с сердечно-сосудистыми заболеваниями и синтезу математической модели с использованием метода бинарной логистической регрессии, которая позволит повысить эффективность выявления нарушений адаптации у детей и подростков за счет комплексной оценки показателей работы сердечно-сосудистой и вегетативной нервной систем, отражающих общее физическое состояние ребенка. Использование предложенного подхода даст возможность своевременно проводить коррекцию лечения и реабилитации подростков с наиболее частыми в педиатрии вторичными кардиомиопатиями.

Ключевые слова: адаптационные возможности, вторичные кардиомиопатии, логистическая регрессия.

Робота присвячена визначенню ймовірності зниження адаптаційних можливостей у підлітків із серцево-судинними захворюваннями і синтезу математичної моделі з використанням методу бінарної логістичної регресії, яка дозволить підвищити ефективність виявлення порушень адаптації у дітей та підлітків за рахунок комплексної оцінки показників роботи серцево-судинної і вегетативної нервової систем, що відображають загальний фізичний стан дитини. Використання запропонованого підходу дасть можливість своєчасно проводити корекцію лікування та реабілітації підлітків з найбільш частими в педіатрії вторинними кардиомиопатіями.

Ключові слова: адаптаційні можливості, вторинні кардиомиопатії, логістична регресія.

The article is devoted to determining the probability of reducing the adaptive capabilities of teenagers with cardiovascular diseases and synthesis of mathematical model using the method of binary logistic regression, which will increase the efficiency of identifying adaptation disorders in children and adolescents due to a comprehensive assessment of performance of the cardiovascular and autonomic nervous systems, reflecting the overall physical condition of the child. According to the received model, the increase in diastolic blood pressure may occur along with increased overall weight and size of a growth indicator and the left ventricle. Therefore, a significant change in the parameters of physical development in the direction of increasing the mass of the body of a teenager and, accordingly, heart is not accompanied by an increase in left ventricular mass, impair the functional reserves of the heart and the adaptive capacity of the organism as a whole. The synthesized mathematical model is adequate and the qualitative and allows to identify 94.7 % of the decrease in adaptive capabilities of teenagers with heart disease. Using the proposed approach will enable a timely manner to carry out the correction of treatment and rehabilitation of teenagers with the most common pediatric secondary cardiomyopathies.

Keywords: adaptive capabilities, secondary cardiomyopathy, logistic regression.

Введение. В последние годы происходит снижение уровня соматического и психического здоровья детей и подростков, в результате чего развиваются процессы ретардации детского населения Украины [1]. Существующие негативные тенденции объясняются влиянием социальных факторов, психоэмоциональными перегрузками, гиподинамией и снижением адаптационного потенциала [2]. Самой уязвимой категорией являются подростки. Именно среди них наблюдается роста количества заболеваний, и прежде всего связанных с сердечно-сосудистой системой организма [3].

В современной медицине существует мнение о необходимости учета индивидуальных морфофункциональных и психофизиологических особенностей ребенка. Известно, что дети с различными темпами физического развития по-разному адаптируются к физической нагрузке, имеют разную структуру заболеваемости и механизмы регуляции функций. Анализируя изложенные факты можно предположить, что существенное влияние на характер адаптации к физическим факторам оказывают темпы физического развития, совместно с физиологическими показателями (энергообмен, аэробные ресурсы, физическая работоспособность). При этом критерием эффективности повышения адаптационных возможностей организма подростков может выступать изменение компенсаторных и резервных механизмов реагирования. Не

менее важно и актуально выявить и предупредить снижение адаптационных резервов у лиц, имеющих малые структурные аномалии сердца, вегетососудистую дисфункцию с нарушениями артериальной давления или начальную стадию артериальной гипертензии, практически здоровых подростков либо желающих заниматься спортом, что является основой профилактики дизадаптивных состояний, а в дальнейшем – нарушения гемодинамики и дисфункции сердца.

Анализ литературных данных и постановка проблемы. В последнее время теме адаптационных возможностей (АВ) у подростков и способам их повышения посвящено много работ, в которых некоторые авторы связывают уровень АВ с физическим развитием подростков. Известно, что в основе тесной взаимосвязи физического развития и многих физиологических функций организма лежат физические зависимости между поверхностью тела, его объемом и массой тела [4]. В монографии [5] показано, что увеличение размеров тела обязательно ведет к изменениям принципов работы организма и его частей и обеспечивает качество адаптивных реакций детского организма, а также устойчивость его «стационарного» состояния [6].

Оценка адаптационных реакций у детей, прежде всего, базируется на показателях деятельности сердечно-сосудистой и дыхательной систем. Измерение

частоты сердечных сокращений (ЧСС), ударного объема сердца, частоты дыхания, артериального давления (АД) просты, и есть нормы их изменений на фоне разных нагрузочных проб, что позволяет с их помощью прогнозировать функциональные возможности организма. Констатировать стрессовое состояние систем адаптации позволяют интенсивность белкового метаболизма, показатели вегетативной регуляции, терморегуляции и симпато-адреналовой системы [7]. Так, существует медико-биологический метод, предполагающий комплексную оценку антропометрических особенностей подростка и функционального состояния сердечно-сосудистой и дыхательной систем [8]. Однако, недостатком данного метода является отсутствие возможности определения вероятности снижения адаптационных возможностей организма и не достаточная точность прогнозирования (ниже 90%), что может влиять на качество дальнейшей терапии.

Для оценки характера адаптации довольно часто используются методики функциональной диагностики и оценки психоэмоционального состояния: электроэнцефалография, холтеровское мониторирование, оценка вариабельности сердечного ритма, методы анкетирования, тест Шульте-Горбова и др. [9, 10]. Однако у детей разного уровня физического развития и морфофункциональных особенностей, с различным характером энергетического обмена эти показатели имеют неравнозначную нормологическую значимость. Так известен метод оценки состояния здоровья, адаптационных возможностей отдельных систем в различные критические периоды, определяемые по показателям вариационной пульсометрии с использованием индекса Баевского [11]. Недостатком данного метода является его трудоемкость, отражение состояния и функционирования только оси вегетативной регуляции — сердечно-сосудистой системы, не всегда может быть применен для пациентов с заболеваниями сердца или решения вопроса спортивных тренировок.

В последнее время большое распространение получило направление, при котором моделирование адаптационных процессов базируется на математических подходах [12]. Так, в [13] описывается подход к оценке адаптационных возможностей организма у подростков на основе исследования двух сопряженных функций, отражающих приспособительный эффект сердечно-сосудистой системы, с использованием методики подсчета индекса функционального напряжения (ИФН), при этом в качестве двух сопряженных функций используют показатели спектрального анализа вариабельности сердечного ритма LF – мощность низких частот, HF – мощность высоких частот и PVLf – доля очень низких частот. Недостатками данного подхода являются сложность оценки адаптивных отклонений в динамике роста и развития детей невысокая достоверность (78 %) клинической диагностики.

Также существует метод оценки адаптационных возможностей подростков, при котором определяют тип конституции, вегетативный тонус и адаптационные возможности сердечно-сосудистой системы с последующим выделением наиболее информативных признаков с использованием последовательного анализа Вальда [14]. К недостаткам метода можно отне-

сти субъективность суждений мнений экспертов при определении срыва адаптационно-приспособительных реакций организма, сложность и трудоемкость проведения.

Таким образом, можно сказать, что уровень физического развития ребенка вместе с состоянием сердечно-сосудистой и вегетативной нервной систем обеспечивают характер ответа как на физическую нагрузку, так и на действие разнообразных факторов внешней среды.

К сожалению, в доступной литературе отсутствуют сведения об особенностях нарушений сердечного ритма у детей и подростков с разным уровнем физического развития, а способы оптимизации медицинской реабилитации с учетом индивидуальных особенностей физического развития еще не достаточно изучены. К тому же не существует общего интегративного подхода к определению вероятности снижения адаптационных возможностей у подростков с сердечно-сосудистой патологией. Таким образом, определение вероятности снижения адаптационных возможностей у подростков с сердечно-сосудистыми заболеваниями является актуальной научной и практической задачей.

Цель и задачи исследования. Цель исследования – определение вероятности снижения адаптационных возможностей у подростков с сердечно-сосудистыми заболеваниями.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- 1) определить наиболее прогностически значимые признаки, характеризующие снижение адаптационных возможностей подростков;
- 2) синтезировать математическую модель определения вероятности снижения адаптационных возможностей у подростков.

Разработка математической модели определения вероятности снижения адаптационных возможностей у подростков. Для определения вероятности снижения адаптационных возможностей у подростков и построения соответствующей математической модели в исследование были включены данные 38 детей 14-17 лет с вторичными кардиопатиями и нарушениями артериального давления, для которых определялся индекс адаптации. Индекс адаптации оценивался на основании двухступенчатой пробы «6-минутная ходьба» (пациент в максимально интенсивном для себя темпе течение 6 минут проходит первую дистанцию, затем после 30-минутного отдыха – вторую дистанцию за 6 минут) и рассчитывался по формуле:

$$I_{Ad} = D_2 / D_1,$$

где I_{Ad} – индекс адаптации; D_2 – дистанция второго этапа теста; D_1 – дистанция первого тестирования.

Детей с ожирением исключали из исследования. По результатам доплер-эхокардиографии нарушения внутрисердечной гемодинамики у всех отсутствовали, показатели систолической и диастолической функции сердца были в норме. Все дети были разделены на группы следующим образом: 1-я группа – пациенты с $I_{Ad} \geq 1$ (25 человек); 2-я группа – пациенты с $I_{Ad} < 1$ (13 человек).

Были проанализированы следующие данные пациентов: пол, возраст, уровень физической подготовки, антропометрические показатели (рост, масса тела,

индекс массы тела, весо-ростовой индекс (рассчитывается по формуле: масса тела, кг/ рост, м. в кубе), тип телосложения, ширина плеч, длина руки, размах рук, длина ноги, окружность грудной клетки, окружность плеча, окружность талии, окружность бедер), клино-ортостатическая проба (КОП – 10 показателей), проба Руфье (5 показателей), 6-минутная ходьба (11 показателей), площадь поверхности тела, морфо-функциональные характеристики сердца по данным эхокардиографии в состоянии покоя (23 показателя, в том числе конечный диастолический размер левого желудочка – КДР; масса миокарда левого желудочка – ММЛЖ) и после нагрузки (10 показателей), результаты клинико-лабораторных исследований (адреналин, норадреналин, дофамин, дофа, кортизол, серотонин). Все показатели были закодированы с учетом наличия, направленности и величины каждого показателя.

Для построения математической модели определения вероятности снижения адаптационных возможностей у подростков использовали метод пошаговой логистической регрессии [14], который позволил выделить 4 наиболее значимых показателя: X_1 – весо-ростовой индекс; X_2 – прирост диастолического арте-

риального давления (ДАД) в КОП; X_3 – ММЛЖ; X_4 – КДР. Данные предикторы модели использовались в качестве прогностических факторов для оценки вероятности отнесения каждого пациента к прогнозируемому состоянию по следующей формуле:

$$\hat{P} = \frac{1}{1 + e^{-(1.328 \cdot X_1 + 0.235 \cdot X_2 - 1.07 \cdot X_3 + 53.178 \cdot X_4 - 150.088)}}.$$

Значение \hat{P} , получаемое по формуле, можно интерпретировать как вероятность снижения адаптационных возможностей у подростков.

Для проведения данного анализа использовалась прикладная программа SPSS 17.0 для Windows.

Проверка значимости подобранных коэффициентов модели проводилась с использованием статистики Вальда.

Далее была получена классификационная таблица (табл. 1), которая позволяет судить о точности прогнозирования снижения адаптационных возможностей на основании сравнения прогнозируемой и фактической групп.

Таблица 1 – Классификационные результаты модели бинарной логистической регрессии

Фактическая группа, m	Прогнозируемая группа, n		Количество верно предсказанных значений, %
	Группа 1	Группа 2	
Группа 1	24	1	96,0
Группа 2	1	12	92,3

Обсуждение результатов построения математической модели. В результате оценки значимости подобранных коэффициентов математической модели определения вероятности снижения адаптационных возможностей у подростков с использованием статистики Вальда, все переменные значимы ($p < 0,05$) и подобраны правильно.

Корректность прогнозирования полученной математической модели, оцененная с использованием, R^2 Нейджелкерка, составила 90,8 %.

Достигнутый уровень значимости в результате проведения теста согласия Хосмера-Лемешова свидетельствует об адекватности созданной модели реальным данным.

Анализируя результаты табл. 1, можно сделать вывод о том, что из общего числа пациентов группы 1, в результате прогнозирования ошибочно отнесен к группе 2 был 1 пациент из 25. Из общего числа пациентов группы 2, правильно были классифицированы 12 пациентов и 1 ошибочно отнесен к группе 1. Таким образом, правильно были распознаны 36 случаев из 38, что составляет 94,7 %. Оценка диагностической ценности построенной математической модели, проводимая на основании построения ROC-кривой, показала высокое качество синтезированной модели (значение площади под ROC-кривой составило 0,94 (0,74, 1,00)).

Выводы. Таким образом в результате исследования были выявлены четыре значимых информативных признака характеризующие снижение адаптационных возможностей подростков: весо-ростовой индекс, прирост ДАД в КОП, ММЛЖ; КДР. Весо-

ростовой показатель и КДР характеризуют физиологические процессы роста у детей. Показатель изменения ДАД в КОП (снижение, увеличение или без изменений) дает возможность судить как о нормальной, так и патологической вегетативной реакции.

Впервые была синтезирована математическая модель определения вероятности снижения адаптационных возможностей у подростков с сердечно-сосудистыми заболеваниями, которая позволила объединить данные физического развития, морфометрические параметры сердца и один из показателей, характеризующих вегетативную реактивность, что отражает тесное взаимодействие сердечно-сосудистой и вегетативной нервной систем, которые в определенной мере зависят от исходного физического состояния и уровня здоровья пациента. Использование полученной модели определения вероятности снижения адаптационных возможностей позволит своевременно внести коррективы в лечение и реабилитацию подростков с наиболее частыми в педиатрии вторичными кардиомиопатиями.

Список литературы:

1. *Волосовець О. П.* Диференціальна діагностика синдромів порушень фізичного та статеворозвитку у дітей [Текст] / *О. П. Волосовець, О. С. Абатуров, С. П. Кривоносов, Ю. К. Більбат* [та ін.]. – Тернопіль, ТДМУ, 2006. – 354 с.
2. *Теннер Е. А.* Динамическая оценка состояния здоровья детей, начавших обучение в школе в разном возрасте [Текст] / *Е. А. Теннер, Т. Е. Таранушенко, Н. Ю. Гришкевич* // Педиатрия. – 2013. – No 1. – С.45–48.
3. *Пархоменко Л. К.* Ювенологія. Практикум з підліткової медицини [Текст] / *Л. К. Пархоменко, З. Т. Балацька, Т. О. Глібова, Л.А. Страшок* [та ін.]. – Х.: Факт, 2004. – 720 с.

4. Баранов А. А. Фундаментальные и прикладные исследования по проблемам роста и развития детей и подростков / А.А. Баранов, Л.А. Щеплягина // Рос. педиатр. – 2000. – No 5. – С.5–12.
5. Шмидт-Ниельсен К. Размеры животных: почему они так важны? [Текст] / К. Шмидт-Ниельсен. – М.: Мир, 1987 – 259 с.
6. Апанасенко Г. А. Эволюция биоэнергетики и здоровья человека [Текст] / Г. А. Апанасенко. – СПб: МГП «Петрополис», 1992. – 123 с.
7. Вахитов И. Х. Особенности становления насосной функции сердца и антропометрических показателей юных спортсменов в процессе многолетней спортивной подготовки [Текст] / И. Х. Вахитов, Р. С. Халиуллин, Б. И. Вахитов, А. В. Ульянова // Педиатрия. – 2012. – No 1. – С.139–141.
8. Бородина Н. Превентивные методы оценки адаптационных возможностей подростков к физической нагрузке [Текст] / Н. Бородина, А. Луинович // Теория та методика фізичного виховання. – 2011. – No 8 – С. 14–17.
9. Сетко Н. П. Особенности формирования адаптационных возможностей гимназистов-первоклассников [Текст] / Н. П. Сетко, А. С. Лозинский, Е. В. Булычева // Гигиена и санитария. – 2012. – No 1. – С. 51–53.
10. Порван А. П. Информационная система определения адаптационных возможностей организма студентов [Текст] / А. П. Порван, Ю. В. Журавлева // Технологический аудит и резервы производства. – 2013. – No 6(3). – С. 38–41.
1. Баевский Р.М. Оценка адаптационных возможностей организма и риск развития заболеваний [Текст] / Р. М. Баевский, А. П. Берсенева. – М.: Медицина, 1997. – 236 с.
11. Высоцкая Е. В. Методика определения систолической дисфункции миокарда у подростков [Текст] / Е. В. Высоцкая, А. П. Порван, Л. И. Рак, О. А. Сватенко // Східно-Європейський журнал передових технологій. 2012. – Vol. 1, Issue 3, – С. 27–31.
12. Способ оценки адаптационных возможностей организма в критические периоды онтогенеза у подростков. [Текст]: пат. 2426127 Рос. Федерации: МПК G01N33/555. Бондарь Т. П.; заявитель и патентообладатель Государственное общеобразовательное учреждение высшего профессионального образования Ставропольский государственный университет - No 2010119129/15; заявл. 12.05.2010; опубл. 10.08.2011 Бюл. No 22. – 13 с.
13. Наглядная медицинская статистика : учеб. пособие [Текст] / А. Петри, К. Сэбин; пер. с англ. под ред. В. П. Леонова. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2015. – 216 с.
3. Parkhomenko L. K., Balatskiy S. T., Glebova T. O., Strashok L. A. *Yuvenolohiya. Praktykum z pidlitkovoyi medytsyny* [Yuvenolohiya. Workshop on Adolescent Medicine]. Kharkov, Fact Publ., 2004. 720 p.
4. Baranov A. A., Scheplyagina L.A. Fundamental'nyye i prikladnyye issledovaniya po problemam rosta i razvitiya detey i podrostkov [Basic and applied research on issues of growth and development of children and adolescents]. *Ros. pediatrician*. 2000, no. 5, pp.5–12.
5. Schmidt-Nielsen K. *Razmery zhivotnykh: pochemu oni tak vazhny?* [Dimensions animals: why are they so important?]. Moscow: Mir Publ., 1987. 259 p.
6. Apanasenko GA *Evolutsiya bioenergetiki i zdorov'ya cheloveka* [Evolution of bioenergy and human health]. St. Petersburg: MGP «Petropolis» Publ., 1992. 123 p.
7. Vahitov I. H., Khaliullin R. S., Vahitov B. I., Ulyanov A. V. Oso-bennosti stanovleniya nasosnoy funktsii serdtsa i antropometricheskikh pokazateley yunyh sportsmenov v protsesse mnogoletney sportivnoy podgotovki [Features of formation of the pumping function of the heart and anthropometric indicators of young athletes in the process of long-term sports training]. *Pediatrics*. 2012, no. 1, pp. 139–141.
8. Borodina N., Lupinovich A. Preventivnyye metody otsenki adaptatsionnykh vozmozhnostey podrostkov k fizicheskoy nagruzke [Preventive methods for assessing adaptation options adolescents to physical activity]. *Teoriya ta metodika fizichnogo vikhovannya*. 2011, no. 8, pp. 14–17.
9. Setko N. P., Lozinskiy A. S., Bulycheva Ye. V. Oso-bennosti formirovaniya adaptatsionnykh vozmozhnostey gimnazistov-pervoklassnikov [Peculiarities of adaptation possibilities of high-school students, first grade]. *Hygiene and sanitation*. 2012, no. 1, pp. 51–53.
10. Porvan A. P., Zhuravleva Yu. V. Informatsionnaya sistema opredeleniya adaptatsionnykh vozmozhnostey organizma studentov [Information system definition of adaptation opportunities of the students organism]. *Tekhnologicheskii audit i rezervy proizvodstva*. [Technology audit and production reserves]. Kharkov, 2013, no. 6 (3). pp. 38–41.
11. Baevsky P. M., Berseneva A. P. Otsenka adaptatsionnykh vozmozhnostey organizma i risk razvitiya zaboлевaniy [Evaluation of adaptive capabilities of the organism, and the risk of developing diseases]. Moscow: Meditsina Publ., 1997. 236 p.
12. Vysotskaya Ye. V., Porvan A. P., Rak L. I., Svatenko O. A. Metodika opredeleniya diastolicheskoy disfunktsii miokarda u podrostkov [Method for determining systolic myocardial dysfunction in adolescents] Східно-Європейський журнал передових технологій [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies]. 2012, Vol. 1, Issue 3, pp. 27-31.
13. Bondar T. P. *Sposob otsenki adaptatsionnykh vozmozhnostey orhanyzma v krytycheskyye peryody ontogeneza u podrostkov* [Method of opportunities otsenki adaptatsyonnykh organism in ontogeny krytycheskyye peryody in adolescents]. Patent RF, no. 2426127, 2010.
14. Petri A., Sabin S. *Medical Statistics at a Glance*. 3rd Edition. Wiley-Blackwell, 2009, 182 p. (Rus. Ed.: Leonov V. P. *Naglyadnaya meditsinskaya statistika: ucheb. Posobiye*. Moscow, GEOTAR Media Publ., 2015. 216 p.)

Поступила (received) 13.03.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Определение вероятности снижения адаптационных возможностей у подростков с сердечно-сосудистыми заболеваниями/ Высоцкая Е. В., Рак Л. И., Порван А. П., Цепенко К. В., Гаврюшина Е. А. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.30–34. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-5459.

Визначення ймовірності зниження адаптаційних можливостей у підлітків із серцево-судинними захворюваннями/ Висоцька О. В., Рак Л. І., Порван А. П., Цепенко К. В., Гаврюшина О. А. // Вісник НТУ «ХПІ». – 2016. – No 17(1189). – С.30–34. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-5459.

Determining the probability of reducing the adaptive capabilities in adolescents with cardiovascular diseases/ Vysotskaya E., Rak L., Porvan A., Tsapenko K., Gavryushin H. // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-

technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 17 (1189).– P.30–34. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Высоцкая Елена Владимировна - доктор технических наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, профессор кафедры Биомедицинской инженерии, пр. Науки, 14, г. Харьков, Украина, 61166., тел. (057) 70-21-364, e-mail: evisotska@mail.ru

Висоцька Олена Володимирівна - доктор технічних наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри Біомедичної інженерії, пр. Науки, 14, м. Харків, Україна, 61166, тел. (057) 70-21-364, e-mail: evisotska@mail.ru

Vysotskaya Elena - doctor of engineering science, Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor, Department of Biomedical Engineering, Nauki Ave., 14, Kharkov, Ukraine, 61166. Tel.: (057) 70-21-364, e-mail: evisotska@mail.ru

Рак Лариса Ивановна - доктор медицинских наук, ГУ "Институт охраны здоровья детей и подростков АМН Украины", ведущий научный сотрудник отделения педиатрии и реабилитации, пр. Юбилейный, 52а, г. Харьков, Украина, 61153, тел. (097) 28-16-496, e-mail: lirack@ya.ru

Рак Лариса Іванівна - доктор медичних наук, ДУ "Інститут охорони здоров'я дітей та підлітків АМН України", провідний науковий співробітник відділення педіатрії та реабілітації, пр. Ювілейний, 52-а, м. Харків, Україна, 61153, тел. (097) 28-16-496, e-mail: lirack@ya.ru

Rak Larisa - doctor of medical sciences, Government Institution "Institute of Child and Adolescent Health, AMS of Ukraine", a leading researcher at the Department of Pediatrics and Rehabilitation, Jubileinii Ave., 52a, Kharkov, Ukraine, 61153, tel.: (097) 28-16-496, e-mail: lirack@ya.ru

Порван Андрей Павлович - кандидат технических наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, старший научный сотрудник кафедры Биомедицинской инженерии, пр. Науки, 14, г. Харьков, Украина, 61166, тел. (066) 29-40-670, e-mail: porvan_a_p@mail.ua

Порван Андрій Павлович - кандидат технічних наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, старший науковий співробітник кафедри Біомедичної інженерії, пр. Науки, 14, м. Харків, Україна, 61166, тел. (066) 29-40-670, e-mail: porvan_a_p@mail.ua

Porvan Andrei - candidate of technical sciences, Kharkiv National University of Radio Electronics, a senior research fellow at the Department of Biomedical Engineering, Nauki Ave., 14, Kharkov, Ukraine, 61166, tel.: (066) 29-40-670, e-mail: porvan_a_p@mail.ua

Гаврюшина Елена Андреевна - Харьковский национальный университет радиоэлектроники, аспирант кафедры Биомедицинской инженерии, пр. Науки, 14, г. Харьков, Украина, 61166, тел. (057) 70-21-364, e-mail: ol8ven@mail.ru

Гаврюшина Олена Андріївна - Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри Біомедичної інженерії, пр. Науки, 14, м. Харків, Україна, 61166, тел. (057) 70-21-364, e-mail: ol8ven@mail.ru

Gavryushin Helena - Kharkiv National University of Radio Electronics, a graduate student of the Department of Biomedical Engineering, Nauki Ave., 14, Kharkov, Ukraine, 61166, tel.: (057) 70-21-364, e-mail: ol8ven@mail.ru

Цапенко Ксения Владимировна - Харківський національний університет радіоелектроніки, студент факультету Електронної техніки, пр. Науки, 14, м. Харків, Україна, 61166, тел. (057) 70-21-364, e-mail: xuhaziege@gmail.com

Цапенко Ксения Владимировна - Харьковский национальный университет радиоэлектроники, студент факультета Электронной техники, пр. Науки, 14, г. Харьков, Украина, 61166, тел. (057) 70-21-364, e-mail: xuhaziege@gmail.com

Tsapenko Ksenia - Kharkiv National University of Radio Electronics, a student of the Faculty of Electronic Engineering, Nauki Ave., 14, Kharkov, Ukraine, 61166, tel.: (057) 70-21-364, e-mail: xuhaziege@gmail.com

УДК 629.1.05

А. А. ШЕКОЛЬЯН

КОМБИНИРОВАННЫЙ ДАТЧИК ВЕТРА ДЛЯ АДАПТИВНЫХ АВТОРУЛЕВЫХ СИСТЕМ

Разработано устройство, позволяющее определять скорость и направление ветра на базе бесконтактных датчиков, отличающееся от аналогов меньшей себестоимостью и большей точностью. Проведен сравнительный анализ методов определения ветровых параметров. Приведена принципиальная схема прибора, описан принцип его работы. Спроектированы конструкция, печатная плата и алгоритм работы датчика ветра. Описана работа цифрового магнитного энкодера Austrian Microsystems AS5040. С помощью оптической делительной головки была проведена оценка погрешности определения направления ветра магнитным энкодером.

Ключевые слова: анемометр, флюгер, авторулевой, магнитный энкодер, датчик Холла.

Разработано устройство, позволяющее определять скорость и направление ветра на базе бесконтактных датчиков, отличающееся от аналогов меньшей себестоимостью и большей точностью. Проведен сравнительный анализ методов определения ветровых параметров. Приведена принципиальная схема прибора, описан принцип его работы. Спроектированы конструкция, печатная плата и алгоритм работы датчика ветра. Описана работа цифрового магнитного энкодера Austrian Microsystems AS5040. С помощью оптической делительной головки была проведена оценка погрешности определения направления ветра магнитным энкодером.

Ключевые слова: анемометр, флюгер, авторулевой, магнитный энкодер, датчик Холла.

This article describes a device that allows determining the wind speed and direction on the basis of proximity sensors. The main aim of the research is the choice of methods for determination of wind parameters, their comparison, as well as the development of the device having low power consumption, high accuracy and a satisfactory degree of integration in automatic control system. The developed device has a lower cost than similar devices.

Using the combined wind sensor is important to analyze the weather conditions in the adaptive autopilot small boats and yachts as well as knowledge about the factors that influence the dynamics of the vessel allows to adjust the steering parameters in real time.

A comparative analysis of wind parameters determination methods, such as thermal, acoustic, correlation and tachometer, was conducted. The choice of the scheme of construction of the anemometer and wind direction sensor is proved

The article describes the operation of the magnetic encoder AS5040 on example of the sensor of wind flow direction. The error in determining the direction of the wind using magnetic encoder was conducted with the help of optical dividing head

A basic and electric circuit, design of combined wind sensor was proposed.

Keywords: anemometer, wind vane, autopilot, magnetic encoder, Hall sensor

Введение

В 80–х годах 20–го века появились адаптивные авторулевые системы, имеющие автоматическую настройку параметров схемы при изменении внешних условий плавания или скорости судна. Это обеспечивает оптимальный режим работы системы без участия человека–оператора. Адаптивные авторулевые используются на судах для улучшения их управляемости, особенно при движении с малой скоростью, на мелководье и в стеснённых условиях плавания [1].

При разработке таких авторулевых систем следует учитывать воздействие внешних факторов на движение судна. В случае маломерных малотоннажных яхт, сила и направление ветра значительно влияют на ходовые параметры судна, такие как: боковой дрейф лодки, ее скорость, дифферент и крен [2]. Имея возможность оценить погодные условия, адаптивные системы могут изменять качество управления рулевого механизма, тем самым улучшая регулирование системы.

Для определения параметров ветра на судах используют различные анемометры и датчики направления ветра. Существующие тепловые и акустические датчики имеют удовлетворительную точность, но, в тоже время, высокую цену для использования на маломерных судах. Тахометрические анемометры основаны на потенциометрах или синусно–косинусных вращающихся трансформаторах. Такие приборы сложны в производстве и имеют меньший ресурс по сравнению с бесконтактными датчиками ветра. Исходя из этого необходимо разработать устройство, обладающее низкими энергопотреблением и себестоимостью, а так же высокими качеством и точностью.

Анализ литературных данных и постановка задачи

В данное время существует несколько видов анемометров: тепловой, акустический и тахометрический.

Тепловой измеритель скорости ветра. В основе работы такого прибора лежит свойство изменения сопротивления открытой нагретой выше температуры окружающей среды открытой тонкой металлической нити в зависимости от воздействия на нее воздушных потоков [3]. Как правило, такие приборы используются в лабораторных условиях в виду их хрупкости, основным преимуществом является миниатюрные размеры датчика.

Акустический анемометр работает на основе измерения скорости звука, которая имеет свойство изменяться под воздействием воздушных потоков. В зависимости от конструкции и принципа работы такие приборы могут быть двумерными (измеряет скорость и направление горизонтально направленных воздушных потоков) и трехмерными (измеряет скорость и направление ветра по трем координатам) [4]. В настоящее время производство таких датчиков на территории Украины является трудным и затратным.

Тахометрический анемометр построен по принципу тахометра. Данный датчик измеряет скорость горизонтальных потоков воздуха. Чувствительным элементом такого устройства могут быть чашки или крыльчатка. Определение скорости вращения вала ЧЭ могут выполнять двигатели постоянного тока, СКВТ, датчики Холла, различные энкодеры. В данный момент является самым простым в изготовлении, имеют меньший диапазон измерения чем у тепловых и акустических анемометров.

Для детектирования направления ветра используются вышеупомянутый акустический анемометр, лазерный датчик направления и флюгеры, построенные на разных датчиках: потенциометрических, СКВТ и т.п.

© А. А. Шекольян. 2016

Цель и задачи исследования

Объект исследования – датчики скорости и направления ветра для судов малого водоизмещения.

Цель исследования – разработка комбинированного датчика ветра, отличающегося удовлетворительной точностью, малыми энергопотреблением и габаритами, высоким ресурсом и возможностью интеграции в системы авторулевого управления.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Проанализировать методы определения скорости и направления ветра.
2. Обосновать выбор методов определения параметров ветра.
3. Разработать комбинированный датчик ветра.
4. Проанализировать работу прибора.

Анализ методов определения скорости и направления ветра

Устройства измерения скорости и направления ветра основываются на различных физических явлениях и представляют собой различные конструкции. Все методы можно разделить по физической идее на пять групп [5]:

- основанные на использовании энергии потока (переменный перепад давлений; измерение крутящего момента; методы, использующие явление обтекания);
- тепловые (использующие измерение температуры нагретого тела, помещаемого в поток (термоанемометры);
- использующие измерение температуры потока, нагреваемого нагревателем (теплокалориметры);
- основанные на введении в поток невесомой метки и измерении ее скорости: (впрыскивание порции иного состава, цвета; намагничивание);
- акустические;
- корреляционные методы.

Самым простым является чашечный анемометр, где по скорости вращения ротора можно судить о скорости ветра. Усовершенствованные модели такого механического анемометра также могут показывать и направление движения воздуха. Другим методом измерения скорости воздушного потока является тепловой метод. Приборы, в которых измеряемый сигнал является функцией тепла, рассеиваемого в контролируемую среду телом, нагреваемым электрическим источником энергии, относят к группе термоанемометров. Существует два способа измерения скорости потока термоанемометрами. При первом способе поддерживают постоянный ток, нагревающий термоэлемент, и измерение скорости потока связывают с изменением температуры термоэлемента. При втором способе током нагрева поддерживают постоянную температуру нити, вследствие чего происходит выделение необходимого компенсирующего количества тепла. Наряду с термоанемометрами, большое распространение получили акустические и вихревые анемометры.

Работа ультразвуковых приборов чаще всего основана на измерении разности времени прохождения акустических колебаний по потоку и против него. Вихревые анемометры определяют скорость потока по частоте пульсаций давления, вызванных срывающимися вихрями, образующимися при обтекании датчика. Их преимуществами являются:

- отсутствие трущихся и движущихся деталей конструкции, что исключает износ;
- высокая точность измерения;
- высокая чувствительность;

Датчики, основанные на описанных способах измерения, несмотря на их плюсы, сложно применить в тяжелых условиях эксплуатации как природного характера (погодные осадки, низкие и высокие температуры), так и техногенного (большие механические нагрузки, ускорения, контакт с источниками широкополосных механических колебаний) [6].

При анализе положительных и отрицательных сторон различных физических принципов построения датчиков ветра необходимо руководствоваться следующими ограничениями по условиям эксплуатации: рабочий температурный диапазон от минус 50 до плюс 50° С, датчик должен быть прочен и устойчив к воздействию вибрационных и ударных нагрузок и внешним воздействующим факторам в виде дождя, тумана, пыли, агрессивных сред, солнечного излучения, акустического шума. Также надо учесть и тот факт, что разрабатываемый прибор будет устанавливаться на судах малого водоизмещения, а, значит, должен иметь простой монтаж, низкую стоимость, ремонтпригодность и малое энергопотребление. [7]

Среди всего спектра рассмотренных принципов построения датчиков ветра наибольшее количество конструктивных недостатков имеет крыльчатый анемометр, имеющий подвижные элементы в измерительном тракте.

Датчики ветра, построенные на других принципах, имеют существенное преимущество по инерционности измерения и отсутствию подвижных частей в измерительном тракте, но имеют высокую цену и сложность производства [8].

Для применения крыльчатого или чашечного анемометра необходимо снизить трение между подвижными элементами конструкции, тем самым увеличив диапазон измерения скорости, использовать цифровой бесконтактный метод измерения скорости вращения вала.

Для измерения направления ветра самым дешевым способом является флюгер. Но он имеет тот же недостаток, что и крыльчатый анемометр – подвижные корпусные элементы. Для определения положения флюгера используются СКВТ, энкодеры, потенциометрические датчики.

Разработка комбинированного датчика ветра

Предложенная конструкция датчика скорости ветра – чашечный бесконтактный анемометр. Датчик такого типа может измерять скорость воздушного потока в горизонтальной плоскости. Чувствительным элементом данного устройства является униполярный цифровой датчик Холла. Принципиальная схема работы анемометра представлена на рис. 1.

Преимущества данной конструкции – простота, дешевизна, отсутствие скользящих контактов, малое энергопотребление. Недостатки – наличие трения между валом чашек и корпусом прибора.

Данный чашечный анемометр предназначен для измерения средней скорости движения воздуха от 1 до 50 м/с.

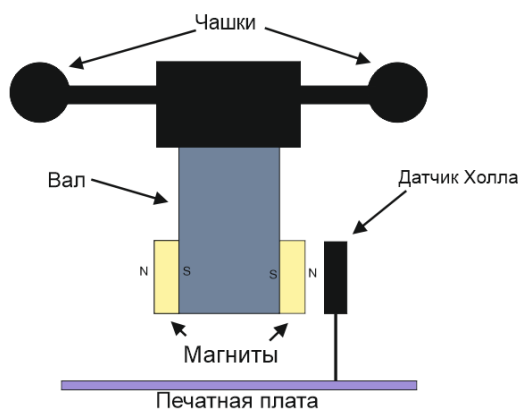


Рис. 1 – Принципиальная схема датчика скорости ветра

Масса анемометра равна 0,2 кг. Приемной частью устройства является четырехчашечная метеорологическая вертушка, насаженная на вал. Вращение вертушки передается валом счетному механизму. Счетный механизм состоит из цифрового датчика Холла, размещенного на печатной плате, а также двух неодимовых магнитов, закрепленных на валу вращения чашек. При прохождении магнитом датчика Холла, последний замыкается и передает логический уровень на микроконтроллер. Скорость ветра рассчитывается по формуле (1):

$$v = R \cdot \frac{\pi}{\Delta t}, \quad (1)$$

где V – скорость ветряного потока, R – радиус четырехчашечной метеорологической вертушки, Δt – период срабатывания датчика Холла.

Для того, чтобы сохранять выбранный курс при хождении под парусом, необходимо корректировать плоскость парусов или направление яхты относительно ветряного потока. Для этого необходимо знать угол направления ветрового потока относительно диаметральной плоскости судна.

Устройство, измеряющее данный параметр, должно быть надежным, иметь малые габариты, потреблять как можно меньше энергии. Для удовлетворения данных параметров предложен бесконтактный флюгер. Конструкция представлена на рис. 2.

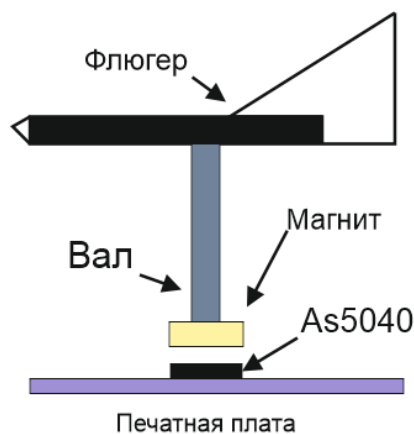


Рис. 2 – Принципиальная схема предложенного флюгера

Для бесконтактного измерения угла вращения вала флюгера используется программируемый круговой магнитный энкодер Austrian MicroSystems (AMS) AS5040. Данный датчик состоит из датчика, измеряющего изменение магнитного поля, распределенного на торцевой поверхности стандартного диаметральном намагниченного цилиндрического магнита (рис. 3).

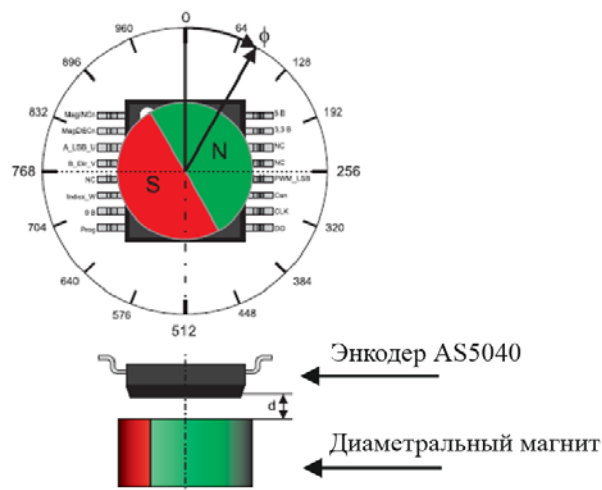


Рис. 3 – Принцип работы двухосевого абсолютного углового энкодера на примере AS5040

В магнитных энкодерах данного типа технология Холла реализована в виде кругового сенсорного массива чувствительных элементов. Крестообразный сенсорный массив, состоящий из попарно-ортогонально ориентированных элементов Холла, формирует двумерное распределение электрического напряжения, соответствующего синусоидальному пространственному распределению рабочего магнитного поля B , которое математически моделируется выражением (2):

$$B = B_{\max} \sin(\varphi + \chi) + B_{\text{off}}, \quad (2)$$

где B_{\max} – амплитудное значение магнитного поля, B_{off} – ненулевое смещение поля, φ – фазовый сдвиг магнитного поля от ненулевой оси при вращении магнита относительно неподвижного энкодера (измеряемый угол), $x = \omega t + \varphi_0$ – приведенная независимая переменная, ω – угловая скорость, t – собственно независимая переменная (время), φ_0 – угловая координата нулевой плоскости в полярной системе координат [9].

При интегрировании магнитного поля по x в четырех элементах ортогонально ориентированных пар и суммировании полученных интегралов будут получены синусная и косинусная информация (выходы напряжения) об угловом положении магнита (рис. 4). Абсолютное угловое положение рассчитывается с использованием функции арктангенса:

$$\varphi = \arctg \left[\frac{-4B_{\max} \sin(\varphi)}{-4B_{\max} \cos(\varphi)} \right]. \quad (3)$$

В датчике AS5040 интегрированная обработка сигналов с функцией арктангенса, реализованной с 10–битным дифференциальным АЦП, образует эквивалентный по разрядности двоичный код, доступный через стандартный синхронный последовательный SSI–интерфейс, и позволяет считывать соответственно 1024 угловых положения на угле в 360°. Цифровой код включает предупреждающие биты состояния источника магнитного поля и биты четности [10].

Для удобства использования, уменьшения габаритов, стоимости, энергопотребления необходимо совместить вышеописанные датчики в одно устройство. Принципиальная конструкция представлена на рис. 4.

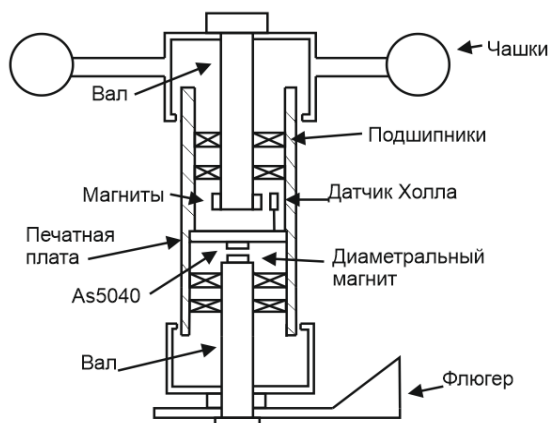


Рис. 4 – Предложенная конструкция комбинированного датчика ветра

Данная конструкция позволяет одновременно измерять оба необходимых параметра с нужной точностью и отправлять их в счетное устройство авторулевого.

Валы метеорологических чашек и флюгера имеют две точки опоры в виде радиальных закрытых подшипников. Для обеспечения малого трения и увеличения чувствительности датчиков в качестве опор валов были выбраны радиальные закрытые подшипники 628zz. Материал валов – алюминий АК5М2.

На рис. 5 изображена конструкция спроектированного устройства. Материал корпуса – АБС-пластик.



Рис. 5 – Спроектированная конструкция комбинированного датчика ветра

Для вычисления скорости и направления ветра в устройстве присутствует микроконтроллер ATtiny13. Цифровой униполярный датчик Холла подключен к логическому входу контроллера, магнитный энкодер подключен по последовательному SSI – интерфейсу. Выходные данные передаются на общее вычислительное устройство авторулевого с помощью виртуального Serial – интерфейса для дальнейшей обработки авторулевым устройством.

Двусторонняя печатная плата, диаметром 20 мм, проектировалась согласно ГОСТ 23751–86. На рис. 6 представлена принципиальная электрическая схема устройства. Топология платы изображена на рис. 7.

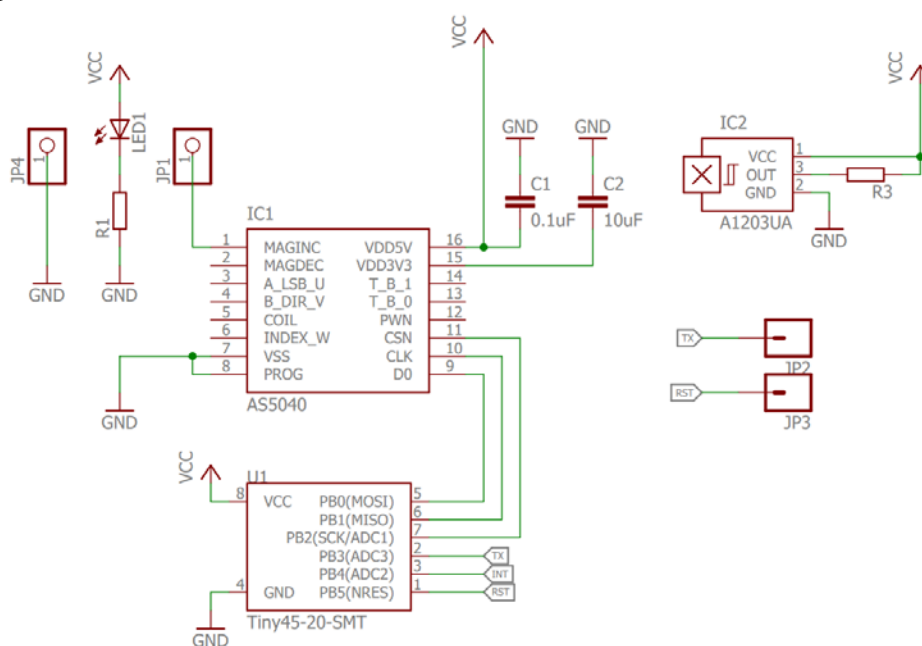


Рис. 6 – Принципиальная электрическая схема

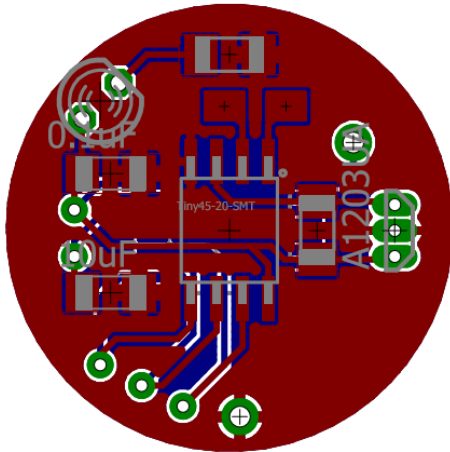


Рис. 7 – Топология печатной платы

Для оценки работы устройства был изготовлен прототип платы, который представлен на рис.8.

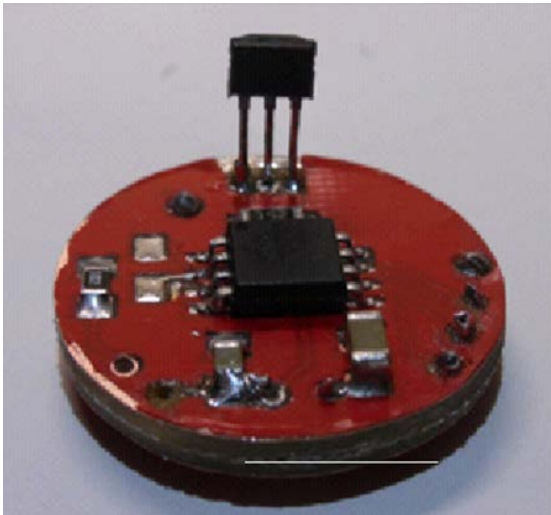


Рис.8 –Печатная плата датчика ветра

Оценка погрешности датчика направления ветра

Для оценки погрешности измерения направления ветра были проведены испытания флюгера на оптической делительной головке с шагом в 5 градусов. График на рис.9 показывает зависимость показаний магнитного энкодера от угла поворота делительной головки.

Как видно, характеристика линейна, удовлетворяющая поставленной задаче. Максимальная полученная погрешность составляет 1,3 градуса. У аналогичных устройств компании LSI LASTEM погрешность составляет $\pm 3^\circ$ [11].

Погрешность и точность определения скорости ветра, а так же измеряемый диапазон схожи с характеристиками аналогичных анемометров, построенных на датчиках Холла [11].

В табл. 1 приведены ожидаемые характеристики комбинированного датчика ветра.

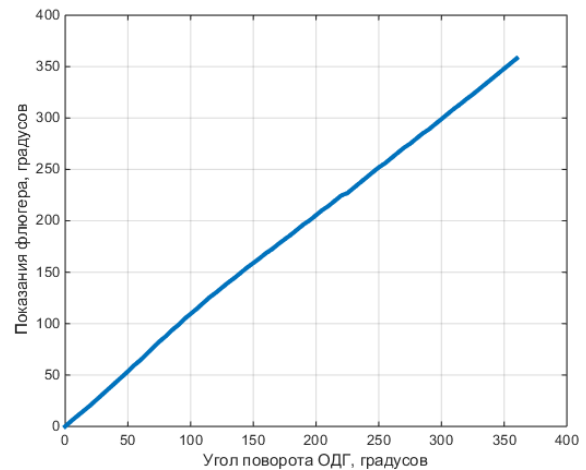


Рис. 9 – Статическая характеристика магнитного энкодера

Таблица 1 – Ожидаемые характеристики датчика

Параметр	Значение
Напряжение питания	5...12 В DC
Максимальный потребляемый ток	80 мА
Диапазон измерения скорости ветра	0,3...50 м/с
Диапазон измерения направления ветра	0...360°
Точность определения скорости ветра	$\pm 0,5$ м/с
Точность определения направления ветра	$\pm 1,3^\circ$
Габариты корпуса	25 x 70 мм

Обсуждение результатов разработки комбинированного датчика ветра

Разработанная схема построения датчиков ветра удовлетворяет нуждам систем автоматического управления парусных яхт и других малотоннажных судов. Предложенная новая схема измерения положения вала флюгера с помощью кругового магнитного энкодера обеспечивает высокую надежность и точность измерения. Отсутствие скользящих контактов повышает чувствительность измерения, а также повышает ресурс прибора. Малые габариты, невысокое энергопотребление позволяют использовать устройство не только на маломерных судах, но и в портативных и стационарных метеостанциях. В связи с тем, что для передачи рассчитанных ветровых параметров используется Serial-интерфейс прибор возможно легко интегрировать в любые авторулевые, нуждающиеся в информации о состоянии ветра. Полученные характеристики флюгера превосходят аналогичные устройства. В дальнейшем требуется провести анализ работы анемометра и влияние неодимовых магнитов датчика скорости на работу магнитного энкодера флюгера.

Выводы

В результате проведенных исследований:

1. Рассмотрены методы определения скорости и направления ветра, преимущества и недостатки тепловых, ультразвуковых и крыльчатых анемометров.

2. Обоснован выбор схемы построения анемометра. При наличии ряда преимуществ тепловых и ультразвуковых методов определения скорости ветра, таких как: высокая точность, малые габариты, отсутствие вращающихся деталей, они имеют значительные недостатки. Температуру металлической нити

тепловых анемометров необходимо держать постоянной. Это увеличивает себестоимость и сложность конструкции. Анемометры такого типа очень хрупкие. Акустические анемометры имеют сложный алгоритм расчета скорости ветра. Чашечные и крыльчатые анемометры, не смотря на наличие вращающихся деталей, имеют большую прочность ЧЭ, меньшую цену. Наличие датчика Холла, с помощью которого рассчитывается скорость ветра, позволяет обойтись без скользящих контактов или дорогих СКВТ. Исходя из этого, наилучшим видом анемометра для судов малого водоизмещения является чашечный анемометр с датчиком Холла.

3. Обоснован выбор схемы построения флюгера. В отличие от СКВТ или энкодеров, построенных на базе двигателей постоянного тока выбранный бесконтактный магнитный энкодер позволяет с легкостью и большой точностью определить положение вала флюгера. При использовании SSI-интерфейса энкодер возможно подсоединить, практически, к любому современному микроконтроллеру.

4. Описана работа бесконтактного магнитного энкодера

5. Оценена погрешность определения направления ветра. Погрешность составила 1,3, что на 1,7 меньше чем у аналогичных устройств, построенных на базе СКВТ.

6. Необходимо провести анализ о влиянии неодимовых магнитов анемометра на работу магнитного энкодера флюгера.

Список литературы:

1. Березин, С. Я. Системы автоматического управления движением судна по курсу [Текст] / С. Я. Березин. – Судостроение, 1990 – 256 с.
2. Вагущенко, Л. Л. Системы автоматического управления движением судна [Текст] / Л. Л. Вагущенко. – Одесса, Латстар, 2002 – 310 с.
3. Тихомиров, А. А. Ультразвуковые анемометры и термометры для измерения пульсаций скорости и температуры воздушных потоков / [Текст] / А. А. Тихомиров // Оптика атмосферы и океана. – 2011. – Т. 23. No7. – С. 585 – 600.
4. A New Type Sonic Anemometer – Thermometer for Field Operation. / Т. Hanafusa [Text] // Papers in Meteorology and Geophysics. March 1982. Vol. 33. No 1-19.
5. Краснов, Н. Ф. Прикладная аэродинамика [Текст] / Н. Ф. Краснов. – М.: Высшая школа, 1974.–402 с.
6. Шкундин, С. З. Состояние и перспективы развития анемометрии в угольной промышленности. [Электронный ресурс] / – Режим доступа: http://www.sirsensor.ru/index.php?P=c_art_3.
7. Панов, А. П. Одноплоскостной датчик скорости воздушного потока // А. Н. Серов, И. Н. Мочегов. – Известия ТулГУ. Технические науки, 2014. – No12–2.
8. Серов, А. Н. Особенности построения датчиков ветра, работающих в составе объектов специального назначения [Текст] / А. П. Панов, И. Н. Мочегов. – Известия ТулГУ. Технические науки, 2014. – No12–2. – С. 163–172.
9. Сысоева, С. С. Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы [Текст] / С. С. Сысоева. – Компоненты и технологии, 2005. – No7.
10. Frantisek, Dusek. Inverted Pendulum Optimal Control Based on First Principle Model [Text] / Daniel Honc, Rahul Sharma, Libor Havlicek. – Automation Control Theory Perspectives in Intelligent Systems, Springer. –2016. – Vol. 3 – P. 63.
11. Датчики направления и скорости ветра. Описание и технические характеристики. [Электронный ресурс] / : <http://eurostandart-spb.ru/upload/file/veter.pdf>.

Bibliography (transliterated):

1. Berezin, S. (1990). Automatic control systems for the movement of the rate of vessel. Shipbuilding, 256.
2. Vaguschenko, L. (2002). Automatic control systems for the movement of the rate of vessel [Text] – Odessa, Latstar, 310.
3. Tikhomirov, A. (2011). Ultrasonic anemometers and thermometers for measuring the velocity fluctuations and temperature of air flow. Atmospheric and Ocean Optics, 23, 7, 585–600.
4. Hanafusa, T. (1982). A New Type Sonic Anemometer – Thermometer for Field Operation. Papers in Meteorology and Geophysics, 33, 1–19.
5. Krasnov, N. (1974). Applied aerodynamics. High school, 402.
6. Shkundin, S. Status and prospects of development of the coal industry in anemometry. [Electronic resource] – http://www.sirsensor.ru/index.php?P=c_art_3
7. Panov, A. (2014). Airflow sensor – Izvestiya TulGU. Technical science, 12–2.
8. Serov, A. (2014). Features of the construction of wind sensors operating as a part of special purpose, Izvestiya TulGU. Technical science, 12–2, 163–172.
9. Susoeva, S. (2005). Car position sensors . Modern technologies and new perspectives. Components and Technologies, 7.
10. Daniel Honc, Rahul Sharma, Libor Havlicek (2016). Inverted Pendulum Optimal Control Based on First Principle Model. Automation Control Theory Perspectives in Intelligent Systems, Springer, 3, 63.
11. The sensors of wind direction and speed . Description and technical characteristics. [Electronic resource] – <http://eurostandart-spb.ru/upload/file/veter.pdf>.

Надійшла (received) 23. 03.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Комбінований датчик вітру для адаптивних авторульових систем/ О. А. Шеколян // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.35–41. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.

Комбинированный датчик ветра для адаптивных авторулевых систем/ А. А. Шеколян // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.35–41. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.

Combined wind sensor for adaptive tiller/pilot/ O. Shekolian //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 17 (1189).– P.35–41. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шеколян Алексей Артемович – магістр, кафедра приборов и систем ориентации и навигации, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056; e-mail: ferozond@gmail.com.

Шеколян Олексій Артемович – магістр, кафедра приладів і систем орієнтації та навігації, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056;

Shekolian Oleksii Artemovich – Master, Department of devices and systems of attitude and navigation, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Pobedy, 37, Kiev, Ukraine, 03056; e-mail: ferozond@gmail.com.

УДК 621.74

Е. П. ДЫМКО, Н. Н. БЕЛИК, А. В. ЗОЛОТАРЕВА, С. Ю. КИЯШКО, А. В. ДЕМИНА

КОМПЬЮТЕРНО-ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ: ВОПРОСЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ОТЛИВОК

Рассмотрены вопросы, касающиеся оценки качества отливок, изготавливаемых из разных типов сплавов – черных и цветных – на базе одного цеха. Показано, как критерий качества может быть учтен с точки зрения построения компьютерно-интегрированных технологий литья, в том числе на этапе перехода к автоматизированному производству. Предложены универсальные критерии качества и примеры их оценки, применение которых может способствовать оптимизации конструкции и технологии на этапе их разработки и проектирования

Ключевые слова: управление качеством отливок, критерии качества отливок, компьютерно-интегрированная технология

Розглянуто питання, що стосуються оцінки якості виливків, що виготовляються з різних типів сплавів - чорних і кольорових - на базі одного цеху. Показано, як критерій якості може бути врахований з точки зору побудови комп'ютерно-інтегрованих технологій лиття, в тому числі на етапі переходу до автоматизованого виробництва. Запропоновано універсальні критерії якості та приклади їх оцінки, застосування яких може сприяти оптимізації конструкції і технології на етапі їх розробки і проектування

Ключові слова: управління якістю виливків, критерії якості виливків, комп'ютерно-інтегрована технологія

The issues concerning the quality evaluation of the castings made from different types of alloys - ferrous and non-ferrous - based on a single plant. It is shown as a quality criterion may be taken into account in terms of the development of computer-integrated technology in the foundry industry, including the transition to automated production. The universal quality criteria and examples of their assessment are proposed. Their use can contribute to the optimization of construction and technology at the stage of their development and design

Keywords: quality control of the castings, quality criteria of the castings, computer-integrated technologies

Введение. Применение компьютерно-интегрированных технологий в литейном производстве предполагают решение двух приоритетных проблем: оптимизация конструкторско-технологической подготовки производства при освоении новых отливок или совершенствовании изготавливаемых и использование современных АСУ ТП (SCADA-систем) в технологических процессах литейного производства. Первая из проблем использует существующие инструменты компьютерного проектирования и инженерного анализа CAD/CAM/CAE, а вторая основана на использовании комплексных решений в области автоматизации и систем оптимального регулирования для различных переделов литейного производства. В последнем случае необходимо рассматривать как каждый участок литейного цеха по отдельности, учитывая характерные для него входные и выходные переменные технологического процесса, так и в комплексе, рассматривая цех как сложную организационно-техническую систему. В этом случае актуальным является выбор критериев качества управления данной системой, среди которых в принципе могут быть следующие [1]:

$$J(u) = M \left[\int_0^T F_1(\tau, x(\tau), u) d\tau \right], \quad (1)$$

где в качестве функции $F_1(\tau, x(\tau), u)$ выбирается

функция, связывающая энергетические показатели работы литейного оборудования и фактическую его производительность в заданный момент времени

$$J(u) = M [F(T, x(T))], \quad (2)$$

где $M [F(T, x(T))]$ – математическое ожидание функции $F(T, x(T))$, описывающей фазовый вектор, компоненты которого являются параметры технологического процесса, влияющие на его выходную характеристику

$$J(u) = M \left[F(T, x(T)) + \int_0^T F_1(\tau, x(\tau), u) d\tau \right], \quad (3)$$

где требуется минимизация суммарного критерия, учитывающего энергетические и эксплуатационные затраты, а также и затраты от получения некачественной продукции, т. е. брака отливок.

Беря во внимание, что украинская продукция пытается найти выход на рынки Евросоюза, наиболее актуальным является как раз управление качеством отливок, и именно данный критерий должен быть взят за основу как приоритетный.

Анализ литературных данных. Исследователи зачастую по-разному подходят к вопросам оценки качества в литейном производстве. Однако преобладают

© Е. П. Дымко, Н. Н. Белик, А. В. Золотарева, С. Ю. Кияшко, А. В. Демина. 2016

следующие подходы: оценка качества отливок по требуемым критериям на основании математических моделей типа «состав – свойства» [2]; соответствие параметров технологических процессов заданным, регламентированным соответствующим документом предприятия (ГОСТ, ТУ и т. п.) [3–9]; возможность воздействия на качество непосредственно на этапе изготовления отливок [10–12] или на финишных операциях термообработки [13–16]. Такое многообразие подходов предопределяет необходимость выбора обобщенного критерия для оценки качества, который может быть учтен в соответствующем функционале при решении задачи поиска оптимального управления технологическим процессом на соответствующем участке литейного цеха.

Цель и задачи исследования. Целью работы являлся выбор критерия для оценки качества отливок, который может быть использован в поиске оптимального по конечному состоянию управления технологическим процессом на соответствующем участке литейного цеха.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- провести экспериментальные плавки синтетического чугуна в промышленных условиях для проведения оценки качества;
- провести статистическую обработку полученных данных.

Экспериментальные данные и результаты их обработки. Эксперименты проводились на базе чугунолитейного цеха ОАО «Кременчугский завод дорожных машин». Плавка чугуна проводилась в индукционной тигельной печи с кислой футеровкой ИСТ1/0.8-М5. Расчет шихты осуществлялся в соответствии с требованиями к химическому составу чугуна. В качестве шихты использовали стальную высечку, науглероживание осуществлялось в соответствии с действующими на предприятии ТУ. Модифицирование осуществлялось ферросилицием ФС-75 после заполнения ковша на 100–150 мм при температуре 1400–1450 °С. Модификатор фракцией 1–0 мм вводился в количестве 0,3% от массы жидкого металла. Из модифицированного чугуна заливали стандартные образцы для контроля механических свойств. Полученные по результатам 59 плавки результаты группировались в соответствии со стандартной методикой для построения гистограмм распределения параметров и расчета статистических характеристик: математического ожидания параметра и оценки его дисперсии:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \tag{1}$$

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2, \tag{2}$$

где x_i – текущее экспериментальное значение параметра плавки, \bar{x}_i – математическое ожидание параметра плавки, S^2 – оценка дисперсии параметра плавки, N – общее число плавки ($N=59$).

Параметром плавки рассматривались содержание углерода и температура плавки, как наиболее важные

для процесса выплавки синтетического чугуна в индукционных печах параметры. Построение гистограмм выполнялось с использованием встроенных функций в среде Microsoft Excel.

На рис. 1, 2 приведены гистограммы распределения содержания углерода и температуры плавки соответственно. В рис. 1, 2 приняты обозначения: n_i/N – частота появления результата в соответствующем диапазоне значений рассматриваемого технологического параметра, $f_{ma,s}(C)$ – теоретическая плотность распределения содержания углерода.

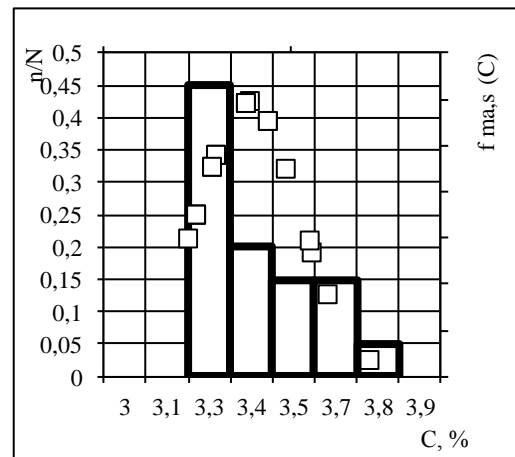


Рис. 1 – Гистограммы распределения содержания углерода

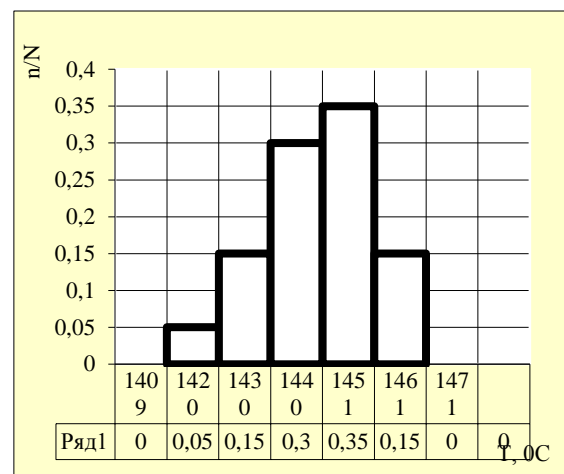


Рис. 2 – Гистограммы распределения температуры плавки

На рис. 3, 4 приведены результаты обработки экспериментальных данных, полученные на основе расчета твердости (НВ) и предела прочности на растяжение (σ_B) по регрессионным уравнениям типа «состав – свойства», приведенным в работе [17], и полученным реализацией промышленных экспериментов, описанных в [18]:

$$\sigma_B = 23,7 + 1,11x_1 + 0,47x_2 - 0,93x_3 - 1,073x_4^2, \tag{3}$$

$$HB = 216,7 - 7x_2 - 7x_4,$$

где x_1 – содержание в чугуне Cr, %, x_2 – содержание в чугуне Ni, %, x_3 – содержание в чугуне C, %, x_4 – содержание в чугуне Cu, %

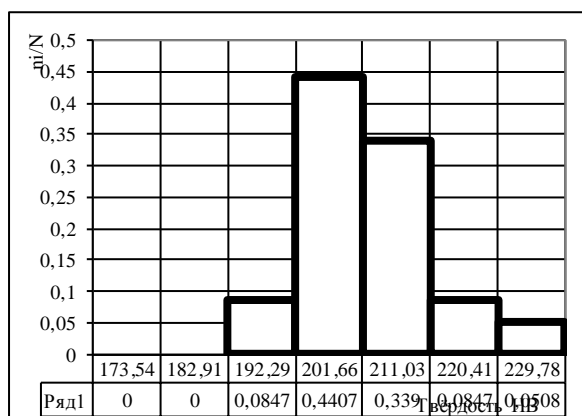


Рис. 3 – Гистограмма распределения твердости чугуна, рассчитанная на основе системы регрессионных уравнений (3)

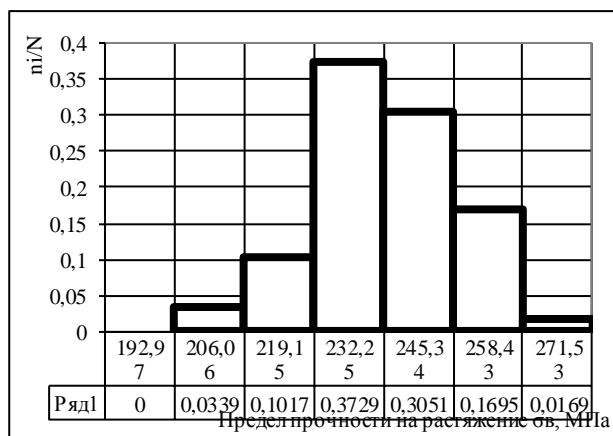


Рис. 4 – Гистограмма распределения предела прочности на растяжение чугуна, рассчитанная на основе системы регрессионных уравнений (3)

Расчет твердости и предела прочности на растяжение чугуна, выбранные в качестве выходных характеристик процесса как параметров качества готового сплава, выполнялся подстановкой математического ожидания содержания углерода и перечисленных выше легирующих элементов для температурного режима плавки, соответствующего математическому ожиданию температуры (рис. 2).

Обсуждение полученных результатов и рекомендации по выбору критерия качества. Из рис. 1 видно, что теоретическая плотность распределения содержания углерода $f_{m,s}(C)$ смещена вправо относительно гистограммы и имеет место асимметрия. Говорить о соответствии закона распределения нормальному нельзя, поэтому можно сделать лишь соответствующее предположение. Асимметрия слева видна и на рис. 2, из которого можно заключить, что преобладающее значение температуры находится в диапазоне 1430–1451 °С. Для оценки соответствия качества заданным требованиям технологического процесса (подход 2, описанный выше) может быть использован критерий вида

$$B = 1 - \left[\Phi \left(\frac{x_e - \bar{x}}{S} \right) - \Phi \left(\frac{x_n - \bar{x}}{S} \right) \right], \quad (4)$$

где B – доля брака по несоответствию исследуемых технологических параметров регламентированным значениям, x_n , x_e – соответственно верхняя и нижняя граница поля допуска на содержание каждого рассмотренного параметра качества технологического процесса, S – среднеквадратическое отклонение параметра качества технологического процесса, \bar{x} – математическое ожидание параметра качества технологического процесса, $\Phi(\cdot)$ – функция Лапласа.

Таким образом, величина фактического брака может быть оценена вероятностью попадания рассматриваемого параметра качества технологического процесса в указанный диапазон.

Анализ рис. 4, 5 позволяет сделать вывод о том, что для обоих выходных параметров качества (подход 1, описанный выше) имеет место асимметрия, поэтому говорить о соответствии закона распределения нормальному не представляется возможным без соответствующей проверки гипотезы. Преобладающее значение твердости составляет HB200...HB215, а предела прочности – 230–250 МПа. Полученный результат позволяет говорить о том, что реально при существующем технологическом процессе получать чугун марки СЧ25 ГОСТ1412-85. В случае, если возникает необходимость повышения марки чугуна, необходима оптимизация химического состава, алгоритм которой может предполагать крутое восхождение и последующее описание поверхности отклика для HV и σ_b , регламентирующих в соответствии с ГОСТ1412-85, марку чугуна.

Однако описанный выше критерий качества базируется на предположении о соответствии закона распределения выходных переменных нормальному. При этом относительно входных переменных необходимо говорить лишь то, что это четкие числа, т. е. в каждом эксперименте эти величины задаются совершенно точно. В рассматриваемой задаче этого сделать нельзя, так как входные переменные являются случайными числами, характеризуемыми математическим ожиданием и дисперсией. Следовательно, необходим какой-то другой способ оценивания качества и построения регрессионных уравнений, рассматривая входные переменные как случайные числа или, в общем случае, как нечеткие числа. В этом случае следует опираться на то, что нет возможности получить плотность распределения и можно оперировать лишь функцией принадлежности [2, 19]. При таком подходе общий вид критерия качества может быть охвачен тем же, но в качестве нижнего и верхнего отклонений, соответствующих величине $\pm 3S$, должна быть выбрана левая и правая граница нечеткости в описании функции принадлежности [2]:

$$\mu(F_{jp}) = \begin{cases} L \left(\frac{\bar{F}_{jp} - F_{jp}}{\alpha_{jp}} \right), & F_{jp} \leq \bar{F}_{jp}, \\ R \left(\frac{F_{jp} - \bar{F}_{jp}}{\beta_{jp}} \right), & F_{jp} > \bar{F}_{jp}, \end{cases} \quad (5)$$

где \bar{F}_{jp} – измеренное значение p -й координаты в j -м эксперименте, являющееся модальным для не-

четкого числа F_{jp} (т. е. параметра качества технологического процесса или параметра качества готовой отливки или сплава), $j = 1, 2, \dots, n$; α_{jp} , β_{jp} – левые и правые коэффициенты нечеткости в описании (5).

Таким образом, следует считать, что истинные значения координат параметров качества F_{jp} суть нечеткие числа с соответствующими функциями принадлежности ($L-R$) типа. Такой подход позволяет считать предложенный критерий универсальным, так как он представляется эффективным и для оценки качества технологического процесса, и для оценки качества готового продукта литейного производства. Кроме этого, он учитывает нечеткость в описании входных переменных, если параметры качества готовых отливок (сплавов) рассчитываются по уравнениям регрессии в функции от параметров технологического процесса.

Выводы. Предложенный универсальный критерий, требующий попадания параметра качества технологического процесса или готового продукта литейного производства (отливки, сплава и т. п.), может учитывать неопределенность, связанную с невозможностью выдерживания точных значений входных переменных процесса. На примере оценки качества синтетического чугуна и основных параметров качества технологического процесса плавки в индукционной печи показано, как может быть использован данный критерий. Отличием его от общеизвестного критерия, построенного с использованием функций Лапласа, является использование в качестве нижней и верхней границ отклонений исследуемого параметра качества левого и правого коэффициентов нечеткости. При этом сами параметры рассматриваются как нечеткие числа с функциями принадлежности выбранного вида.

Список литературы:

1. Дёмин, Д. А. Методология формирования функционала для задачи оптимального управления электроплавкой [Текст] / Д. А. Дёмин // Технологический аудит и резервы производства. – 2011. – No 1. – С. 15–24.
2. Дёмин, Д. А. Нечеткая кластеризация в задаче построения моделей «состав – свойство» по данным пассивного эксперимента в условиях неопределенности [Текст] / Д. А. Дёмин // Проблемы машиностроения. – 2013. – No 6. – С. 15–23.
3. Пономаренко, О. И. Компьютерное моделирование процессов кристаллизации как резерв повышения качества поршней ДВС [Текст] / О. И. Пономаренко, Н. С. Тренёв // Технологический аудит и резервы производства. – 2013. – No 6/2(14). – С. 36–40.
4. Чибичик, О. А. Анализ технологического процесса заливки роторов электродвигателя и возможные пути его усовершенствования [Текст] / О. А. Чибичик // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007. – No 6/1(30). – С. 55–60.
5. Акимов, О. В. Совершенствование технологических процессов изготовления литых деталей роторов для повышения эксплуатационных характеристик тягового электропривода [Текст] / О. В. Акимов, О. А. Чибичик, А. В. Редькина // Проблемы машиностроения. – 2014. – No 16 (5). – С. 7–12.
6. Хорошилов, О. Н. повышение качества непрерывнолитых заготовок из медных сплавов [Текст] / О. Н. Хорошилов, О. И. Пономаренко, А. В. Кипенский, В. В. Наний // Металлургия машиностроения. – 2012. – No 12. – С. 29–31.
7. Бреславский, Д. В. Управление качеством непрерывно литых заготовок [Текст] / Д. В. Бреславский, О. Н. Хорошилов, О. И. Пономаренко // Вісник ДДМА. – 2010. – No 3 (20). – С. 41–46.
8. Хорошилов, О. Н. Исследование конструкционных характеристик срезов на дорне при производстве полых заготовок из цветных сплавов. [Текст] / О. Н. Хорошилов, О. И. Пономаренко // Литые и металлургия. – 2006. – No 2. – С. 187–189.
9. Акимов, О. В. Анализ погрешностей формообразования отливок колес турбин turboкомпрессоров для наддува ДВС на этапе изготовления их восковых моделей [Текст] / О. В. Акимов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2003. – No 3. – С. 16–24.
10. Maria Chiara, Zanetti Foundry processes: the recovery of green moulding sands for core operations [Text] / Maria Chiara Zanetti, Silvia Fiore // Resources, Conservation and Recycling. – 2003. – Vol. 38, Issue 3. – P. 243–254. doi:10.1016/S0921-3449(02)00154-4
11. Дьомін, Д. О. Деякі аспекти управління якістю чавуну з пластинчастим графітом [Текст]: дис.... канд. техн. наук / Д. О. Дьомін. – Харків, 1995. – 181 с.
12. Xinba, Yaer. Erosive wear characteristics of spheroidal carbides cast iron [Text] / Xinba Yaer, Kazumichi Shimizu, Hideto Matsumoto, Tadashi Kitsudo, Tadashi Momono. // Wear. – 2008. – Vol. 264, Issues 11–12. – P. 947–957. doi:10.1016/j.wear.2007.07.002
13. Idan, AFI. The study of the influence of laser hardening conditions on the change in properties of steels [Text] / AFI Idan, O. Akimov, L. Golovko, O. Goncharuk, K. Kostyk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – No 2/5(80). – P. 69–73 doi: 10.15587/1729-4061.2016.65455
14. Yongwei, Sun. Effect of hydrogen on ductility of high strength quenched and tempered (QT) Cr–Ni–Mo steels [Text] / Yongwei Sun, Jizhi Chen, Jun Liu // Materials Science and Engineering: A. – 2015. – Vol. 625. – P. 89–97. doi:10.1016/j.msea.2014.12.013
15. Kostyk, K. Development of the high-speed boriding technology of alloy steel [Text] / K. Kostyk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2015. – No 6/11(78). – P. 8–15 doi: 10.15587/1729-4061.2015.55015
16. Mohanad, M. K. Modeling of the case depth and surface hardness of steel during ion nitriding [Text] / M. K. Mohanad, V. Kostyk, D. Domin, K. Kostyk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – No 2/5 (80). – P. 45–49 doi: 10.15587/1729-4061.2016.65454
17. Demin, D. A. Complex alloying of grey cast iron [Text] / D. A. Demin, V. F. Pelikh, O. I. Ponomarenko // Litejnoe Proizvodstvo. – 1998. – No 10. – P. 18–19.
18. Demin, D. A. Optimization of the method of adjustment of chemical composition of flake graphite iron [Text] / D. A. Demin, V. F. Pelikh, O. I. Ponomarenko // Litejnoe Proizvodstvo, 1995. – P. 42–43.
19. Дёмин, Д. А. Применение искусственной ортогонализации в поиске оптимального управления технологическими процессами в условиях неопределенности [Текст] / Д. А. Дёмин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – No 5/9(65). – С. 45–53.

Bibliography (transliterated):

1. Domin, D. A. (2011). Metodologiya formirovaniya funkcionala dlya zadachi optimalnogo upravleniya elektroplavkoj. Technology audit and production reserves, 1, 15–24.
2. Domin, D. A. (2013). Nечetkaya klasterizaciya v zadache postroeniya modelej «sostav – svojstvo» po dannym passivnogo eksperimenta v usloviyax neopredelyonnosti. Problemy mashinostroeniya, 6, 15–23.
3. Ponomarenko, O. I., Trenyov, N. S. (2013). Kompyuternoe modelirovanie processov kristallizacii kak rezerv povysheniya kachestva porshnej DVS. Technology audit and production reserves, 6/2(14), 36–40.
4. Chibichik, O. A. (2007). Analiz tehnologicheskogo processa zalivki rotorov elektrodvigatelya i vozmozhnye puti ego usovershenstvovaniya. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, No 6/1(30), 55–60.
5. Akimov, O. V., Chibichik, O. A., Redkina A. V. (2014). Sovershenstvovanie tehnologicheskix processov izgotovleniya lityx detalej rotorov dlya povysheniya ekspluatacionnyx karakteristik tyagovogo elektroprivoda. Problemy mashinostroeniya, No 16 (5), 7–12.
6. Xoroshilov, O. N., Ponomarenko, O. I., Kipenskiy, A. V., Naniy V. V. (2012). Povyshenie kachestva nepreryvnolityx zagotovok iz mednyx splavov. Metallurgiya mashinostroeniya, 12, 29–31.

7. Breslavskij, D. V., Xoroshilov, O. N., Ponomarenko, O. I. (2010). Upravlenie kachestvom nepreryvno lityx zagotovok. Visnik DDMA, 3 (20), 41–46.
8. Xoroshilov, O. N., Ponomarenko O. I. (2006). Issledovanie konstrukcionnyxarakteristik srezov na dome pri proizvodstve polyx zagotovok iz cvetnyx splavov. Lite i metallurgiya, 2, 187–189.
9. Akimov, O. V. (2003). Analiz pogreshnostej formoobrazovaniya otlivok koles turbin turbokompressorov dlya nadduva DVS na etape izgotovleniya ix voskovyx modelej. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3, 16–24.
10. Maria Chiara, Silvia Fiore (2003). Zanetti Foundry processes: the recovery of green moulding sands for core operations. Resources, Conservation and Recycling, 38, 3, 243–254. doi:10.1016/S0921-3449(02)00154-4
11. Domin, D. O. (1995). Deyaki aspekti upravlinnya yakistyu chavunu z plastinchastim grafitom: dis.... kand. texn. nauk – Xarkiv, 181.
12. Xinba, Yaer, Kazumichi Shimizu, Hideto Matsumoto, Tadashi Kitsudo, Tadashi Momono. (2008). Erosive wear characteristics of spheroidal carbides cast iron. Wear, 264, 11–12, 947–957. doi:10.1016/j.wear.2007.07.002
13. Idan, AFI, Akimov, O., Golovko, L., Goncharuk, O., Kostyk K. (2016). The study of the influence of laser hardening conditions on the change in properties of steels. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2/5(80), 69–73 doi: 10.15587/1729-4061.2016.65455
14. Yongwei Sun, Jizhi Chen, Jun Liu (2015). Effect of hydrogen on ductility of high strength quenched and tempered (QT) Cr–Ni–Mo steels. Materials Science and Engineering: A., 625, 89–97. doi:10.1016/j.msea.2014.12.013
15. Kostyk, K. (2015). Development of the high-speed boriding technology of alloy steel. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6/11(78), 8–15 doi: 10.15587/1729-4061.2015.55015
16. Mohanad, M. K., Kostyk, V., Domin, D., Kostyk, K. (2016). Modeling of the case depth and surface hardness of steel during ion nitriding. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2/5 (80), 45–49 doi: 10.15587/1729-4061.2016.65454
17. Demin, D. A., Pelikh, V. F., Ponomarenko O. I. (1998). Complex alloying of grey cast iron. Litejnoe Proizvodstvo, 10, 18–19.
18. Demin, D. A., Pelikh, V. F., Ponomarenko, O. I. (1995). Optimization of the method of adjustment of chemical composition of flake graphite iron. Litejnoe Proizvodstvo, 42–43.
19. Domin, D. A. (2013). Primenenie iskusstvennoj ortogonalizacii v poiske optimalnogo upravleniya tehnologicheskimi processami v usloviyax neopredelennosti. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, No5/9(65), 45–53.

Поступила (received) 20.03.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Комп'ютерно-інтегровані технології в литейному виробництві: питання управління якістю виливків/ Е. П. Димко, М. М. Белик, А. В. Золотарева, С. Ю. Кияшко, А. В. Демина// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.41–46. – Бібліогр.: 19 назв. – ISSN 2079-5459.

Комп'ютерно-інтегровані технології в ливарному виробництві: питання управління якістю виливків/ Е. П. Димко, М. М. Белик, А. В. Золотарева, С. Ю. Кияшко, А. В. Демина// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.41–46. – Бібліогр.: 19 назв. – ISSN 2079-5459.

Computer-integrated technologies in the foundry industry: quality control issues castings/ E. P. Dimko, M. M. Belik, A. V. Zolotareva, S. Yu. Kiyashko, A. V. Demina//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 17 (1189).– P.41–46. – Bibliogr.: 19. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Димко Е. П. – заступитель начальника эксплуатационно-технического отдела, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002.

Димко Е. П. – заступник начальника експлуатаційно-технічного відділу, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Фрунзе, 21, г. Харків, Україна, 61002.

Dimko E. P. – Deputy Head of the Technical Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", st. Frunze, 21, Kharkov, Ukraine, 61002.

Белик Н. Н. – магістр, кафедра литейного виробництва, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002.

Белик Н. Н. – магістр, кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Фрунзе, 21, г. Харків, Україна, 61002.

Belik M. M. – student, department of the foundry industry, the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", st. Frunze, 21, Kharkov, Ukraine, 61002.

Золотарева А. В. – магістр, кафедра литейного виробництва, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002.

Золотарева А. В. – магістр, кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Фрунзе, 21, г. Харків, Україна, 61002.

Zolotareva A. V. – student, department of foundry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", st. Frunze, 21, Kharkov, Ukraine, 61002.

Кияшко С. Ю. – магістр, кафедра литейного виробництва, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002.

Кияшко С. Ю. – магістр, кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Фрунзе, 21, г. Харків, Україна, 61002.

Kiyashko S. Yu. – student, department of the foundry industry, the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", st. Frunze, 21, Kharkov, Ukraine, 61002.

Деміна А. В. – магістр, кафедра литейного виробництва, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002.

Дьоміна А. В. – магістр, кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Фрунзе, 21, г. Харків, Україна, 61002.

Demina A. V. – student, department of foundry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", st. Frunze, 21, Kharkov, Ukraine, 61002.

УДК 656.225:681.3

Т. Ю. КАЛАШНИКОВА, П. О. ЦВІР, С. П. ПРИСТУПА, Р. С. ПОЛОЗУН

ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ У РОБОТІ ПРИКОРДОННОЇ ДІЛЬНИЧНОЇ СТАНЦІЇ В УМОВАХ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ІНФОРМАТИЗАЦІЇ

Досліджено особливості технології роботи прикордонної дільничної станції. Встановлено недоліки у процесі обробки поїздів та вагонів у зв'язку із додатковою витратою часу на проведення огляду прикордонною службою та необхідність покращення якості роботи станції за рахунок удосконалення технології та подальшої інформатизації. Запропоновано скорочення часу проходження поїздів контролюючими органами, що дозволить вивільнити час для надання інших операцій. Додатково покращити показники роботи станції передбачено за рахунок впровадження мікропроцесорної системи диспетчерської централізації «Каскад» на дільниці, до якої належить станція.

Ключові слова: залізничний транспорт, прикордонна дільнична станція, технологія, поїзда, вагони, система диспетчерської централізації «Каскад».

Исследованы особенности технологии работы пограничной участковой станции. Установлены недостатки в процессе обработки поездов и вагонов в связи с дополнительной тратой времени на проведение осмотра пограничной службой и необходимость улучшения качества работы станции за счет совершенствования технологии и дальнейшей информатизации. Предложено сокращение времени прохождения поездов контролирующими органами, что позволит высвободить время для выполнения других операций. Также улучшить показатели работы станции предполагается путем внедрения микропроцессорной системы диспетчерской централизации «Каскад» на участке расположения станции.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, пограничная участковая станция, технология, поезда, вагоны, система диспетчерской централизации «Каскад».

Investigated technology features work border polling station. Established deficiencies in processing trains and cars because of the additional time spent on the examination Border Service and the need to improve the quality of the station by improving technology and further information.

Designed by technological graphics processing trains. Thus, manufacturing process trains, entering the recycling of other countries design by reducing the time during drafting internal transit document (From 150 minutes to 100 minutes); delivery of documents to the customs post their inspection and returning the station Technology Center (From 180 minutes to 150 minutes); processing documents Frontier Forwarding office (From 90 min to 30 min); natures audit and layout storage (From 30 min to 15 min). Total time processing train reduced by about 18%. These optimization processes will increase processing capacity to the station and its throughput about by 31%.

A reduction in the time of passing trains regulatory authorities, which will free up time to provide other operations, such as local work. Additionally, to improve performance of stations provided through the introduction microprocessor control centralization "Cascade" at the district, to which the station.

Keywords: railway, border polling station technology oborobky trains, cars, centralized system of control "Cascade".

Вступ. Україна має досить розвинуту транспортну систему, яка містить залізничні, морські, річкові, автомобільні, трубопровідні й авіаційні шляхи сполучення, вдале географічне розташування на шляху основних транзитних потоків між Європою та Азією. Залізничний транспорт працює стабільно й результативно. Проте у роботі залізничного транспорту є чимало невирішених проблем і труднощів. За останні роки в Україні значно погіршився стан основних засобів, особливо їх активної частини, через недостатнє оновлення основних фондів, невідповідність їх технічного рівня перспективним вимогам.

Недоліки в роботі залізниці пояснюються не тільки недостатніми темпами розвитку мережі та інших технічних засобів. Багато з них виникли через недосконале планування і організацію перевезень.

Організація експлуатаційної роботи в сучасних умовах вбачає об'єктивну здатність зв'язати між собою технологічні процеси всіх підрозділів залізничного транспорту, дозволяє досягнути взаємодії діль-

ниць і напрямків, вдосконалити координацію їх діяльності з іншими видами транспорту і промисловими підприємствами. Але ця здатність потребує своєчасного розвитку технічних засобів і збільшення їх надійності, постійного удосконалення довгострокового і оперативного планування експлуатаційної роботи, системи її управління.

Таким чином, підвищення рівня інформатизації, особливо для умов роботи прикордонної дільничної станції є актуальним у взаємодії з комплексною інформатизацією.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Для досягнення оптимізації у роботі прикордонної дільничної станції в умовах підвищення рівня інформатизації в трудах [6] автор надає рекомендації щодо впровадження науково-технічних та технологічних методів роботи прикордонних станцій, забезпечення стійкості функціонування технічної станції в умовах транспортного ринку.

© Т. Ю. Калашнікова, П. О. Цвір, С. П. Приступа, Р. С. Полозун. 2016

Згідно з [7, 8] визначено завдяки чому відбувається посилення умов взаємодії роботи підсистем технічної станції між собою та з прилеглими ділянками.

Подальшому розвитку інформатизації встановлено у роботах [9, 10, 11, 12], який є дуже необхідним для визначення технологічних аспектів у роботі прикордонної дільничної станції.

Трудами [1] обумовлено дуже вдале географічне розташуванням України, а саме тому, що через нашу країну проходить три міжнародні (Критські) транспортні коридори та чотири коридори Організації співробітництва залізниць (ОСЗ), що з'єднують Європу та Азію. Також Україна має спільні кордони з країнами Західної Європи та межує з країнами СНД.

Ці можливості дають змогу розвивати залізничну галузь в напрямку міжнародного конкурентного продукту надання послуг в сфері перевезень, що в свою чергу підвищить економічну стабільність та галузеву продуктивність в країні.

Цілі та задачі дослідження. Метою дослідження є аналіз сучасних аспектів у технологічному процесі роботи прикордонної дільничної станції та розробку пропозицій щодо підвищення якості її функціонування.

Задачею дослідження є обґрунтування технологічних аспектів у роботі прикордонної дільничної станції в умовах підвищення рівня інформатизації.

Для досягнення поставленої мети вирішували наступні задачі:

1. Впровадження науково-технічних та технологічних методів роботи прикордонних станцій, забезпечення стійкості функціонування технічної станції в умовах транспортного ринку.

2. Посилення умов взаємодії роботи підсистем технічної станції між собою та з прилеглими ділянками.

3. Розвиток інформатизації.

Матеріали та методи дослідження технологічних аспектів у роботі прикордонної дільничної станції в умовах підвищення рівня інформатизації. Методичною основою виконання комплексних досліджень є: перелік технологічних операцій при обробці поїзда; розробка, що заснована на мікропроцесорних технологіях, МСДЦ «Каскад».

Прикордонна дільнична станція на даний час здійснює безліч операцій з обробки інформації стосовно іновагонів та вантажів.

В зв'язку з цим, створюється тенденція вдосконалення процесів обробки вантажів та поїздів, які надходять з закордону або за кордон України, що в свою чергу тягне за собою необхідність вдосконалення цих процесів. На підставі аналізу технології роботи прикордонної станції пропонуються наступні заходи щодо підвищення здатності її функціонування в умовах взаємодії із сусідніми державами:

1. Підвищення ефективності взаємодії залізниці та прикордонних служб.

2. Зменшення часу на проходження контролю по проходженню операцій пов'язаних з контролюючими органами.

3. Підвищення ефективності використання пропускної та переробної спроможності станції.

4. Введення новітніх технологій та процесів обробки складів вагонів на території нашої держави дозволить підвищити продуктивність обробки та прибутку від надання послуг перевезень.

Скорочення часу проходження контролюючими органами дозволить вивільнити час для надання інших операцій, що пов'язані, наприклад, з подавання та забиранням місцевих вагонів.

Впровадження жорсткого контролю за роботою маневрового локомотива дозволяє зменшити час на обробку поїздів, що надходять з інших держав в переробку. Розроблено технологічні графіки обробки поїздів. Так, технологічний процес поїздів, що надходить у переробку з інших держав удосконалено за рахунок:

1. Скорочення часу при складанні внутрішнього транзитного документу (зі 150 хв до 100 хв).

2. При доставці документів на митній пост їх перевірки та повернення в Станційний технологічний центр (з 180 хв до 150 хв).

3. Обробки документів прикордонною транспортно-експедиційною конторою (з 90 хв до 30 хв).

4. Натурної перевірки і розмітки складу (з 30 хв до 15 хв).

Загальний час обробки состава скорочується приблизно на 18 %. Ці оптимізаційні процеси дозволять підвищити переробну спроможність станції та її пропускну спроможність приблизно на 31 %.

Введення в роботу станції систем АРМ дозволяє виключити повторюваність надання інформації та виключення проведення дублюючих операцій. Це прискорить обмін даними, що пов'язані з перевезенням вантажів, доцільне впровадження новітніх інформаційних систем, що забезпечать взаємодію різних електронних систем окремих залізниць.

Одним з напрямків підвищення продуктивності та економічної ефективності функціонування як станції так і залізниці в цілому є модернізація фізично зношених релейних пристроїв та впровадження сучасних мікропроцесорних систем залізничної автоматики і телемеханіки.

Результати досліджень технологічних аспектів у роботі прикордонної дільничної станції в умовах підвищення рівня інформатизації. В результаті проведення досліджень необхідно відмітити, що на початку XXI століття в розпорядженні залізничників з'явилася нова розробка, що заснована на мікропроцесорних технологіях, МСДЦ «Каскад». Основний акцент робиться на подальший розвиток його взаємодії з глобальною мережею управління перевізним процесом АСК ВП УЗ-С.

Програмно-апаратний комплекс МСДЦ «КАСКАД» впроваджується на дільницях залізничного транспорту з метою підвищення ефективності управління вантажними та пасажирськими перевезеннями, забезпечення заданої пропускної спроможності залізниць і безпеки руху при централізованому (диспетчерському) управлінні об'єктами автоматики на станціях, а також автоматизації і максимального спрощення операцій з управління рухом поїздів, зменшення навантаження на поїзних диспетчерів, чергових по станції та маневрових диспетчерів, забезпечення доступу до інформації про поїзну ситуацію

іншим користувачам центру управління перевезеннями (ЦУП) регіонального рівня, а також інформаційного забезпечення автоматизованих систем управління вантажними перевезеннями через локальну і глобальну мережі. Тобто на даний час його впровадження

надасть можливість максимально ефективно керувати перевізним процесом та підвищення рівня взаємодії станції із дирекцією залізничних перевезень.

Структурна схема центрального поста МСДЦ "КАСКАД" наведено на рис. 1.

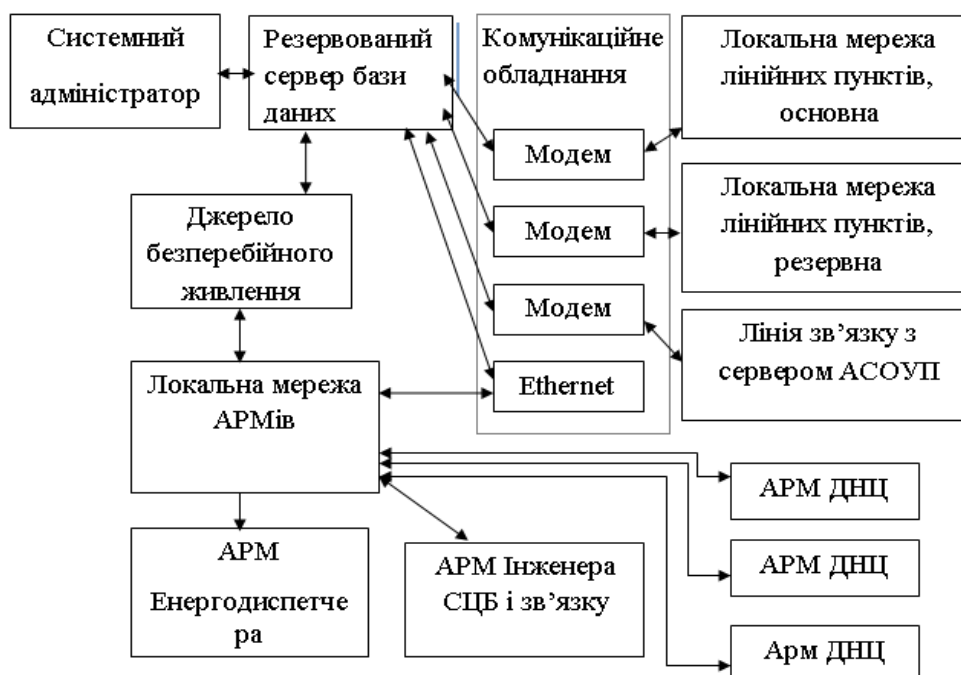


Рис. 1 – Структурна схема центрального поста МСДЦ КАСКАД

Застосування МСДЦ "КАСКАД" вимагає побудови таких підсистем як автоматизоване робоче місце техніко-розпорядчого акту станції, автоматизоване робоче місце поїзного диспетчера, автоматизоване робоче місце чергового по залізничній станції, автоматизоване робоче місце товарного касира, станційний технологічний центр оброблення поїзної інформації та перевізних документів, автоматизоване робоче місце гіркового оператора, автоматизоване робоче місце товарного касира та інші.

Автоматизоване робоче місце поїзного диспетчера в складі мікропроцесорної системи диспетчерської централізації "КАСКАД" забезпечує контроль і управління перевізним процесом на підставі інформації отриманої від пристроїв СЦБ.

Інформація відображається на трьох або більше моніторах у вигляді загальної схеми дільниці, детальної мнемосхеми однієї зі станцій керованої дільниці, графіка руху на дільниці. Управління відбувається за допомогою клавіатури або маніпулятора «миша». При вказаній централізації, поїздографом виконується автоматичний запис виконаного графіка руху поїздів, що дозволяє в оперативному режимі, тобто в реальному часі, планувати роботи сумісно ДНЦ та ДСП.

Мікропроцесорна система диспетчерської централізації має низку переваг у порівнянні із релейними аналогами. Серед них – можливість «гарячого» резервування обладнання, скорочення площ виробничих приміщень для розміщення обладнання та часу на його

монтаж, зменшення енергоспоживання, покращення умов роботи обслуговуючого персоналу. Не менш важливе й розширення спектра функціональних можливостей, зокрема – наявність систем самодіагностики та архівації інформації про роботу системи.

Все це дозволить підвищити показники продуктивності та економічної ефективності залізничного транспорту як структури ПАТ.

Обговорення результатів досліджень технологічних аспектів у роботі прикордонної дільничної станції в умовах підвищення рівня інформатизації. Застосування новітніх технологій дозволить вивільняти професії, що не пов'язані з операціями проходження митного контролю та вводити їх у штат працівників, які пов'язані з обробкою інформації, що стосується міжнародних перевезень та дозволить підвищити економію грошових коштів для галузі в цілому.

Бачити в режимі реального часу точну картину дислокації і переміщення рухомого складу на території країни та за її межами – одне із завдань, над вирішенням якого залізничники працюють давно і наполегливо. За останні роки вдалося досягти головного: знайти спосіб, що забезпечує надходження достовірної первинної інформації «з коліс».

Висновки. В результаті проведених досліджень встановлено, що провадження запропонованих змін – це не що інше, як справжній прорив, оскільки в мину-

лону залишився «ручний» графік виконаного руху поїздів: йому на зміну прийшов електронний. Отримавши інформацію «з коліс», керування перевізним процесом стає набагато продуктивніше, оскільки ДНЦ бачить реальну поїзну ситуацію та впливає найточніше на технологічний процес вцілому та окремо-прикордонної станції.

Таким чином, можна зробити висновки, що найбільш ефективним, для розвитку ПАТ та створення конкурентної продукції (перевезення) є підвищення переробної та пропускну здатності станцій (саме прикордонних станцій) та перекваліфікація працівників (за рахунок впровадження АРМ) на інші робочі місця поряд із підвищенням рівня інформатизації, а саме застосуванням МСДЦ «КАСКАД».

Список літератури:

1. Альошинський, Є. С. Напрямки удосконалення роботи прикордонних регулювальних станцій на кордонах з країнами СНД [Текст] / Є. С. Альошинський, Н. В. Колесникова: Х.: УкрДАЗТ – 2009. – С. 29–34.
2. Всеукраїнська транспортна газета «Магістраль» [Електронний ресурс] // Командний пункт вантажного руху. – 2014. – 6 січня. – Режим доступу : <http://www.magistral-uz.com.ua/articles/komandnij-punkt-vantazhnogo-ruhu.html>.
3. Бутько, Т. В. Удосконалення технології роботи прикордонної передавальної станції на основі вимог логістики [Текст] / Т. В. Бутько, Г. С. Бауліна, В. М. Верьовко / Зб. Наук. праць. Х.: УкрДАЗТ. – 2012. – С. 26–31.
4. Всеукраїнська транспортна газета «Магістраль» [Електронний ресурс] / Мікропроцесори у дії. – 2014. – 12 березня. – Режим доступу : <http://www.magistral-uz.com.ua/articles/mikroprocesori--v-dii.html>.
5. Петрушов, В. В. Удосконалення технології роботи прикордонної передавальної станції [Текст] / В. В. Петрушов // Зб. Наук. праць УкрДУЗТ. Вип. 156. Х.: УкрДУЗТ. – 2015. – С. 106–109.
6. Бутько, Т. В. Забезпечення стійкості функціонування сортувальної станції в умовах транспортного ринку [Текст] / Т. В. Бутько, Г. М. Сіконенко, Т. Ю. Калашнікова / Міжвуз. Зб. Наук. праць. Вип. 47 – Х.: ХарДАЗТ. – 2001. – С. 22–27.
7. Калашнікова, Т. Ю. Модель забезпечення взаємодії функціонування системи "депо - станція - перегін" [Текст] / Т. Ю. Калашнікова, // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2002. – No2. – С. 67-69.
8. Калашнікова, Т. Ю. Посилення умов взаємодії роботи підсистем технічної станції між собою та з прилеглими дільницями [Текст] / Т. Ю. Калашнікова, Л. В. Свиридюк / Зб. Наук. праць. Вип. 120. Х.: УкрДАЗТ – 2011. – С. 44–47.
9. Калашнікова, Т. Ю. Шляхи підвищення рівня інформатизації дільничної станції [Текст] / Т. Ю. Калашнікова, І. Г. Каленик, І. В. Расовський / Зб. магістр. праць. Вип. 112. Х.: УкрДАЗТ – 2011 – С. 128–133.
10. Всеукраїнська транспортна газета «Магістраль» [Електронний ресурс] С «Каскадом» он-лайн. – 2013. – 13 березня. – Режим доступу : <http://www.magistral-uz.com.ua/articles/c-kaskadom--v-on-lajn.html>.
11. Данько, М. І. Мікропроцесорна диспетчерська централізація «Каскад» [Текст] / М. І. Данько // навч. Посібник. Х.: УкрДАЗТ – 2005. – 176 с.
12. Долгополов, П. В. Розробка функціональних задач залізничних систем диспетчерського управління із застосуванням теорії розкладів [Текст] / П. В. Долгополов // Зб. Наук. праць. Вип. 140. – Х.: УкрДАЗТ. – 2013. – С. 96–102.

Bibliography (transliterated):

1. Alohynskyy, E., Kolesnikova, N. (2009). Directions improvement of border adjustment stations on the borders with the CIS, 29–34.
2. Ukrainian transport newspaper "Highway" [Electronic resource] // command post freight traffic. – 2014 – 6 January. Access : <http://www.magistral-uz.com.ua/articles/komandnij-punkt-vantazhnogo-ruhu.html>.
3. Butko, G. Baulina, V. Verovko (2012). Improving the technology of Border transmitting station based on the requirements of logistics, 26–31.
4. Ukrainian transport newspaper "Highway" [Electronic resource] // Microprocessors in action. – 2014 – 12 March. - Access : <http://www.magistral-uz.com.ua/articles/mikroprocesori--v-dii.html>.
5. Petrushov (2015). Improving the technology of the border transfer station, 106–109.
6. Butko, G. Sikonenko, T. Kalashnikova (2001). Ensuring the sustainability of the sorting station in terms of the transport market. Mizhvuz . collection of papers, 22–27.
7. Kalashnikova (2002). Model interoperability of the system " depot - station - driving " . Information management systems for rail transport, 67–69.
8. Kalashnikova, L. Sviridyuk (2011). Increased interaction terms of technical sub stations with each other and with surrounding stations, 44–47.
9. Kalashnikova, I. Kalenyk, I. Rasovskyy (2011). Ways to improve the level of information polling stations, 128–133.
10. Ukrainian transport newspaper "Highway" [electronic resource] С "cascade" online. – 2013 – 13 March. Access : <http://www.magistral-uz.com.ua/articles/c-kaskadom--v-on-lajn.html>.
11. Danko (2005). Microprocessor centralized traffic control "Cascade", 176.
12. Dolgoplov (2013). Development of functional tasks rail systems using supervisory control scheduling theory, 96–102.

Поступила (received) 20.03.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Технологічні аспекти у роботі прикордонної дільничної станції в умовах підвищення рівня інформатизації/ Т. Ю. Калашнікова, П. О. Цвир, С. П. Приступа, Р. С. Полозун // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.46–50. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.

Технологические аспекты в работе пограничной участковой станции в условиях повышения уровня информатизации/ Т. Ю. Калашникова, П. А. Цвир, С. П. Приступа, Р. С. Полозун // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.46–50. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.

Technological aspects in the border precinct station in the raising the conditions information/ T. Kalashnikova, P. Cvir, S. Pristupa, R. Polozun // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No 17 (1189). – P.46–50. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-5459.

Калашикіова Тат'яна Юрійвна – кандидат технічних наук, Український державний університет залізничного транспорту, доцент кафедри «Управління експлуатаційною роботою»; майдан Фейербаха, 7, м. Харків, Україна, 61050; тел.: (066) 441-50-42; e-mail: bulavina_ty@ukr.net.

Калашикіова Тат'яна Юрьевна – кандидат технических наук, Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой», площадь Фейербаха, 7, г. Харьков, 61050; тел.: (066) 441-50-42; e-mail: bulavina_ty@ukr.net.

Kalashnikova Tetyana – candidate of technical sciences, associate professor, Ukrainian State University of Railway Transport, department of "Management of operational work"; Kharkiv, Feuerbach sq, 7, 61050; tel.: (066) 441-50-42; e-mail: bulavina_ty@ukr.net.

Цвір Павло Александрович – магістр, Український державний університет залізничного транспорту, кафедра «Управління експлуатаційною роботою»; майдан Фейербаха, 7, м. Харків, Україна, 61050; тел.: (063) 155-48-15; e-mail: pavel.tsvir@ukr.net.

Цвир Павел Александрович – магистр, Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, кафедра «Управление эксплуатационной работой»; площадь Фейербаха, 7, г. Харьков, 61050; тел.: (063) 155-48-15; e-mail: pavel.tsvir@ukr.net.

Cvir Pavlo – listener, Ukrainian State University of Railway Transport, department of "Management of operational work"; Kharkiv, Feuerbach sq, 7, 61050; tel. (093) 982-71-34; e-mail: pavel.tsvir@mail.ru.

Приступа Сергій Петрович – магістр, Український державний університет залізничного транспорту, кафедра «Управління експлуатаційною роботою»; майдан Фейербаха, 7, м. Харків, Україна, 61050; тел.: (098) 968-02-43; e-mail: prystupa_serhiy@ukr.net.

Приступа Сергей Петрович – магистр, Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, кафедра «Управление эксплуатационной работой»; площадь Фейербаха, 7, г. Харьков, 61050; тел.: (098) 968-02-43; e-mail: prystupa_serhiy@ukr.net.

Pristupa Sergey – listener, Ukrainian State University of Railway Transport, department of "Management of operational work"; Kharkiv, Feuerbach sq, 7, 61050; tel. (093) 982-71-34; e-mail: prystupa_serhiy@ukr.net.

Полозун Роман Сергійович – магістр, Український державний університет залізничного транспорту, кафедра «Управління експлуатаційною роботою»; майдан Фейербаха, 7, м. Харків, Україна, 61050; тел.: (099) 286-83-45, (099)-286-83-45; e-mail: milano.roman01@gmail.com.

Полозун Роман Сергеевич – магистр, Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, кафедра «Управление эксплуатационной работой»; площадь Фейербаха, 7, г. Харьков, 61050;

Polozun Roman – listener, Ukrainian State University of Railway Transport, department of "Management of operational work"; Kharkiv, Feuerbach sq, 7, 61050; tel. (093)982-71-34, (099)-286-83-45;

УДК 004.4:378.147

М. С. ШИРОКОПЕТЛЄВА, Ю. Ю. ЧЕРЕПАНОВА

ПРО ПІДХІД ДО ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ ТЕСТУВАННЯ ЗНАНЬ З МОВИ SQL

Розглядаються питання проектування та розробки системи тестування знань з мови структурованих запитів до бази даних. Запропоновано критерії формування тестових наборів для тестування знань з мови структурованих запитів, наведена методика формування тестових завдань та оцінки проходження тестування. Визначено підходи до проектування програмної системи тестування знань з урахуванням можливості виконання запитів на модифікацію даних та зміну структури бази даних, з відкатом транзакції при помилці запиту редагування даних.

Ключевые слова: автоматизована перевірка, система тестування знань, мова структурованих запитів.

Рассматриваются вопросы проектирования и разработки системы тестирования знаний языка структурированных запросов к базе данных. Предложены критерии формирования тестовых наборов для тестирования знаний языка структурированных запросов, приведена методика формирования тестовых заданий и оценки прохождения тестирования. Определены подходы к проектированию программной системы тестирования знаний с учетом возможности выполнения запросов на модификацию данных и изменение структуры базы данных, с откатом транзакции при ошибке запроса редактирования данных.

Ключевые слова: автоматизированная проверка, система тестирования знаний, язык структурированных запросов.

The problems of the design and development of knowledge testing system Structured Query Language was discussed in the article. Test systems are widely applied in the educational process. But evaluation of the level of knowledge of SQL has problems with their use. There are usage isolated transaction for CRUD operations and database recovering for database modification query (create, alter, drop). The method of test tasks formation was described. Also two criteria for the test tasks were proposed and formalized: criterion completeness and lack of intersection criterion. There are set in the test questions should cover all elements of the topic you being tested (criterion completeness). The lack of intersection criterion is checking to be only fragments of the tasks for which formulated questions. Difficulty levels for thematic units can be used for formation of the test results.

The authors propose an approach to web system development using ASP .NET MVC platform. Web system supports three roles (teacher, student and administrator). System contains two databases (training DB and a test DB for recovery training database and execute queries). This approach allows to automate the testing of knowledge on SQL.

Keywords: automated testing, system testing, test task criteria, Structured Query Language

Вступ. Інформаційні технології - вельми широке визначення, під яке потрапляє ряд окремих технічних засобів і прийомів роботи з інформацією. Дедалі більшої популярності набувають веб-системи. Такі системи мають певні переваги, а саме: доступність за рахунок мережі Internet, швидкість розповсюдження, менші вимоги до пам'яті комп'ютерів та іншої техніки, і т.д. Для даної роботи ці переваги мають ключове значення, тому питання проектування веб-систем тестування знань набувають все більше важливості.

На сьогоднішній день підготовка фахівців в напрямку комп'ютерних наук практично неможлива без вивчення різних СУБД і написання запитів до бази даних. У більшості технічних навчальних закладів сфери ІТ вивчають ці питання, без цього у наш час неможливо розробляти більшість програмних продуктів. Тому важливими є закріплення та перевірка знань студентів у цій сфері. Система тестування знань мови запитів може використовуватись для спрощення завдань перевірки і навчання студентів. Автоматизація цього процесу дає багато переваг, до того ж у час технологій, в першу чергу Internet, така система буде більш відповідати вимогам сучасності. Різні веб-системи тестування вже застосовуються у багатьох навчальних установах, це зручний спосіб контролю та перевірки знань учнів та студентів.

Метою роботи є проектування системи тестування знань мови запитів до бази даних. Система повинна відповідати усім вимогам, окремо слід спроектувати функціонал різних груп користувачів. Також система має передбачати певну звітність результатів тестування та зручне і зрозуміле оброблення помилок з поясненнями для студентів у деяких випадках.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Тестування як ефективний спосіб перевірки знань здобуває все більшу і більшу популярність в навчальних закладах вищої та середньої акредитації [1, 2]. Одною з основних і безперечних його переваг є мінімум часових витрат на отримання надійних підсумків контролю. При тестуванні використовують як паперові, так і електронні варіанти. Останні особливо привабливі, тому що дозволяють отримати результати практично відразу по завершенні тесту.

Тестування – більш справедливий метод, що ставить всіх учнів в рівні умови, як у процесі контролю, так і в процесі оцінювання, практично виключаючи суб'єктивізм викладача [3].

В дослідженнях [4] розглянуто питання формування тестового набору, який всебічно охоплює навчальний матеріал, але такий підхід не враховує особливості перевірки знань з мов програмування, зокрема, з мови запитів.

При тестуванні запитів до бази даних потрібно мати на увазі особливості запитів до різних СУБД. Також різні запити виконують різну роботу з даними. Найбільш безпечні просто зчитують і повертають деяку інформацію. Ці запити важливо перевіряти на помилки та перевіряти отримані дані з потрібними. Такі запити, як Insert, Update, Delete, Create, Drop, вже впливають на дані, змінюючи їх, тому такі запити більш небезпечні при виникненні помилок. При роботі з запитом до бази даних потрібно розділити обро-

бку помилок різних запитів і передбачити різний порядок рядків у отримуваних даних при виконанні запити.

Окрему увагу приділимо проектуванню системи тестування.

Ціль та задачі дослідження. Метою дослідження є обґрунтування методів створення тестових завдань з мови SQL та вибір архітектури веб-системи тестування знань з мови SQL.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання:

1. Описати методику формування тестових завдань та оцінки результатів тестування.

2. Визначити підходи до проектування програмної системи тестування знань з урахуванням можливості виконання запитів на модифікацію даних та зміну структури бази даних.

Опис методики формування тестових завдань.

Для системи тестування знань важливу роль відіграє галузь, інформацію якої підлягає перевірці. Для розділів дисциплін, що містять теоретичні знання, в першу чергу, рекомендується застосовувати оцінку рівня володіння основними поняттями та відношеннями між ними, а лише після успішного контролю цього рівня – перехід до більш абстрактних питань та питань, які можуть містити узагальнення та приклади практичної реалізації набутих теоретичних знань. При цьому для оцінки базового рівня володіння теоретичними знаннями пропонується використовувати тести з вибором однієї правильної відповіді з багатьох та багатозначні питання [5]. Таким чином можна запобігти ускладненню програмного забезпечення для проведення тестування та на достатньому рівні оцінити знання користувача. При формуванні питань підвищеної складності може бути застосовані питання з визначеннями відповідності елементів та формування коректної послідовності дій [6]. Такі варіанти питань призводять до ускладнення програмної системи тестування, але значно розширюють перелік навичок та компетенцій, які підлягають перевірці. Для дисциплін, що носять теоретичний характер, використання питань з відкритою відповіддю (заповнення таблиць, схем, довільне висловлювання, тощо) призводить до зниження рівня формалізації теоретичної інформації та необхідності введення підсистем синтаксичного та семантичного аналізу до системи перевірки знань (при автоматичній перевірці тестів), що значно перевантажує систему, або до так званої «ручної» перевірки завдань, що збільшує навантаження на викладача і та може привести до необ'єктивності оцінки знань, що неприпустимо у системах тестування.

Для галузей, які потребують перевірки набутих навичок розв'язання завдань, слід застосовувати варіанти одиночного та множинного вибору (при наявності декількох рішень задачі) з відкладеними відповідями, щоб учасники тестування мали змогу самостійно знайти рішення, а не підставляти надані у відповідях варіанти.

Окрему увагу приділимо тестуванню навичок в галузі програмування, коли необхідно не лише перевірити теоретичні знання (наприклад, знання основних управляючих конструкцій), а й навички виконання практичних завдань – написання фрагментів про-

грам. Складність полягає в тому, що такого роду завдання можуть бути виконані по-різному, тобто завдання може мати безліч вірних рішень і для перевірки коректності виконання завдання не можливо застосувати жоден з класичних підходів до тестування. На даний час існують програмні засоби - системи тестування рішень, які дозволяють автоматизувати перевірку коректності виконання рішень, обраних для тестування [7].

Для наведення методики формування тестових завдань окрім стандартних критеріїв для тестів [6] (критерій надійності, валідності, складності тесту, дискримінативності) запропонуємо критерії, яким повинні задовольняти тестові набори:

1. Критерій повноти - наведені у тестовому наборі питання повинні покривати усі елементи теми, за якою проводиться тестування.

2. Критерій відсутності перетину тестових питань: перевірки підлягають лише фрагменти завдання, за яким сформульоване питання.

Докладніше опишемо критерій повноти. Для цього наведемо терміни «зміст поняття» та «об'єм поняття»: змістом поняття є сукупність суттєвих ознак, які характеризують даний предмет, а об'єм поняття – сукупність або множина предметів, які входять до складу поняття. Провівши аналогію між по-

няттям (основним об'єктом предметної галузі) та дисципліною, за якою проводиться тестування, можна зауважити, що до змісту дисципліни входить увесь перелік тематичних одиниць (тем, розділів, підрозділів, тощо), а об'єм складає множина тестових питань, які покривають увесь зміст кожної теми. Формалізуємо наведене:

$$S = \cup R^i,$$

де S – об'єм всієї дисципліни; R^i – i-е тематична одиниця, $i \in [1; n]$, n – кількість тематичних одиниць в дисципліні.

Для запобігання «обміну думками» під час проведення тестування тест повинен містити не менш ніж 10 питань за кожною темою.

Наприклад, для перевірки знань з мови структурованих запитів, виділимо розділи: DML, DDL, DCL. В кожному з них визначимо тематичні одиниці, взаємозв'язок яких для розділу DML наведено в табл.1. Наведений рівень складності може застосовуватися для автоматизації формування тестових наборів для стійкої групи користувачів або дискримінаційного тестування (для отримання максимальної оцінки «задовільно» за успішне проходження тесту першого рівня складності).

Таблиця 1 – Тематичні одиниці підрозділу DML

Підрозділ	Тема	Тематична одиниця	Рівень
SELECT	Прості запити	Формування виведення	1
		Обмеження на дані	1
		Спеціальні оператори, упорядкування	1
		Групові операції	1
		Обмеження на групи	2
	Запити на декількох таблицях	Об'єднання таблиць	2
		Об'єднання таблиці з собою	2
		Обмеження на дані та групи з декількох таблиць	3
	Підзапити	Прості підзапити	2
		Корельовані підзапити	3
Предикати ANY, ALL		3	
INSERT	Додавання одиничного запису	1	
	Множинне додавання	2	
UPDATE	Проста модифікація даних	1	
	Модифікація даних на підставі даних з іншої таблиці	2	
DELETE	Просте вилучення даних	1	
	Вилучення даних на підставі даних з іншої таблиці	2	

Тобто для формування тесту з цього підрозділу необхідно скласти не менш ніж 170 питань відповідно до наведеної тематики.

На підставі критерію відсутності перетину тестових питань, пропонується обмежити перевірку відповідей лише тематикою питання, наприклад, при перевірці знань за тематичним розділом «Обмеження на дані» необхідно перевірити результуючу вибірку на кількість рядків та на їх відповідність, а не звертати увагу на кількість та порядок полів виведення та на упорядкування рядків в результаті запиту. Формалізуємо:

$$\forall i, j: R^i \cap R^j = \emptyset,$$

$R^i, R^j - i (j) -$ а тематична одиниця, $i, j \in [1; n]$, n – кількість тематичних одиниць в дисципліні.

Таким чином, уся тестова множина може бути представлена:

$$S = \cup Q_i,$$

де $Q_i - i$ -те питання тестового набору, яке входить до складу $R^i, i \geq 10$.

Так, для формування тестового набору з одного тематичного розділу, слід навести однотипні питання, наприклад, для тематичного розділу «Обмеження на дані» наведемо таблицю Students (id, Name, DOB, Group, Address) та запити:

- Виведіть студентів, які навчаються у групі IT-21;
- Виведіть студентів, які мешкають у гуртожитку (адреса містить текст «Харків, вул. Перша, 1», тощо).

А для визначення коректної відповіді слід для кожного запиту сформулювати еталонний запит, за допомогою якого можна отримати результуючу вибірку. Також необхідно розробити показники оцінки результуючих запитів для кожної з тематичних одиниць і ввести їх до бази тестових питань з вказівкою тематичної одиниці, а всі завдання повинні відноситися до певної одиниці для здійснення перевірки.

Тестовий набір для підсумкового контролю знань повинен містити питання з кожної тематичної одиниці, але при досить великій кількості тем та обмежені часу пропонується проводити тестування, призначене для окремих груп користувачів, а в тестові набори включати питання одного рівня складності. Наприклад, в першу чергу можна сформулювати тест з питань рівнем складності 2 (оцінка «добре»), після складання якого можна сформулювати 2 набору з рівнем складності 1 (для перевірки володіння базовими знаннями для тих, хто не склав першу частину) та рівнем 3 – для користувачів, які можуть претендувати на відмінну оцінку.

Також можна передбачити ведення поточного контролю шляхом автоматичного формування тестових наборів на підставі питань з обраного розділу / підрозділу без урахування складності завдань. Кількість питань в завданні викладач може самостійно визначити, але ця кількість не повинна бути меншою, ніж кількість тематичних одиниць. Тобто при ієрархічній структурі організації завдань полегшується процес формування тестових наборів з урахуванням критерію валідності за змістом.

Методики оцінки результатів тестування. Для перевірки знань можуть використовуватися різні критерії формування оцінки [6]. Методи на основі кількісних критеріїв припускають використання кількісної шкали, тобто оцінка в цьому випадку задається числом. Наприклад, коефіцієнт засвоєння $K = A / P$, де A – кількість правильних відповідей в тесті, P – загальна кількість відповідей. Також при формуванні оцінки можна врахувати типи і характеристики тестових завдань, рівня підготовленості користувача, що проходить тестування, віднесення користувача до стійких класів, тощо. Усі перелічені підходи можуть застосовуватися для тестів, які не передбачають декілька правильних семантично різних варіантів відповідей. Для перевірки знань та навичок в галузі програмування слід передбачити можливість автоматизованої перевірки запропонованого рішення, тобто створення системи тестування, яка надає можливість компіляції коду (фрагменту коду) програми та перевірки результатів за темами.

Для програмної системи перевірки знань з мови SQL необхідно створити набір вимог за кожною тематичною одиницею та алгоритм порівняння результуючих вибірок (еталонної та запропонованої користувачем).

Наприклад, для теми «Обмеження даних» результати отриманих вибірок пропонується порівнювати

по рядкам (для даної тематичної одиниці) за такими показниками: кількість рядків повинна збігатися, ідентифікатори рядків (ROWID) повинні збігатися за умови вибірки з даних, частково невідомих користувачеві (для запобігання некоректного формування запиту). При виконанні цих правил завдання можна вважати виконаним правильно.

Для перевірки запитів на модифікацію слід передбачити виконання двох ізольованих транзакцій (для еталонного та запропонованого запитів) для унеможливлення довільної зміни початкових даних, а результати виконання завдання перевіряти за допомогою перевірки даних таблиць за таким критерієм: повний збіг даних таблиці при виконанні запиту на вибірку усіх даних з упорядкуванням по ключовому полю.

При проведенні поточного контролю і формуванні завдань з рівним рівнем складності для оцінювання можна застосовувати коефіцієнти, які відповідають рівням складності. Пропонується загальну оцінку розраховувати за формулою: $M = k * A / P$, де k – коефіцієнт складності. Для середнього рівня складності (2) – $k = 1$, для низького (1) – $k = 0.7$, для завдань підвищеної складності (3) – $k = 1.3$. А за наявності більшої кількості рівнів можна коефіцієнт складності задавати самостійно.

Опис проектування програмної системи тестування знань з SQL. Одним з особливостей розробки системи тестування знань мови запитів є передбачення зміни даних після кожного сеансу роботи студентів з системою. Таким чином потрібно відновлювати тестову базу даних після кожного сеансу роботи студента. Важливо також зберігати певний звіт про тестування студентів певної групи, і звіт про роботу окремих студентів цієї групи для звітності навчально-го закладу, якщо це потрібно.

Для реалізації веб-сервісу тестування знання мови запитів у вигляді веб-серверу та веб-клієнта було вирішено використовувати клієнт-серверну архітектуру. Веб-система розроблена з використанням платформи ASP.NET MVC [8]. Для реалізації серверної частини був використаний принципи проектування SOLID [9]. Серверна частина виконує функцію обробки введених клієнтом даних та надання клієнту певної інформації відповідно до його запитів. Перед виконанням запиту на стороні клієнта доцільна перевірка запиту за допомогою регулярних виразів (на наявність ключових слів).

На клієнтському боці для створення дизайну і динамічної роботи веб-сайту слід використовувати JQuery бібліотеку, що значно спрощує роботу з JavaScript. Клієнт являє собою web-додаток, створений також з використанням ASP.NET MVC та він виконує роль динамічної навігації між сторінками та взаємодії з клієнтом.

Для зберігання даних пропонується використання бази даних. В якості СУБД обрано Microsoft SQL Server, що краще всього інтегрується з ASP.NET проектами, при використанні технологій Entity Framework та LINQ та моделлю Code First [10].

Слід зауважити, що існують різні діалекти мови SQL та спеціальні функції, реалізовані у конкретних СУБД. При реалізації системи тестування слід перед-

бачити можливість вибору типу СУБД для виконання запиту, але цей підхід вимагає необхідність підключення різних СУБД для коректної перевірки запитів, що в свою чергу підвищує вимоги до апаратного забезпечення серверної частини. На даний час в реалізованій системі тестова база використовує СУБД Microsoft SQL Server, та у майбутньому планується розширити перелік СУБД.

В базі даних зберігається вся динамічна інформація, що може бути редагована адміністраторами та викладачами, а саме: дані користувачів; групи студентів; завдання; групи тестових завдань, критерії оцінки груп, питання з еталонними запитими, відповіді та оцінки.

Сервер включає основний функціонал обробки даних, відновлення тестової бази даних. Певний функціонал, та доступ до даних з бази даних винесен

до окремих бібліотек класів. Також в окрему бібліотеку класів винесені ресурси локалізації. На рисунку 1 зображена діаграма компонентів. З неї видно, що пропонується використовувати компонент серверу, базу даних та компонент «веб-клієнт». При програмній реалізації з використанням платформи .Net, компонент «база даних» використовує DbContext, що потрібен для роботи EntityFramework. Компонент «Сервер» використовує «Controller» для формування сторінок та обробки запитів від клієнта і обробки потрібних для відображення даних, а також використовує бібліотеку EntityFramework. Веб-клієнт, в свою чергу, використовує бібліотеку jQuery.

Усі компоненти взаємодіють між собою: клієнт робить запит до серверу, сервер запитує дані у серверу БД, а тоді повертає їх клієнту.

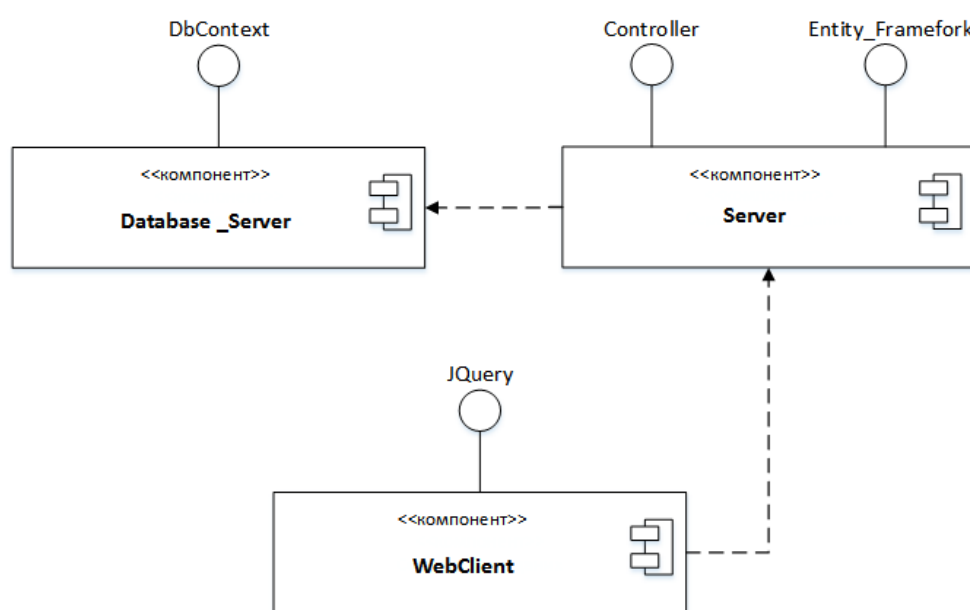


Рис. 1 – Діаграма компонентів

Висновки. В результаті проведених досліджень запропоновано критерії формування тестових наборів для тестування знань з мови структурованих запитів, наведена методика формування тестових завдань та оцінки проходження тестування. Також в роботі наведений підхід до створення програмної системи тестування знань, яка передбачає можливість відновлення, редагування тестової бази, та відкат транзакції при помилці запиту редагування даних та відображення помилки.

В подальшому розвиток системи можливий у декількох напрямках: додавання нового функціоналу з тестування видів запитів щодо забезпечення цілісності даних (indexes, constraints), додавання підтримки додаткових СУБД та тестування запитів до бази даних цих СУБД.

Список літератури:

1. Майоров, А. Н. Теория и практика создания тестов для системы образования. [Текст] / А. Н. Майоров. – М.: «Интеллектуальный центр», 2002. – 296 с.
2. Битюев, Ю. В. Тестирование в образовательном процессе: методические указания [Текст] / Ю. В. Битюев, Е. Л. Очирова. – Улан-Удэ: Изд-во БГСХА им. В. Р. Филиппова, 2009. – 32 с.
3. Різун, Н. О. Методика розробки автоматизованої системи управління якістю тестового контролю знань [Текст] / Н. О. Різун, Ю. К. Тараненко // Вісник НТУ "ХПІ". Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2010. – № 31. – С. 145–152.
4. Кабанова, Т. А. Тестирование в современном образовании: уч. пособие. [Текст] / Т. А. Кабанова, В. А. Новиков. – М.: Высшая школа, 2010. – 384 с.
5. Аванесов, В. С. Форма тестовых заданий: Учебное пособие. [Текст] / В. С. Аванесов. – М.: Центр тестирования, 2005. – 155 с.
6. Карпенко, А. П. Тестовый контроль качества обучения и критерии качества образовательных тестов. Обзор [Электронный ресурс] / А. П. Карпенко, А. С. Домников, В. В. Белоус // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2011. – № 04. – Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/184741.html>. – 15.06.2016г. – Загол. с экрана.
7. Бондарев, В. М. Мережева підтримка навчання програмуванню [Текст] / В. М. Бондарев, Ю. Ю. Черепанова // V Міжнародна науково-практична конференція "Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія", 27–29 мая 2015 р. – Івано-Франківськ: Супрун В. П., 2015. С. 49–50.
8. Freeman, A. Pro ASP.NET MVC 5 5th ed. [Текст] / A. Freeman. – Apress, 2013. – 832 с.
9. Кинг, Б. Опасность нарушения принципов SOLID в C# [Электронный ресурс] / Microsoft Developer Network org – Режим доступа: <https://msdn.microsoft.com/ru-ru/magazine/dn683797.aspx/> – 01.06.2016 р. – Назва з екрана.

10. Code First Migrations and Deployment with the Entity Framework in an ASP.NET MVC Application [Електронний ресурс] / The ASP.NET Site. – Режим доступу: <http://www.asp.net/mvc/overview/getting-started/getting-started-with-ef-using-mvc/migrations-and-deployment-with-the-entity-framework-in-an-asp-net-mvc-application> – 10.05.2016 р. – Назва з екрану.
6. Karpenko, A. P., Domnikov, A. S., Belous, V. V. (2011). Testovyi kontrol kachestva obucheniia i kriterii kachestva obrazovatelnykh testov. Obzor. Nauka i obrazovanie: elektronnoe nauchno-tekhnicheskoe izdanie, 04. <http://technomag.edu.ru/doc/184741.html> (15.06.2016).
7. Bondarev, V. M., Cherepanova, Y. Y. (2015). Merezheva pidtrinka navchannia programuvanniu. Abstracts of Papers. Conference V Mizhnarodna naukovopraktychna konferentciia "Informatiini tekhnologii ta komp'uterna inzheneriia", Ivano-Frankivsk, May 27-29 2015, 49–50, Ivano-Frankivsk: Suprun V.P.
8. Freeman, A. (2013). Pro ASP.NET MVC 5 5th ed. Apress.
9. King, B. (2016). Opasnost narusheniia printcipov SOLID v C#. Microsoft Developer Network org. <https://msdn.microsoft.com/ru-ru/magazine/dn683797.aspx>.
10. Code First Migrations and Deployment with the Entity Framework in an ASP.NET MVC Application. The ASP.NET Site. <http://www.asp.net/mvc/overview/getting-started/getting-started-with-ef-using-mvc/migrations-and-deployment-with-the-entity-framework-in-an-asp-net-mvc-application> (10.05.2016).

Bibliography (transliterated):

1. Maiorov, A. N. (2002). Teoriia i praktika sozdaniia testov dlia sistemy obrazovaniia. Moscow: «Intellekt-tcentr».
2. Bituev, Iu. V., Ochirova E. L. (2009). Testirovanie v obrazovatelnom protsesse. Ulan-Ude: Izd-vo BGSKhA im. V. R. Filippova.
3. Rizun, N. O., Taranenko, Iu. K. (2010). Metodika rozrobki avtomatizovanoi sistemi upravlinnia iakistiu testovogo kontroliu znan. Visnik NTU "KhPI". Tematichnii vipusk: Informatika i modeliuvannia, 31, 145–152.
4. Kabanova, T. A., Novikov, V. A. (2010). Testirovanie v sovremennom obrazovanii. Moscow: Vysshaia shkola.
5. Avanesov, V. S. (2005). Forma testovykh zadani. Moscow: Tcentr testirovaniia.

Надійшла (received) 20.03.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Про підхід до проектування системи тестування знань з мови SQL/ М. С. Широкопетлева, Ю. Ю. Черепанова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.50–55. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

О подходе к проектированию системы тестирования знаний по языку SQL/ М. С. Широкопетлева, Ю. Ю. Черепанова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.50–55. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

The approach to the design of system of testing knowledge of SQL / M. Shirokopetleva, Y. Cherepanova //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 17 (1189).– P.50–55. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Широкопетлева Марія Сергіївна – Харківський національний університет радіоелектроніки, старший викладач кафедри програмної інженерії; пр. Науки, 14, м. Харків, Україна, 61166; тел. 066-403-91-64; e-mail: mshirokopetleva@gmail.com.

Широкопетлева Марія Сергеевна – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, старший преподаватель кафедры программной инженерии; пр. Науки, 14, г. Харьков, Украина, 61166; тел. 066-403-91-64; e-mail: mshirokopetleva@gmail.com.

Shirokopetleva Mariia – Kharkiv National University of Radio Electronics; Senior lecturer; Kharkiv, 61166, Nauka ave., 14; phone: 066-403-91-64; e-mail: mshirokopetleva@gmail.com.

Черепанова Юлія Юрійівна – Харківський національний університет радіоелектроніки, старший викладач кафедри програмної інженерії; пр. Науки, 14, м. Харків, Україна, 61166; тел. 066-161-72-42; e-mail: cher_y@list.ru.

Черепанова Юлия Юрьевна – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, старший преподаватель кафедры программной инженерии; пр. Науки, 14, г. Харьков, Украина, 61166; тел. 066-161-72-42; e-mail: cher_y@list.ru.

Cherepanova Yulia– Kharkiv National University of Radio Electronics; Senior lecturer; Kharkiv, 61166, Nauka ave., 14; phone: 066-161-72-42; e-mail: cher_y@list.ru.

УДК 656.025.2

В. О. ВДОВИЧЕНКО, Г. О. САМЧУК

ФОРМУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДОЧНИХ ВУЗЛІВ МІСЬКОГО ПАСАЖИРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

Розглядається процес формування моделі функціонування транспортно-пересадочних вузлів. Пропонується використовувати математичне моделювання з метою урахування випадкових величин експлуатаційних параметрів формування умов функціонування транспортно-пересадочних вузлів. Графічно представлені та формалізовані впливи вхідних параметрів і факторів зовнішнього середовища на процеси, що відбуваються у транспортно-пересадочних вузлах, та критерій ефективності їх функціонування. Результати досліджень можуть бути використані при складанні синхронізованих розкладів руху міського пасажирського транспорту та зміні конструктивних параметрів зупиночних пунктів.

Ключові слова: транспортно-пересадочний вузол, модель, громадський транспорт, параметри, випадкові величини, сталий розвиток.

Рассматривается процесс формирования модели функционирования транспортно-пересадочных узлов. Предлагается использовать математическое моделирование с целью учета случайных величин эксплуатационных параметров формирования условий функционирования транспортно-пересадочных узлов. Графически представлены и формализованные влияния входных параметров и факторов внешней среды на процессы, происходящие в транспортно-пересадочных узлах, и критерий эффективности их функционирования. Результаты исследований могут быть использованы при составлении синхронизированных расписаний движения городского пассажирского транспорта и изменении конструктивных параметров остановочных пунктов.

Ключевые слова: транспортно-пересадочный узел, модель, общественный транспорт, параметры, случайные величины, устойчивое развитие.

The article deals with issues related to the development of a mathematical model of public transport interchanges functioning from a sustainable development perspective.

The results of research are presented graphically effects of input parameters and external factors on processes taking place at transport interchanges, and efficiency criteria of their functioning, and also formalization of listed influences.

As a scientific novelty for the first time it is formulated a mathematical model of public transport interchanges functioning, that includes subprocesses for both urban passenger transport and passengers, and also takes into account technical parameters of stops. The duration of certain subprocesses is considered as random variables.

The practical significance of the model consists in the fact that simulation conducted on its basis will generate an array of statistical data, using which it is possible to obtain and evaluate functional dependencies of the efficiency criterion of on input parameters and choose their optimal value. The obtained results can become the backbone for schedule synchronization and, if necessary, for changes in design parameters of stops to ensure the efficiency of urban transport interchange functioning.

Keywords: transport interchange, model, public transport, parameters, random variables, sustainable development.

Вступ. Питання забезпечення сталого розвитку [1, 2] та ресурсозбереження стали основою для формування стратегій та відповідних векторів змін у сфері матеріального виробництва та невиробничій сфері, де особливу роль відіграє транспорт. Сьогодні спостерігається вичерпання ресурсів не тільки автошляхів через ріст рівня автомобілізації населення, а і об'єктів інфраструктури міських пасажирських транспортних систем, а саме транспортно-пересадочних вузлів (ТПВ) зі збільшенням інтенсивності руху міського пасажирського транспорту (МПТ). Поряд із екстенсивними методами збільшення пропускної здатності окремих елементів за рахунок їх розбудови, поліпшення організації руху транспортних засобів у зоні ТПВ набуває особливої важливості. За рахунок синхронізації розкладу руху транспортних засобів МПТ можливо значно зменшити витрати пасажирів на очікування у ТПВ, скоротити кількість конфліктних ситуацій між учасниками руху та знизити тривалість знаходження транспортних засобів у ТПВ, що призводить до виникнення додаткових витрат палива, як результат, викидів відпрацьованих газів у довкілля. У сукупності всі зазначені негативні впливи, що мають економічний, соціальний та екологічний характер, порушують сталість функціонування ТПВ.

Вирішити завдання їх мінімізації неможливо без математичного моделювання функціонування ТПВ. Необхідність створення моделі обумовлено неможливістю проведення експериментів на реальних об'єктах пасажирської транспортної системи. Аналітичні мо-

делі не дозволяють дослідити функціонування ТПВ у умовах впливів факторів зовнішнього середовища, тому для врахування ймовірнісної природи більшості показників обрано імітаційне моделювання.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Важливим питанням при дослідженні та створенні моделі функціонування ТПВ є аналіз існуючих наукових розробок, що стосуються його складових елементів, якими виступають зупиночні пункти. Автором дисертаційного дослідження [3] розроблена та запропонована комплексна методика розрахунку пропускної здатності зупиночних пунктів з урахуванням непостійного числа місць обслуговування. Робота Димової І. П. [4] направлена на виявлення закономірності функціонування зупиночних пунктів під впливом експлуатаційних і конструктивних факторів, а також закономірності руху транспортних засобів у їх зоні. Кажасєв А. О. встановив, що кількість конфліктних ситуацій на зупиночних пунктах, що утворюються при роботі дублюючих маршрутів, має зворотну залежність від величини суміщених інтервалів руху маршрутного транспорту через пункти зупинки та їх пропускної здатності [5].

Рух транспортних засобів маршрутів МПТ та їх взаємодія у зоні зупиночних пунктів розглядається у дисертаційних дослідженнях Єніна Д. В. [6], Корягина М. Є. [7], Шабалина Б. А. [8], але на практиці у багатьох містах проблема нескоординованого руху та скупчення рухомого складу на зупиночних пунктах все ще залишається невирішеною.

© В. О. Вдовиченко, Г. О. Самчук. 2016

Одним із напрямів підвищення ефективності функціонування ТПВ є удосконалення технологічної форми взаємодії видів транспорту шляхом синхронізації розкладу руху. У статті [9] розроблено модель узгодження графіку підводу рухомого складу МПТ до ТПВ (залізничний вокзал), науковець використав методи еволюційного моделювання, зокрема генетичний алгоритм. Недоліком запропонованої моделі можливо назвати неврахування випадкових величин, а також параметрів зупиночних пунктів.

Питання розробки математичних моделей для синхронізації розкладів руху МПТ з метою мінімізації часу очікування при здійсненні пасажирами пересадки знайшло своє відображення у публікаціях зарубіжних авторів [10, 11].

Аналіз літературних джерел виявив нестачу комплексних досліджень ТПВ, оскільки більшість наукових праць присвячені питанню визначення параметрів окремих елементів або певному аспекту технологічного процесу. Це обумовило необхідність розробки математичної моделі процесу функціонування ТПВ, що стане основою для подальшого виявлення чисельних значень вхідних параметрів, що забезпечать ефективність та сталий розвиток ТПВ.

Ціль та задачі дослідження. Об'єктом дослідження виступає процес функціонування ТПВ, а предметом – вплив експлуатаційних параметрів роботи МПТ та технічних параметрів зупиночних пунктів на ефективність функціонування ТПВ.

Метою дослідження є встановити зв'язки між вхідними параметрами, факторами зовнішнього середовища і процесами, що відбуваються у транспортно-пересадочних вузлах, та формалізувати їх впливи на функціонування ТПВ. Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

1. Визначити керуючі параметри та фактори зовнішнього середовища функціонування ТПВ.

2. Формалізувати впливи вхідних параметрів на технологічні підпроцеси, а також критерій ефективності функціонування ТПВ.

Модель функціонування ТПВ. Обраний критерій ефективності функціонування ТПВ включає мінімізацію вартісної оцінки негативного впливу на економічну, соціальну та екологічну складові:

$$EFF = \tilde{t}_{пр} \cdot C_{1год} + m \cdot C_e + \tilde{t}_{оч} \cdot C_{пас-год} + n \cdot C_{ДТП} + Q_{CO_2} \cdot C_{CO_2} \rightarrow \min, \quad (1)$$

де EFF – вартісна оцінка негативного впливу функціонування ТПВ, грн; $\tilde{t}_{пр}$ – час простою транспортних засобів у черзі перед зупиночним пунктом, год; $C_{1год}$ – собівартість однієї години простою транспортного засобу, грн/год; m – кількість зупиночних пунктів, що потребують зміни конструктивних параметрів, од.; C_e – витрати на експлуатацію зупиночних пунктів, грн; $\tilde{t}_{оч}$ – час очікування пасажирів у ТПВ, год; $C_{пас-год}$ – вартісна оцінка однієї пасажиро-години, грн/год; n – ймовірна кількість ДТП у зоні ТПВ; $C_{ДТП}$ – витрати, спричинені одним ДТП, грн; Q_{CO_2} – об'єм викидів, еквівалентних CO_2 , від транспортних

засобів, що знаходяться у черзі, г; C_{CO_2} – платежі, пов'язані із компенсацією екологічного забруднення викидами, еквівалентними CO_2 , грн/г.

Кожен компонент інтегрального критерію містить постійну складову ($C_{1год}$, C_e , $C_{пас-год}$, $C_{ДТП}$, C_{CO_2}), що дозволяє трансформувати обрані індикатори функціонування ТПВ у грошовий еквівалент, а також множину показників, що характеризують технологічний процес та залежать від випадкових величин часу очікування пасажирів або часу простою транспортних засобів маршрутів МПТ у ТПВ. Момент прибуття транспортних засобів у ТПВ, а також технічні характеристики зупиночних пунктів ТПВ, тобто кількість місць обслуговування, є визначальними для величини часу очікування пасажирів та часу простою транспортних засобів. Маршрути, траси яких проходять через ТПВ, розділені на дві групи: \mathfrak{Z} – номер маршруту, з якого здійснюється пересадка, $\mathfrak{Z} = \{\mathfrak{Z}_i \mid i = \overline{1, N}\}$; \mathfrak{R} – номер маршруту, на який здійснюється пересадка, $\mathfrak{R} = \{\mathfrak{R}_j \mid j = \overline{1, K}\}$; N – кількість маршрутів \mathfrak{Z} , од.; K – кількість маршрутів \mathfrak{R} , од.

Момент прибуття транспортних засобів кожного маршруту є функцією від часу відправлення з початкового зупиночного пункту та інтервалу руху на маршруті, обмеженнями до цільової функції є наступні вирази:

$$\begin{cases} tB_{\mathfrak{Z}}^{(b)} < tB_{\mathfrak{Z}}^{(b')} < tB_{\mathfrak{Z}}^{(b)} + I_{\mathfrak{Z}}, & b=1, \dots, B; \\ tB_{\mathfrak{Z}}^{(B)} \in T, \end{cases} \quad (2)$$

де $tB_{\mathfrak{Z}}^{(b)}$ – існуючий час відправлення b -го транспортного засобу маршруту \mathfrak{Z} з початкового зупиночного пункту; T – розрахунковий період; B – кількість транспортних засобів маршруту \mathfrak{Z} , що прибувають у ТПВ за період T ; $I_{\mathfrak{Z}}$ – інтервал на маршруті \mathfrak{Z} ; $tB_{\mathfrak{Z}}^{(b')}$ – змінений час відправлення b -го транспортного засобу маршруту \mathfrak{Z} з початкового зупиночного пункту.

У обмеженні (2) відображено, що зміна часу відправлення може варіюватися від існуючого часу відправлення у межах значення інтервалу на маршруті. Також відзначено, що час відправлення B -го транспортного засобу маршруту \mathfrak{Z} повинен належати рамкам розрахункового періоду T . Обмеження у рівній мірі діє для маршрутів \mathfrak{R} .

Зменшення значення простою транспортних засобів у ТПВ та загального часу очікування пасажирів, що складається з витрат часу на пересадку між маршрутами \mathfrak{Z} та \mathfrak{R} і витрат часу очікування пасажирів у ТПВ, реалізується за рахунок синхронізації розкладу, що є оптимізаційним заходом технологічного характеру. Синхронізація досягається шляхом зміщення часу та частоти відправлення транспортних засобів з початкового зупиночного пункту. Зменшити простій транспортних засобів у ТПВ можливо реалізуючи заходи зі збільшення кількості місць обслуговування на зупиночних пунктах.

Для дослідження функціонування ТПВ виділяємо елементарні підпроцеси для учасників технологічного процесу: процес підходу, очікування, пересадки пасажирів у ТПВ; процес прибуття, простою, відправлення транспортних засобів з ТПВ.

Технічну характеристику ТПВ можливо окреслити за допомогою чисельних значень наступних параметрів: Π – кількість місць обслуговування на зупиночному пункті, од.; $t_{пер}$ – значення тривалості переходу між лініями маршрутів у ТПВ. У якості вхідних параметрів обрано:

- множину моментів відправлення з початкової зупинки, $\{t_b\}$;
- множину тривалості руху від початкової зупинки до ТПВ, $\{t_p\}$;

- множина інтенсивності підходу пасажирів у ТПВ, $\{N\}$;
- множину пасажирів, що пересаджуються у ТПВ, $\{Q_{п}\}$;
- кількість ДТП за участі МПТ, n ;
- множина місць обслуговування на зупиночному пункті, $\{\Pi\}$;
- множину інтервалів руху на маршрутах $\{I\}$.

Вихідним параметром є вартісна оцінка негативного впливу функціонування ТПВ EFF .

Зв'язки між вхідними параметрами, факторами зовнішнього середовища та підпроцесами представлені на рис. 1.

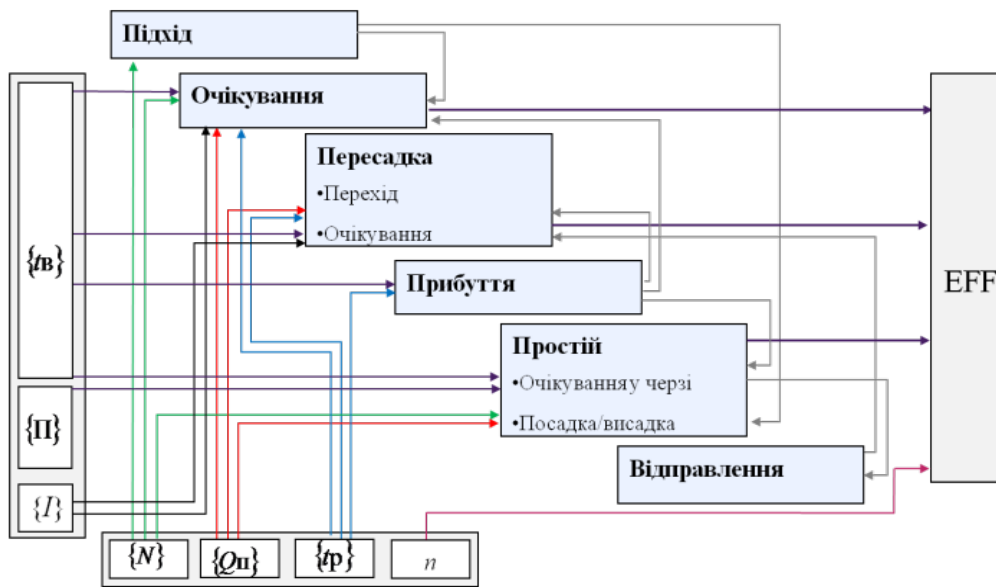


Рис. 1 – Зв'язки між вхідними параметрами, факторами зовнішнього середовища та підпроцесами

У якості керуючих змінних розглядається момент відправлення з початкового зупиночного пункту, кількість місць обслуговування на зупиночному пункті та інтервал на маршрутах МПТ.

Відправлення з початкового зупиночного пункту для b -го транспортного засобу розраховуємо наступним чином:

$$t_{b3}^{(b)} = \begin{cases} t_{b3}^{(1)}, & \text{при } b=1, \\ t_{b3}^{(b-1)} + I_3, & \text{при } b > 1, \end{cases} \quad (3)$$

де $t_{b3}^{(b)}$ – час відправлення b -го транспортного засобу маршруту \mathfrak{Z} з початкового зупиночного пункту; $t_{b3}^{(b-1)}$ – час відправлення попереднього транспортного засобу маршруту \mathfrak{Z} з початкового зупиночного пункту; I_3 – інтервал на маршруті \mathfrak{Z} .

Другий вираз формули (3) показує, що кожний наступний транспортний засіб b маршруту повинен відправитися через інтервал, встановлений на маршруті \mathfrak{Z} .

Момент прибуття транспортних засобів розраховується шляхом додавання до моменту відправлення з початкового зупиночного пункту тривалості руху до ТПВ:

$$\tilde{M}_{пр3}^{(b)} = t_{b3}^{(b)} + \tilde{t}_{р3}^{(b)}, \quad (4)$$

де $\tilde{M}_{пр3}^{(b)}$ – момент прибуття b -го транспортного засобу маршруту \mathfrak{Z} у ТПВ; $t_{b3}^{(b)}$ – відправлення b -го транспортного засобу маршруту \mathfrak{Z} з початкового зупиночного пункту; $\tilde{t}_{р3}^{(b)}$ – час руху b -го транспортного засобу маршруту \mathfrak{Z} від початкового зупиночного пункту до ТПВ.

Аналогічно розраховуємо момент прибуття d -них транспортних засобів маршруту \mathfrak{R} .

Простій транспортних засобів у ТПВ складається з непродуктивного простою, тобто простою у черзі та простою, що виникає при пасажирообміні і є частиною технологічного процесу.

$$\tilde{t}_{пр3} = \sum_{b=1}^B (\tilde{t}_{чер3}^{(b)} + \tilde{t}_{пв3}^{(b)}), \quad b=1, B; \quad (5)$$

$$\tilde{t}_{пр\mathfrak{R}} = \sum_{d=1}^D (\tilde{t}_{чер\mathfrak{R}}^{(d)} + \tilde{t}_{пв\mathfrak{R}}^{(d)}), \quad d=1, D; \quad (6)$$

де $\tilde{t}_{чер3}^{(b)}$, $\tilde{t}_{чер\mathfrak{R}}^{(d)}$ – час очікування b -их, d -их

транспортних засобів у черзі перед зупиночним пунктом; $\tilde{t}_{\text{пв}}^{(b)}$, $\tilde{t}_{\text{пв}}^{(d)}$ – час посадки-висадки пасажирів.

Непродуктивний простій виникає, коли моменти прибуття на зупиночний пункт транспортних засобів співпадають, а кількість транспортних засобів, що одночасно знаходяться у зоні ТПВ, перевищує кількість місць обслуговування на зупиночних пунктах.

Для усунення цієї складової часу перебування транспортних засобів у ТПВ проводиться перевірка умови недопущення скупчення транспортних засобів у ТПВ під час пошуку оптимальних параметрів функціонування ТПВ.

$$M_c \leq \Pi \quad (7)$$

де M_c – кількість прибуттів транспортних засобів у контрольний час t_c , од.

$$M_c = \sum_{\mathfrak{Z}} \sum_{b=1}^B \max[1 - \Pi \tilde{M}_{\mathfrak{Z}}^{(b)}, 0] \quad (8)$$

де t_c – контрольний час.

Аналогічно перевіряється кількість одночасних прибуттів транспортних засобів маршрутів \mathfrak{R} .

Шаг (С), з яким здійснюється перевірка наявності одночасного прибуття, залежить від необхідного ступеню деталізації при моделюванні. Приймаємо значення C з урахуванням мінімального інтервалу між транспортними засобами, що прибувають на зупиночний пункт.

$$X = \begin{cases} 0, & \Delta M < C \\ 1, & \Delta M \geq C \end{cases} \quad (9)$$

де C – шаг, з яким здійснюється перевірка наявності одночасного прибуття.

$$X = \max[1 - \Pi \tilde{M}_{\mathfrak{Z}}^{(b)}, 0] \quad (10)$$

$$\Delta M = |\tilde{M}_{\text{пр}}^{(b)} - t_c|. \quad (11)$$

Момент відправлення b -го транспортного засобу маршруту \mathfrak{R} розраховується за наступною залежністю:

$$\tilde{M}_{\text{в}}^{(b)} = \tilde{M}_{\text{пр}}^{(b)} + \tilde{t}_{\text{пер}}^{(b)}. \quad (12)$$

Для визначення моменту відправлення d -го транспортного засобу маршруту \mathfrak{R} з ТПВ використовуємо аналогічну залежність.

Тривалість процесу пересадки складається з часу, витраченого на перехід та очікування. Витрати часу на очікування пересадки між маршрутами \mathfrak{Z} та \mathfrak{R} у ТПВ пропонується визначити як різницю моментів відправлення d -го транспортного засобу маршруту \mathfrak{R} та моменту прибуття b -го транспортного засобу маршруту \mathfrak{Z} , з урахуванням часу переходу між лініями маршрутів \mathfrak{Z} та \mathfrak{R} .

$$\tilde{t}_{\text{пер}} = \sum_{b=1}^B \sum_{d=1}^D [(\tilde{M}_{\text{в}}^{(d)} - (\tilde{M}_{\text{пр}}^{(b)} + \tilde{t}_{\text{пер}})) \cdot \tilde{Q}_{\text{п}}^{(bd)} \cdot P_{\text{ЗР}}], \quad (13)$$

де $\tilde{M}_{\text{в}}^{(d)}$ – момент відправлення d -го транспортного засобу маршруту \mathfrak{R} з ТПВ; $\tilde{t}_{\text{пер}}$ – час пере-

ходу між лініями маршрутів \mathfrak{Z} та \mathfrak{R} ; $\tilde{Q}_{\text{п}}^{(bd)}$ – кількість пасажирів, що здійснюють пересадку між транспортними засобами b, d маршрутів \mathfrak{Z} та \mathfrak{R} ; $P_{\text{ЗР}}$ – бінарна величина, що приймає значення 1 при можливості здійснення пересадки між транспортними засобами b, d маршрутів \mathfrak{Z} та \mathfrak{R} , у іншому випадку – 0.

Формування матриці пересадок вимагає аналізу ТПВ для виявлення можливих варіантів пересадки. У матриці заносимо номери маршрутів, що проходять через вузол. Можливі пересадки позначаємо літерами a_{ij} , індекси – номери строки та стовпця маршрутів, між якими відбувається пересадка. Якщо пересадка не відбувається, a_{ij} приймає значення 0. Приклад матриці пересадок для ТПВ представлений у табл. 1.

Таблиця 1 – Матриця визначення можливих пересадок між маршрутами \mathfrak{Z} та \mathfrak{R}

No маршруту	\mathfrak{Z}_1	\mathfrak{Z}_2	...	\mathfrak{Z}_N
\mathfrak{R}_1	a_{11}	a_{12}	...	a_{1N}
\mathfrak{R}_2	a_{21}	a_{22}	...	a_{2N}
...
\mathfrak{R}_K	a_{K1}	a_{K2}	...	a_{KN}

Для визначених маршрутів наступним кроком є визначення пар транспортних засобів, між якими здійснюється пересадка. Перевіряється умова відправлення d -го транспортного засобу маршруту \mathfrak{R} , пізніше моменту прибуття b -го транспортного засобу маршруту \mathfrak{Z} з урахуванням часу на перехід пасажирів між лініями маршрутів. Для забезпечення визначення єдиної пари різниця між відправленням та прибуттям транспортних засобів маршрутів \mathfrak{R} , \mathfrak{Z} не повинна перевищувати інтервал на маршруті \mathfrak{R} .

$$\begin{cases} \tilde{M}_{\text{пр}}^{(b)} + \tilde{t}_{\text{пер}} < \tilde{M}_{\text{в}}^{(d)}; \\ \tilde{M}_{\text{в}}^{(d)} - (\tilde{M}_{\text{пр}}^{(b)} + \tilde{t}_{\text{пер}}) < I_{\mathfrak{R}}. \end{cases} \quad (14)$$

Складаємо окремі матриці для кожної пари обраних маршрутів, номером строки та стовпця виступають порядкові номери транспортних засобів маршрутів \mathfrak{Z} та \mathfrak{R} . Якщо виконується умова (14) у клітинку, що знаходиться на перетині строки та стовпця певних b та d , вносимо 1, у іншому випадку 0, таким чином визначається значення бінарної величини $P_{\text{ЗР}}$.

Другою складовою загального часу очікування є час очікування пасажирів, для яких ТПВ є початковим зупиночним пунктом. Для кожного окремого пасажира час очікування складає різницю моменту його появи у ТПВ та моменту посадки у транспортний засіб:

$$\tilde{t}_{\text{оч}} = \tilde{M}_{\text{пос}} - \tilde{M}_{\text{п}}, \quad (15)$$

де $\tilde{t}_{\text{оч}}$ – час очікування 1 пасажира у ТПВ; $\tilde{M}_{\text{пос}}$ – момент посадки пасажира у транспортний засіб; $\tilde{M}_{\text{п}}$ – момент появи пасажира у ТПВ.

Наступним етапом є моделювання та встановлення функціональних залежностей критерію ефективності від вхідних параметрів, на основі яких визначаються оптимальні значення вхідних параметрів, що забезпечать ефективне функціонування ТПВ.

Висновки

У результаті проведених досліджень встановлено, що потенціал ТПВ для підвищення привабливості громадського транспорту, який є сталим засобом мобільності, обумовлює важливість їх вивчення. В якості керуючих параметрів виступає час відправлення з початкового зупиночного пункту, кількість місць обслуговування на зупиночному пункті та інтервал руху на маршрутах, що визначає ефективність функціонування ТПВ.

Формалізація внутрішніх та зовнішніх зв'язків дозволила виділити складові елементи та розробити математичну модель, що враховує стохастичну природу технологічних процесів та охоплює громадський транспорт, пасажирів, сукупність зупиночних пунктів.

Запропонована математична модель функціонування ТПВ МПТ у подальшому стане основою для проведення імітаційного моделювання, що дозволить сформулювати масив статистичних даних, на основі якого можливо отримати й оцінити функціональні залежності критерію ефективності від вхідних параметрів, та обрати оптимальні їх значення для забезпечення ефективного функціонування ТПВ.

Список літератури:

1. UNWCED: United Nations World Commission on Environment and Development. Our Common Future (Brundtland Report) [Text]: Oxford: University Press, 1987. Available at: <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf>.
2. Lélé, Sharachchandra M. Sustainable development: A critical review. [Text] / Sharachchandra M. Lélé // World Development. – 1991. – Vol. 19, Issue 6. – P. 607–621.
3. Липенков, А. В. Повышение эффективности функционирования городского пассажирского транспорта на основе управления пропускной способностью остановочных пунктов [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.10 / Липенков Александр Владимирович. – Нижний Новгород, 2015. – 154 с.
4. Димова, И. П. Повышение эффективности функционирования остановочных пунктов городского пассажирского транспорта и движения транспортных средств в зоне их влияния [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.10 / Димова Ирина Петровна. – Тюмень, 2009. – 167 с.
5. Кажаяв, А. А. Снижение конфликтных ситуаций на остановочных пунктах маршрутных сетей городского пассажирского транспорта [Текст] : автореф. дис. на соиск. научн. степени канд. техн. наук : спец. 05.22.01 «Транспортные и транспортно-технологические системы страны, её регионов и городов, организация производства на транспорте» / Кажаяв Андрей Александрович; МАДИ. – Москва, 2012. – 19 с.
6. Енин, Д. В. Модели и алгоритмы управления городскими пассажирскими перевозками (на примере г. Воронежа) [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.10 / Енин Дмитрий Владимирович. – Воронеж, 2004. – 200 с.
7. Корягин, М. Е. Оптимизация управления городскими пассажирскими перевозками на основе конфликтно-устойчивых

- решений [Текст] : дис. ... доктора техн. наук : 05.13.10 / Корягин Марк Евгеньевич. – Новокузнецк, 2011. – 345 с.
8. Шабалин, Б. А. Обеспечение надежности исполнения заданного расписанием режима движения автобусов городских маршрутов [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.10 / Шабалин Борис Аркадьевич. – Москва, 1984. – 134 с.
9. Журба, О. О. Формування моделі узгодження графіку підводу рухомого складу різних видів транспорту до залізничного вокзалу [Текст] / О. О. Журба // ДонІЗТ : зб. наук. праць. – 2010. – Вип. 22. – С. 62–68.
10. Poorjafari, V. A New Mathematical Programming Model for Transit Timetable Synchronization [Text] / V. Poorjafari, W.L. Yue, N. Holyoak // The 32nd Conference of Australian Institutes of Transport Research, University of New South Wales, Sydney, Feb 2014. Available at: <http://trid.trb.org/view.aspx?id=1309706>.
11. Shafahi, Y. A practical model for transfer optimization in a transit network: Model formulations and solutions [Text] / Y. Shafahi, A. Khani // Transportation Research Part A: Policy and Practice. – 2010. – Vol. 44. – Issue 6. – P. 377–389.

Bibliography (transliterated):

1. UNWCED: United Nations World Commission on Environment and Development (1987). Our Common Future (Brundtland Report). Oxford: Oxford University Press. Retrieved from <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf>.
2. Lélé, S. M. (1991). Sustainable development: A critical review. World development, 19(6), 607–621.
3. Lipenkov, A. V. (2015). Povyshenie jeffektivnosti funkcionirovaniya gorodskogo passazhirskogo transporta na osnove upravleniya propusknoj sposobnost'ju ostanovochnyh punktov [Efficiency improvement of urban passenger transport functioning on the basis of stopping points capacity]. Candidate's thesis. Nizhnij Novgorod, 154.
4. Dimova, I. P. (2009). Povyshenie jeffektivnosti funkcionirovaniya ostanovochnyh punktov gorodskogo passazhirskogo transporta i dvizheniya transportnyh sredstv v zone ih vlijanija [Efficiency improvement of stopping points functioning of urban passenger transport and vehicle traffic in their zone of influence]. Candidate's thesis. Tjumen', 167.
5. Kazhaev, A. A. (2012). Snizhenie konfliktnyh situacij na ostanovochnyh punktah marshrutnyh setej gorodskogo passazhirskogo transporta [Reducing conflicts at stopping points of urban passenger transport route networks]. Extended abstract of candidate's thesis. Moskva: MADI, 19.
6. Enin, D. V. (2004). Modeli i algoritmy upravlenija gorodskimi passazhirskimi perevozkami (na primere g. Voronezha) [Models and algorithms of urban passenger transportation management (on the Voronezh example)]. Candidate's thesis. Voronezh, 200.
7. Korjagin, M. E. (2011). Optimizacija upravlenija gorodskimi passazhirskimi perevozkami na osnove konfliktno-ustojchivyh reshenij [Optimization of urban passenger transport management on the basis of conflict-resistant solutions]. Doctor's thesis. Novokuzneck, 345.
8. Shabalin, B. A. (1984). Obespechenie nadezhnosti ispolnenija zadannogo raspisaniem rezhima dvizhenija avtobusov gorodskih marshrutov [Ensuring the reliability of the scheduled regime of urban route buses operation]. Candidate's thesis. Moskva, 134.
9. Zhurba, O. O. (2010). Formuvannia modeli uzgodzhennia hrifiku pidvodu rukhomoho skladu riznykh vydiv transportu do zaliznychnoho vokzalu [Development of a model of the schedule coordination of rolling stock of different transport modes arrival to a railway station]. DonIZT: zb. nauk. prats, 22, 62–68.
10. Poorjafari, V. A. (2014). New Mathematical Programming Model for Transit Timetable Synchronization. The 32nd Conference of Australian Institutes of Transport Research, University of New South Wales, Sydney, Retrieved from <http://trid.trb.org/view.aspx?id=1309706>.
11. Shafahi, Y. (2010). A practical model for transfer optimization in a transit network: Model formulations and solutions. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 44 (6), 377–389.

Надійшла (received) 07.03.2016

Формування математичної моделі функціонування транспортно-пересадочних вузлів міського пасажирського транспорту / В. О. Вдовиченко, Г. О. Самчук // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.56–61. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.

Формирование математической модели функционирования транспортно-пересадочных узлов городского пассажирского транспорта / В. А. Вдовиченко, А. А. Самчук // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.56–61. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.

Development of a mathematical model of public transport interchanges functioning/ V.O. Vdovychenko, G. O. Samchuk // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 17 (1189). – P.56–61. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Вдовиченко Володимир Олексійович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри транспортних технологій; вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна, 61002; тел.: (057) 707-37-20; e-mail: vval2301@gmail.com.

Вдовиченко Владимир Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, доцент кафедры транспортных технологий; ул. Ярослава Мудрого, 25, г. Харьков, Украина, 61002; тел.: (057) 707-37-20; e-mail: vval2301@gmail.com.

Vdovychenko Volodymyr – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Kharkiv National Automobile and Highway University, Associate Professor at the Department of Transport Technologies; st. Yaroslav Mydrogo, 25, Kharkiv, Ukraine, 61002; tel.: (057) 707-37-20; e-mail: vval2301@gmail.com.

Самчук Ганна Олександрівна – Харківський національний автомобільно-дорожній університет, аспірант кафедри транспортних технологій; вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна, 61002; тел.: (057) 707-37-20; e-mail: ganna.samchuk@gmail.com.

Самчук Анна Александровна – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, аспирант кафедры транспортных технологий; ул. Ярослава Мудрого, 25, г. Харьков, Украина, 61002; тел.: (057) 707-37-20; e-mail: ganna.samchuk@gmail.com.

Samchuk Ganna – Kharkiv National Automobile and Highway University, Post Graduate at the Department of Transport Technologies; st. Yaroslav Mydrogo, 25, Kharkiv, Ukraine, 61002

УДК 004.94; 519.876

Р. Ю. ЛОПАТКИН, С. А. ПЕТРОВ, С. Н. ИГНАТЕНКО, В. А. ИВАЩЕНКО

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

В работе рассматриваются фундаментальные аспекты применения имитационного моделирования в задачах автоматизации и управления техническими системами и комплексами, рассмотрены и проанализированы стандарты и существующие протоколы построения подобных систем. Исследован вопрос развития систем имитационного моделирования в разрезе развития науки в области синтеза информационных систем, структурного проектирования, рассматривается связь с системами искусственного интеллекта. Определены принципиальные характеристики систем имитационного моделирования а также обосновывается перспективность применения распределенных, масштабируемых систем на базе мульти-агентного подхода.

Ключевые слова: имитационное моделирование, мульти-агентные системы, моделирование управления, агентное моделирование, распределенные агентные системы.

В роботі розглядаються фундаментальні аспекти застосування імітаційного моделювання в задачах автоматизації і керування технічними системами і комплексами. Розглянуто та проаналізовано стандарти та протоколи побудови подібних систем. Досліджено питання розвитку систем імітаційного моделювання в розрізі розвитку науки в галузі синтезу інформаційних систем, структурного проектування та зв'язку з системами штучного інтелекту. Визначені принципові характеристики систем імітаційного моделювання а також обґрунтовується перспектива застосування розподілених систем на базі мульти-агентного підходу що масштабується.

Ключові слова: імітаційне моделювання, мульти-агентні системи, моделювання керування, агентне моделювання, розподілені агентні системи

The paper covered the fundamental simulation aspects for automation and control problems in technical systems and complexes. Standards and existing protocols were reviewed to building such systems. Development of the simulation were investigator in scope of information systems synthesis, structural design, considering the connection with artificial intelligence systems. Modern software frameworks and modeling problems classification were analysed in the paper in scope of building complex control systems. The major part in the paper show the advantages of using distributed approach for modeling using the self organised agents and tasks decomposition. Determined the basic characteristics of simulation systems and justified prospects of using the distributed, scalable systems based on multi-agent approach. As a conclusion we demonstrate the intuitive clue for solving different kind of many practical problems from wide range of science.

Keywords: simulation, multi-agent systems, management modeling, agent-based modeling, distributed agent systems.

Введение. Большинство реальных систем в окружающем нас мире настолько сложны, что построение чисто аналитических моделей для таких систем – сверхсложная, не окупающая усилий задача. Для моделирования таких систем уместно применить имитационное моделирование (ИМ), особенностью которого является описание модели, в большей степени, в виде алгоритмов взаимодействия составных её частей [1]. Отчасти такой подход чем-то схож с человеческим видением окружающего мира.

В данный момент ИМ, как научное направление бурно развивается благодаря необходимости, а также возможности его применения для решения сложных и больших задач. Возможность использования ИМ для решения таких задач обусловлена двумя основными факторами. Во-первых, это – резкий рост вычислительных мощностей благодаря технологическому прорыву в микро и нано электронике, а во-вторых, стремительное развитие мировой грид-инфраструктуры, технологий линий связи (таких, как спектральное уплотнение оптических каналов WDM [2]) и виртуальных организаций. В-третьих, помимо фундаментальных исследований, при моделировании сложных процессов в физике, генной инженерии, биологии, астрономии, актуальность ИМ определяется огромными потребностями прикладного характера. Это вопросы, связанные с прогнозированием поведения сверхсложных систем, таких как, прогнозирование погодных условий в масштабах отдельно взятой страны или всего земного шара, социальных процессов (динамика численности населения), экономических процессов развития отраслей, фондового рынка и т.д. Поэтому развитие данного направления представляется крайне важным для решения насущных научных и прикладных задач.

История моделей и методов имитационного моделирования. ИМ, как направление в науке, зародилось в 1950-х годах с появлением первых ЭВМ, и было впервые применено в оборонной промышленности [3]. Первые имитационные модели разрабатывались с использованием обычных языков программирования общего назначения, таких, как FORTRAN, и были предназначены для использования на больших универсальных ЭВМ – мейнфреймах (англ. Mainframes) [4]. К началу 1960-х были созданы первые подходы и первые специальные языки имитационного моделирования (например, SIMSCRIPT и GPSS) [5], что способствовало распространению использования ИМ не только в оборонной промышленности, но и в других отраслях, например, в производственной и финансовой. Широкое распространение и доступность персональных компьютеров в начале 1980-х стали новым этапом в развитии технологии ИМ, которая стала использоваться еще более широким кругом специалистов, были созданы новые языки ИМ, такие как SLAM и SIMAN [6], предназначенные для использования на персональных компьютерах.

В конце 1980-х – ранних 1990-х новые графические возможности персональных компьютеров позволили разработчикам программного обеспечения (ПО) создать графические инструменты разработки моделей и использовать анимацию в ИМ. Например, такие инструменты ИМ, как ProModel [7], Arena [8], и iThink [9],

обеспечили управляемый в режиме меню пользовательский интерфейс, визуальное интерактивное моделирование и впечатляющие по тем временам возможности анимации. Эти усовершенствования еще больше упростили разработку имитационных моделей и значительно повлияли на широкое использование ИМ.

Примерно в то же время в разработке ПО стали активно применяться объектно-ориентированные подходы и анализ. Это, в свою очередь, не могло не оказать влияния на ИМ по причине существования природной связи между объектно-ориентированным моделированием и имитационным моделированием. Тогда же был введен новый термин – объектно-ориентированное имитационное моделирование (англ. object-oriented simulation). Объектно-ориентированное программирование, как технология, обеспечило новый скачок в ИМ, т.к. теперь программисты могли использовать разработанные ранее библиотеки объектов и существенно повысить скорость и качество разработки ПО в области ИМ. На этом этапе развития были разработаны специализированные объектно-ориентированные языки имитационного моделирования, например, Simple++, OOSimL, Simgscript III [10]. Следует отметить, что у разработчиков, использующих эти языки, отпала необходимость в решении низкоуровневых задач при создании новых продуктов – вся необходимая логика уже содержалась в предоставляемых классах стандартных библиотек.

Параллельно, начиная с 1980-х годов, развитие сетевых технологий внесло свой вклад в развитие ИМ. Тогда же начались разработки распределенных систем ИМ, что подтолкнуло разработчиков к созданию новых стандартов, поскольку они были необходимы для корректного взаимодействия распределенных модулей. Разработки таких систем и стандартов не прекращаются до наших дней, а необходимость в них только растет. За последние 20-30 лет произошло еще одно качественное изменение в области ИМ. Был создан и устоялся новый подход в ИМ – мультиагентное (агентное) моделирование (АМ). В последнее время наблюдается тенденция в разработке систем ИМ, направленная на изменение их интерфейса с похожего на оболочку языка программирования к виду более понятному и удобному для пользователя. Это объясняется тем, что ИМ находит все более широкое применение в областях, далеких от компьютерных наук, и исследователи в этих областях, как правило, не владеют навыками программирования. Тем не менее, разработчики оставляют возможность написания частей модели на языке программирования, поскольку это позволяет обеспечить необходимую гибкость и охватить большее количество моделей.

Таким образом, ИМ, начав свое становление и развитие с середины XX века, вначале применялось для сравнительно небольшого спектра задач. Однако на данный момент методы и программные продукты ИМ используются практически во всех предметных областях, а исследования и разработки в этом направлении продолжают.

Задачи имитационного моделирования. ИМ широко применяется в самых различных отраслях человеческой деятельности. Примерами могут послужить: научные исследования в естественных и гума-

нитарных науках [11, 12], исследования в оборонной промышленности [13], проектирование непроизводственных и производственных систем [14, 15], систем массового обслуживания [16], логистических систем [17], создание тренажеров для специалистов различных отраслей [18], а также многие другие. Каждая из перечисленных категорий включает множество различных реальных систем. Например, теория систем массового обслуживания включает такие системы, в которых могут присутствовать очереди, конкуренция за ресурсы, отказы в обслуживании в случае, если необходимый ресурс занят или отсутствует. Примером таких систем могут послужить: магазины, распределенные вычислительные системы, компьютерные сети и так далее. Такое обилие моделей можно классифицировать с точки зрения математического моделирования.

В ИМ устоялось три основных подхода [22]: системная динамика, дискретно-событийное моделирование и агентное моделирование, которые перечислены в хронологическом порядке их создания. Каждый из подходов имеет свою терминологию, свои методологии и стандарты. Современные программные продукты ИМ разрабатываются на основе одного или одновременно нескольких из этих подходов.

Системную динамику [23, 24] основал Джей Форрестер в 1950-х годах. Этот подход был создан раньше остальных в ИМ и из названия можно понять, что используется он, в большей степени, для исследования динамических систем. Взгляд на исследуемые системы с точки зрения системной динамики называют «системным мышлением» [25].

В системной динамике существует своя устоявшаяся терминология. Так, например, модели в системной динамике задаются с помощью накопителей (агрегатов) и потоков между ними, а также правил (обратных связей) и задержек [22, 26]. Накопитель (агрегат) – переменная, которая изменяется во времени и хранит в себе информацию о количественной характеристике моделируемой системы. Поток характеризуется его величиной и влияет на скорость этих изменений, а обратные связи могут быть как положительными, так и отрицательными, и вместе с задержками влияют на величину потока. С помощью системной динамики строят экономические модели (модели бизнес-процессов, развития города, производства), динамики популяции, экологии, развития эпидемии и множество других подобных моделей.

Дискретно-событийное моделирование предложено профессором Джеффри Гордоном в 1960х годах. Его особенность также подчеркнута в его названии и состоит в том, что функционирование системы представляется как хронологическая последовательность событий [27]. Поэтому один из центральных технических вопросов в программировании дискретно-событийных моделей – написание планировщика, который извлекает из списка запланированных событий событие с минимальной временной меткой и выполняет его, а также добавляет в этот список новые запланированные события. Этот подход очень развит и применяется для исследования широкого спектра имитационных моделей.

Агентное моделирование последнее время становится все более популярным [28]. В этом подходе исходными данными для модели является информация о взаимодействии ее составных частей (агентов) между собой и окружающим миром, а на выходе исследователь такой модели получает информацию о глобальных закономерностях, ей присущих. Под агентом понимается сущность, которая способна воспринимать воздействия внешнего мира и сама оказывать воздействия на него [28]. Кроме того, среди прочих характеристик агента подразумевается его способность самостоятельно функционировать, адаптироваться к изменениям окружающего мира, выполнять поставленные перед ним цели и т.д. Этот подход в ИМ тесно переплетается с искусственным интеллектом, и поэтому очень часто в литературе употребляется термин «интеллектуальный агент» вместо термина «агент». «Интеллект» агента может варьироваться от простого рефлекторного ответа на влияния внешнего мира до способности обучаться. Как правило, реальные системы невозможно исследовать с помощью одного агента – такой подход не обеспечит необходимый уровень конкретизации, поэтому необходимо использовать значительное количество агентов, взаимодействующих друг с другом. По этой причине системы моделирования, использующие агентный подход, часто называют мультиагентными системами (МАС) [29].

На сегодняшний день, АМ – мощная технология, предназначенная для исследования сложных систем. С термином «агентное моделирование» тесно связан термин «агентно-ориентированное программирование». Успех АМ в значительной степени принесло свойство агентных моделей охватывают системы с различными уровнями абстракции (уровень абстракции выбирается от самого высокого до низкого на усмотрение исследователя системы). Также в одной агентной модели можно различным компонентам определять различные уровни абстракции. Например, один агент может представлять отдельного человека, а другой – целое отделение предприятия.

Таким образом, рассмотрев основные подходы в имитационном моделировании, можно сделать вывод, что каждый из них предназначен для решения своего круга задач. Однако для исследований с помощью ИМ необходимо, но недостаточно знать основные подходы. Для своей работы исследователь дополнительно должен знать и использовать специализированные стандарты, определенные методологии, концептуальные фреймверки, специализированные языки программирования и так далее. Уже существует значительное количество подобных решений, которые тяжело охватить в рамках одной публикации. Поэтому дальнейшее рассмотрение будем проводить с уклоном на агентно-ориентированные решения, которые основаны, как нам кажется, на наиболее перспективных идеях с точки зрения реализации их на распределенных вычислительных сетях типа GRID.

Медународные стандарты систем ИМ. С развитием ИМ возникла необходимость решать сложные задачи, связанные с разработкой специальных программных средств. В частности это: повторное использование кода существующих моделей, вопросы их взаимодействия (причем они могут быть распо-

жены как на одном компьютере, так и на различных компьютерах в сети) и т.д.

В начале 80-х годов с развитием компьютерной техники возникла возможность создавать распределенные системы имитационного моделирования, следовательно и необходимость стандартизировать разработку таких систем, которые уже не ограничиваются отдельной вычислительной машиной, а функционируют в рамках вычислительных сетей. Поэтому стал вопрос осуществления взаимодействия уже существующих моделей по некоторым правилам. Это был новый качественный этап в развитии систем имитационного моделирования. Самые известные стандарты в распределенном имитационном моделировании: High Level Architecture, Distributed Interactive Simulation, Common Image Generator Interface [30] и другие.

High Level Architecture. High Level Architecture (HLA) (IEEE 1516) [31] – это стандарт архитектуры распределенных систем имитационного моделирования, который первоначально разрабатывался для военных потребностей. Его разработчик – Department of Defense, Defense Modeling and Simulation Office (DoD DMSO). HLA стандарт был разработан, чтобы способствовать функциональной совместимости и осуществлению взаимодействия различных составляющих военных систем: имитационных моделей, датчиков тренажеров, датчиков на реальной боевой технике. Благодаря HLA, имитационные модели могут взаимодействовать друг с другом, будучи используемыми на различных компьютерах, не зависимо от компьютерных платформ. Коммуникация между моделями осуществляется с помощью специально разработанной библиотеки RTI (Run-Time Infrastructure). Существуют версии RTI, написанные на языке программирования C++ или Java, но она также может быть использована при написании программ и на других языках программирования.

В стандарте HLA существует своя терминология: федератом называется отдельная составляющая всей системы (например, имитационная программа, отдельный датчик, тренажер и т.д.). Объединение федератов – это федерация. Можно провести аналогию данного стандарта с агентным подходом: федерат можно сопоставить понятию агента, а федерацию – мультиагентной системе.

Distributed Interactive Simulation. Стандарт Distributed Interactive Simulation (DIS) (IEEE 1278) [32] так же, как и HLA, первоначально проектировался для военных целей. Но исторически стандарт DIS был разработан раньше, чем HLA. DIS – это открытый стандарт для сопровождения взаимодействия моделей, существующих в режиме реального времени, на распределенных системах. Из-за того, что разные имитационные программы написаны на разных языках или диалектах одного языка, протокол DIS был разработан, чтобы способствовать взаимодействию различных участников сети. В отличие от HLA, этот стандарт определяет только стандарт информационных сообщений имитационных приложений и не затрагивает внутреннего представления моделей.

Протокол DIS гарантирует безопасность и точность передачи сообщений между множеством имитационных программ, объединенных в одну сеть. DIS кодирует информацию имитационных программ в форматированные сообщения, которые называются Protocol Data Units (PDUs), которыми обмениваются хосты с использованием существующих протоколов транспортного уровня, таких как User Datagram Protocol (UDP). Имитационное приложение должно поддерживать определенный тип PDU, чтобы обеспечить отправку/прием этой информации другому приложению.

тационных программ, объединенных в одну сеть. DIS кодирует информацию имитационных программ в форматированные сообщения, которые называются Protocol Data Units (PDUs), которыми обмениваются хосты с использованием существующих протоколов транспортного уровня, таких как User Datagram Protocol (UDP). Имитационное приложение должно поддерживать определенный тип PDU, чтобы обеспечить отправку/прием этой информации другому приложению.

Common Image Generator Interface. Стандарт Common Image Generator Interface (CIGI) [33] пока не является общепризнанным мировым стандартом, но, тем не менее, на него стоит обратить внимание. Этот стандарт зародился в компании Boeing, которая уже несколько десятков лет успешно применяет имитационное моделирование для создания тренажеров летательных аппаратов.

Это открытый стандарт и предназначен он для трансляции информации от сервера с программой имитации к устройству отображения информации и последующей визуализации. Архитектурно он представляет собой протокол передачи пакетов и API, который эти пакеты формирует со стороны сервера, принимает и распаковывает со стороны устройства визуализации. В своей основе он также как и DIS использует протокол UDP.

The Foundation for Intelligent Physical Agents. Дальнейшее развитие метода имитационного моделирования потребовало создание новых стандартов. В 2005 году организацией The Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA) [34–36] был принят ряд стандартов, касающихся самого нового и перспективного подхода – агентного моделирования. Они предназначены для продвижения агентно-ориентированной технологии и взаимодействия ее с другими технологиями. Эти стандарты регламентируют разработку как отдельных агентов, так и мультиагентных систем в целом. В частности, эти стандарты, так же, как HLA и DIS, регламентируют правила создания распределенных мультиагентных систем.

Методологии проектирования систем ИМ. Так как задача проектирования сложных систем далеко не тривиальна, возникла необходимость в создании методологий для этих целей. Здесь под термином «методология», как и в объектно-ориентированном программировании, имеется в виду последовательность действий при разработке архитектуры программы. Самые известные методологии проектирования агентно-ориентированных систем: Gaia, Agent UML, MaSE, MESSAGE, Tropos, Prometheus [37].

Gaia. Методология Gaia [38] была разработана Михаэлем Вулдриджем (Michael Wooldridge), Франко Замбонелли (Franco Zambonelli) и Николасом Дженнингсом (Nicholas Jennings). Она представляет собой инструмент для проектирования архитектуры мультиагентных систем. Gaia заимствует ряд принципов и понятий из объектно-ориентированного анализа и синтеза. Тем не менее, она не является попыткой применить объектно-ориентированный подход для создания мультиагентных систем, а предоставляет разработчику принципиально новый инструмент. И поэтому она позволяет решать такие задачи разработ-

ки агентно-ориентированных систем, как охват гибкости агентов, автономное поведение и решение задач, взаимодействие агентов и так далее, что не предусматривает объектно-ориентированный анализ и синтез.

Gaia рассматривает MAC как концептуальную организацию, состоящую из взаимодействующих агентов с различными ролями. Один агент может агрегировать в себе несколько ролей. В соответствии идеологии Gaia, агенты предоставляют сервисы, которые соответствуют их ролям. Процесс разработки в Gaia состоит из двух этапов: анализа (analysis) и проектирования (design). Проходя эти этапы, разработчик последовательно переходит от абстрактных сущностей к более конкретным. К недостаткам Gaia можно отнести то, что она накладывает ряд существенных ограничений на разрабатываемые модели, что значительно сужает класс мультиагентных систем, которые могут быть разработаны с ее применением.

Agent UML. Все более широкое применение в исследовании и разработке мультиагентных систем приобретает язык графической объектной разработки приложений – UML [39] (Unified Modeling Language – Унифицированный Язык Моделирования). Язык UML является языком общего назначения, поэтому его можно применять для решения достаточно широкого спектра задач. Например, названный выше стандарт FIPA использует UML.

Методология, использующая UML для разработки архитектуры мультиагентных систем, называется Agent UML (AUML) [40]. Поскольку UML используется для объектно-ориентированной разработки, то данная методология рассматривает агентно-ориентированный подход как расширение объектно-ориентированного. Разработчики Agent UML максимально используют функциональность UML и разрабатывают только те нововведения, которые никак нельзя заменить существующими в UML возможностями. До недавнего времени разработчики вкладывали значительные усилия для активного развития этой методологии, но сейчас ее развитие приостановлено, поскольку в нем нет необходимости – требуемая функциональность уже частично или полностью реализована в последних версиях UML. Например, версия UML 2.1 была выпущена с множеством функциональных возможностей, которые предполагалось осуществить разработчиками AUML. Также существуют попытки расширить другие методологии, в том числе и методологию Gaia с использованием UML [41]. Выше были рассмотрены две наиболее перспективные, по нашему мнению, методологии построения систем ИМ. С остальными методологиями можно познакомиться в источниках [42–44].

Программные продукты. На основе рассмотренных выше подходов, стандартов и методологий создаются программные продукты для проведения исследований с помощью имитационного моделирования.

На сегодня существует множество различных программных продуктов для работы с имитационными моделями – систем имитационного моделирования, готовых фреймворков для создания моделей и самих систем моделирования, специальных библиотек

для различных языков программирования, библиотек и надстроек для математических пакетов и т.д. Они подразделяются на специализированные и общего назначения, ориентированные на последовательные или параллельные вычисления, поддерживающие различные подходы и различные алгоритмы продвижения времени.

Проанализируем наиболее известные из существующих современных программных продуктов. Анализ начнем с агентно-ориентированных решений, а закончим наиболее популярными продуктами, использующими другие подходы – GPSS World, AnyLogic, Simulink.

NetLogo [45] – свободно распространяемое кроссплатформенное окружение для программирования мультиагентных систем. Позволяет создавать распределенные решения, путем взаимодействия моделей в сети через использование технологии [HubNet](#) [46]. Ее разработал Uri Wilensky в 1999 году. На сегодняшний день работу над этим фреймворком продолжают в центре The Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling. NetLogo применяется в основном для исследования в естественных и социальных науках [47]. К преимуществам NetLogo можно отнести: кроссплатформенность, высокую функциональность моделей, наличие мощных инструментов визуализации, возможность использования в Web, а также взаимодействия моделей по сети, наличие специального инструмента для сбора статистических данных о тестировании модели с различными значениями параметров.

Кроссплатформенность обеспечивается за счет того, что среда NetLogo написана на языке Java. Поэтому ее можно использовать в различных операционных системах: Mac, Windows, Linux и т.д.

NetLogo использует специальный язык программирования, что в свою очередь обеспечивает широкую функциональность моделей. Кроме того, этот язык специализирован для создания агентных моделей и содержит большую библиотеку примитивов, что ускоряет разработку моделей. Но, кроме того, NetLogo имеет встроенный редактор интерфейса моделей.

VisualBots [48] – бесплатная библиотека для Visual Basic, предназначенная для создания визуальных мультиагентных систем. Она написана специально для использования в Microsoft Excel, что позволяет использовать функциональность этого приложения. Содержит обширный набор примеров моделей. Это в свою очередь позволяет достаточно быстро научиться создавать свои собственные модели.

Несомненным преимуществом рассматриваемой библиотеки является продуманный и удобный графический пользовательский интерфейс для запуска моделей, созданных на ее основе. Она позволяет создавать обширные объектные модели с большими графическими возможностями, а также управлять группами агентов и содержит алгоритмы быстрого поиска соседних агентов. Особенность VisualBots в том, что данная разработка предназначена для построения и исследования визуальных моделей. Это значительно сужает количество возможных моделей, что можно отнести к недостаткам данной разработки.

MASON [49] представляє собою Java-бібліотеку для розробки та моделювання мультиагентних систем і повністю підтримує мову Java, починаючи з версії 1.3 і вище. Програми написані з використанням даної бібліотеки мобільні за рахунок використання мови Java, а також порівняно невеликого розміру. Основними перевагами MASON можна назвати кроссплатформеність і наявність потужних інструментів візуалізації, яка може бути додана, видалена або змінена в будь-який момент часу. Підтримується двохмерна і трьохмерна візуалізація. Крім того, існує можливість зберігати зображення, відео процесу імітації, графіки та потоки вихідних даних.

REPAST. Бібліотека REPAST (Recursive Porus Agent Simulation Toolkit) [50] представляє собою набір інструментів для створення моделей мультиагентних систем. Цей фреймворк – безкоштовний і відкритий проєкт. Більш ранні версії повністю підтримували мови програмування Java та C#. Також моделі Repast можна розробляти на різних мовах, включаючи: C++, Visual Basic.Net, Lisp, Prolog, та Python.

Остання версія включає в себе створення гібридних моделей з використанням мови програмування Java [51], Groovy [52] та блок-схем моделей, має зручний користувацький інтерфейс, а також потужну систему візуалізації, яка дозволяє легко створювати та візуалізувати 2D та 3D моделі.

В даній середі інтегровано обширне количество стандартних бібліотек, наприклад: бібліотека Weka [53], призначена для отримання нових знань, використовуючи алгоритми машинного навчання; бібліотеки для генетичних алгоритмів, нейронних мереж; методи регресії; бібліотеки генерації випадкових чисел, та бібліотеки спеціалізованої математики. Крім переваг REPAST можна віднести: підтримується запис та вилучення результатів експериментів з XML-файлів, текстових файлів та бази даних; повний багатопотоковий дискретно-подієвий планировщик; автоматизований фреймворк моделювання з використанням методу Монте-Карло, який підтримує роботу з кількома моделями одночасно та оптимізацію результатів; повністю об'єктно-орієнтована середа. Також REPAST містить вбудовані інструменти для інтеграції зовнішніх моделей. Доступні версії REPAST для всіх популярних платформ, включаючи Windows, Mac OS, Linux.

Java Agent Development Framework (JADE) [54] – Java-бібліотека для створення розподілених мультиагентних систем. Найважливішою перевагою JADE – це те, що створювані моделі відповідають розглянутому вище стандарту FIPA (The Foundation for Intelligent Physical Agents). Оскільки JADE розроблена з використанням мови Java, то вона успадковує від неї всі переваги та недоліки.

Розглянуті вище програмні засоби в основному орієнтовані на використання АМ та відповідні задачі. Однак достатньо широкий

клас задач ними не вирішується, тому слід звернути увагу на інше програмне забезпечення, що використовує інші підходи.

GPSS World. В основу GPSS World покладено мову GPSS (General Purpose System Simulation – цілеспрямована система моделювання), яку розробив співробітник фірми IBM професором Джефрі Гордоном в 1961 році, засновником дискретно-подієвого підходу в імітаційному моделюванні [55]. GPSS World – система загального призначення, яку можна використовувати для вирішення широкого спектра задач, підтримує як неперервні так і дискретні моделі. В ній існує можливість моделювати непродуктивні, продуктивні системи, системи масового обслуговування. Особливістю GPSS World є те, що для її використання необхідно вивчити спеціальну мову програмування.

AnyLogic. Розробчик – компанія XJ Technologies. AnyLogic є середою імітаційного моделювання загального призначення та підтримує розробку великої кількості типів моделей, а також всі три основні підходи, що існують в імітаційному моделюванні. Дозволяє будувати гібридні моделі з одночасним використанням кількох підходів. Система має графічний інтерфейс користувача, але для забезпечення додаткової гнучкості розробляються моделі, AnyLogic дозволяє додатково використовувати мову програмування Java для створення моделей.

SIMULINK. Деякі розробники програмного забезпечення пішли шляхом створення інструментів (бібліотек) імітаційного моделювання, які включаються в прикладні математичні пакети. Таким прикладом може послужити середою візуального моделювання SIMULINK, яке включено в стандартний набір математичного пакета MATLAB [56].

Розподілене мультиагентне моделювання. Багато моделей імітаційного моделювання своєю природою досить добре підходять для паралельних обчислень. В більшій мірі це можна сказати про мультиагентні, а також дискретно-подієві моделі. Даний питання стає важливим, оскільки з допомогою мультиагентних моделей можна досліджувати складні глобальні системи, які можуть включати в себе від кількох тисяч до кількох мільйонів агентів, що вимагає значних обчислювальних ресурсів. Тому великомасштабний імітаційний експеримент на локальній однопроцесорній обчислювальній машині займе неприпустимо довгий час. Або ж проведення такого експерименту взагалі буде неможливим через недостатність пам'яті локальної обчислювальної машини. Отже, виникає необхідність використання обчислювальних архітектур, які дозволяють привертати значні кількості різних ресурсів (обчислювальні ресурси, пам'ять і т.д.). З іншої сторони, перед розробником системи мультиагентного моделювання, орієнтованої на паралельні та розподілені обчислення, виникають додаткові задачі, які він повинен вирішити. Сюди можна віднести, наприклад, синхронізацію модельного часу [57], дина-

мическое распределение ресурсов и так далее. Grid-технология позволяет освободить разработчика если не от всех, то от большинства из этих задач посредством использования middleware [58]. Уже одно это обстоятельство делает распределенное мультиагентное моделирование на Grid более привлекательным, чем использование других вычислительных архитектур. Кроме того, Grid-технологии позволяют использовать значительное количество ресурсов для проведения эксперимента. По этим причинам все большей актуальности и внимания среди исследователей набирает вопрос мультиагентного моделирования именно на Grid-системах. Из рассмотренных выше существующих решений распределенные мультиагентные системы позволяют создавать: NetLogo, Mason, JADE, но они не ориентированы на Grid. К современным распределенным мультиагентным системам имитации, как и к распределенным системам имитации в целом, выдвигаются требования гибкости, прозрачности, масштабируемости [58].

Все перечисленные требования можно осуществить только при условии правильного выбора архитектуры системы моделирования. Как показывает практика, в большинстве случаев наиболее разумная общая архитектура систем моделирования на Grid следующая:

1. В основе системы лежит Grid middleware, предоставляющий свои сервисы.
2. Над первым уровнем находится имитационный «движок», который предоставляет все необходимые сервисы следующему уровню (например, мониторинг состояния агентов, синхронизация времени и т. д.)
3. Самый верхний уровень – прикладной, который представляет собой конкретные имитационные программы (эксперименты), использующие сервисы движка.

Существует два пути реализации первого уровня:

1. Использование уже существующего Grid middleware.
2. Создание собственного Grid middleware специально для этих целей.

В данном случае архитектура приложения является сервисно-ориентированной (англ. *SOA, service-oriented architecture*), поскольку каждый уровень использует сервисы нижележащего уровня, а пользователь использует сервисы самого верхнего уровня [59]. Использование этой архитектуры дает следующие основные преимущества:

- улучшение понимания структуры приложения;
- упрощение взаимодействия его составляющих частей;
- возможность создания кроссплатформенных приложений;
- повышение масштабируемости и повторного использования кода разрабатываемой системы.

Следует отметить, что использование именно сервисно-ориентированной архитектуры естественным образом подходит для мультиагентного моделирования и отображено в существующих стандартах и методологиях. Например, рассмотренная выше методология разработки мультиагентных систем Gaia предполагает, что каждый агент может как использо-

вать сервисы других агентов, так и самостоятельно предоставлять эти сервисы.

Попробуем классифицировать существующие концепты инструментариев для мультиагентного моделирования на Grid.

Первая группа. Было предпринято значительное количество попыток использовать стандарт HLA для создания систем мультиагентного моделирования на Grid путем взаимодействия различных моделей согласно этому стандарту. В таком случае особенностью разрабатываемых систем можно считать строгую иерархическую древовидную модель, а HLA можно рассматривать как централизованный механизм координации распределенных ресурсов моделирования. Самым известным из подобного решения можно назвать HLA_Grid_RePast. Система разработана на основе двух независимых платформ: HLA_Grid и HLA_RePast. Первая предназначена для поддержки стандарта HLA на Grid, вторая – для распределенного мультиагентного моделирования путем взаимодействия моделей в соответствии со стандартом HLA. Так же известны: XMSF, HLA+Open GIS Consortium (OGC), HLA-based Interactive Simulation on the Grid, IDSim. Использует Globus Toolkit, SO-XMSSEA.

Вторая группа. Есть попытки расширения обычных (нераспределенных) систем мультиагентного моделирования для использования на Grid. Сюда можно отнести упомянутый выше HLA_Grid_RePast, а также Distributed GenSim и MACE-3J. Например, MACE-3J разворачивается с использованием Globus Toolkit 3 (GT3).

Третья группа. Также существуют попытки адаптации под Grid систем для распределенного имитационного моделирования, не предназначенных для Grid изначально. Автор Iskra предложил Time Warp Simulation Kernel – средство, которое позволяет работать в Grid-среде существующим системам моделирования с использованием оптимистического алгоритма продвижения времени.

Четвертая группа. Системы, ориентированные на движок продвижения времени. Они реализованы с использованием классических алгоритмов продвижения времени в распределенном имитационном моделировании (консервативный и оптимистический алгоритм). Архитектура систем этой группы может значительно отличаться от описанной выше. Например, в JAMES использован явно централизованный событийно-ориентированный подход, а MPADES использует консервативный алгоритм продвижения времени с централизованной моделью среды.

Пятая группа (остальные). **Large Scale Multiagent Simulation on the Grid** (автор Ingo J. Timm). Использует технологию P2P-Grid, реализованную посредством проекта JXTA. JXTA содержит стек XML-ориентированных протоколов для взаимодействия по принципу P2P (peer-to-peer, «равный к равному»). Ядро JXTA реализует сервисы Grid, такие как поиск, индексация, группировка и безопасность. JXTA не зависит от нижележащих протоколов транспортного уровня и реализует необходимую для Grid масштабируемость и децентрализацию. На прикладном уровне в этой системе используется JADE.

Выводы. В настоящее время в развитии систем имитационного моделирования продолжают тенденции использования распределенной архитектуры, разработки графических инструментов для создания имитационных моделей, внедрения мощных инструментов визуализации имитационных экспериментов. Создаются новые специализированные языки программирования (например, агентно-ориентированный язык программирования Axum [60], который разрабатывается в лаборатории DevLabs корпорации Microsoft). Также продолжают теоретические исследования в этой области, развитие существующих и создание новых методологий и стандартов. Это закономерно, поскольку имитационное моделирование уже давно подтвердило свою эффективность в качестве мощного инструмента для исследования сложных систем. Тем не менее, еще остается множество нерешенных задач и проблем.

Как показывает практика, современная среда распределенного мультиагентного моделирования для научных исследований должна соответствовать следующим требованиям: наглядность и простота задания агентов; масштабируемость – ограничения, накладываемые на модели (например, максимально допустимое количество агентов в модели) должны в большей степени определяться только возможностями аппаратного обеспечения; при разработке модели пользователь не должен решать концептуальные проблемы такие, как синхронизация времени, обмен сообщениями между агентами, функционирование окружающего мира и т.д.; соответствие современным понятиям об архитектуре системы (модульность, сервисно-ориентированность и т.д.); возможность дальнейшего усовершенствования; ориентация на Grid, как на наиболее мощный и доступный инструмент распределенных вычислений.

Проведенный анализ показал, что среди существующих решений нет таких, которые в полной мере удовлетворяли бы данную потребность. Это позволяет сделать вывод, что в настоящее время существует необходимость в создании масштабируемого высокоуровневого инструмента мультиагентного моделирования, обладающего мощным графическим интерфейсом для создания моделей и визуализации процесса и результатов моделирования. Данный инструмент мог бы успешно применяться при решении большого количества научных и прикладных задач высокой степени сложности, состоящих из большого количества компонентов, связи между которыми не являются очевидными, а порой и непредсказуемыми.

Список литературы:

1. *Лычкина, Н. Н.* Имитационное моделирование экономических процессов : Учеб. пособие [Текст] / Под. ред. В. В. Година. – М.: Академия ИТ, 2005. – 165 с.
2. *Keiser, G. E.* A Review of WDM Technology and Applications [Text] / *G. E. Keiser* // Opt. Fiber Technol. – 1999. – Vol 5 (1), 3.
3. *Harrington, H. J.* Simulation modeling methods. To Reduce Risks and Increase Performance [Text] / *H. J. Harrington* // McGraw-Hill Professional, 2000. – 379 p.
4. Mainframe computer – Wikipedia, the free encyclopedia [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://en.wikipedia.org/wiki/Mainframe_computer. – Загл. с экрана.
5. *Mikihiko, O.* Simulation engineering [Text] / *O. Mikihiko* // IOS Press Amsterdam, 1998. – 190 p.
6. *Fishman, G. S.* Discrete-event simulation: modeling, programming, and analysis [Text] / *G. S. Fishman* // Springer, 2001. – 537 p.
7. Decision Making Tools and Techniques – ProModel [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.promodel.com/>. – Загл. с экрана.
8. Arena Portal: Products [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.arenasimulation.com/Products_Products.aspx. – Загл. с экрана.
9. Isee systems – Ithink Modeling & Simulation Software for Business [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.iseesystems.com/software/Business/ithinkSoftware.aspx>. – Загл. с экрана.
10. *Garrido, J. M.* Object Oriented Simulation: A Modeling and Programming Perspective [Text] / *J. M. Garrido* // Springer, 2009. – 449 p.
11. *Heermann, D. W.* Computer Simulation Methods in Theoretical Physics [Text] / *D. W. Heermann* // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1990. – 155 p.
12. *Hartmann, S.* The World as a Process: Simulations in the Natural and Social Sciences [Text] / *S. Hartmann* // Modelling and Simulation in the Social Sciences from the Philosophy of Science Point of View, Theory and Decision Library. – Dordrecht: Kluwer, 1996. – P. 77–100.
13. Introduction to Military Training Simulation: A Guide for Discrete Event Simulationists [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.modelbenders.com/papers/mil4des.html>. – Загл. с экрана.
14. *Miller, S.* Introduction to manufacturing simulation/ Scott Miller, Dennis Pegden [Text] / *S. Miller* // Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference, 2000.
15. *Banks, J.* Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice, vol. 57 [Text] / *J. Banks* // Wiley-IEEE, 1998. – 849 p.
16. *Томашевский, В.* Имитационное моделирование в среде GPSS [Текст] / *Томашевский В., Жданова Е.* – М.: Бестселлер, 2003. – 416 с.
17. *Graudina, V.* Technologies and multi-agent system architectures for transportation and logistics support Vita Graudina, [Text] / *V. Graudina, J. Grundspenkis* // International Conference on Computer Systems and Technologies - CompSysTech, Varna, Bulgaria, 2005.
18. *Воронцов, К. В.* Имитационное моделирование торгов: новая технология биржевых тренажеров [Электронный ресурс] / *К. В. Воронцов, С. Б. Пиеничников* // Индикатор – 2002. – No2 (42) – Режим доступа: http://www.forecsys.com/ru/site/about/media_coverage/exchange_simulator/. – Заголовок с экрана
19. *Шеннон, П.* Имитационное моделирование систем: искусство и наука [Текст] / *П. Шеннон*. – М.: Мир, 1978.
20. *Карпов, Ю.* Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 [Текст] / *Ю. Карпов*. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 400с.
21. *Ljung, L.* Modeling of dynamic systems [Text] / *L. Ljung, T. Glad* // Prentice Hall PTR, 1994. – 368 p.
22. *Борищев, А. А.* От системной динамики и традиционного ИМ – к практическим агентным моделям: причины, технология, инструменты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gpss.ru/>;
23. *Forrester, J. W.* Principles of systems [Text] / *J. W. Forrester* // Wright-Allen Press Inc., 1968. – 387 p.
24. *Forrester, J.* Industrial Dynamics – A Major Breakthrough for Decision Makers [Text] / *J. Forrester* // Harvard Business Review. – 1958. – Vol. 36, No. 4. – P. 37–66.
25. *Richmond, B.* System Dynamics/Systems Thinking: Let's Just Get On With It: International Systems Dynamics Conference in Sterling, Scotland. [Text] / *B. Richmond* // Springer, 1994. – 215 p.
26. *Ruth, M.* Dynamic modeling for business management: an introduction [Text] / *M. Ruth, B. Hannon* // Springer, 2003 – 388 p.
27. *Banks, J.* Discrete-Event System Simulation [Text] / *Jerry Banks, John S. Carson, Barry L. Nelson, David M. Nicol* // Prentice Hall, 2009. – 622 p.
28. *Стюарт, Р.* Искусственный интеллект: современный подход [Текст] / *Рассел Стюарт, Нораг Пумер, 2-е изд.*: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1408 с.
29. *Shoham, Y.* Multiagent systems: algorithmic, game-theoretic, and logical foundations [Text] / *Yoav Shoham, Kevin Leyton-Brown*. – Cambridge University Press, 2008. – 483 p.
30. Industry Standards [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.mak.com/community/standards.php>. – Загл. с экрана.

31. Kuhl, F. Creating Computer Simulation Systems: An Introduction to the High Level Architecture [Text] / Frederick Kuhl, Richard Weatherly, Judith Dahmann. – Prentice Hall PTR, 1999. – 224 p.
32. DIANE Publishing Company. Distributed Interactive Simulation of Combat [Text]: DIANE Publishing Company. – DIANE Publishing, 1996. – 177 p.
33. CIGI: Overview [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://cigi.sourceforge.net/overview.php>. – Загл. с экрана.
34. The Foundation for Intelligent Physical Agents [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://fipa.org/>. – Загл. с экрана.
35. Subrahmanian, V. S. Heterogeneous agent systems [Text] / V. S. Subrahmanian // MIT Press, 2000. – 580 p.
36. Standard Status Specifications [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://fipa.org/repository/standardspecs.html>. – Загл. с экрана.
37. Давыдов, А. А. О Компьютационной теории социальных агентов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.isras.ru/files/File/Socis/1-6-2006/davydov_agents.pdf.
38. Zambonelli F. Developing MAS: The Gaia Methodology [Text] / F. Zambonelli, N. Jennings, M. Wooldridge / ACM. – 2003. – Vol. 12, No 3.
39. Object Management Group – UML [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://uml.org/>. – Загл. с экрана.
40. Agent UML [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.auml.org/>. – Загл. с экрана.
41. Juan, C. Garcia-Ojeda. Extending the Gaia Methodology with Agent-UML [Text] / Juan C. Garcia-Ojeda, Jose de J. Perez-Alcazar, Alvaro E. Arenas / ACM. – 2004. – Vol. 3. – P. 1456–1457.
42. Schreiber, Th. CommonKADS: A comprehensive methodology for KBS development [Text] / A. Th. Schreiber, B. J. Wielinga, J. M. Akkermans, and W. Van de Velde // IEEE Expert. – 1994. – No 9(6).
43. The Prometheus Methodology [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.cs.rmit.edu.au/agents/SAC2/methodology.html>. – Загл. с экрана.
44. MESSAGE - Methodology for Engineering Systems of Software Agents [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.eurescom.de/public/projects/P900-series/p907/>. – Загл. с экрана.
45. NetLogo [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. – Загл. с экрана.
46. Understanding HubNet [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/hubnet.html>. – Загл. с экрана.
47. What is NetLogo? [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/docs/>. – Загл. с экрана.
48. VisualBots Software [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.visualbots.com/software.htm>. – Загл. с экрана.
49. MASON Multiagent Simulation Toolkit [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason/>. – Загл. с экрана.
50. Repast Agent Simulation Toolkit [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://repast.sourceforge.net/>. – Загл. с экрана.
51. Java [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://java.com/>. – Загл. с экрана.
52. Groovy – Documentation [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://groovy.codehaus.org/Documentation>. – Загл. с экрана.
53. Weka 3 – Data Mining with Open Source Machine Learning Software in Java [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>. – Загл. с экрана.
54. Jade – Java Agent Development Framework [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://jade.tilab.com/>. – Загл. с экрана.
55. Кудрявцев, Е. М. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем [Текст] / Е. М. Кудрявцев. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 320 с.
56. Гуляев, А. МАТЛАВ 5.2. Имитационное моделирование в среде Windows [Текст] / А. Гуляев. – М.: Корона принт, 1999. – 288 с.
57. Окольников, В. В. Представление времени в имитационном моделировании [Текст] / В. В. Окольников // Вычислительные технологии. – 2005. – Том 10, No5.
58. Timm, I. J. Large Scale Multiagent Simulation on the Grid [Text] / Ingo J. Timm, Dirk Pawlaszczyk // IEEE International Symposium on Cluster Computing and the Grid (CCGRID), Cardiff University, Cardiff, UK, 2005.
59. OASIS SOA Reference Model TC [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.oasis-open.org/committees/tc_home.php?w_g_abbrev=soa-rm. – Загл. с экрана.
60. Ахун [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://msdn.microsoft.com/en-us/devlabs/dd795202.aspx>. – Загл. с экрана.

Bibliography (transliterated):

- Lychkina, N. N. (2005). Imitacionnoe modelirovanie ekonomicheskix processov : Ucheb.posobie. Moscow: Akademiya IT, 165.
- Keiser, G. E. (1999). A Review of WDM Technology and Applications. Opt. Fiber Technol, 5 (1), 3.
- Harrington, H. J. (2000). Simulation modeling methods. To Reduce Risks and Increase Performance. McGraw-Hill Professional, 379.
- Mainframe computer – Wikipedia, the free encyclopedia [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: http://en.wikipedia.org/wiki/Mainframe_computer. Zagl. s ekrana.
- Mikihiko, O. (1998). Simulation engineering. IOS Press Amsterdam, 190.
- Fishman, G. S. (2001). Discrete-event simulation: modeling, programming, and analysis. Springer, 537.
- Decision Making Tools and Techniques – ProModel [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.promodel.com/>. Zagl. s ekrana.
- Arena Portal: Products [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: http://www.arenasimulation.com/Products_Products.aspx. Zagl. s ekrana.
- Isee systems – Ithink Modeling & Simulation Software for Business [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.iseesystems.com/software/Business/ithinkSoftware.aspx>. Zagl. s ekrana.
- Garrido, J. M. (2009). Object Oriented Simulation: A Modeling and Programming Perspective. Springer, 449.
- Heermann, D. W. (1990). Computer Simulation Methods in Theoretical Physics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 155.
- Hartmann, S. (1996). The World as a Process: Simulations in the Natural and Social Sciences. Modelling and Simulation in the Social Sciences from the Philosophy of Science Point of View, Theory and Decision Library. Dordrecht: Kluwer, 77–100.
- Introduction to Military Training Simulation: A Guide for Discrete Event Simulationists [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.modelbenders.com/papers/ml4des.html>. Zagl. s ekrana.
- Miller, S. (2000). Introduction to manufacturing simulation/ Scott Miller, Dennis Pegden. Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference.
- Banks, J. (1998). Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice, vol. 57. Wiley-IEEE, 849.
- Tomashevskij, V., Zhdanova, E. (2003). Imitacionnoe modelirovanie v srede GPSS, 416.
- Graudina, V., Grundspenik, J. (2005). Technologies and multi-agent system architectures for transportation and logistics support Vita Graudina. International Conference on Computer Systems and Technologies - CompSysTech, Varna, Bulgaria.
- Voroncov, K. V., Pshenichnikov, S. B. (2002). Imitacionnoe modelirovanie trgov: novaya tehnologiya birzhevyyh trenazherov. Indikator, 2 (42).
Rezhim dostupa: http://www.forecsys.com/ru/site/about/media_coverage/exchange_simulator/. – Zagolovok s ekrana
- Shannon, R. (1978). Imitacionnoe modelirovanie sistem: iskustvo i nauka. Moscow: Mir,
- Karpov, Yu. (2005). Imitacionnoe modelirovanie sistem. Vvedenie v modelirovanie s AnyLogic 5. SPb.: BXV-Peterburg, 400.
- Ljung, L., Glad, T. (1994). Modeling of dynamic systems. Hall PTR, 368.
- Borshhyov, A. A. Ot sistemnoj dinamiki i tradiconnogo IM – k prakticheskim agentnym modelyam: prichiny, tehnologiya, instrumenty [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.gpss.ru/>
- Forrester, J. W. (1968). Principles of systems. Wright-Allen Press Inc., 387.
- Forrester, J. (1958). Industrial Dynamics – A Major Breakthrough for Decision Makers. Harvard Business Review, 36, 4, 37–66.
- Richmond, B. (1994). System Dynamics/Systems Thinking: Let's Just Get On With It: International Systems Dynamics Conference in Sterling, Scotland. Springer, 215.
- Ruth, M., Hannon, B. (2003). Dynamic modeling for business management: an introduction. Springer, 388.

27. Jerry Banks, John S. Carson, Barry L. Nelson, David M. Nicol (2009). Discrete-Event System Simulation. Prentice Hall, 622.
28. Styuart, R. (2006). Iskusstvennyj intellekt: sovremennyy podhod. Moscow: Izdatelskij dom «Vilyams», 1408.
29. Yoav Shoham, Kevin Leyton-Brown (2008). Multiagent systems: algorithmic, game-theoretic, and logical foundations. Cambridge University Press, 483.
30. Industry Standards [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.mak.com/community/standards.php>. Zagl. s ekrana.
31. Frederick Kuhl, Richard Weatherly, Judith Dahmann (1999). Creating Computer Simulation Systems: An Introduction to the High Level Architecture. Prentice Hall PTR, 224.
32. DIANE Publishing Company. Distributed Interactive Simulation of Combat: DIANE Publishing Company. – DIANE Publishing, 1996, 177.
33. CIGI: Overview [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://cigi.sourceforge.net/overview.php>. Zagl. s ekrana.
34. The Foundation for Intelligent Physical Agents [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://fipa.org/>. Zagl. s ekrana.
35. Subrahmanian, V. S. (2000). Heterogeneous agent systems. MIT Press, 580.
36. Standard Status Specifications [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://fipa.org/repository/standardspecs.html>. Zagl. s ekrana.
37. Davydov, A. A. O Kompyutacionnoj teorii socialnyx agentov [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: http://www.isras.ru/files/File/Socis/1-6-2006/davydov_agents.pdf.
38. F. Zambonelli, N. Jennings, M. Wooldridge (2003). Developing MAS: The Gaia Methodology. ACM, 12, 3.
39. Object Management Group – UML [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://uml.org/>. Zagl. s ekrana.
40. Agent UML [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.auml.org/>. Zagl. s ekrana.
41. Juan C. Garcia-Ojeda, Jose de J. Perez-Alcazar, Alvaro E. Arenas (2004). Garcia-Ojeda. Extending the Gaia Methodology with Agent-UML. ACM, 3, 1456–1457.
42. A. Th. Schreiber, B. J. Wielinga, J. M. Akkermans, and W. Van de Velde (1994). CommonKADS: A comprehensive methodology for KBS development [Text] / A. Th. Schreiber, B. J. Wielinga, J. M. Akkermans, and W. Van de Velde // IEEE Expert, No 9(6).
43. The Prometheus Methodology [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.cs.rmit.edu.au/agents/SAC2/methodology.html>. Zagl. s ekrana.;
44. MESSAGE - Methodology for Engineering Systems of Software Agents [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.eurescom.de/public/projects/P900-series/p907/>. Zagl. s ekrana.
45. NetLogo [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. Zagl. s ekrana.
46. Understanding HubNet [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/hubnet.html>. Zagl. s ekrana.
47. What is NetLogo? [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/docs/>. Zagl. s ekrana.
48. VisualBots Software [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.visualbots.com/software.htm>. Zagl. s ekrana.
49. MASON Multiagent Simulation Toolkit [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason/>. Zagl. s ekrana.
50. Repast Agent Simulation Toolkit [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://repast.sourceforge.net/>. Zagl. s ekrana.
51. Java [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://java.com/>. Zagl. s ekrana.
52. Groovy – Documentation [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://groovy.codehaus.org/Documentation>. Zagl. s ekrana.
53. Weka 3 – Data Mining with Open Source Machine Learning Software in Java [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>. – Zagl. s ekrana.
54. Jade – Java Agent Development Framework [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://jade.tilab.com/>. Zagl. s ekrana.
55. Kudryavcev, E. M. (2004). GPSS World. Osnovy imitacionnogo modelirovaniya razlichnyx sistem. Moscow: DMK Press, 320.
56. Gulyaev, A. (1999). MATLAB 5.2. Imitacionnoe modelirovanie v srede Windows. Moscow: Korona print, 288.
57. Okolnishnikov, V. V. (2005). Predstavlenie vremeni v imitacionnom modelirovanii. Vychislitelnye tekhnologii, 10, 5.
58. Ingo J. Timm, Dirk Pawlaszczyk (2005). Large Scale Multiagent Simulation on the Grid. IEEE International Symposium on Cluster Computing and the Grid (CCGRID), Cardiff University, Cardiff, UK.
59. OASIS SOA Reference Model TC [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: http://www.oasis-open.org/committees/tc_home.php?wg_abbrev=soa-rm. Zagl. s ekrana.
60. Axum [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://msdn.microsoft.com/en-us/devlabs/dd795202.aspx>. Zagl. s ekrana.

Поступила (received) 05.03.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Перспективы применения имитационного моделирования в задачах автоматизации и управления технологическими системами/ Р. Ю. Лопаткин, С. А. Петров, С. Н. Игнатенко, В. А. Иващенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – No 17(1189). – С.61–71. – Бібліогр.: 60 назв. – ISSN 2079-5459.

Перспективы застосування імітаційного моделювання в задачах автоматизації та управлінні технологічними системами/ Р. Ю. Лопаткін, С. А. Петров, С. Н. Ігнатенко, В. А. Іващенко// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – No 17(1189). – С.61–71. – Бібліогр.: 60 назв. – ISSN 2079-5459.

Prospects for the use of simulation modeling to automate tasks and the management of technological systems/ R. Y. Lopatkin, S. A. Petrov, S. N. Ignatenko, V. A. Ivaschenko//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2015. – No 49 (1189).– P.61–71 – Bibliogr.: 60. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Лопаткін Роман Юрійович – кандидат фізико-математических наук, доцент кафедри загальної фізики, Інститут прикладної фізики НАН України, вул. Петропавлівська, 58, м. Суми, Україна, 40000, тел.: 050-572-39-61; e-mail: rlopatkin@gmail.com.

Лопаткин Роман Юрьевич – кандидат фізико-математических наук, доцент кафедри общей фізики, Інститут прикладної фізики НАН України, ул. Петропавловская, 58, г. Сумы, Украина, 40000, тел.: 050-572-39-61; e-mail: rlopatkin@gmail.com.

Lopatkin Roman – candidate of physical and mathematical sciences, associate professor of general physics department, Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, 58, Petropavlivska St., 40000 Sumy, Ukraine, тел.: 050-572-39-61; e-mail: rlopatkin@gmail.com.

Петров Сергій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук, Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, Україна, 41100, тел.: 066-726-32-29; e-mail: sergpet@gmail.com.

Петров Сергей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных наук, Сумской государственной университет, ул. Римского-Корсакова, 2, г. Сумы, Украина, 41100, тел.: 066-726-32-29; e-mail: sergpet@gmail.com.

Petrov Serhii – candidate of technical sciences, associate professor of computer science department, Sumy State University 2, Rymaskogo-Korsakova st., 40007 Sumy, Ukraine, phone.: 066-726-32-29; e-mail: sergpet@gmail.com.

Игнатенко Сергей Миколайович – старший науковий співробітник, Інститут прикладної фізики НАН України, вул. Петропавлівська, 58, м. Суми, Україна, 40000, тел.: 050-142-98-67; e-mail: mynameissergey@gmail.com.

Игнатенко Сергей Николаевич – старший научный сотрудник, Институт прикладной физики НАН Украины, ул. Петропавловская, 58, г. Сумы, Украина, 40000, тел.: 050-142-98-67; e-mail: mynameissergey@gmail.com.

Ignatenko Serhii – senior researcher, Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, 58, Petropavlivska St., 40000 Sumy, Ukraine, phone.: 050-142-98-67; e-mail: mynameissergey@gmail.com.

Іващенко Віталій Анатолійович – старший науковий співробітник, Інститут прикладної фізики НАН України, вул. Петропавлівська, 58, м. Суми, Україна, 40000, тел.: 095-925-77-00; e-mail: va.ivashchenko@gmail.com.

Ivashchenko Vitaliy – senior researcher, Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, 58, Petropavlivska St., 40000 Sumy, Ukraine, phone.: 095-925-77-00; e-mail: va.ivashchenko@gmail.com.

ТЕХНОЛОГІЇ ТА
ОБЛАДНАННЯ ВИРОБНИЦТВА

УДК 539.41

М. Г. ФАРЗАЛИЕВ, С. М. САДИРЛИ

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТОЛКАТЕЛЯ В КАНАЛЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО КУЛАЧКОВОГО МЕХАНИЗМА, СОСТАВЛЕННОГО ИЗ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Рассмотрено движение толкателя в канале пространственного кулачкового механизма, составленного из упругих элементов при тканеформировании. Экспериментальными исследованиями установлено, что перемещение толкателя в канале осуществляется с переменной скоростью. Проанализированы силовые взаимодействия винтовой поверхности торца толкателя с рабочими кромками ведущих выступов пластин-кулачков. Получены дифференциальные уравнения дополнительного движения толкателя и гармонических колебаний, определяющие закономерности движения в канале роторного тканеформирующего механизма.

Ключевые слова: толкатель, пластина, переместитель, скорость, колебания, кулачковый механизм

Розглянуто рух штовхача в каналі просторового кулачкового механізму, що складається з пружних елементів при тканиноформуванні. Експериментальними дослідженнями встановлено, що переміщення штовхача в каналі здійснюється зі змінною швидкістю. Проаналізовано силові взаємодії гвинтової поверхні торця штовхача з робочими крайками провідних виступів пластин - кулачків. Отримано диференціальні рівняння додаткового руху штовхача і гармонічних коливань, що визначають закономірності руху в каналі роторного тканиноформуючого механізму.

Ключові слова: штовхач, пластина, переміщувач, швидкість, коливання, кулачковий механізм

The investigational study shows that the motion of pusher is performed by variable speed in pipes. Force impact of the helical surface with labour margins are analyzed which are called nose fin. Considered a movement of the pusher in the feed of spatial mechanism silk kulak composed of elastic elements in tissue odds changes. The aim of the research is to study the movement of the pusher in the feed of spatial cam mechanism, composed of elastic elements in. The experimental research found that re removing the pusher in the feed is carried out with variable speed. Analysis streamlined power persuasion endcap screw surface interaction case with working edges leading protrusions plates-cams.

Semi rollover differential equations additional traffic capacities and katol harmonic vibrations that determine patterns of movement in the channel rotary taken mechanism. Found that the extra load on the pusher is transmitted as a somewhat modified overhead from the wing on the leading tabs cams that will receive additional service in the opposite direction of deformation.

Found that the extra load on the pusher is transmitted as a somewhat modified overhead from the wing on the leading tabs cams that will receive additional deformation required in a direction opposite to the velocity of the basic movement of the pusher.

Keywords: pusher, fin, shifter, speed, vibration, cam gear.

Введение. В настоящее время в текстильную промышленность внедряются новые технологические машины с новыми принципами работы. В этих машинах имеются роторные механизмы, что позволяет увеличить производительность текстильных машин в 4-5 раз [1, 2]. Одной из таких технологических машин является ткацкая многозвенная машина типа ТММ, где несколько технологических операций образования и формирования ткани осуществляются роторным тканеформирующим механизмом (ТФМ) [3–5].

ТФМ состоит из подвижных и неподвижных частей берда, которые собраны из пластин различной конфигурации толщины, изменяющейся в пределах 0,15-0,4 мм. Подвижные и неподвижная берда образуют канал для перемещения толкателя-челнока, который по технологическим требованиям должен перемещаться с постоянной скоростью [6, 7].

Экспериментальные исследования показали, что перемещение толкателя в канале осуществляется с переменной скоростью [6, 7]. Поэтому, в настоящей работе проведено исследование движения и нагружения толкателя и установлена закономерность движения толкателя в канале роторного ТФМ.

Проанализированы силовые взаимодействия винтовой поверхности торца толкателя с рабочими кромками ведущих выступов пластин – кулачков [8, 9]. Подвижное бердо состоит из вращающегося вала с собранными на нем пластинами – кулачками. Кулачки

на валу собраны смещенно относительно друг друга на определенный угол, что образует винтовую поверхность. Неподвижное бердо состоит из неподвижных пластин и образует опорную поверхность для толкателя [10, 11].

При вращении вала винтовая поверхность, образованная пластинами-кулачками, взаимодействует с винтовой поверхностью торца толкателя и перемещает его в канале. Плоскость вращения кулачков перпендикулярна плоскости перемещения толкателя.

При идеальном изготовлении кулачков и толкателя и при условии строгого постоянства угловой скорости вращения вала толкатель должен совершать в рабочей зоне механизма прямолинейно-поступательные движения с постоянной линейной скоростью. Фактически, толкатели могут иметь непостоянную по величине скорость в связи с возможностью неравномерного вращения вала и появления переменной деформации ведущих толкателей кулачков в направлении вдоль оси вала ТФМ.

Если посчитать угловую скорость вращения вала постоянной, то остается возможность переменной деформации ведущих выступов кулачков в процессе движения толкателя из-за случайных увеличений сопротивления движения.

Рассмотрим случай увеличения сопротивления движения толкателя в результате его «наезда»* на выступающий зуб пластин неподвижного берда – откид

© М. Г. Фарзалиев, С. М. Садирли. 2016

ной гребенки, что может иметь место в результате недостаточно точного положения одной из секций берда по отношению к остальным секциям. Другие реальные возможности возникновения случайных импульсивных нагрузок на толкатель в направлении, противоположном его скорости в основном движении, маловероятны [2].

В результате указанного наезда* на выступающие зубья толкатель получит дополнительную нагрузку, имеющую импульсивный характер. Направление этой нагрузки в общем случае может не совпадать с траекторией движения толкателя, поэтому, говоря в дальнейшем об этой нагрузке, мы будем иметь в виду ее составляющую, направленную против скорости основного движения толкателя.

Перпендикулярная составляющая вызовет появление дополнительных реакций со стороны направляющих толкателя, действующих также перпендикулярно к траектории движения толкателя и поэтому не влияющих на деформацию ведущих выступов кулачков.

Строго говоря, появление указанных дополнительных реакций вызовет изменение сил трения, действующих на толкатель со стороны его направляющих, но для нас это не имеет значения, т.к. указанное изменение лишь несколько изменит величину дополнительной нагрузки на ведущие выступы кулачков со стороны толкателя по сравнению с нагрузкой, действующей на толкатель со стороны выступающих зубьев неподвижного берда. По прекращении действия нагрузки со стороны зубьев исчезнут дополнительные силы трения, а наш дальнейший анализ будет относиться именно к последующему периоду [6].

Таким образом, дополнительная нагрузка на толкатель передается в виде несколько измененной дополнительной нагрузки со стороны толкателя на ведущие выступы кулачков, которые получают дополнительную деформацию в направлении, противоположном направлению скорости основного движения толкателя.

Цель работы и задачи исследования. Целью работы является исследование движение толкателя в канале пространственного кулачкового механизма, составленного из упругих элементов при тканеформировании.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- анализировать силовое взаимодействие винтовой поверхности торца толкателя с рабочими кромками ведущих выступов пластин-кулачков;
- получение дифференциальных уравнений дополнительного движения толкателя и гармонических колебаний;
- определение закономерности движения толкателя в канале роторного тканеформирующего механизма.

Анализ силового взаимодействия. Проанализировано силовое взаимодействие винтовой поверхности толкателя с рабочими кромками ведущих выступов-кулачков. В результате этого анализа действие на винтовую поверхность толкателя рабочих кромок ведущих выступов кулачков сведено к силам P_1 , V и H , приложенным в точке K .

В нашем случае, когда ведущие выступы кулачков получают дополнительную деформацию, соответствующую усилию P_1 , а действие нагрузки со стороны зубьев неподвижного берда на толкатель прекратится, толкатель к своему основному движению получит добавочное (относительное) движение под действием упругих сил дополнительной деформации ведущих выступов кулачков.

Так как добавочное движение толкателя также будет являться поступательно-прямолинейным, то оно будет полностью описываться закономерностью движения одной из точек толкателя, которую обозначим через A^* . Для упрощения последующего рассмотрения добавочного движения толкателя в качестве точки A^* примем точку толкателя, совпадающую с упоминавшейся выше точкой K^* . Положение этой точки в добавочном движении, совпадающее с положением при нормальных условиях, назовем нулевым и обозначим через A_0^* (рис. 1).

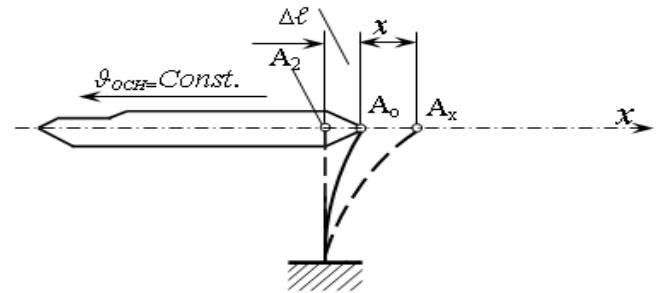


Рис. 1 – Силовое взаимодействия винтовой поверхности толкателя с рабочими кромками кулачков

Очевидно, что полная скорость движения толкателя и, следовательно, точки A^* в этом положении и при нормальных условиях будет постоянна и по величине, и по направлению, и будет являться скоростью его основного (переносного) движения. Обозначим ее через " $v_{осн}$ ". Скорость добавочного движения точки A^* обозначим через X' . В данном случае при нормальных условиях скорость X' точки A^* в добавочном движении будет равна 0 (добавочное движение будет отсутствовать).

Очевидно также, что положению точки A^* толкателя A_0 соответствует определенная начальная деформация ведущих выступов кулачков, которую обозначим через Δl (рис. 1, 2).

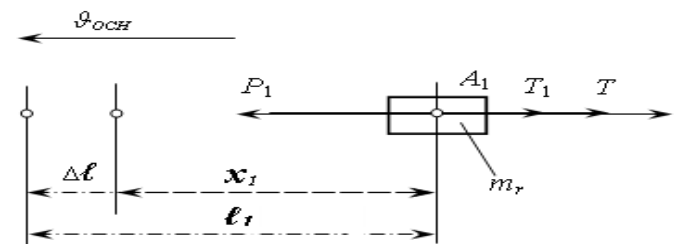


Рис. 2 – Деформация ведущих выступов кулачков

Эта деформация обусловлена давлением толкателя на ведущие выступы, равным равнодействующей сопротивлений движению толкателя, направленных против скорости $v_{осн}$, при нормальных условиях. Обозначим эту равнодействующую сопротивлений через T^* и посчитаем ее постоянной (T^* в основном определяется силами трения, обусловленными собственным весом толкателя и технологическими сопротивлениями, действующими на толкатель со стороны опорных поверхностей и технологическими сопротивлениями в процессе его движения в рабочей зоне ТФМ).

В первом приближении будем учитывать из вышеуказанных трех сил только одну силу P_1 , совпадающую по направлению со скоростью основного движения толкателя " $v_{осн}$ ". Силы V и H непосредственно влиять на добавочное движение толкателя не будут, т.к. действуют в плоскости, перпендикулярной направлению движения толкателя.

Однако эти силы будут вызывать нормальные реакции, которые в свою очередь вызовут дополнительные силы трения, действующие в направлении, противоположном скорости $v_{осн}$. Эти силы трения будут находиться в определенной зависимости от величины силы P_1 и будут влиять на добавочное движение толкателя. Это влияние будем учитывать в дальнейшем.

Кроме этого следует отметить, что сила T^* в случае отрыва толкателя от ведущих выступов кулачков будет несколько иная по величине, чем при нормальных условиях движения толкателя. Указанное в данном случае также не будем принимать во внимание.

Проанализируем момент, когда действие случайной дополнительной нагрузки со стороны толкателя на ведущие выступы кулачков прекратится. Как мы уже говорили, в этот момент ведущие выступы кулачков будут иметь дополнительную деформацию и будут давить на толкатель с усилием P_1 , соответствующим полной деформации ведущих выступов l_1 . Положение точки $A_в$ указанный момент обозначим через A_1 .

Напишем для добавочного (относительного) движения толкателя, когда он находится в положении A_1^* , уравнение суммы проекций внешних сил и силы инерции " F_1 " на ось X^* . При этом имеется в виду, что основное (переносное) движение толкателя является прямолинейно-поступательным с постоянной скоростью " $v_{осн}$ ".

$$-P_1 + T + F_1 = 0$$

Линия действия силы инерции F_1 проходит через центр масс толкателя. Посчитаем, что линия действия силы P_1 также проходит через центр масс толкателя, что является весьма близким к действительности. Такое допущение обуславливает, что действие сил P_1 и F_1 не будет создавать разворачивающего толкатель момента в процессе дополнительного движения толкателя с ускорением. Посчитаем также, что линии действия сил P_1 и T совпадают.

Эти допущения избавляет нас от необходимости учитывать дополнительные силы трения, зависящие от величины силы P_1 .

Обозначим жесткость ведущих выступов кулачков при их деформации толкателем, находящемся в канале механизма, в направлении, противоположном направлению основного движения толкателя через K^* .

Тогда $P_1 = Kl_1$, где l_1 – полная деформация ведущих выступов кулачков для положения толкателя A_1

$$l_1 = \Delta l + X_1,$$

Δl можно определить из соотношения:

$$T = K\Delta l, \quad \Delta l = \frac{T}{K}.$$

Величины T и K следует считать известными. Если взять произвольное положение толкателя (точка A находится в положении A_1) при его дополнительном движении в направлении от A_1 к положению A_0 (рис. 3), то соответствующие текущие параметры можно обозначить через X (вместо X_1), P (вместо P_1), F (вместо F_1) и l (вместо l_1).

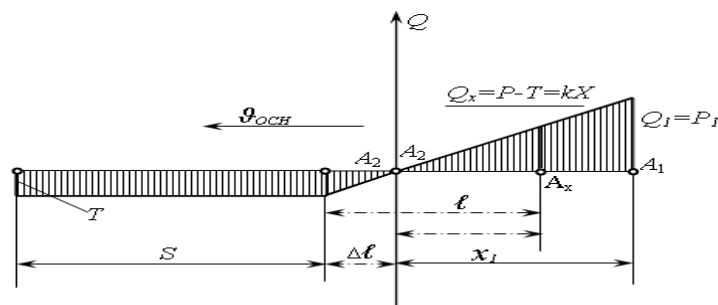


Рис. 3 – Произвольное положение толкателя при его движении

Тогда, очевидно, будет:

$$P = Kl = K(\Delta l + X) = K\left(\frac{T}{K} + X\right) = T + KX.$$

Уравнение суммы проекций сил на ось X примет вид:

$$-P + T + F = 0.$$

Как известно:

$$F = -m \frac{d^2 x}{dt^2},$$

где m – масса толкателя.

Подставим в уравнение суммы проекций сил на ось X значения P и F :

$$-(T + KX) + T - m \frac{d^2 x}{dt^2} = 0$$

или

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + KX = 0.$$

Обозначим m через p^2 . Произведя соответствующую замену, окончательно получим дифференциальное уравнение дополнительного движения толкателя в виде:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + p^2 x = 0 \tag{1}$$

После интегрирования уравнения (1) и определения из начальных условий постоянных интегрирования получим:

$$X = X_1 \sin\left(pt + \frac{\pi}{2}\right). \quad (2)$$

Уравнение (2) является уравнением гармонических колебаний, где X_1 – амплитуда колебаний, p – круговая частота, $\frac{\pi}{2}$ – начальная фаза колебаний.

В нашем конкретном случае, не будем в течении полного цикла иметь гармонические колебания толкателя в его дополнительном движении, т.к. толкатель не связан жестко с ведущими выступами кулачков и последние могут безотрывно взаимодействовать с толкателем только при условии, когда направление силы, действующей со стороны ведущих выступов кулачков на толкателей будет совпадать с направлением основного движения толкателя.

Выводы. Таким образом, выведено основное уравнение, определяющее закономерности добавочного движения толкателя в канале роторного ТФМ, возникающего в результате неточного изготовления и сборки деталей механизма. Предложена методика для определения закономерности движения толкателя в канале роторного ТФМ при формировании ткани на машинах типа ТММ.

Список литературы:

1. Фарзалиев, М. Г. Разработка методов расчета и проектирования тканеформирующего механизма и исследование процесса прокладки уточной нити в волнообразных зевых основы широких многозевных ткацких машин типа ТММ [Текст] : дис. ... докт. техн. наук / М. Г. Фарзалиев. – Санкт-Петербург, 1990. – 450 с.
2. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин [Текст] / И. И. Артоболевский. – М.: Наука, 2007. – 347 с.
3. Байбаков, И. М. Теория колебаний [Текст] / И. М. Байбаков. – М.: Наука, 2005. – 320 с.
4. Вульфсон, И. И. Нелинейные задачи динамики машин [Текст] / И. И. Вульфсон, М. З. Козловский. – С-Пб.: Машиностроение, 2008. – 234 с.
5. Гордеев, В. А. Динамика механизмов натяжения и отпуска основы [Текст] / В. А. Гордеев. – С-Пб., Легкая индустрия, 2003. – 178 с.
6. Ден Гартог Дж. Механические колебания [Текст] / Ден Гартог Дж. – М., Физматгиз, 1960. – 345 с.
7. Малышев, А. П. Механика и расчеты ткацких станков [Текст] / А. П. Малышев, П. А. Воробьев. – М.: Mashgiz, 1960. – 197 с.
8. Пановка, Я. Г. Основы прикладной теории колебаний и удара [Текст] / Я. Г. Пановка. – Л.: Машиностроение, 1976. – 212 с.
9. Понамарев, С. Д. Расчет на прочность в машиностроении [Текст] / С. Д. Понамарев и др. – М.: Mashgiz, 1959. – 346 с.
10. Строндж, В. Д. Колебания в условиях возбуждения, частота которого изменяется с постоянной скоростью [Текст] / В. Д. Строндж // Труды американского общества инженеров-механиков. – 1964. – Серия E. No4. – С. 45–49.
11. Фарзалиев, М. Г. Устройство для экспериментального измерения изгибных и крутильных колебаний с большим числом кулачков [Текст] / М. Г. Фарзалиев, Б. И. Дамаскин, А. С. Сарханов. – Баку, АЗНИИТИ, 2005. – 21 с.

Bibliography (transliterated):

1. Farzaliev, M. G. (1990). Razrabotka metodov rascheta i proektirovaniya tkaneformiruyushhego mexanizma i issledovanie processa prokladki utочноj niti v volnoobraznykh zevax osnovy širokix mnogozevnykh tkackix mashin tipa TMM [Tekst] : dis. ... dokt. techn. nauk. Sankt-Peterburg, 450.
2. Artobolevskij, I. I. (2007). Teoriya mexanizmov i mashin. Moscow: Nauka, 347.
3. Bajbakov, I. M. (2005). Teoriya kolebanij. Moscow: Nauka, 320.
4. Vulfson, I. I. (2008). Nelinejnye zadachi dinamiki mashin. Sankt-Peterburg: Mashinostroenie, 234.
5. Gordeev, V. A. (2003). Dinamika mexanizmov natyazheniya i otpuska osnovy. Sankt-Peterburg: Legkaya industriya, 178.
6. Den Gartog Dzh (1960). Mexanicheskie kolebanija. Moscow: Fizmatgiz, 345.
7. Malyshev, A. P. (1960). Mexanika i raschety tkackix stankov. Moscow: Mashgiz, 197.
8. Panovka, Ya. G. (1976). Osnovy prikladnoj teorii kolebanij i udara. Lvov: Mashinostroenie, 212.
9. Ponamarev, S. D. (1959). Raschet na prochnost v mashinostroenii. Moscow: Mashgiz, 346.
10. Strondzh, V. D. (1964). Kolebanija v usloviyax vozbuzhdeniya, chastota kotorogo izmenyaetsya s postoyannoju skorostyu. Trudy amerikanskogo obshhestva inzhenerov-mexanikov. Seriya: E., 4, 45–49.
11. Farzaliev, M. G. (2005). Ustrojstvo dlya eksperimentalnogo izmereniya izgibnyx i krutilynx kolebanij s bolshim chislom kulachkov. Baku, AzNIINTI, 21.

Поступила (received) 10.03.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Исследование движения толкателя в канале пространственного кулачкового механизма, составленного из упругих элементов/ М. Г. Фарзалиев, С. М. Садирли// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.72–76. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.

Дослідження руху штовхача в каналі просторового кулачкового механізму, що складається з пружних елементів/ М. Г. Фарзалиєв, С. М. Садірілі // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.72–76. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.

The motion study of pusher in extensive cam gear pipe which is composed of elastic elements/ M. G. Farzaliev, S. M. Sadirli//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 17 (1189).– P.72–76. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Фарзалиев Мазахир Гамза оглы – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические машины и оборудование отрасли», Азербайджанский государственный экономический университет, ул. Истиглалият, 6, г. Баку, Азербайджан, AZ1001.

Фарзалиєв Мазахир Гамза огли – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Технологічні машини і обладнання галузі», Азербайджанський державний економічний університет, вул. Істіглаліят, 6, м Баку, Азербайджан, AZ1001.

Farzaliyev Mazahir Gamza – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Technological machinery and equipment industry", Azerbaijan State Economic University, ul. Istiglaliyyat, 6, Baku, Azerbaijan, AZ1001.

Садирли Садраддин Мовлам оглы – диссертант, Кафедра «Технологические машины и оборудование отрасли», Азербайджанский государственный экономический университет, ул. Истиглалият, 6, г. Баку, Азербайджан, AZ1001.

Садірлі Садраддін Мовлам огли – диссертант, Кафедра «Технологічні машини і обладнання галузі», Азербайджанський державний економічний університет, вул. Істіглаліят, 6, м Баку, Азербайджан, AZ1001.

Sadirli Sadraddin Movlam – candidate for a degree, Department "Technological machinery and equipment industry", Azerbaijan State Economic University, ul. Istiglaliyyat, 6, Baku, Azerbaijan, AZ1001.

УДК 669.041

С. А. ЛЕВЧЕНКО

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ И ТЕПЛОВОЕ ПОЛЯ РУДНОТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Предложена методика проведения теоретических исследований с помощью конформных отображений для определения физических полей в руднотермической плавильной печи. Рассмотрены наиболее распространенные функции комплексного переменного, выполняющие необходимые конформные отображения. Показано применение конформного отображения электрического поля одноэлектродной ванны для теоретического определения распределения электрической мощности и температуры в её объёме. Рассмотрена возможность разработки универсальных численных алгоритмов расчёта электрических и тепловых полей печи на ЭВМ.

Ключевые слова: руднотермическая плавильная печь, электрическое поле, электрическая мощность, тепловое поле, функции комплексного переменного, конформные отображения.

Запропонована методика проведення теоретичних досліджень за допомогою конформних відображень щодо визначення фізичних полів в руднотермічній плавильній печі. Розглянуто найбільш уживані функції комплексного змінного, що виконують необхідні конформні відображення. Показано застосування конформного відображення електричного поля одноелектродної ванни для теоретичного визначення розподілу електричної потужності та температури в її об'ємі. Розглянута можливість розробки універсальних чисельних алгоритмів розрахунку електричних та теплових полів печі на ЕОМ.

Ключові слова: руднотермічна плавильна піч, електричне поле, електрична потужність, теплове поле, функції комплексного змінного, конформні відображення.

This article considers the problem concerning the improvement of orethermal furnace's working regime, the distribution of thermal energy all over its contents volume, to be exact. For analytical determination of temperature distribution the conformal maps' theory is offered. This theory is widely used for solving actual tasks in aerodynamics, hydrodynamics, electrostatics, strength of materials, electrotechnics, thermotechnics, optics and others. The employment of conformal maps makes it possible to create the mathematical models of the temperature field distribution in time.

The methodic of theoretical researches carried out using the conformal maps to define physical fields in orethermal furnace is offered. The most widespread complex variable quantity functions carrying out essential conformal maps are considered. The employment of one electrode furnace's electric field conform map to determine the distribution of electric power and the temperature in its volume is shown. The working outs of universal numerical algorithms to calculate electrical and thermal furnace's fields with computer possibility is considered.

Keywords: orethermal furnace, electric field, electric power, thermal field, complex variable quantity functions, conformal maps.

Введение. Почти все руднотермические печи относятся к печам прямого нагрева. Тепловая энергия выделяется непосредственно в ванне печи в результате ее активного сопротивления электрическому току. Важнейшим параметром печи является электрическое сопротивление ванны. Пронизываемая током большой силы ванна находится в электромагнитном поле с высокой магнитной напряженностью, оказывающим влияние на распределение в ней мощности.

Анализ публикаций и постановка проблемы. Электрическое поле в руднотермической ванне являлось давно предметом изучения. Этому вопросу посвящены многие теоретические и экспериментальные исследования, в которых изучалось распределение тока в однофазной и трехфазной ваннах на электроли

тических моделях, а также исследовалось поле однофазной ванны на моделях, в которых проводящей средой служил мелкий коксик или криптол [1–5]. Проводились имитации бесшлаковой ванны при помощи разных полупроводящих сред, выполненных в форме цилиндров и колец с разным электрическим сопротивлением. Проводилось математическое моделирование электрических полей трёхфазных руднотермических печей [6]. Также, большое значение придавалось изучению распределения тока непосредственно в действующих печах.

Качественно электрическое поле печи освещено достаточно широко, однако имеющиеся сведения недостаточны для точного расчета электрической мощности и температуры в каждой точке объема ванны.

© С. А. Левченко. 2016

Применение конформных отображений для исследования электрического поля печи. В каждом элементарном объеме ванны V активная электрическая мощность P рассчитывается по известной напряженности электрического поля E и удельной электрической проводимости материала γ (удельному электрическому сопротивлению ρ) по формуле:

$$P = \gamma E^2 V. \quad (1)$$

Активная мощность всей ванны

$$P_{\Sigma} = \sum P. \quad (2)$$

Удельная электропроводность γ является физической константой, не зависящей от геометрических размеров, но обусловленной физическим состоянием проводника. Ванну руднотермической печи только в единичных случаях можно рассматривать как среду с однородными физическими свойствами. В большинстве же случаев она представляет конгломерат веществ с разными физическими свойствами и разной электропроводностью. Несмотря на то что руднотермические печи применяют на протяжении многих десятилетий, нет достаточных сведений об электропроводности применяемых шихт, полученных шлаков и сплавов. Их электропроводность очень сильно зависит от температуры, состава, размеров гранул.

Простейшую картину электрического поля можно наблюдать на однофазной печи с проводящим подом и электродом круглого сечения. Поле такой цепи симметрично по отношению к вертикальной оси, совпадающей с осью электрода. Симметрию поля не нарушают ни гетерогенность загрузки, ни наличие на пути тока слоев шлака и металла с резко различной электропроводностью.

На рис. 1 изображено поле одноэлектродной однофазной ванны, полученное экспериментальным путем на модели, в которой проводящей средой служил просеянный коксик крупностью 0,5 мм [1]. Пунктиром показаны эквипотенциальные линии, сплошными – ток. Как указывалось выше, для определения электрической мощности в элементарном объеме необходимо знать напряженность электрического поля в данной точке. Известно, что напряженность электрического поля определяется из выражения $E=U/l$, где l – длина силовой линии.

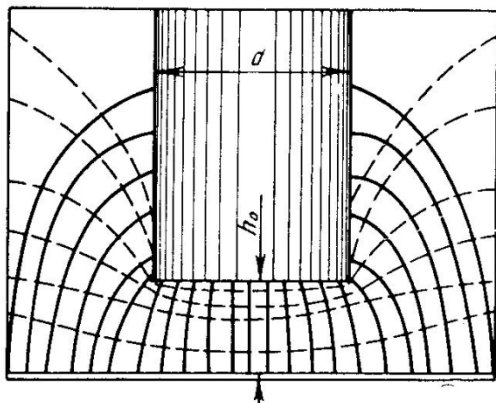


Рис. 1 – Электрическое поле однофазной ванны:
d=200 мм; h=90 мм.

Из рис. 1 видно, что электрическое поле неравномерное. Наибольшая напряженность поля и плотность тока сосредоточены под электродом. Следовательно в этой зоне будет наибольшее тепловыделение. Вследствие неравномерности электрического поля определение напряженности представляет определенную трудность.

Поэтому предлагается использовать конформные отображения, позволяющие отобразить одну неравномерную заданную область на другую, равномерную, решение которой не вызывает трудностей. Использование конформных отображений позволяет успешно решать достаточно сложные задачи гидро-, аэро- и электродинамики, которые имеют большой интерес для теории теплового, электростатического, магнитного полей и многих других.

Если каждому комплексному числу $z=x+jy$ из множества g (произвольная область) поставлено в соответствие одно или несколько (в случае многозначной функции) комплексных чисел $w=u+jv$ из множества G (область, на которую производится конформное отображение), то считают, что w является функцией комплексного переменного z , которая определяется из множества g .

$$w = f(z). \quad (3)$$

Имея некоторую аналитическую функцию $w=f(z)$, можно произвольную область g , в которой эта функция однолистка, отобразить конформно на некоторую область G . Для практики большой интерес имеет вопрос, как по заданным областям g и G найти функцию, которая выполняет конформное отображение одной из этих областей на другую.

При решении основной задачи конформных отображений – задачи нахождения функции, выполняющей конформное отображение заданной области, приходится использовать различные специальные методы. Одним из методов есть подбор необходимых комбинаций элементарных функций при условии, что удастся найти области, которые отображаются этими функциями. Такой подход предусматривает свободное владение геометрическими свойствами элементарных функций комплексного переменного. Так как электрические поля в разных сечениях различны, то и комбинации элементарных функций разные.

Из элементарных функций наибольший интерес представляет дробно-линейная функция

$$w = \frac{az + b}{cz + d}. \quad (4)$$

Решив уравнение (4) относительно z , получим

$$z = \frac{dw - b}{-cw + a}, \quad (5)$$

то есть обратная функция так же дробно-линейная.

Кроме дробно-линейной функции широкое распространение получили функции:

– степенная

$$w = z^a; \quad (6)$$

– показательная

$$w = e^z ; \tag{7}$$

- логарифмическая

$$w = lnz ; \tag{8}$$

- тригонометрические

$$w = \cos z , \tag{9}$$

$$w = tg z . \tag{10}$$

Кроме этих функций задача конформных отображений может быть решена при помощи приближенных методов или интегралом Кристоффеля-Шварца [7–10].

Так, например, при помощи преобразования $w=z^2$ декартова сетка плоскости $z(x,y)$ преобразуется в параболическую сетку плоскости $w(u,v)$ [8].

Видно, что параболическая сетка рис. 2, а соответствует картине электрического поля на рис. 1.

Чтобы получить из параболической сетки $w(u,v)$ декартову сетку $z(x,y)$ необходимо использовать обратное преобразование $z = \sqrt{w}$ на положительной полуплоскости.

Напряженность равномерного электрического поля E в каждой точке пространства $z(x,y)$ (G область) одинаковая и легко определяется. Для определения напряженности реального поля или плотности тока в какой-либо точке шихты или расплава $w(u,v)$ (G область) необходимо предварительно найденное значение напряженности поля или плотности тока пересчитать через формулу преобразования координат $w=f(z)$.

Конформные отображения можно применять и к полям трехфазных трехэлектродных ванн, являющихся наиболее распространенными. Их достоинства заключаются в цилиндрической форме и симметричном расположении электродов, обеспечивающими равномерное распределение мощности по электродам и в рабочем сечении ванны. Независимо от схемы включения электродов ток в ванне протекает по нормали к

эквипотенциальным линиям. Проводящий под, или металл, образует электрический нуль печи (рис. 3).

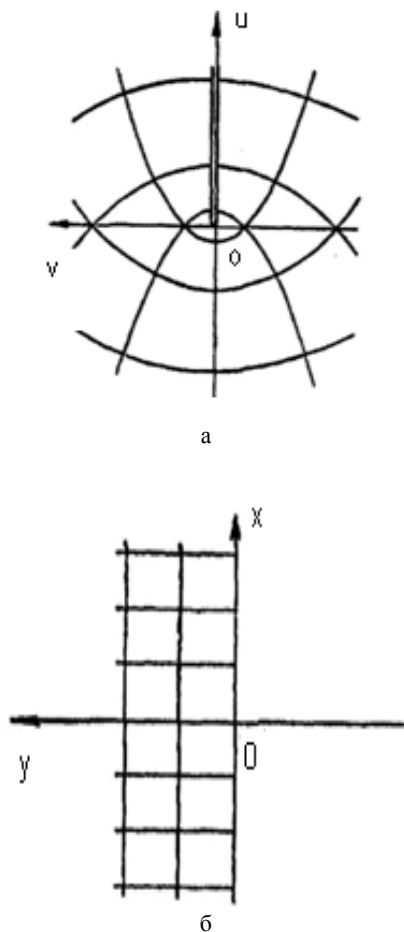


Рис. 2 – Конформное отображение $w=z^2$: а – параболическая сетка плоскости $w=u+jv$; б – декартова сетка плоскости $z=x+jy$.

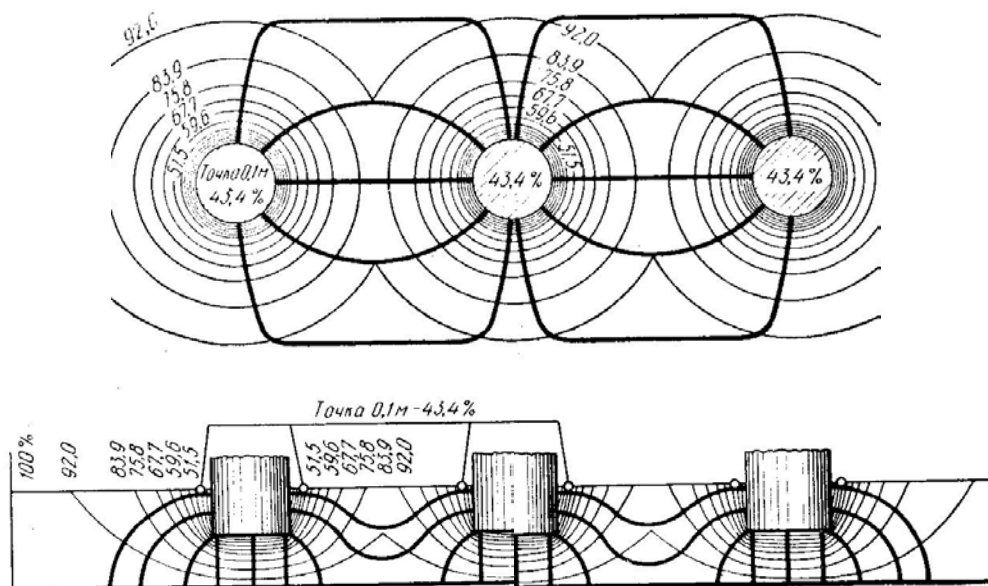


Рис. 3 – Электрическое поле ванны для медно-никелевого штейна при среднем погружении электродов

Цифры у кривых на рис. 3 – падение напряжения между электродом и данной точкой поля (% к напряжению фазы) [5].

В круглой ванне с электродами, расположенными по вершинам равностороннего треугольника, электрические поля фаз симметричны, сопротивления фаз одинаковые.

Приведенная схема электрического поля трехфазной ванны условна. Она построена по эффективной величине сил тока и, следовательно, даёт представление об эффективном электрическом поле. В действительности токи в фазах сдвинуты во времени и меняются со скоростью, соответствующей удвоенной частоте тока.

Разнообразие и сложность геометрических форм и размеров современного электротехнологического оборудования, все более жесткие требования, предъявляемые к точности их расчета, с одной стороны, указывают на ограниченную область применения аналитических методов для такого расчета, а, с другой стороны, подчеркивают актуальность разработки универсальных численных алгоритмов расчета, в данном случае - электромагнитных полей, ориентированных на применение вычислительных технологий. Располагая подобными алгоритмами, позволяющими варьировать геометрическими параметрами, свойствами материалов и другими характеристиками, можно заменить длительный эксперимент быстрым расчетом на ЭВМ различных вариантов и выбором оптимального из них. При этом создаются предпосылки автоматизации режима работы ванн.

Выводы

1. Для определения электрической мощности в каждом элементарном объеме ванны предложено использовать конформное отображение заданной области с неравномерным электрическим полем в область с равномерным полем, что даст возможность рассчитать его напряженность.

2. Для расчета действительной напряженности электрического поля в каждой точке ванны необходимо величину напряженности равномерного поля пересчитать через формулу преобразования координат $w=f(z)$. Точность нахождения действительной напряженности поля зависит от того, насколько точно подобрана функция конформного отображения.

3. Использование алгебраических функций конформных отображений дает возможность разработать соответствующие компьютерные программы для расчета электромагнитных и тепловых полей в руднотермических плавильных печах.

Список литературы:

1. Сисоян, Г. А. Электрическая дуга в электрической печи [Текст] / Г. А. Сисоян. – М.: Metallurgizdat, 1961. – 216 с.
2. Сергеев, П. В. Энергетические закономерности руднотермических электропечей, электролиза и электрической дуги [Текст] / П. В. Сергеев. – Изд. АН КазССР, 1963. – 184 с.
3. Платонов, Г. Ф. Параметры и электрические режимы металлургических электродных печей [Текст] / Г. Ф. Платонов. – М.: Энергия, 1965. – 224 с.
4. Альтгаузен, А. П. Электротермическое оборудование. Справочник [Текст] / А. П. Альтгаузен. – М.: Энергия, 1967. – 216 с.
5. Струнский, Б. М. Руднотермические плавильные печи [Текст] / Б. М. Струнский. – М.: Metallurgija, 1972. – 368 с.
6. Ольдзиевский, С. А. Математическое моделирование электрических полей печей рудной электропечи [Текст] / С. А. Ольдзиевский, В. А. Кравченко, В. И. Нежурин, И. А. Борисенко. – М.: Metallurgija, 1990. – 114 с.
7. Фильчаков, П. Ф. Приближенные методы конформных отображений [Текст] / П. Ф. Фильчаков. – К.: Наукова думка, 1964. – 218 с.
8. Лаврик, В. И. Справочник по конформным отображениям [Текст] / В. И. Лаврик, В. Н. Савенков. – К.: Наукова думка, 1970. – 252 с.
9. Угодчиков, А. Г. Построение конформно отображающих функций при помощи электромоделирования и интерполяционных полиномов Лагранжа [Текст] / А. Г. Угодчиков. – К.: Наукова думка, 1966. – 238 с.
10. Пачколин, Ю. Е. Використання конформних відображень для дослідження електрофізичних параметрів течії розплаву металу в електродуговій сталеплавильній печі [Текст] / Ю. Е. Пачколин, О. О. Бондаренко, С. А. Левченко // Энергосбережение Энергетика Энергоаудит. – 2015. – No4(135). – С. 40–45.

Bibliography (transliterated):

1. Sisojan, G. A. (1961). Elektricheskaja duga v elektricheskoy pechi. Moscow: Metallurgizdat, 216.
2. Sergeev, P. V. (1963). Energeticheskie zakonomernosti rudnotermicheskikh elektropechej, elektroliza i elektricheskoy dugi. Akademija Nauk KazSSR, 184.
3. Platonov, G. F. (1965). Parametry i elektricheskije rezhimy metallurgicheskikh elektrodnykh pechej. Moscow: Energija, 224.
4. Altgauzen, A. P. (1967). Elektrottermicheskoe oborudovanije. Spravochnik. Moscow: Energija, 216.
5. Strunskij, B. M. (1972). Rudnotermicheskie plavilnye pechi. Moscow: Metallurgija, 368.
6. Oldzjevskij, S. A., Kravchenko, V. A., Nezhurin, V. I., Borisenko, I. A. (1990). Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh polej pechej rudnoj elektrotermii. Moscow: Metallurgija, 114.
7. Filchakov, P. F. (1964). Priblizhennye metody konformnykh otobrazhenij. Kyiv: Naukova dumka, 218.
8. Lavrik, V. I., Savenkov, V. N. (1970). Spravochnik po konformnym otobrazhenijam. Kyiv: Naukova dumka, 252.
9. Ugodchikov, A. G. (1966). Postroenije konformno otobrazhajushchikh funkcij pri pomoshhi elektromodelirovanija i interpoljacionnykh funkcij Lagranzha. Kyiv: Naukova dumka, 238.
10. Pachkolin, J. E., Bondarenko, O. O., Levchenko, S. A. (2015). Vykorystannja konformnykh vidobrazhenj dlja doslidzhennja parametriv techiji rozplavu metalu v elektrodugovij staleplavilnij pechi. Energoberezenije Energetika Energoaudit, 4(135), 40–45.

Поступила (received) 10.03.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Електромагнітне та теплове поля руднотермічної плавильної печі/ С. А. Левченко// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.76–80. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Электромагнитное и тепловое поля руднотермической плавильной печи/ С. А. Левченко// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.76–80. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Electromagnetic and thermal fields of orethermalfurnace/ S. Levchenko//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 17 (1189).– P.76–80. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Левченко Сергій Андрійович – кандидат технічних наук, Запорізька державна інженерна академія, доцент кафедри "електротехніки та енергоефективності"; пр. Соборний 226, м. Запоріжжя, Україна, 69006; тел.: +38(063) 604-56-76; e-mail: levchenko_s@rambler.ru.

Левченко Сергей Андреевич – кандидат технических наук, Запорожская государственная инженерная академия, доцент кафедры "Электротехники и энергоэффективности"; пр. Соборный 226, г. Запорожье, Украина, 69006; тел.: +38(063) 604-56-76; e-mail: levchenko_s@rambler.ru.

Levchenko Sergiy – candidate of technical sciences, associate professor, Zaporizhia State Engineering Academy; Soborniy prosp. 226, Zaporizhia, Ukraine, 69006; tel.: +38(063) 604-56-76; e-mail: levchenko_s@rambler.ru.

УДК 62-663.7 (045)

В. И. РЫНДЯЕВ

НАПРАВЛЕНИЯ В СОЗДАНИИ ТРАНСМИССИЙ ПРИВОДОВ КОКСОВЫХ МАШИН

Создание трансмиссий приводов коксовых машин рациональной конструкции, обладающих повышенным уровнем работоспособности, является актуальной задачей. Проанализированы схемные и конструктивные решения приводов современных коксовых машин. Рассмотрены индивидуальный и групповой приводы машин. Обобщен опыт создания традиционных и новых систем трансмиссий приводов коксовых машин. Нахождение оптимального схемного решения связано, главным образом, с творческим уровнем конструктора. Разработаны обоснованные решения для проектирования работоспособных систем трансмиссий, на основе методов снижения действующих нагрузок.

Ключевые слова: коксовые машины, трансмиссия, нагрузки, привод.

Створення трансмісій приводів коксових машин раціональної конструкції, що володіють підвищеним рівнем працездатності, є актуальним завданням. Проаналізовано схемні і конструктивні рішення приводів сучасних коксових машин. Розглянуто індивідуальний і груповий приводи машин. Узагальнено досвід створення традиційних і нових систем трансмісій приводів коксових машин. Знаходження оптимального схемного рішення пов'язане, головним чином, з творчим рівнем конструктора. Розроблено обґрунтовані рішення для проектування працездатних систем трансмісій, на основі методів зниження діючих навантажень.

Ключові слова: коксові машини, трансмісія, навантаження, привід.

Creating transmission drives for rational designed coking machines with the high level of efficiency is an urgent task. Transmissions of drives for various coking machines have been investigated. Schematics and designs of modern drives for coking machines have been analyzed. Formation of values of operating load with accounting of the maximum load has been studied. Individual and group drives of machines have been considered. The effect of design decisions on the selection of the optimal design has been analyzed. The experience of creation of traditional and new transmission systems for drives of coking machines has been generalized. Finding the optimal circuit design associated primarily with the creative designer level. Sustainable solutions for design of efficient transmission systems based on methods of reducing operating loads have been developed.

Keywords: coking machines, transmission, load, drive.

Введение. В решении задачи успешного развития промышленного производства Украины, важное значение занимает увеличение объемов и повышение качества кокса. Поэтому конструкторским организациям необходимо уделять большое внимание созданию современных коксовых машин.

В настоящее время разрабатываются новые и реконструируются эксплуатирующиеся машины, принимаются меры для увеличения мощностей и расширения технологических возможностей заводов - изготовителей коксового оборудования.

В результате этого коксохимические заводы страны оснащены рядом современных машин, разрабатывается и изготавливается новое высокопроизводительное оборудование.

Высокая производительность коксовых машин достигается, главным образом, за счет очень точной взаимной увязки их в работе [1]. Выход из строя одной из машин вызывает остановку работы всех остальных. Устойчивостью работы коксового оборудования в значительной степени определяются экономические показатели коксового цеха.

Анализ эксплуатационных условий, в которых работает коксовое оборудование, показывает, что наиболее напряженными в работе являются трансмиссии приводов коксовых машин [1–10].

Поэтому создание трансмиссий приводов рациональной конструкции, обладающих повышенным уровнем работоспособности, является актуальной задачей.

© В. И. Рындяев. 2016

Анализ схемных и конструктивных решений приводов современных коксовых машин. Непрерывность технологического процесса в коксовом производстве оказывает существенное влияние на схемные и конструктивные решения приводов современных коксовых машин.

Широкое применение в современных коксовых машинах нашли индивидуальный и групповой приводы ходовых колес [2]. Под индивидуальным понимается такой привод, когда каждое из ходовых колес обслуживается в основном силовым потоком собственного двигателя, а под групповым – общего двигателя. Это определение весьма условно, однако позволяет ввести удобную классификацию схемных решений.

В индивидуальных редукторных приводах передачи редукторов находятся в более благоприятных условиях, чем, например, в аналогичной схеме при групповом приводе. Однако, такая система привода имеет и существенные недостатки.

Известно, что габаритные размеры редукторов приблизительно пропорциональны передаваемой нагрузке в степени $1/3$ [3]. Это значит, что снижение нагрузки вдвое лишь на 20–25 % снижает габаритные размеры каждого из редукторов, используемых в индивидуальных приводах, по сравнению с редуктором группового привода. Поэтому возникает серьезная проблема расположения редукторов, а также и двигателей, для которых аналогичные зависимости близки.

Опыт проектирования показывает, что при традиционных редукторных системах редукторы и двигатели могут быть расположены в линейном порядке. Это существенно удлиняет линию машины и удорожает ее.

Преимущества имеют групповые приводы с кинематической синхронизацией ходовых колес.

Из-за упомянутых выше соотношений, вес привода таких систем меньше, чем при индивидуальном приводе ходовых колес, расположение оборудования не вызывает каких-либо трудностей, особенно в системах с поздним разделением потоков, т.к. при использовании схем с ранним разделением мы встречаемся с теми же проблемами, что и при индивидуальном приводе.

Принципиальным является вопрос о положении синхронизирующего узла. Если такой узел расположен на входной стороне привода, мы называем такую схему с поздним разделением силового потока, если на входном - с ранним. Между обеими схемами идет непрерывная конкурентная борьба, связанная с определенными преимуществами и недостатками каждой из них.

Разработка обоснованных методов проектирования рациональных систем трансмиссий. Основной задачей при проектировании трансмиссий приводов коксовых машин, обладающих повышенным уровнем работоспособности, является обобщение опыта создания традиционных и новых систем трансмиссий, и разработка на этой основе обоснованных методов проектирования рациональных систем.

Решение этой задачи при создании традиционных систем возможно двумя путями: изыскание методов повышения допускаемых нагрузок и методов снижения действующих. При этом, как в первом, так

и во втором случае, конструктор вынужден обращаться к анализу различных моделей разрабатываемых систем от сравнительно простых – качественных до весьма сложных – эскизных, описываемых дифференциальными уравнениями высоких порядков, программных и т.п. Изыскание оптимального схемного решения связано, главным образом, с творческими возможностями конструктора.

В данной работе рассматриваются решения и методы достижения сформулированной цели вторым путем. В тех же случаях, когда реализация разработанного решения связана с изменением значений допустимых нагрузок, последние рассчитываются известными методами и комплексно учитываются сформулированными критериями при оценке рациональности схемного решения либо его основных параметров.

При создании же новых систем трансмиссий сформулированная выше цель работы является критерием для их кинематического либо кинематико – силового анализа. Квалифицированный кинематический и силовой анализ таких систем во многом предопределяет работоспособность коксовых машин и эффективность использования в них исследуемых систем.

Следовательно, наиболее острыми в связи со сформулированными целями являются две проблемы:

1. Обоснованного выбора из известных систем трансмиссий рациональной и ее основных параметров для реализации конкретных технологических задач.

2. Создание новых систем трансмиссий, обеспечивающих эффективную реализацию в основном нетрадиционных технологических либо специфических конструктивных задач.

Для решения первой проблемы необходимы постановка и разрешение следующих задач:

– Разработка критериев оценки проектных решений систем трансмиссий и анализ на их основе существующих тенденций использования известных систем.

– Исследование систем трансмиссий с позиции разработанных критериев, включающие:

– Разработку и исследование аналитических моделей трансмиссий;

– Разработку и экспериментальные исследования эксплуатирующихся либо внедряемых трансмиссий;

– Сопоставление результатов аналитических и экспериментальных исследований и оценку правомерности использования аналитических моделей.

– Формулирование методики выбора рациональных систем трансмиссий для решения конкретных технологических задач.

– Разработка инженерной методики расчета рациональных параметров трансмиссий.

Для решения второй проблемы:

– Кинематический синтез создаваемой системы трансмиссий.

– Силовой синтез.

– Проектная реализация.

– Экспериментальные исследования.

– Оценка перспективности использования и формулирования круга задач для дальнейших исследований.

Таким образом, можно констатировать, что в дальнейшем совершенствовании отечественного кок-

сового оборудованія проблеми розробки раціональних систем трансмісій приводів коксових машин займають важке місце. Вони актуальні, намагаються в пристальному увазі спеціалістів. Від їх рішення во багатому залежать кількісні та якісні показники роботи проектуваного та виготовлюваного коксового оборудованія.

Висновки. Аналіз роботи коксових машин показує, що найбільше навантаженими є трансмісії приводів. При розробці цих трансмісій велике значення має оцінка відомих та апробованих схемних рішень і визначення раціональної конструкції. Вибір з ряду рішень найбільш оптимального пов'язано, в основному, з творчими можливостями конструктора.

Застосування групових систем трансмісій суттєво знижує габарити приводу і дає прийнятне компоновочне рішення.

Створення нових систем трансмісій включає кінематико-силовий синтез, проектну реалізацію, проведення експериментальних досліджень і оцінку перспективності використання.

Список літератури:

1. *Непомнящий, И. Л.* Коксовые машины, их конструкции и расчеты [Текст] / *И. Л. Непомнящий*. – М.: Металлургиздат, 1963. – 388 с.
2. *Шепелев, И. Г.* Оборудование коксохимических заводов [Текст] / *И. Г. Шепелев*. – М.: Металлургия, 1966. – 332 с.
3. *Вирозуб, И. В.* Механическое оборудование коксохимических заводов [Текст] / *И. В. Вирозуб, Е. Я. Тахтамышев, М. В. Циперевич*. – М.: Металлургиздат, 1952. – 292 с.
4. *Непомнящий, И. Л.* Механизация и автоматизация на коксохимическом заводе [Текст] / *И. Л. Непомнящий*. – М.: Металлургиздат, 1962. – 312 с.
5. *Караваев, Н. М.* Машины и аппараты коксохимического производства [Текст] / *Н. М. Караваев, И. Я. Пильский, Н. Т. Шепелев*. – М.: Металлургиздат, 1955. – 288 с.

6. Справочник Коксохимика [Текст]: Т. 1, 11, 111. – М.: Металлургия, 1964.
7. Штанга виштовхувального пристрою коксовиштовхувача [Текст]: Патент України на корисну модель К 87302 МПК С 10 В 33/10 (2006.01) *Риндяев В. И.*; Заявл. 19.02.2013; опубл. 10.02.2014. – Бюл. № 3.
8. А.С. СССР № 962291, Кл. С 10 В 33/10. Устройство для выталкивания кокса из коксовых печей [Текст]: *Филипенко Е. С. и др.* Заявл. 19.11.1979; опубл. 30.09.1982. – Бюл. Ка 36.
9. А.С. СССР № 173698 А1, Кл. С 10 В 7/00. Штанга выталкивающего устройства коксовыталкивателя [Текст]: *Чамов А. В., Рогозина Т. В.* Заявл. 07.03.1989; опубл. 30.05.1992. – Бюл. № 20.
10. *Иванов, М. Н.* Детали машин [Текст] / *М. Н. Иванов, В. Н. Иванов*. – М.: Высшая школа, 1975. – 551 с.

Bibliography (transliterated):

1. Nepomnyashnij, I. L. (1963). Koksovyje mashiny, ix konstrukcii i rascheti. Moscow: Metallurgizdat, 388.
2. Shepelev, I. G. (1966). Oborudovanie koksoximicheskix zavodov. Moscow: Metallurgiya, 332.
3. Virozub, I. V., Taxtamyshev, E. Ya., Ciperovich, M. V. (1952). Mexanicheskoe oborudovanie koksoximicheskix zavodov. Moscow: Metallurgizdat, 292.
4. Nepomnyashnij, I. L. (1962). Mexanizacija i avtomatizacija na koksoximicheskom zavode. Moscow: Metallurgizdat, 312.
5. Karavaev, N. M., Pilsaf, I. Ya., Shepelev, I. G. (1955). Mashiny 4 apparaty koksoximicheskogo proizvodstva. Moscow: Metallurgizdat, 288.
6. Spravochnik Koksoximika (1965). T. 1, II, III. Moscow: Metallurgiya.
7. Rindyaev, V. I. (2014). Shtanga vishtovxuvalnogo pristroyu koksovishtovxuvacha. Patent Ukraini na korisnu model No 87302 MPK S 10 V 33/10 (2006.01). Zayavl. 19.02.2013; opubl. 10.02.2014. Byul. No23.
8. Filipenko E. S. i dr. (1982). A.S. SSSR 962291, K1. S 10 V 33/10. Ustrojstvo dlya vytallcivaniya koksa iz koksovyx pecej. Zayavl. 19.11.1979; opubl. 30.09.1982. Byul. No 36.
9. Chamov, A. V., Rogozina, T. V. (1992). A. S. SSSR No 173698 A1, K1. S 10 V 7/00. Shtanga vytalkivayushhego ustrojstva koksovytalkivatela. Zayavl. 07.03.1989; opubl. 30.05.1992. Byul. No 20.
10. Ivanov, M. N., Ivanov, V. N. (1975). Detali mashie. Moscow: Vysshaya shkola, 551.

Поступила (received) 17.03.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Направления в создании трансмісій приводів коксових машин/ В. И. Риндяев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.80–82. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Напрямки в створенні трансмісій приводів коксових машин/ В. И. Риндяев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.80–82. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Directions in creating transmissions of drives for coking machines/ V. I. Ryndyaev // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 17 (1189). – P.80–82. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Риндяев Виктор Иванович – кандидат технічних наук, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри хімічних і харчових технологій, ул. Университетская, 16, г. Харьков, Украина, 61003.

Риндяев Віктор Іванович – кандидат технічних наук, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри хімічних і харчових технологій, вул. Университетська, 16, г. Харьков, Україна, 61003.

Ryndyaev Viktor Ivanovich – candidate of technical sciences, Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy, Associate Professor of Chemical and Food Technology, ul. University, 16, Kharkov, Ukraine, 61003.

УДК 622.7

И. В. ХМЕЛЬ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕЗИНТЕГРАЦИИ МАГNETИТОВЫХ КВАРЦИТОВ В БАРАБАННОЙ МЕЛЬНИЦЕ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Математическое моделирование проведено с позиции баланса энергетических величин процесса дробления: работы внешнего силового воздействия и значения внутренней потенциальной энергии деформации кусков руды. Использовался метод конечных элементов для анализа напряженно-деформированного состояния элементов загрузки. Показано, что выделенный в любом месте элемент загрузки подвергается деформированию со стороны соседних элементов (кусков руды) в условиях всестороннего неравнокомпонентного сжатия контактными силами. Установлено, что механизм разрушения в барабане шаровой мельницы с резиновой футеровкой основан на наличии концентрации сдвиговых напряжений.

Ключевые слова: механизм разрушения, неравнокомпонентное сжатие, шаровая мельница, математическое моделирование, метод конечных элементов.

Математичне моделювання проведено з позицій балансу енергетичних величин процесу дроблення: роботи зовнішнього силового впливу та значення внутрішньої потенційної енергії деформації кусків руди. Використано метод кінцевих елементів для аналізу напружено-деформованого стану елементів завантаження. Показано, що на виділений у любому місці елемент завантаження діє деформування з боку сусідніх елементів (кусків руди) в умовах всебічного нерівно-компонентного тиску контактними силами. Встановлено, що механізм руйнування у барабані кулькового млина з гумовим футеруванням заснований на наявності концентрації зсувних напружень.

Ключові слова: механізм руйнування, нерівно-компонентний тиск, кульковий млин, математичне моделювання, метод кінцевих елементів.

Mathematical modeling is carried out from a position of power balance of crushing process: work of external power influence and value of internal potential energy of ore pieces deformation. The final element method for the analysis of the intense deformed condition of element loading was used. It is shown that the loading element allocated in any place is exposed to deformation from the neighboring loading elements (pieces of ore) in the conditions of comprehensive non-equal component compression by contact forces. It is established, the destruction mechanism in a spherical mill drum with rubber lining is based on existence of shift tension concentration.

The modeling results of the intense deformed condition of loading elements have confirmed that application of rubber wave lining allows using the appearing shift tension for material destruction in a mill that leads to decrease in process power consumption.

As scientific novelty for the first time on the modeling basis the existence of shift deformations at the loading elements movement in a mill drum with rubber lining is shown.

The practical importance of research is in justification of power consumption decrease of ore crushing in a ball mill with rubber lining due to shift deformations.

Keywords: the destruction mechanism, non-equal component compression, ball mill, mathematical modeling, final element method.

Введение. При обогащении полезных ископаемых разрушение горных пород для дальнейшего извлечения полезного ископаемого при его переработке – весьма сложный и энергоемкий физический процесс. Фактически от параметров этого процесса зависит рентабельность всего производства в целом. Использование данных существующего промышленного и научного опыта обогащения сырья в совокупности с применением современных компьютерных технологий инженерного анализа – это одна из концепций снижения энергоемкости передела руды.

Математическое моделирование в инженерном анализе на его современном уровне развития базируется на численном решении уравнений физики процесса, где ведущую роль играет высокоэффективный метод конечных элементов (МКЭ). Моделирование на основе геометрии объекта деформирования, свойств его материала и других параметров можно сравнить с его тестированием или построением его виртуального прототипа с высокой степенью адекватности.

Анализ исследований и публикаций и постановка проблемы. Последние исследования в рудоподготовке [1, 2] доказали существование в барабанных мельницах смешанного режима, который существенно отличается от принятого в теории Дэвиса. Поэтому рассматривая поперечное сечение барабана, считаем, что движение элементов загрузки состоит из трех этапов: подъем по круговой траектории, падение по параболической траектории и откат по контуру пяты. При этом существуют характерные области перепада с одной траектории на другую.

Модель основана на традиционной концепции – разбиение всего объема мельницы на элементы загрузки камеры, которые двигаются под силой массовых сил веса, центробежных сил инерции и реакции ограничивающей поверхности. Однако ранее созданные модели не учитывали взаимодействие элементов между собой и влияние свойств футеровки барабана [3, 4]. В предлагаемой модели основное внимание уделяется силам трения, поэтому учитываются силы взаимодействия между слоями элементов.

Таким образом, внутренний объем барабанной мельницы с загрузкой разбивается на плоские поперечные сечения, которые, в свою очередь, состоят из слоев элементарных элементов загрузки,двигающихся по траекториям. Полагаем, что указанные элементы загрузки, на которые разбит весь объем мельницы, имеют одинаковую форму с ребром Δl

Разрушение твердого тела происходит в том случае, если подведенной энергии достаточно для преодоления сил внутреннего сцепления. Величины показателей деформации и прочности, при прочих равных условиях, будут определять, прежде всего, некоторое сложное напряженно-деформированное состояние горной породы, характеризуемое взаимодействием каждого куска (объема) породы с другими кусками. На практике используются, так называемые, критерии разрушения (прочности), по которым и определяется момент разрушения породы в процессе внешнего воздействия на нее. Представленный подход предполагает изучение таких характеристик прочно-

© И. В. Хмель. 2016

сти материала, как модуль упругости и предел прочности. Их получают экспериментальным путем в условиях одноосного сжатия образцов, где эти характеристики усредняются в зависимости от размеров образцов.

Лабораторные исследования на сжатие образцов породы показывают свои закономерности процесса деформирования и разрушения материала горных пород. Изучение технико-минералогических разновидностей руд ПАО «СевГОК» на прочность при одноосном сжатии показало, что они отличаются как по своим вещественным свойствам (в частности, и по минеральному составу), так и характеру изменения прочностных характеристик (текстуры, структуры каждого образца), наложенных тектонических изменений, а также трещиноватости, возникшей в результате проведения буровзрывных работ в процессе добычи полезных ископаемых.

Анализ полученных данных показывает, что с увеличением размера образцов от 1 мм до 100 мм прочность при одноосном сжатии силикатно-магнетитовых кварцитов снижается примерно в 8 раз, магнетито-силикатных кварцитов – в 3 раза, магнетитовых кварцитов – в 5 раз. Анализ результатов исследований показал, что прочность горной породы на сжатие в 5-10 раз выше предела прочности на сдвиг и в 8-15 раз выше предела прочности на растяжение. Установлено, что энергоёмкость при разрушении стандартных образцов магнетитовых руд на ПАО «СевГОК» при деформациях сжатия в 17,4 раза больше, чем при разрушении сдвиговыми напряжениями [5]. Экспериментально подтверждено, что исследуемые магнетитовые кварциты в зависимости от типа технико-минералогической разновидности различным образом ведут себя при сжатии и растяжении: прочность на сжатие выше прочности на растяжение.

Способ разрушения материала в шаровых мельницах комбинированный, то есть присутствует и раздавливание - истирание от качения шаров, соприкосновения слоев элементов загрузки и сдвиговые деформации на поверхности футеровки, удары от падения элементов загрузки с шарами. От того, какой способ будет преобладающим и какой вклад каждого из них, зависит количество энергии, расходуемой на образование единицы новой поверхности.

Результаты технико-экономического использования мельницы зависят от множества факторов. Основными из них являются: крупность питания, размер и распределение мелющих тел, объем загрузки, скорость вращения барабана, форма и материал футеровки. В работе **реализована идея** повышения эффективности измельчения за счет использования силы трения элементов загрузки о резиновую волновую футеровку внутренней стенки барабана мельницы и трения между слоями и элементами загрузки с соблюдением принципа: разрушение горной породы должно осуществляться за счёт создания преимущественно сдвиговых напряжений.

Экспериментальные исследования [3, 6, 7, 8] видов напряженного состояния при больших необратимых деформациях вплоть до остаточной прочности позволили установить, что возрастающая с ростом бокового давления степень измельчения пород при

деформации имеет предел. Достигнув минимального размера, элементы дробления перестают измельчаться при дальнейшем увеличении. Измельчаемость и как следствие раскрытие минеральных зерен определяется размерами структурных элементов: зерен и кристаллов. Обнаружение этого факта позволило понять механизм развития деформационных процессов в условиях изменения давления на минеральные частицы за счет изменения профиля футеровки и внести принципиальные коррективы в деформационную модель.

Цель и задачи исследований. Целью исследований явилось установить наличие сдвигового механизма разрушения материала в мельнице с измененным профилем футеровки, который является основной причиной процесса дезинтеграции (измельчения), на основе использования моделирования самого процесса разрушения материала.

При расчете напряженного состояния материала при деформации его в слое целесообразно и допустимо: в качестве основной характеристики прочности горных пород использовать предельное значение сдвиговой составляющей напряженного состояния; в качестве предельного по сдвиговым напряжениям значения использовать предел упругости, так как пределы прочности и запредельной прочности имеют у большинства видов горных пород на порядок меньшую зону (область) существования, а также высокий коэффициент хрупкости; для изучения напряженного состояния горных пород в условиях неравнокомпонентного сжатия использовать данные о свойствах горных пород, полученные экспериментально в условиях одноосного сжатия, при минимальных значениях на образцах бокового давления.

Материалы и методы исследований. Рассмотрим математическое моделирование процесса взаимодействия кусков горной породы в технологическом процессе дробления для получения уровня энергозатрат в виде потенциальной энергии деформации породы в слое. Моделирование плоского напряженного состояния выполняется на основе метода конечных элементов (МКЭ) [9] с применением пакета программ Solidworks.

Математическое моделирование построено на основе численного решения МКЭ, где основные зависимости напряженно-деформированного состояния элементов загрузки в барабанной мельнице представлены в описании типа конечного элемента.

Построение конечно-элементной модели напряженно-деформированного состояния загрузки мельницы включает следующие этапы:

1. Формирование геометрии модели, включающее определение геометрических мест характерных зон шаровой мельницы, учет хаотического положения кусков руды с учетом падения мелющих шаров, движения слоев элементов загрузки.
2. Генерация секи конечных элементов деформируемых кусков руды, шаров, внутренних стенок барабан.
3. Выделение граничных условий взаимодействия элементов.
4. Задание свойств материалов горной породы, размеров мелющих шаров и свойств футеровки барабана мельницы.

5. Моделирование действующей нагрузки на выделенные элемент и область руды.

6. Графическая интерпретация полученных результатов.

Анализ большого числа экспериментальных результатов показал [3, 5], что в условиях объемного неравнокомпонентного сжатия горные породы разрушаются за счет скачкообразного прорастания критически ориентированных сдвиговых трещин.

На основе выше представленного анализа можно выдвинуть гипотезу о наличии сдвигового механизма разрушения материала в мельнице с измененным профилем футеровки, который является основной причиной процесса дезинтеграции (измельчения).

В частности, в работах лаборатории [5–8] на основе многолетних экспериментальных исследований принята концепция о существовании двух видов прочности твердых тел: прочность на отрыв и прочность на срез (сдвиг). Как установлено, эти два вида прочности, а соответственно два вида сопротивления разрушению в чистом виде являются крайними случаями. Первый из них относится к области действия исключительно растягивающих напряжений, а второй – к области сдвигающих напряжений, действующих при высоких значениях бокового давления.

Для изучаемого технологического процесса измельчения горной породы в условиях изменения профиля футеровки с ребристой на волновую, учитывая то, что основным силовым фактором в нем является боковое давление (в виде силы и момента), при оценке сопротивления горной породы разрушению наиболее целесообразно принять концепцию оценки ее прочности по максимальным сдвиговым напряжениям.

В пользу принятого утверждения свидетельствует и установленный экспериментально механизм развития деформации за пределом прочности, одним из важных моментов которого является неизменность коэффициента необратимой поперечной деформации μ как до, так и за пределом прочности горной породы. Это постоянство (равенство) свидетельствует о развитии деформационного процесса за пределом прочности по плоскостям сдвига, сформированным до предела прочности. Число плоскостей сдвига в разрушаемом фрагменте возрастает до (момента наступления) предела прочности и убывает за этим пределом, при этом, согласно статистической модели, это число не влияет на показатель μ .

Зависимость остаточной прочности пород от вида напряженного состояния по аналогии с предельными зависимостями прочности и упругости можно описать экспоненциальным уравнением такого же вида.

При построении модели учитывались особенности нагружения кусков руды при движении в барабане мельницы с резиновой волновой футеровкой. В этом случае при смене профиля футеровки возникает боковое давление, в связи с этим существует возможность смещения зерен друг относительно друга из-за неоднородности по крупности всего слоя материала, а основным силовым фактором является боковое давление. Поэтому при оценке сопротивления горной породы разрушению наиболее целесообразно принять концепцию оценки ее прочности по максимальным сдвиговым напряжениям.

Данные различных исследований [4, 10] показывают, что в сдвиговом потоке могут существовать три основных механизма появления напряжений: трение, перенос импульса за счет перемещения элементов из одного слоя в другой и перенос импульса за счет столкновения между элементами. Все эти механизмы действуют при движении элементов загрузки в камере барабанной мельницы. Хотя они действуют одновременно, особенности барабанной мельницы позволяют выделить области движения элементов загрузки, где преобладает один из видов напряжений.

Рассмотрим процесс передачи импульса вглубь элементов загрузки, представив элементы загрузки, расположенные в плоскости сечения, в виде наклонной цепочки, которые, двигаясь вместе с остальной частью загрузки, подвергаются давлению от опоры и соседних элементов. С определенной степенью точности такие напряжения можно считать плоскими.

Внутренний объем барабанной мельницы с загрузкой разбивается на плоские поперечные сечения, которые, в свою очередь, состоят из слоев элементарных элементов загрузки, двигающихся по траекториям. Полагаем, что указанные элементы загрузки, на которые разбит весь объем мельницы, имеют одинаковую форму с ребром Δl

В ходе моделирования полагаем, что на тело, находящееся в состоянии равновесия, действуют внешние силы. При этом для него задается некоторое виртуальное (предполагаемое) поле перемещений, которое является искомым и характеризуется в каждой точке пространства значением вектора $\{\delta\}$. Равновесие будет полным только тогда, когда при произвольных вариациях перемещений виртуальная работа внешних воздействующих сил равна работе внутренних сил сопротивления (или потенциальной энергии) деформированного тела. При этом поле виртуальных перемещений на континууме деформированного тела должно быть представлено непрерывными функциями пространственных координат и удовлетворять кинематическим условиям на его границах.

С учетом условия непрерывности используемый вариационно-энергетический принцип метода перемещений теории упругости (деформированного тела) утверждает, что сумма изменений потенциальной энергии воздействующих внешних нагрузок dW_p и внутренней энергии деформации $d\Lambda$ при некотором поле перемещений $\{\delta\}$ равна нулю. То есть имеем:

$$d(\Lambda - W_p) = d(\quad) = 0 \quad (1)$$

Работа воздействующих внешних нагрузок W равна по значению и противоположна по знаку потенциальной энергии сопротивления W_p деформируемого тела, т.е. $W_p = -W$. Таким образом, энергетическое состояние деформируемой механической системы характеризуется выражением вида $\frac{\partial(\Pi)}{\partial\{\delta\}} = 0$.

Каждое из составляющих потенциальной энергии деформирования Π является некоторой функцией от вектора перемещений $\{\delta\}$. Функционал потенциаль-

ной энергии для дискретной области определения деформируемого тела запишется в виде

$$\Pi = \sum_{e=1}^E (\Lambda^e - W^e) = \sum_{e=1}^E \Pi^e \quad (2)$$

где E – число элементов дискретной области определения; Π^e – доля потенциальной энергии отдельного конечного элемента. Тогда запишем необходимые выражения для составляющих полной потенциальной энергии деформируемого тела на конечном элементе. Внутренняя энергия деформации для моделирования среды горных пород определяется выражением вида:

$$\Lambda^e = \int_{V^e} 1/2(\{\varepsilon\}^T \{\delta\}) dv, \quad (3)$$

где интегрирование ведется по объему конечного элемента – V^e .

Вычисление вектора напряжений $\{\delta\}$ проводится после решения основной системы уравнений, осуществляется по известным узловым значениям поля перемещений и деформаций конечного элемента. Для представления результатов расчета достаточно вычислить напряжения в узлах и в центре конечного элемента. Вектор напряжений в узле конечного элемента записывается в виде $\{\sigma\} = [D][B]\{\delta\}^e$, где $[B]$ – матрица деформаций.

Решение этой задачи проверено на примере фрагмента слоя. Его конечно-элементная (КЭ) модель построена с применением КЭ объемного напряженно-деформированного состояния, где толщина фрагмента (в направлении оси Z) равна 1 мм.

При моделировании плоско-нагруженного состояния среды выделим три характерных положения элемента загрузки.

В первом случае элементы загрузки в зоне пята находятся под давлением верхних шаров загрузки и упавшего шара мелющей среды, диаметром 40мм и скоростью в момент удара - 1 м/с. Учитывается реакция резиновой футеровки, размеры шаров и преобладающие нормальные напряжения. Во втором случае действует давление только верхних шаров загрузки, которое определяется насыпной плотностью материала и высотой слоя. Для расчета принята плотность $\rho = 5250 \text{ кг/м}^3$, и высота слоя – 1м. В третьем случае действует давление, но уже под некоторым углом.

На рис. 1а) показаны расчетные напряжения, вызываемые на первом этапе движения элементов загрузки на резиновой поверхности футеровки после удара их шарами, падающими в районе пята.

На следующем шаге нормальные напряжения внутри элементов загрузки в области контакта с мелющим телом ослабевают, зато увеличиваются нагрузки со стороны элементов слоя. Второй характерный расчетный случай – исследование загрузки нижних элементов (кусков) загрузки под давлением

верхних элементов загрузки заданной высоты слоя и плотности элементов (рис. 1, б).

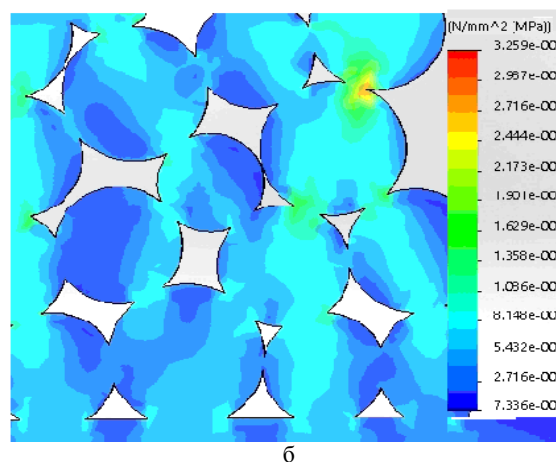
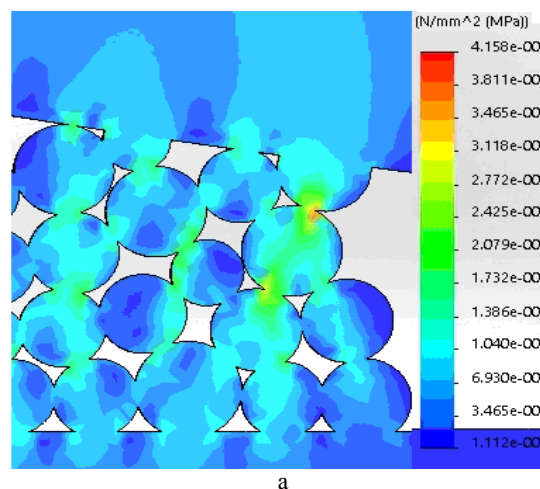


Рис. 1 – Напряжения в элементах загрузки: а – после удара шаром; б – в середине слоя под давлением верхних элементов загрузки.

Далее происходит подъем элементов загрузки, и необходимо учитывать появление касательных напряжений и, соответственно, напряжений сдвига. На рис. 2 показаны напряжения в элементах загрузки в результате деформаций сдвига внутри загрузки зоне ее подъема.

Выделенный в любом месте куска породы элемент загрузки подвергается деформированию со стороны соседних элементов загрузки (кусков породы) в условиях всестороннего неравнокомпонентного сжатия контактными силами. Данные силы определяют появление максимальных сдвиговых (касательных) напряжений τ , зависящих от возникающих в куске породы максимальных нормальных напряжений σ . Для этого элемента построены эпюры напряжений.

На рис. 3 показаны эпюры напряжений на указанный элемент в трех расчетных положениях.

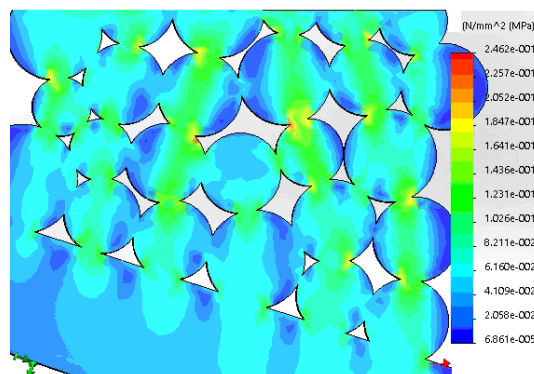


Рис. 2 – Напряжения в элементах загрузки в области предела прочности материала.

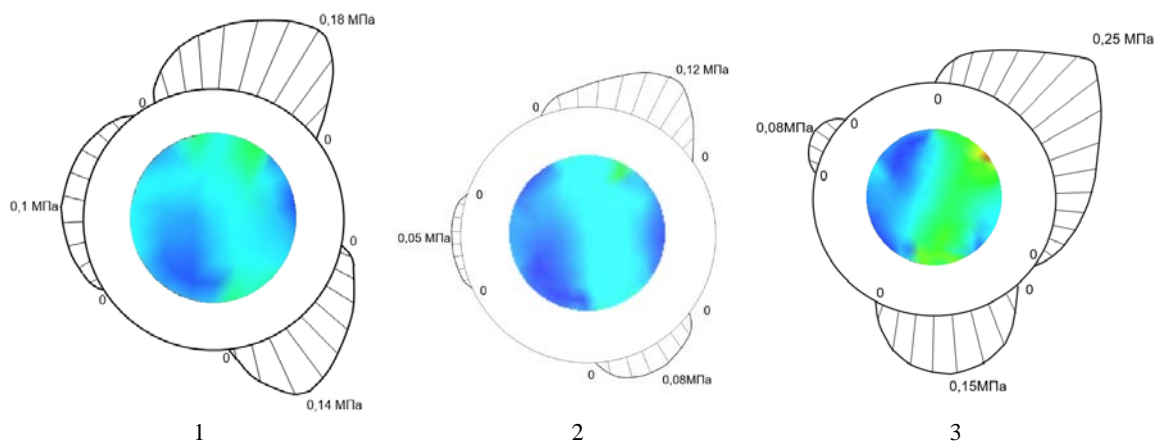


Рис. 3 – Эпюры нормальных напряжений для рассматриваемых положений элемента загрузки: 1 – первое расчетное положение, 2 – второе расчетное положение, 3 – третье расчетное положение

Расчеты показали, что наибольшие нормальные напряжения в элементе в середине расчетной области, находятся в третьем случае. При этом касательные напряжения также максимальные. Установлено, что при использовании резиновой футеровки касательные напряжения в 2 и более раз меньше нормальных. На основе исследования напряжений в кусках породы в слое загрузки методом конечных элементов на базе пакета Solidworks показано влияние сдвиговых напряжений на элементы загрузки. Показано, что механизм разрушения в барабане шаровой мельницы с резиновой футеровкой основан на наличии концентрации сдвиговых напряжений.

Разработанная модель подтверждена на полученных экспериментальных результатах. Применение резиновых футеровок конструкции резиновых и резинометаллических футеровок благодаря своим морфометрическим параметрам на СевГОКе в технологических схемах рудоподготовки позволило снизить удельный расход мелющих тел на 10 % и снизить удельный расход электроэнергии в целом на технологическую секцию на 10–12 % [6–8].

Выводы

1. Математическое моделирование проведено с позиции баланса энергетических величин процесса дробления: работы внешнего силового воздействия и значения внутренней потенциальной энергии деформации кусков руды и основано на использовании метода конечных элементов, анализа напряженно-

деформированного состояния элементов загрузки, учета сложной структуры взаимодействия кусков руды в слое частиц под давлением в процессе ее движения в барабанной мельнице.

2. Разработанная модель процесса измельчения магнетитовых кварцитов при условии изменения сдвиговых и ударных нагрузок позволяет рассчитать максимальные и минимальные нагрузки в элементах внутримельничной загрузки (руда, шары, вода, футеровка) при шаровом измельчении магнетитовых кварцитов с учетом формы и материала футеровки.

3. Показано, что выделенный в любом месте элемент загрузки подвергается деформированию со стороны соседних элементов загрузки (кусков руды) в условиях всестороннего неравнокомпонентного сжатия контактными силами. Данные силы определяют появление максимальных сдвиговых (касательных) напряжений, зависящих от возникающих в куске породы максимальных нормальных напряжений.

4. Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния элементов загрузки подтвердили, что применение резиновой футеровки волнового вида позволяет использовать при разрушении материала в мельнице появляющиеся сдвиговые напряжения, что ведет к снижению энергоемкости процесса.

Список литературы:

1. *Маляров, П. В.* Основы интенсификации процессов рудоподготовки [Текст] / П. В. Маляров - Ростов - на - Дону, 2004. – 185 с.

2. Андреев, Е. Е. Дробление, измельчение и подготовка сырья к обогащению: Учебник [Текст] / Е. Е. Андреев, О. Н. Тихонов - Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет). СПб, 2007. – 439 с.
3. Дырда, В. И. Резиновые футеровки технологических машин [Текст] / В. И. Дырда, Р. П. Зозуля, А. П. Левицкий, И. В. Хмель – Днепропетровск, 2014. – 255 с.
4. Науменко, Ю. В. Основи теорії режимів роботи барабаних млинів: Монографія [Текст] / Ю. В. Науменко. – Рівне: Вид-во СПД Зелент О.І., 2009. – 282 с.
5. Дырда, В. И. Кинетика измельчения минерального сырья в шаровых мельницах с резиновой футеровкой [Текст] / В. И. Дырда, В. А. Калашиников, И. В. Хмель, Е. В. Калганков // Геотехнічна механіка. – 2013. – № 108. – С. 89–96.
6. Олейник, Т. А. Исследование влияния резиновых футеровочных плит на эффективность измельчения руды Северного ГОКа [Текст] / Т. А. Олейник., И. В. Хмель // Вісник КНУ. – 2013. – Вип. 34. – С. 123–127.
7. Олейник, Т. А. Исследования влияния профиля резиновой футеровки на процесс измельчения в барабанных мельницах [Текст] / Т. А. Олейник, И. В. Хмель // Вісник Криворізького технічного університету. Зб.наук.праць. – 2011. – Вип. 29. – С. 242–246.
8. Олейник, Т. А. Особенности процессов рудоподготовки при использовании мельниц с резиновой футеровкой [Текст] / Т. А. Олейник, И. В. Хмель // Вісник Криворізького технічного університету. Зб.наук.праць. – 2011. – Вип. 30. – С. 181–186.
9. Морозов, Е. М. Метод конечных элементов в механике разрушения [Текст] / Е. М. Морозов, Г. П. Никишков. – М.: Наука, – 1980. – 254 с.
10. Сэвидж, С. Тензор напряжений в потоке гранулированной среды при высоких скоростях сдвига: Пер. С англ. [Текст] / С. Сэвидж, Д. Джеффри // Механика гранулированных сред: теория быстрых движений. – М.: Мир, 1985. – С. 147–170.

Bibliography:

1. Malyarov, P. (2004). Bases of an intensification of ore dressing process. Monograph, Rostov - on - Don, 185.
2. Andreyev, E. Tikhonov, O. (2007). Crushing, grinding and preparation of raw materials for enrichment. Textbook, St. Petersburg state mining institute (technical university), SPB, 439.
3. Dyrda, N., Zozul, R., Levitsky, A., Hmel, I. (2014). Rubber linings of technological machines. Monograf, Dnipropetrovsk, 255.
4. Naumenko, Yu. (2009). Theory basis and drum mill operation. Monograph Rivne, SPD of Zelent, 282.
5. Dyrda, V., Kalashnikov, V., Hmel, I., Kalgankov, E. (2013). Kinetics of mineral raw materials crushing in ball mills with rubber lining. Geotekhnichna of a mekhanik, 108, 89–96.
6. Oleynik, T., Hmel, I. (2013). Research of influence of rubber lining plates on efficiency of Northern GOK ore crushing. Visnik KNU, 34, 123–127.
7. Oleynik, T., Hmel, I. (2011). Researches of influence of a profile of rubber lining on process of crushing in drum mills. Visnik of KNU, 29, 242–246.
8. Oleynik, T., Hmel, I. (2011). Features of ore preparation processes for mill with rubber lining. Visnik of KNU, 30, 181–186.
9. Morozov, E., Nikishkov, G. (1980). A method of final elements in mechanics of destruction. Monograph, Moscow: Science, 254.
10. Sevidg, S. (1985). About the tension tensor in a stream of the granulated medium at the high shift speeds. Mechanics of the granulated environments: the theory of fast movements, Moscow: World, 147–170

Поступила (received) 20.03.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Моделирование процесса дезинтеграции магнетитовых кварцитов в барабанной мельнице на основе использования метода конечных элементов/ И. В. Хмель// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 17(1189). – С.83–88. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Модельовання процесу дезінтеграції магнетитових кварцитів в барабаних млинах на основі використання методу кінцевих елементів/ І. В. Хмель// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 17(1189). – С.83-88. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Disintegration process modeling of the magnetite quartzite in a drum mill on the basis of a final elements method use/I. V. Khmil//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Khar'kov: NTU “KhPI”, 2016. – No 17 (1189).– P.83–88. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Хмель Ірина Віталіївна – аспірант, ДВНЗ «Криворізький національний університет», кафедра "Збагачення корисних копалин і хімії"; вул. XXII Партз'їзду, 11, г. Кривий Ріг, Україна, 50027; тел.: 098-110-48-30; e-mail: irina414@ukr.net.

Хмель Ірина Віталіївна – аспірант, ГБУЗ «Криворожський національний університет», кафедра «Обогащення корисних копалин і хімії»; ул. XXII Партсъезда, 11, г. Кривой Рог, Украина, 50027; тел.: 098-110-48-30; e-mail: irina414@ukr.net.

Khmil Iryna Vitalievna – graduate, State institution of higher educational "Kryvyi Rih National University", Department "Mineral processing and chemistry"; Kryviy Rig, XXII party Assembly st. 11; Ukraine, tel.: 098-110-48-30; e-mail: irina414@ukr.net.

УДК 541.128.13

Н. І. ЛАПИЧАК, В. В. ІВАСІВ, Р. В. НЕБЕСНИЙ, О. О. МАЦЬКІВ, А.-Б. В. ШАТАН

ОДЕРЖАННЯ АКРИЛАТНИХ МОНОМЕРІВ З ПРОПІОНОВОЇ КИСЛОТИ І ФОРМАЛЬДЕГІДУ В ПРИСУТНОСТІ МЕТАНОЛУ В ГАЗОВІЙ ФАЗІ

Досліджено процес одержання метилметакрилату та метакрилової кислоти альдольною конденсацією пропіонової кислоти з формальдегідом в присутності метанолу у газовій фазі на твердому катализаторі. Встановлено ефективність катализатора на основі оксидів бору та фосфору промотованого оксидом цирконію та вплив температури і часу контакту на конверсію пропіонової кислоти, селективність утворення та вихід метилметакрилату та метакрилової кислоти. Визначено оптимальні умови (температура та час контакту) перебігу процесу газозфазної конденсації пропіонової кислоти з формальдегідом у присутності метанолу. Результати досліджень можуть бути використанні для розробки нового технологічного процесу.

Ключові слова: метилметакрилат, метакрилова кислота, альдольна конденсація, катализатор, акрилатні мономери, метилпропіонат, пропіонова кислота, формальдегід.

Исследован процесс получения метилметакрилата и метакриловой кислоты альдольной конденсацией пропионовой кислоты с формальдегидом в присутствии метанола в газовой фазе на твердом катализаторе. Установлено эффективность катализатора на основе оксидов бора и фосфора промотированного оксидом циркония и влияние температуры и времени контакта на конверсию пропионовой кислоты, селективность образования и выход метилметакрилата и метакриловой кислоты. Определены оптимальные условия (температура и время контакта) течения процесса газозфазной конденсации пропионовой кислоты с формальдегидом в присутствии метанола. Результаты исследований могут быть использованы для разработки нового технологического процесса.

Ключевые слова: метилметакрилат, метакриловая кислота, альдольная конденсация, катализатор, акрилатные мономеры, метилпропионат, пропионовая кислота, формальдегид.

The article dedicated to the synthesis of acrylate monomers – methyl methacrylate and methacrylic acid by aldol condensation of propionic acid with formaldehyde in the presence of methanol in the gas phase on catalyst promoted by zirconium oxide. It was found that compared to earlier research using only propionic acid and formaldehyde, three important products – methyl methacrylate, methacrylic acid, methyl propionate – can be obtained simultaneously at equimolar ratio of reactants.

In result of the research the effect of temperature and residence time on selectivity and yield of acrylic monomers was determined. The optimum conditions of the process were selected to be temperature 653 K and residence time 12 sec. Under these conditions, the total yield of the target products methyl methacrylate and methacrylic acid 27.6 % was obtained at the selectivity of their formation 49.7 %. Also non-target but valuable product methyl propionate was obtained with yield 5 %.

As scientific innovation it was proposed to combine the two stages of condensation and esterification by implementing the process of aldol condensation of propionic acid with formaldehyde in the presence of methanol, which will significantly simplify the hardware design and reduce number of stages for production of methyl methacrylate and methacrylic acid from ethylene.

The practical significance of the results is that it can be used to create a new joint process to obtain methyl methacrylate and methacrylic acid.

Keywords: methyl methacrylate, methacrylic acid, aldol condensation, catalyst acrylate monomers, methylpropionate, propionic acid, formaldehyde.

Вступ. Доступною сировиною в промисловості органічного синтезу є етилен, світове річне виробництво якого, станом на 2016 рік, становить понад 160 млн. т. З етилену синтезують широкий ряд важливих продуктів таких як: етилен оксид, етанол, поліетилен, полівінілхлорид, метил хлороформ, трихлоретилен, етилбензен, пропіонової альдегід та ін. Зокрема його використовують і для одержання пропіонової кислоти, яка може бути використана для виробництва акрилатів – метилметакрилату (ММА) і метакрилової кислоти (МАК), що є одними з дуже цінних мономерів органічного синтезу [1, 2].

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. На даний час у промисловості реалізовано чотиристадійний метод виробництва ММА з етилену, на першій стадії якого карбонілюванням етилену одержують пропіонової альдегід, який методом альдольної конденсації з формальдегідом (ФА) перетворюють у метакролеїн; метакролеїн в подальшому окислюють в МАК, яка подається на стадію естерифікації до ММА.

Перспективним є процес одержання ММА з етилену, на першій стадії якого методом гідрокарбонілювання одержують пропіонової кислоту (ПК), з якої методом альдольної конденсації з ФА одержують МАК, останню подають на стадію естерифікації з метанолом у кінцевий продукт ММА.

На нашу думку, реалізація процесу конденсації ПК з ФА в присутності метанолу дасть змогу

об'єднати дві стадії альдольної конденсації і естерифікації в одну, що у свою чергу значно спростить промисловий процес. Впровадження даного процесу викликає значну зацікавленість, проте існує ряд причин, що зумовлюють неможливість його промислової реалізації. Відомі на сьогодні катализатори процесу конденсації ПК з ФА в присутності метанолу не можуть забезпечити високого виходу цільового продукту [3,4], що пов'язано з низькою конверсією вихідних реагентів або низькою селективністю утворення цільових продуктів. Також, існуючі катализатори здатні забезпечити високу селективність [5] і вихід цільових продуктів лише при значних надлишках ПК і метанолу [6], що зумовлює необхідність в постійній рециркуляції великої кількості непрореагованих речовин і як наслідок спричиняє зниження економічної ефективності виробництва. Також надлишок вихідного реагенту, такого як пропіонової кислота, буде призводити до збільшення перебігу побічних реакцій з утворенням нецільових продуктів.

З попередніх досліджень було встановлено, що використання в якості катализатора суміші оксидів $B_2O_3-P_2O_5/SiO_2$ нанесених на силікагель є ефективним катализатором альдольної конденсації ПК і ФА [7, 8].

З літературних даних відомо, що для процесів конденсації естерів насичених карбонових кислот (наприклад, метилацетату та метилпропіонату) [7] переважно використовують катализатори основного типу, а саме оксиди лужних та лужноземельних металів, нанесені на силікагель; у процесах конденсації оцтової та пропіонової кислот з формальдегідом ефективними є катализатори кислотного типу [9, 10], зокрема, на основі суміші оксидів бору та фосфору, промотовані оксидами перехідних металів, зокрема оксидом цирконію [11]. Враховуючи, що у реакціях естерифікації зазвичай використовуються кислотні катализатори можна очікувати, що катализатор на основі оксидів бору та фосфору промотованого оксидом металу перехідного елементу проявить ефективні каталітичні властивості у процесі суміщеної конденсації та естерифікації ПК з ФА та метанолом.

Мета та завдання досліджень. Метою даної роботи є встановлення ефективності катализатора на основі оксидів бору та фосфору промотованого оксидом цирконію, на каталітичне перетворення ПК з ФА в присутності метанолу в ММА та МАК та визначення оптимальних умов процесу для забезпечення прийнятної конверсії, виходу і селективності утворення цільових продуктів ММА і МАК при еквімолярному співвідношенні вихідних реагентів.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні завдання:

- визначити вплив зміни температури та часу контакту на параметри процесу альдольної конденсації ПК і ФА в присутності метанолу на $B_2O_3-P_2O_5-ZrO_2/SiO_2$ катализаторі;
- встановити оптимальні умови (температура та час контакту) процесу.

Матеріали та методи досліджень. Для проведення досліджень було приготовано каталітичну систему на основі сумішей оксидів бору та фосфору з оксидом цирконію при співвідношенні компонентів $B_2O_3:P_2O_5:ZrO_2=3:1:0,3$. Причиною вибору такого складу катализатора було те, що за такого співвідношення катализатор проявляє найбільшу ефективність в процесі альдольної конденсації метилпропіонату і формальдегіду, який є дуже схожим [11]. Каталітичні властивості розроблених катализаторів досліджували на проточній установці зі стаціонарним шаром катализатора. Процес здійснювали при еквімолярному співвідношенні вихідних реагентів, зі зміною часу контакту в межах від 2 до 16 с. Інтервалом температур було обрано 563–683К, це обумовлено тим, що при температурі нижче 563К конверсія реагентів є дуже малою, а за температури вище 683 К катализатор втрачає свою стабільність. Продукти реакції аналізували за допомогою газоріднинної хроматографії. Як джерело формальдегіду використовували формалін. Каталітичну систему складу $B_2O_3-P_2O_5-ZrO_2/SiO_2$ готували методом просочування [10].

Результати досліджень конденсації пропіонової кислоти з формальдегідом в присутності метанолу. Як видно на рис. 1, зі збільшенням температури зростає як конверсія ПК, так і селективність утворення МАК, яка утворюється в результаті конденсації ПК з ФА. Також за рахунок естерифікації ПК з метанолом утворюється метилпропіонат (МП), селективність

утворення якого є максимальною при 563 К і з ростом температури знижується. Селективність утворення ММА залишається майже без змін на всьому інтервалі температур. Найвищу конверсію ПК було отримано при часі контакту 12 с і інтервалі температур 653–683 К. Оптимальною температурою можна вважати 653 К, при якій досягається конверсія – 55,4 %, оскільки при 683 К конверсія всього лише на 0,5 % більша, а здійснення процесу при цій температурі потребує вищих енергетичних затрат.

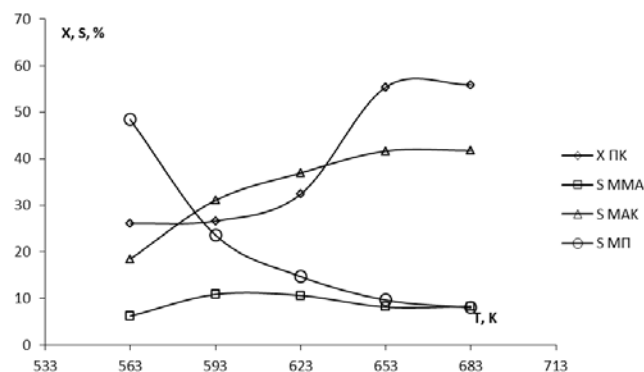


Рис. 1 – Вплив температури на конверсію пропіонової кислоти і селективність утворення продуктів, при часі контакту 12 с.

Залежність (рис. 2) селективності утворення цільових продуктів ММА та МАК від часу контакту в інтервалі температур 563–683 К є екстремальною і має максимум при часі контакту 12 с. Найбільше значення селективності – 50 % досягнуто при температурі 683 К, однак при 653 К селективність є тільки трохи нижчою – 49,7 %, тому ми вважаємо цю температуру оптимальною.

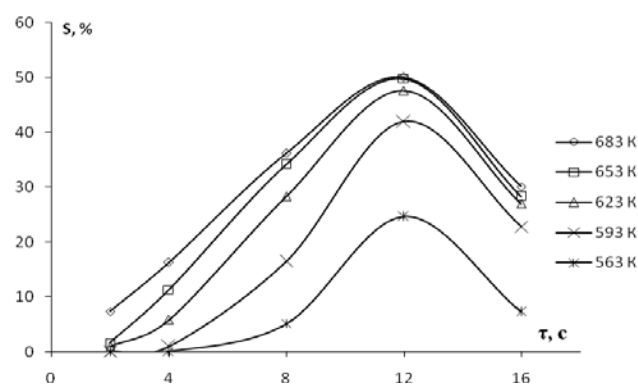


Рис. 2 – Вплив зміни часу контакту на селективність утворення цільових продуктів ММА і МАК, в інтервалі температур 563–683 К.

Також було встановлено залежність виходу цільових продуктів від температури на досліджуваному катализаторі (рис. 3). Найбільше значення сумарного виходу цільових продуктів ММА і МАК одержано при часі контакту 12 с та температурі 653 К і становить 27,6 %. На досліджуваному катализаторі, в умовах перебігу процесу, побічним продуктом є метилпропіонат, котрий можна виділити як товарний продукт вихід якого становить до 10 %.

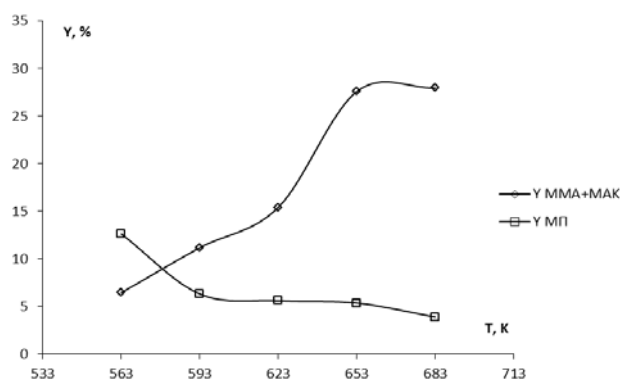


Рис. 3 – Вплив температури на вихід цільових продуктів, час контакту 12 с.

Оптимальними умовами було обрано час контакту 12 с і температура 653 К, при яких було одержано конверсію пропіонової кислоти – 55,4 % і сумарний вихід утворення ММА і МАК – 27,6 %. Якщо використовувати в даному процесі рециркуляцію непрореагованих реагентів, то вихід цільових продуктів складатиме 49,7 %.

Обговорення результатів одержання акрилатних мономерів. Виконані дослідження показали, що розроблена каталітична система $V_2O_5-P_2O_5-ZrO_2/SiO_2$ є ефективною, а процес альдольної конденсації пропіонової кислоти з формальдегідом у присутності метанолу в газовій фазі є перспективним. Порівняно з дослідженнями проведеними раніше лише з використанням ПК і ФА вдалось досягнути одержання одразу трьох важливих продуктів – метилметакрилату, метакрилової кислоти, метилпропіонату при еквімолярному співвідношенні реагентів. Необхідно відзначити, що ММА може утворюватися як з МАК естерифікацією з метанолом, так і з МП конденсацією з ФА. Вплив зміни часу контакту наступний: зі збільшенням часу контакту до 12 с збільшується конверсія і селективність утворення продуктів, вище 12 с – відбувається зменшення селективності утворення продуктів. Вплив зміни температури: з ростом температури конверсія і селективність зростають у всьому досліджуваному інтервалі.

Оптимальними умовами здійснення процесу було обрано температуру 653 К і час контакту 12 с. За таких умов одержуємо сумарний вихід цільових продуктів ММА і МАК становить – 27,6 % при селективності їх утворення – 49,7 %. Також в обраних за оптимальні умов вихід не цільового, але важливого продукту метилпропіонату становить – 5 %. Недоліком розробленого каталізатора в даному процесі можна вважати низьку селективність утворення продуктів, тому подальші дослідження будуть спрямовані на її підняття за рахунок зміни співвідношення реагентів, пошуку ще більш ефективних промоторів, можливо використання суміші промоторів. Отримані результати будуть використані для подальшого розроблення і вдосконалення нового технологічного процесу.

Висновки

У результаті проведених досліджень встановлено, що каталізатор складу $V_2O_5:P_2O_5:ZrO_2=3:1:0,3$ є ефективним у процесі конденсації ПК і ФА в присутності метанолу, а запропонований метод одержання суміші акрилатних мономерів може бути конкурентоспроможним, оскільки виробництво вихідної сировини – етилену існує, зокрема і в Україні.

Встановлено вплив зміни температури і часу контакту на процес одержання акрилатних мономерів.

Обрано оптимальну температуру перебігу процесу та час контакту реакції – 653 К і 12 с відповідно. В цих умовах одержано сумарний вихід цільових продуктів ММА і МАК – 27,6 % при селективності їх утворення 49,7 % та вихід МП становить 5%. Одержані результати будуть використані для подальшого розроблення каталізаторів процесу.

Список літератури:

- (Meth)acrylic coating material and coated material coated with the same [Text] / Sakamoto Yoshiko, Tsuchiya Nobuyuki, Makino Tomonori, Narimatsu Hiroshi // Patent JP2009144009 JP, NISSHIN STEEL CO LTD. – No JP2007000321315; filing date: 12.12.2007; publication date: 02.07.2009.
- Polymethylmethacrylate bone cement [Text] / Kühn, Klaus-dieter (Marburg, DE), Vogt, Sebastian (Erfurt, DE) // Patent United State 7655706, assignee: Heraeus Kulzer GmH (Hanau, DE). – No 447807; filing date: 06.06.2006; publication date: 02.02.2010.
- Synthesis of methacrylic acid by aldol condensation of propionic acid with formaldehyde over acid–base bifunctional catalysts [Text] / Jianren Tai, Robert J. Davis // Catalysis Today. – 2007. – Vol. 123. – P. 42–49. doi: 10.1016/j.cattod.2007.02.004
- Synthesis of methyl methacrylate by vapor phase condensation of formaldehyde with propionate derivatives [Text] / Makarand R. Gogate, James J. Spivey, Joseph R. Zoeller // Catalysis Today. – 1997. – Vol. 36. – P. 243–254. doi: 10.1016/s0920-5861(96)00241-6
- Production of methacrylic acid by vapor-phase aldol condensation of propionic acid with formaldehyde over silica-supported metal phosphate catalysts [Text] / Mamoru Ai, Hideyuki Fujihashi, Sanae Hosoi, Akiyo Yoshida // Applied Catalysis. – 2003. – Vol. 252. – P. 185–191. doi: 10.1016/s0926-860x(03)00449-6
- Methacrylic acid synthesis. Condensation of propionic acid with formaldehyde over alkali metal cation on silica catalysts [Text] / O. H. Bailey, R. A. Montag, J. S. Yoo // Applied Catalysis A: General. – 1992. – Vol. 88. – P. 163–177.
- Nebesnyi, R. Acrylic acid obtaining by acetic acid catalytic condensation with formaldehyde [Text] / R. Nebesnyi, V. Ivashiv, Y. Dmytruk, N. Lapychak // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2013. – No 6/6(66). – С. 40–42. doi: 10.15587/1729-4061.2013.19130
- Небесний, Р. В. Метакриловова кислота. Одержання конденсацією пропіонової кислоти з формальдегідом у газовій фазі [Текст] / Р. В. Небесний, В. В. Івасів, В. М. Жизневський, З. Г. Пліх // Хімічна промисловість України. – 2012. – No 1. – С. 3–6.
- Process for the production of acrylic acid or methacrylic acid [Text] / Niizuma, Hiroshi (Aichi, JP), Miki, Toshiro (Tokyo, JP), Kojima, Shiro (Aichi, JP) and others // Patent United State 4677225, assignee: Toagosei Chemical Industry Co., Ltd. (Tokyo, JP). – No 736621; filing date: 21.05.1985; publication date: 30.06.1987.
- Condensation of Methyl Propionate with Formaldehyde to Methyl Methacrylate over Cs-Zr-Mg/SiO₂ Catalysts [Text] / S. Ding, L. Wang, R. Y. Yan, Y. Y. Diao, Z. X. Li, S. J. Zhang, S. J. Wang // Advanced Materials Research. – 2012. – Vol. 396–398. – P. 719–723. doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.396-398.719
- Небесна, Ю. В. Дослідження технологічних та кінетичних закономірностей сумісного одержання метакрилатів на цирконійвмісних каталізаторах [Текст] / Ю. В. Небесна, В. В. Івасів, Р. В. Небесний // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2015. – No 5, Т. 6 (77). – С. 49–52. doi: 10.15587/1729-4061.2015.51348

Bibliography (transliterated):

1. Sakamoto Yoshiko, Tsuchiya Nobuyuki, Makino Tomonori, Narimatsu Hiroshi (2009). (Meth)acrylic coating material and coated material coated with the same. Patent JP2009144009 JP, NISSHIN STEEL CO LTD, JP2007000321315; filing date: 12.12.2007; publication date: 02.07.2009.
2. Kühn, Klaus-dieter (Marburg, DE), Vogt, Sebastian (Erfurt, DE) (2010). Polymethylmethacrylate bone cement. Patent United State 7655706, assignee: Heraeus Kulzer GmbH (Hanau, DE), 447807; filing date: 06.06.2006; publication date: 02.02.2010.
3. Jianren Tai, Robert J. Davis (2007). Synthesis of methacrylic acid by aldol condensation of propionic acid with formaldehyde over acid–base bifunctional catalysts. *Catalysis Today*, 123, 42–49. doi: 10.1016/j.cattod.2007.02.004
4. Makarand R. Gogatea, James J. Spiveya, Joseph R. Zoellerb (1997). Synthesis of methyl methacrylate by vapor phase condensation of formaldehyde with propionate derivatives. *Catalysis Today*, 36, 243–254. doi: 10.1016/s0920-5861(96)00241-6
5. Mamoru Ai, Hideyuki Fujihashi, Sanae Hosoi, Akiyo Yoshida (2003). Production of methacrylic acid by vapor-phase aldol condensation of propionic acid with formaldehyde over silica-supported metal phosphate catalysts. *Applied Catalysis*, 252, 185–191. doi: 10.1016/s0926-860x(03)00449-6
6. Bailey, O. H., Montag, R. A., Yoo, J. S. (1992). Methacrylic acid synthesis. Condensation of propionic acid with formaldehyde over alkali metal cation on silica catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 88, 163–177.
7. Nebesnyi, R., Ivasiv, V., Dmytruk, Y., Lapychak, N. (2013). Acrylic acid obtaining by acetic acid catalytic condensation with formaldehyde. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/6(66), 40–42. doi: 10.15587/1729-4061.2013.19130
8. Nebesnyi, R. V., Ivasiv, V. V., Zhyznevskiy, V. M., Pikh, Z. H. (2012). Metakrylova kyslota. Oderzhannia kondensatsiieiu propionovoi kysloty z formaldehydom u hazovii fazi. *Khimichna promyslovisht Ukrainy*, 1, 3–6.
9. Niizuma, Hiroshi (Aichi, JP), Miki, Toshiro (Tokyo, JP), Kojima, Shiro (Aichi, JP) and others (1987). Process for the production of acrylic acid or methacrylic acid. Patent United State 4677225, assignee: Toagosei Chemical Industry Co., Ltd. (Tokyo, JP), 736621; filing date: 21.05.1985; publication date: 30.06.1987.
10. S. Ding, L. Wang, R. Y. Yan, Y. Y. Diao, Z. X. Li, S. J. Zhang, S. J. Wang (2012). Condensation of Methyl Propionate with Formaldehyde to Methyl Methacrylate over Cs-Zr-Mg/SiO₂ Catalysts. *Advanced Materials Research*, 396–398, 719–723. doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.396-398.719
11. Nebesna, Yu. V., Ivasiv, V. V., Nebesnyi, R. V. (2015). Doslidzhennia tekhnolohichnykh ta kinetychnykh zakononomirnostei sumisnoho oderzhannia metakrylativ na tsyrkoniiemisnykh katalizatorakh. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5, 6 (77), 49–52. doi: 10.15587/1729-4061.2015.51348

Поступила (received) 17.03.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Одержання акрилатних мономерів з пропіонової кислоти і формальдегіду в присутності метанолу в газовій фазі/ Н. І. Лапичак, В. В. Івасів, Р. В. Небесний, О. О. Мацьків, А.-Б. В. Шатан// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.89–93– Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.

Получение акрилатных мономеров с пропионозой кислоты и формальдегида в присутствии метанола в газовой фазе/ Н. И. Лапичак, В. В. Ивасив, Р. В. Небесный, О. О. Мацкив, А.-Б. В. Шатан// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.89–93. – Бібліогр.: 1 назв. – ISSN 2079-5459.

Obtaining of acrylate monomers from propionic acid and formaldehyde in the presence of methanol in the gas phase/ N. I. Lapychak, V. V. Ivasiv, R. V. Nebesnyi, E. O. Matskiv, A.-B. V. Shatan// Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 17 (1189). – P.89–93. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Лапичак Назарій Ігорович – Аспірант, Кафедра технології органічних продуктів, Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013, e-mail: glominik@gmail.com.

Лапичак Назарій Ігоревич – Аспірант, Кафедра технологии органических продуктов, Национальный университет «Львовская политехника», ул. С. Бандеры, 12, Львов, Украина, 79013, e-mail: glominik@gmail.com.

Lapychak Nazariy – PhD student, Technology of Organic Products Department, Lviv Polytechnic National University, S.Bandery, 12, Lviv, Ukraine, 79013, e-mail glominik@gmail.com.

Івасів Володимир Васильович – Кандидат технічних наук, докторант Кафедра технології органічних продуктів, Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013, e-mail: el.spectre.x@gmail.com.

Ивасив Владимир Васильевич – Кандидат технических наук, докторант, Кафедра технологии органических продуктов, Национальный университет «Львовская политехника», ул. С. Бандеры, 12, Львов, Украина, 79013, E-mail: el.spectre.x@gmail.com.

Volodymyr Ivasiv – PhD., doctoral, Technology of Organic Products Department, Lviv Polytechnic National University, S.Bandery, 12, Lviv, Ukraine, 79013, e-mail: el.spectre.x@gmail.com.

Небесний Роман Володимирович – Кандидат технічних наук, докторант Кафедра технології органічних продуктів, Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013, e-mail: nebesnyi@lp.edu.ua, nebesnyi@ukr.net.

Небесный Роман Владимирович – Кандидат технических наук, докторант, Кафедра технологии органических продуктов, Национальный университет «Львовская политехника», ул. С. Бандеры, 12, Львов, Украина, 79013, e-mail: nebesnyi@lp.edu.ua, nebesnyi@ukr.net.

Roman Nebesnyi – Ph.D., doctoral, Technology of Organic Products Department, Lviv Polytechnic National University, S.Bandery, 12, Lviv, Ukraine, 79013, e-mail: nebesnyi@lp.edu.ua, nebesnyi@ukr.net.

Мацьків Олена Олександрівна – Кандидат технічних наук, асистент, Кафедра цивільної безпеки, Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013, e-mail: o.olex.ul@gmail.com.

Мацьків Елена Александровна – Кандидат технических наук, асистент, Кафедра гражданской безопасности, Национальный университет «Львовская политехника», ул. С. Бандеры, 12, Львов, Украина, 79013, e-mail: o.olex.ul@gmail.com.

Matskiv Elena – Ph.D., assistant, Civil Protection Department, Lviv Polytechnic National University, S.Bandery, 12, Lviv, Ukraine, 79013, e-mail: o.olex.ul@gmail.com.

Шатан Анастасія-Богдана Вікторівна – Студент, Кафедра технології органічних продуктів, Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013, e-mail: izobara23@gmail.com.

Шатан Анастасия-Богдана Викторовна – Студент, Кафедра технологии органических продуктов, Национальный университет «Львовская политехника», ул. С. Бандеры, 12, Львов, Украина, 79013, e-mail: nastya_shatan19@mail.ru.

Shatan Anastasia-Bogdana – Student, Technology of Organic Products Department, Lviv Polytechnic National University, S.Bandery, 12, Lviv, Ukraine, 79013, e-mail: nastya_shatan19@mail.ru.

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

УДК 636.085.55; 504.064.2.001.18

В. І. УРСУЛОВА

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗПОДІЛУ ПИЛОВИХ ВИКИДІВ КОМБІКОРМОВИХ ЗАВОДІВ

Розглянута технологія виробництва та технологічне обладнання, яке використовується під час виготовлення комбікормових сумішей. Представлено методики розрахунку викидів від робіт з навантаження і розвантаження, зерно переробки та елеваторів. Розглянуто недоліки розрахунків та визначено шляхи покращення отриманих результатів. Побудовано розсіювання, на основі проведених розрахунків викидів речовин у вигляді твердих суспендованих частинок та покладено на місцевість. Створено та проаналізовано математичну модель розподілу пилових викидів типового комбікормового заводу.

Ключові слова: пил, викиди, концентрація, розсіювання, розподіл, модель, комбікорм.

Рассмотрена технология производства и технологическое оборудование, которое используется при изготовлении комбикормов смесей. Представлены методики расчета выбросов от работ по погрузке и разгрузке, зерно переработки и элеваторов. Рассмотрены недостатки расчетов и определены пути улучшения полученных результатов. Построено рассеивание на основе проведенных расчетов выбросов веществ в виде твердых взвешенных частиц, и положено на местность. Создана и проанализирована математическая модель распределения пылевых выбросов типового комбикормового завода.

Ключевые слова: пыль, выбросы, концентрация, рассеивание, распределение, модель, комбикорм.

The object of the study in this article is technological emissions of feed mill. Technological equipment and feed production technology were considered. Techniques for determining emissions from corn processing, operations of loading and unloading and elevators were chosen. Disadvantages of calculations were identified and eliminated.

The values of concentration of suspended solid particles were obtained during direct measurements directly in the production technology in the emissions of a typical feed mill, resulting in the use of considered techniques. Dust dispersion was built and assigned to the area on the basis of calculated data. Distribution model of dust emissions for a typical feed mill was established with accounting the main parameters of the organized and unorganized sources of emissions. Size, pitch and centers coordinate plane were given. This model facilitates the determination of zones of influence of emission sources from planned activity and capacity of emissions in the nodes of coordinate plane to the level of air pollution. The model makes it possible to assess the individual (point) sources of emissions.

Keywords: dust, emissions, concentration, dispersion, model, feed.

Вступ. Сучасний аграрно–промисловий комплекс (АПК) є важливим сектором економіки України. Ядром АПК є сільське господарство до складу якого входить комбікормова галузь, яка представлена 120–ма різними виробниками кожен з яких має в розпорядженні в середньому 4 комбікормових заводи (КЗ), що забезпечують виробничу потужність галузі на рівні 12 – 15 млн. тонн на рік. Основними виробниками комбікормів є агрохолдинги, що займають 87 % загального виробництва [1]. До початку 2000 років значна кількість агрохолдингів та незалежних КЗ, розташовувалась, як правило неподалік від міста та в промислових зонах, загалом за межами міської забудови. За останні роки ситуація суттєво змінилась через розширення та глобалізацію міст заводи почали обростати житловими будинками та спорудами, що з огляду на тенденцію збільшення виробництва спричиняє негативний вплив на людський організм, та довкілля загалом.

Аналіз літературних даних та постановка задачі. Кожний КЗ є джерелом викиду забруднюючих речовин (ЗР) зважаючи на особливості технологічного процесу основною ЗР, яка потрапляє в атмосферне повітря, є тверді суспендовані частинки (пил). Враховуючи динаміку зростання виробництва комбікормів [2], та виходячи з вище зазначених даних можна підрахувати що комбікормова галузь України щорічно викидає в атмосферне повітря більше 170 тис. тонн пилу в рік. З огляду на це виникає необхідність детального підходу до вивчення впливу роботи КЗ на навколишнє середовище [3]. Основою для даного під

ходу є не лише визначення кількості ЗР, що викидаються, а й проведення розрахунків розсіювання ЗР з метою визначення зони впливу ЗР і факторів, що впливають на утворення зони. Дослідження закордонних вчених, щодо параметрів, які впливають на розповсюдження викидів від зерно перероблювальних виробництв та елеваторів визначають основні фактори впливу [4, 5]. Виникає потреба у створенні математичної моделі розподілу концентрацій з урахуванням організованих та неорганізованих джерел викиду. Особливо важливим є необхідність постійного контролю прямими інструментальними вимірюваннями рівня концентрації пилу безпосередньо під час технологічних процесів [6–8].

Об'єкт, мета та задачі дослідження. Об'єкт дослідження – технологічні викиди комбікормових заводів.

Мета дослідження – створення математичної моделі розподілу концентрації пилу при врахуванні параметрів усіх джерел комбікормового виробництва.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

5. Розглянуто технологію та обладнання виробництва комбікормів.

6. Проаналізувати методики розрахунку викидів від робіт з навантаження і розвантаження, зерно переробки та елеваторів.

7. Провести розрахунки викидів комбікормового заводу по методикам, та побудувати розсіювання викидів.

© В. І. Урсулова. 2016

8. Створити та проаналізувати математичну модель розподілу пилових викидів комбікормового заводу.

Матеріали та методи дослідження для створення математичної моделі розподілу викидів пилу. Стисла характеристика технології виробництва, технологічного обладнання та їх вплив на забруднення атмосферного повітря

Комбікормовий завод здійснює приймання сировини для виробництва і відвантаження комбікормів споживачам. Для виробництва комбікормів використовуються різні види зернової, білкової та мінеральної сировини.

Зерно поступає на підприємство по залізниці та автотранспортом і розвантажується в приймальних пристроях елеватора. Після розвантаження зерно подається в елеватор для зберігання та передачі в цех розсипних комбікормів (РКК). Елеватор має робочу вежу, де розміщено зерноочисне та вагове обладнання і силосні корпуси для зберігання зерна. Робоча вежа елеватора і силосні корпуси ємністю 48 тис. тон, оснащені сімома аспіраційними мережами, викидають зерновий пил. Для відокремлення пилу використовуються циклони ЦОЛ та батареї циклонів типу 4БЦШ. Час роботи цих джерел відповідає часу роботи технологічного устаткування.

Двоюрисний силосний склад борошністої сировини (відноситься до цеху розсипних комбікормів) призначений для отримання, очистки, подрібнення та зберігання сировини, а також для передачі на подальшу обробку. Транспортне та технологічне обладнання обслуговують аспіраційні установки з високоефективними пиловідокремлювачами типу РЦЕ.

Приймальні пункти (завальні ями) для автотранспорту та залізниці є неорганізованими джерелами викиду, по типу закриті з двох сторін. Річний період їх праці залежить від плану випуску продукції і корегується протягом року. Також до неорганізованих джерел на елеваторі відносяться чотири однакових бункери з під циклонів, під час розвантаження яких у атмосферу надходить зерновий пил. Об'єм одного бункера – 25 м³. Розвантажуються приблизно 1 раз на місяць, саме розвантаження триває в середньому 20 хвилин, на відкритій місцевості.

В цеху розсипних комбікормів основа (пшениця, жито, горох, шрот, соя тощо), яка поступає з елеватора, подрібнюється дробарками (сумарною потужністю 20 і 30 т/год). Після цього через дозатори додаються компоненти згідно рецепту і вся суміш проходить стадію змішування з наступним зважуванням і транспортуванням в склад готової продукції (ГП) та в цех гранульованих комбікормів (ГКК). Пости, які призначено для розвантаження сировини (переважно шроти) з автотранспорту та вагонів є неорганізованими джерелами викиду. Відвантаження сировини відбувається до завальної ями під навісом, який закрито з двох сторін – для залізничного транспорту, та для автотранспорту. Основним обладнанням в цьому цеху є транспортне обладнання (ланцюгові конвеєри, норії), дробарки, дозатори, змішувачі, ваги. Для відокремлення пилу від цього обладнання використовуються чотири аспіраційні мережі з пиловідокремлювачами типу РЦЕ, що викидають в атмосферу зерновий пил, пил борошна і комбікормовий пил.

В цеху гранульованих комбікормів здійснюється гранулювання комбікорму, охолодження гранул, зважування готової продукції і транспортування в силоси для зберігання та відпуск на автомобільний та залізничний транспорт. Даний цех оснащений транспортним та технологічним обладнанням – норіями, ланцюговими конвеєрами, просіювачами, пресами типу ДГ з охолоджувачими колонками, вагами ДН – 1000 та бункерами для зберігання гранул. Технологічне та транспортне обладнання обслуговують дві аспіраційні мережі, охолоджуючі колонки обслуговують п'ять аспіраційних мереж з пиловідокремлювачами типу ЦОЛ що викидають в атмосферу пил борошна і комбікормовий пил. Час роботи цих джерел відповідає часу роботи технологічного устаткування.

Цех готової продукції виконує відвантаження продукції на транспорт і являє собою два неорганізовані джерела викиду. Відвантаження відбувається за допомогою рукавів на відкритій або під закритим з двох сторін навісом та рухомою завісою з третьої сторони.

Загальна кількість джерел викиду на підприємстві становить 29. Безпосередньо задіяні у виробництві комбікормів 22 джерела, з них 8 джерел представляють собою не організовані джерела викидів.

Розрахунок викидів від зернопереробних установок, елеваторів та від постів завантаження і розвантаження. Валовий викид пилу в атмосферу аспіраційними та пневмотранспортними установками зернопереробних установок та елеваторів визначається відповідно до методики [9]. Розрахунки проводяться за формулою:

$$M^0 = 10^{-6} \cdot T \cdot \sum_{i=1}^n Q_i \cdot B_i \cdot \tau_i, \quad (1)$$

де B_i – концентрацію пилу в повітрі, що викидається i -ю аспіраційною чи пневмотранспортною установкою, г/м³; Q_i – витрата повітря на вихлопі i -ої аспіраційною чи пневмотранспортною установкою, м³/год; n – кількість аспіраційних установок; $n=1$ T – час роботи підприємства, діб/рік; τ_i – час роботи i -ої установки, год/добу; Час роботи підприємства – 250 діб/рік

$$Q_i = V * 3600, \quad (2)$$

V – витрата повітря на виході з ГОУ, м³/с;

$$B_i = C / 1000, \quad (3)$$

C – концентрація забруднюючої речовини на виході з ГОУ, мг/м³.

Розрахунок валових викидів забруднюючих речовин в атмосферу від постів завантаження і розвантаження (ПЗР) виконується за методикою [10]. Розрахунок валових викидів виконується по формулі:

$$M_n^0 = P \cdot K, \quad (4)$$

де M_n^0 – валовий викид забруднюючої речовини, т/рік; P – план заготовок зерна/комбікормів K – коефіцієнт, який враховує масову долю пилу в мате-

ріалі 0,2 – 0,4%; а – коефіцієнт, який дорівнює 10^{-3} при виробництві комбікормів, 10^{-2} при заготівлі зерна.

Методики визначення викидів від різних процесів комбікормового виробництва наведені у формулах (1 – 4), розрахунки призначенні для оптимальних (ідеальних) умови технологічних процесів КЗ, але не враховують старіння обладнання, наростаюче порушення герметичності, зміни у складі сировини, втрату ефективності пелогозоочисних установок. Відповідно виникає потреба у моделюванні процесів викидів КЗ з урахуванням реального стану технологічного обладнання та обов'язковим корегуванням вищенаведених розрахункових формул даними прямих інструментальних вимірів концентрації забруд-

нюючих речовин (пилу) безпосередньо у виробничому процесі КЗ

Результати досліджень по визначенню викидів та побудові розсіювання і математичної моделі розподілу пилу

Експериментально – розрахункові дослідження типового комбікормового заводу

За результатами проведених вимірювань концентрацій пилу від організованих джерел викиду було проведено розрахунки викидів у відповідності до методик. [9] В табл. 1. представленні результати розрахунків викидів від зернопереробних підприємств та елеваторів по джерелам.

Таблиця 1 – Валові викиди пилу по джерелам

№ дж.	Найменування джерела утворення, цех	Максимальна концентрація забруднюючої речовини, мг/м ³	Прямі виміри, г/с	Розрахунок, т/рік
1	Норія*, РКК*	24,15	0,034921	0,314288
2	Дробарки 1,2; РКК*	15,45	0,024241	0,218169
4	Дробарки 3,4; РКК*	88,14	0,09114	0,820231
5	Рукав розвантаження, РКК*	79,44	0,018033	0,162296
8	Прес 1, ГКК*	19,65	0,043878	0,394906
9	Прес 2, ГКК*	20,21	0,061499	0,553491
10	Прес 3, ГКК*	26,22	0,057448	0,517032
12	Транспортер, елеватор	32,84	0,0111331	0,100195
13	Норія*, елеватор	42,68	0,0306862	0,276182
14	Норія*, елеватор	32,68	0,0215388	0,193825
15	Транспортер, елеватор	28,429	0,0119402	0,107462
16	Транспортер, елеватор	16,523	0,008278	0,074502
17	Транспортер, елеватор	133,824	0,1112077	1,00087
18	Транспортер, елеватор	112,125	0,0951941	0,856747

*Норія – транспортний засіб для переміщення сипких матеріалів системою ковшів, що закріплені через певні проміжки на нескінченній стрічці; РКК – цех розсипних комбікормів; ГКК – цех гранульованих комбікормів.

Максимальна концентрація ЗР коливається від 24,15 мг/м³ до 112,125 мг/м³, відповідно до цих концентрацій величина валових викидів забруднюючих речовин в атмосферу від зерно переробки та елеваторів становить 0,621138 г/с, річний розрахований викидів дорівнює 5,590196 т/рік від 14 організованих джерел викиду. Порівнюючи отриманні данні з пороговими значеннями викидів [11, 12] бачимо, що викиди джерел № 9, 10 перевищують поріг, а джерела №4, 17, 18 вищі за порогові майже в два рази.

Необхідно зазначити, що об'єм викидів без

очистки ГОУ становить 182,6342 т/рік, а після очистки значення зменшується в середньому на 97 % і сумарний викид становить 5,590196 т/рік. Отриманні результати свідчать про необхідність використання та контролю ефективності ГОУ.

Відповідно до результатів вимірювання у табл. 2 – 4 представленні розрахунки, відповідно до методик [10], які проведенні по неорганізованими джерелам викиду під час робіт з завантаження і розвантаження у різних цехах КЗ.

Таблиця 2 – Валові викиди від завантажувальних і розвантажувальних робіт у цеху розсипу

№ дж.	Найменування джерела утворення, цех	Прямі виміри, г/с	Розрахунок, т/рік
3	Пост розвантаження, РКК*	0,085	1,656

*РКК – цех розсипних комбікормів.

Валові викиди забруднюючих речовин в атмосферу від завантажувальних і розвантажувальних постів у цеху розсипу становлять 0,085 г/с, річний розрахований викид дорівнює 1,656 т/рік від джерела №3 викиду. Порогове значення перевищене у три рази.

В табл. 3 представлено викиди від цеху готової продукції.

Викиди забруднюючих речовин від завантажувальних і розвантажувальних постів від цеху гото-

вої продукції становлять 0,1158 г/с, річний розрахований викид дорівнює 0,45871 т/рік від джерел викиду №6 та №7. Викиди від проведених робіт у цеху готової продукції не перевищують порогові значення, та мають амортизаційний запас у разі розвитку потужностей підприємства.

Визначенні та розраховані значення викидів представленні у табл. 4.

Таблиця 3 – Валові викиди завантажувальних і розвантажувальних робіт від цеху готової продукції

№ дж.	Найменування джерела утворення, цех	Навантаження, %	Визначенні, г/с	Розрахунок, т/рік
6	ПЗР* сировини, ГП*	0,75	0,0869	0,34403
7	ПЗР* сировини, ГП*	0,25	0,0289	0,11468

*ПЗР – пост завантаження/розвантаження; ГП – цех готової продукції.

Таблиця 4 – Валові викиди від завантажувальних і розвантажувальних робіт елеватора

№ дж.	Найменування джерела утворення, цех	Визначенні, г/с	Розрахунок, т/рік
11	Транспортування сировини ПЗР*, елеватор	0,358	1,937
25	Транспортування сировини ПЗР*, елеватор	0,0245	0,00035
26	Транспортування сировини ПЗР*, елеватор	0,0245	0,00035
27	Транспортування сировини ПЗР*, елеватор	0,0245	0,00035
28	Транспортування сировини ПЗР*, елеватор	0,0245	0,00035

*ПЗР – пост завантаження/розвантаження.

Об'єм забруднюючих речовин в атмосферу від завантажувальних і розвантажувальних постів елеватора становить 0,456 г/с, річний розрахований викид дорівнює 1,9384 т/рік. Викид джерела №11 відносно порогового вищий у 4 рази, джерела №25 – 28 мають великий амортизаційний запас у разі розвитку потужностей підприємства. При оцінці викидів від організованих та неорганізованих джерел викиду треба враховувати, що в останніх відсутні аспіраційні уста-

новки. Дослідивши сумарні обсяги викидів по джерелам №1 – 18 та №25 – 28, речовин у вигляді твердих суспендованих частинок, можна побачити, що найбільші значення викидів притаманні тим джерелам діяльності, яких пов'язана з сировиною, яка використовується для виготовлення комбікормів.

Обсяги викидів по кожному з цехів підприємства представлені у табл. 5.

Таблиця 5 – Обсяги викидів пилу по кожному з цехів

Назва цеху	Кількість джерел	Визначенні, г/с	Розрахунок, т/рік
Цех розсипних комбікормів	5	0,253335	3,170984
Цех готової продукції	2	0,1158	0,45871
Цех гранульованих комбікормів	3	0,162825	1,465429
Елеватор	12	0,745978	4,548183

Дослідження по обсягам викидів по кожному цеху представлені у табл. 5 з них видно, що найбільші викиди у розмірі 4,548183 т/рік виникають від елеваторів, наступним йде цех розсипних комбікормів з показником у 3,170984 т/рік. Втричі менші показники від елеваторів має цех гранульованих комбікормів. Найнижчий викид становить 0,45871 т/рік у цеху готової продукції.

Таким чином можна сказати, що значна кількість викидів виникає при транспортуванні, пересипці й обробці сировини. Треба зазначити що кількість використаної сировини за рік становить 230648 тонн, об'єм виготовленої продукції дорівнює 229351 тонн, відповідно до цих даних та враховуючі, що при виготовленні комбікормів втрата маси в середньому складає 40 %, 777 тонн – це верхня межа потенційного викиду.

Розсіювання та математична модель розподілу концентрацій забруднюючих речовин від джерел типового комбікормового заводу

Розрахунок проведений за допомогою спеціалізованої програми призначеної для розрахунку концентрацій забруднення атмосферного повітря, селітебних і промислових територій. В результаті розрахунку одержані концентрації у вузлових точках розрахункової сітки, які слугують основою для побу-

дови карт розсіювання забруднюючих речовин на розрахунковій ділянці. Величина концентрації визначається у відносних одиницях (частках ГДК). Встановлення і нормування величини гранично допустимих викидів (ГДВ) шкідливих речовин в атмосферному повітрі за ГОСТом 17.2.3.02 – 78 проводиться згідно з критерієм якості атмосферного повітря.

$$K = C_p / \text{ГДК}, \quad (5)$$

де C_p – розрахункова величина концентрації ЗР в приземному шарі атмосферного повітря над заданою точкою поверхні, мг/м³.

ГДК – граничнодопустима концентрація ЗР.

Якість повітря за ступенем забрудненості шкідливими речовинами вважається задовільною, якщо $K=1,0$, а величина викидів M (г/с), яка обумовила концентрацію C_p при несприятливих умовах розсіювання, є допустимою по відношенню до даної точки. Таким чином, завдання нормування величини викидів M зводиться до розрахунку C_p і перевірки умови $K=1,0$.

СЗЗ типового комбікормового заводу становить 100м. Створено модель розсіювання, що зображена на рис. 1, та покладено отримане розповсюдження на місцевість.



Рис. 1 – Модель розсіювання речовин у вигляді твердих суспендованих частинок та зони по часткам ГДК: 1 – 61,825 ГДК; 2 – 110,980 ГДК; 3 – 160,135 ГДК; 4 – 209,290 ГДК; 5 – 258,445 ГДК; 6 – 307,600 ГДК; 7 – 356,755 ГДК; 8 – 405,910 ГДК; 9 – 455,065 ГДК;

Результати розсіювання, щодо рівня забруднення пилом повітря джерелами викидів на прилеглий території до підприємства коливаються в межах від 61 до 455 часток ГДК. Показники свідчать про перевищення викидів. Лише на відстані у 1,5 км значення коефіцієнта К дорівнює одиниці. Таким чином навіть 9 т/рік мають величезний вплив на здоров'я людини та довкілля.

Для детального аналізу та врахування необхідних параметрів створено математичну модель розподілу концентрації пилу, яка зображена на рис.2. Для побудови моделі використано наступні дані:

- організованих джерел викиду – висота, об'ємна витрата та швидкість вітру в залежності від висоти (для високих джерел від 4м – найбільша швидкість вітру, для низьких джерел менше 4м – найнижча швидкість вітру, притаманна для даної місцевості);

- неорганізованих джерел викиду – показники концентрації пилу, при вимірюванні на відстані в 0,5 м від місця проведення робіт, та швидкість вітру для низьких джерел викиду.

Центром координат обрано $x:11470$ та $y:19620$, заданий розмір координатної площини становить $400\text{м} \times 400\text{м}$, значення концентрацій у вузлах розраховані з кроком у 5м.

Розрахункові величини концентрації речовин у вигляді твердих суспендованих частинок в атмосфер-

ному повітрі на заданій площині коливаються від $6,3 \text{ мг/м}^3$ до 252 мг/м^3 . Точки з найбільшою концентрацією відповідають розміщенню джерел викиду пилу по мірі віддалення від джерел відбувається розсіювання ЗР, що загалом знижує значення концентрації на відстані від території підприємства. Розглянемо детальніше: найвища концентрація безпосередньо над джерелом викиду становить $252,59 \text{ мг/м}^3$ на відстані у 20м концентрація зменшується вдвічі і становить $129,46 \text{ мг/м}^3$, значення у $80,88 \text{ мг/м}^3$ відповідає відстані у 40 м. На межі СЗЗ, що становить 100 м від джерел забруднення, концентрація дорівнює $32,3 \text{ мг/м}^3$. Усі значення, що наведені вище перевищують значення ГДК навіть без урахування фонових концентрацій.

На перший погляд незначні викиди комбікормового заводу насправді мають велику зону впливу та постійно забруднюють атмосферне повітря [3, 7] Тому необхідно зменшувати кількість неорганізованих, використовувати аспіраційні установки для очищення викидів з організованих джерел та безперервно контролювати викиди під час технологічних процесів.

Обговорення результатів створення математичної моделі розподілу пилових викидів типового комбікормового заводу. Запропонована модель розподілу викидів комбікормових заводів враховує висоту, об'ємну витрату та швидкості вітру в залежності від висоти джерел викидів (для високих джерел від 4м – найбільша швидкість вітру, для низьких джерел

менше 4 м – найнижча швидкість вітру, притаманна для даної місцевості). Основною відмінністю є врахування значень концентрації, які отриманні в результаті вимірювань, не лише організованих джерел, а

й неорганізованих. Дана модель дає змогу оцінити потужність та зону впливу, як від окремих джерел викидів так і від їх скупчення.

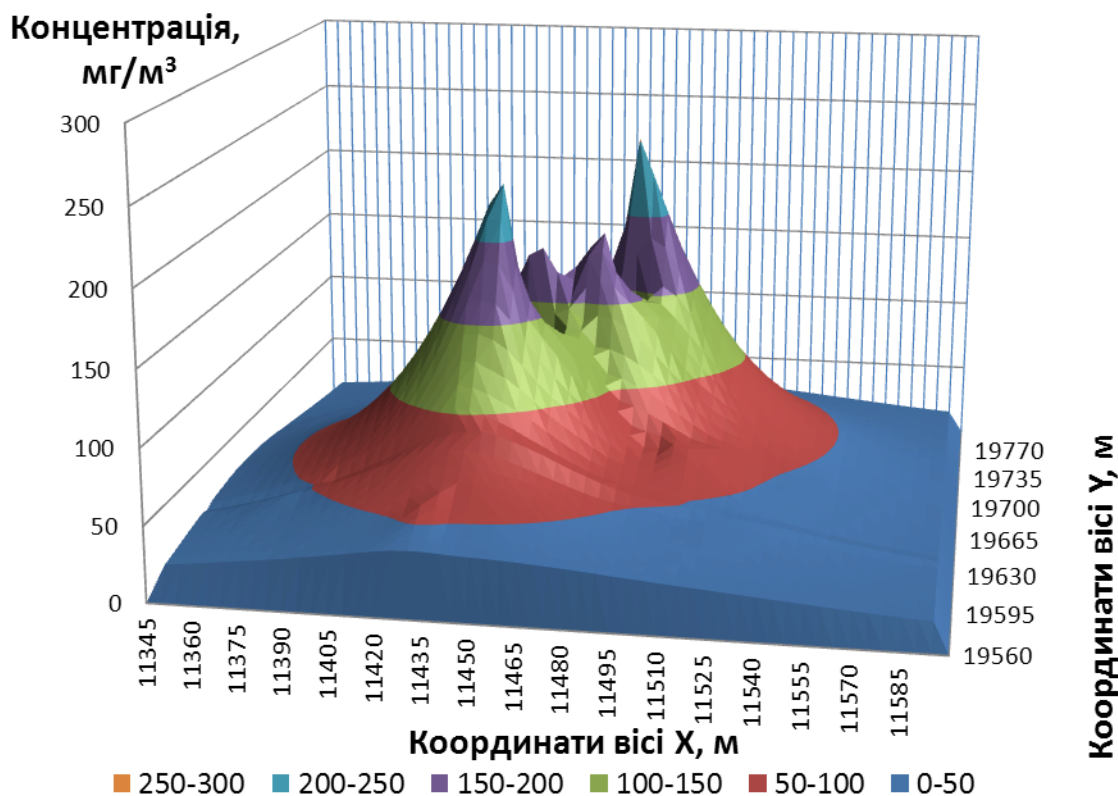


Рис. 2 – Розподіл концентрацій речовин у вигляді твердих суспендованих частинок в районі КЗ.

Висновки.

У результаті проведених досліджень:

1. Розглянуто технологію та обладнання виробництва комбікормів визначено, що час роботи обладнання становить 2500 год/рік, кількість джерел викидів – 22, з них неорганізованих 8, висота джерел викидів коливається від 2 м до 52 м, швидкість вітру по сторонам світу має середнє значення у 8 м/с.

2. Проаналізовано методики розрахунку викидів від робіт з навантаження і розвантаження, зерно переробки та елеваторів, виявлено, що під час розрахунку не враховується багато параметрів таких як щільність забудови, вага забруднюючої речовини, неорганізовані джерела викидів, через це похибка становить 10–15 % при використанні прямих вимірювань похибка дорівнює 3–5 %.

3. Проведено розрахунки викидів пилу, від кожного джерела на основі прямих вимірювань, комбікормового заводу, по методикам. На базі розрахунків побудовано розповсюдження викидів на місцевості.

4. Створено математичну модель розподілу пилових викидів комбікормового заводу з врахуванням швидкості вітру відповідно до параметрів організованих та неорганізованих джерел викиду, під час аналізу моделі встановлено, що над джерелом викиду концентрація пилу становить 252,59 мг/м³, на відстані у 20 м концентрація зменшується вдвічі і становить 129,46 мг/м³, значення у 80,88 мг/м³ відповідає відстані у

40 м. На межі СЗЗ, що становить 100 м від джерел забруднення, концентрація дорівнює 32,3 мг/м³.

Список літератури:

1. Економічні новини [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ukrexport.gov.ua/w...=view&id=3222&country=pol?new=9333&country=ukr>
2. Інформаційне агентство «AgroNews» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://agronews.ua/node/48203>
3. Урсулова, В. І. Вплив викидів комбікормових заводів на довкілля [Текст] / В. І. Урсулова // Приладобудування: стан і перспективи. – Київ, 2016. – 218 с.
4. Shaw, B. W. Emission factors for grain receiving and feed loading operations at feed mills [Text] / B. W. Shaw, P. P. Buharivala, C. B. Parnell Jr., M. A. Demny // Transactions of the ASAE. – 1997. – Vol. 41, Issue 3. – P. 757–765. doi: 10.13031/2013.17212
5. Air Emissions from Animal Feeding Operations: Current Knowledge, Future Needs. Chapter: Appendix I: Emission Factors for a Feed Mill or Grain Elevator, 2003. doi: 10.17226/10586
6. Балтренас, П. Б. Методы и приборы определения физико-механических свойств пылей и аэрозолей [Текст] / П. Б. Балтренас, В. Шпакаускас // Вильнюс: Техника – 1994. – 237 с.
7. Урсулова, В. І. Контроль викидів комбікормових заводів [Текст] / В. І. Урсулова // Всеукраїнська наукова Інтернет – конференція "Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення". – 2016. – Вип. 15. – С. 43–44.
8. Вовна, А. Методы и средства измерения концентрации газовых компонент [Текст] / А. Вовна, А. Зори, М. Хламов // Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG. – 2012. – 244 с. – Режим доступу: <https://www.lap-publishing.com/catalog/>.

9. Збірник показників емісії (питомих викидів) забруднюючих речовин в атмосферне повітря різними виробництвами. Т. 1–3 [Текст]. – Донецьк, 2004. – 184 с.
10. Временная методика расчета плановых показателей по охране атмосферного воздуха зерноперерабатывающих предприятий и элеваторов. Министерство хлебопродуктов СССР, ВНИО «КОМБИКОРМ», Украинский филиал Всесоюзного научно-исследовательского института комбикормовой промышленности. Москва, 1989 г.
11. Наказ No177 від 10.05.2002 «Про затвердження Інструкції про порядок та критерії взяття на державний облік об'єктів, які справляють або можуть справити шкідливий вплив на здоров'я людей і стан атмосферного повітря, видів та обсягів забруднюючих речовин, що викидаються в атмосферне повітря
12. Приміський, В. П. Технологічні нормативи допустимих викидів забруднюючих речовин і їх інструментальний контроль [Текст] / В. П. Приміський, В. М. Івасенко, Д. Г. Корнієнко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – Vol 3, Issue 1 (69). – С. 8–15. doi: 10.15587/1729-4061.2014.24973
5. Air Emissions from Animal Feeding Operations: Current Knowledge, Future Needs (2003). Chapter: Appendix I: Emission Factors for a Feed Mill or Grain Elevator. doi: 10.17226/10586
6. Baltrenas, P. B., Shpakauskas, V. (1994). Metody i pribory opredeleniya fiziko-mexanicheskix svoystv pylej i aerozolej. Vilnyus: Texnika, 237.
7. Ursulova, V. I. (2016). Kontrol vikidiv kombikormovix zavodiv. Vseukraïnska naukova Internet – konferenciya "Informacijne suspilstvo: tehnologichni, ekonomichni ta texnicni aspekti stanovleniya", 43–44.
8. Vovna, A., Zori, A., Xlamov, M. (2012). Metody i sredstva izmereniya koncentracii gazovyx komponent. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG. 244.
9. Zbirnik pokaznikov emisii (pitomix vikidiv) zabrudnyuyuchix rechovin v atmosferne povitrya rizmimi virobniactvami, 1–3, 2004, 184.
10. Vremennaya metodika rascheta planovyx pokazatelej po ohrane atmosferного vozduxa zernopererabatyvayushhix predpriyatij i elevatorov. Ministerstvo xleboproduktov SSSR, VNPO «КОМБИКОРМ», Ukrainskij filial Vsesoyuznogo nauchno issledovatel'skogo instituta kombikormovoj promyshlennosti. Moskva, 1989».
11. Nakaz No177 vid 10.05.2002 «Pro zatverdzhennya Instrukcii pro porjadok ta kriterii vzyattya na derzhavnij oblik ob'ektiv, yaki spravlyayut abo mozhut spraviti shkidlivij vpliv na zdorov'ya lyudev i stan atmosferного povitrya, vidiv ta obsyagiv zabrudnyuyuchix rechovin, shho vikidayutsya v atmosferne povitrya.
12. Primiskij, V. P., Ivashenko, V. M. Kornienko, D. G. (2014). Texnologichni normativy dopustimix vikidiv zabrudnyuyuchix rechovin i ix instrumentalnij kontrol. Eastern European Journal of advanced technologies, 3, 1 (69), 8–15. doi: 10.15587/1729-4061.2014.24973

Bibliography (transliterated):

1. Ekonomichni novini [Elektronnij resurs]. Rezhim dostupu: <http://ukrexport.gov.ua/w...=view&id=3222&country=pol?new=9333&country=ukr>
2. Informacijne agentstvo «AgroNews» [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu: <http://agronews.ua/node/48203>
3. Ursulova, V. I. (2016). Vpliv vikidiv kombikormovix zavodiv na dovkillya. Priladobuduvannya: stan i perspektivi. Kiev, 218.
4. Shaw, B. W., Buharivala, P. P., Parnell Jr., C. B., Demny, M. A. (1997). Emission factors for grain receiving and feed loading operations at feed mills. Transactions of the ASAE, Vol. 41, Issue 3, 757–765. doi: 10.13031/2013.17212
5. Nakaz No177 vid 10.05.2002 «Pro zatverdzhennya Instrukcii pro porjadok ta kriterii vzyattya na derzhavnij oblik ob'ektiv, yaki spravlyayut abo mozhut spraviti shkidlivij vpliv na zdorov'ya lyudev i stan atmosferного povitrya, vidiv ta obsyagiv zabrudnyuyuchix rechovin, shho vikidayutsya v atmosferne povitrya.
6. Primiskij, V. P., Ivashenko, V. M. Kornienko, D. G. (2014). Texnologichni normativy dopustimix vikidiv zabrudnyuyuchix rechovin i ix instrumentalnij kontrol. Eastern European Journal of advanced technologies, 3, 1 (69), 8–15. doi: 10.15587/1729-4061.2014.24973

Надійшла (received) 23. 03.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Математична модель розподілу пилових викидів комбикормових заводів/ В. І. Урсулова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.94–100. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.

Математическая модель распределения пылевых выбросов комбикормовых заводов/ В. И. Урсулова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.94–100. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.

Mathematical model of distribution of dust emissions feed mill/ V. Ursulova // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 17 (1189). – P.94–100. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Урсулова Валентина Іванівна – магістрант, кафедра наукових, аналітичних та екологічних приладів і систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056, e-mail: vect_ra@ukr.net.

Урсулова Валентина Іванівна – магістрант, кафедра наукових, аналітичних та екологічних приладів і систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» пр. Перемоги, 37, г. Київ, Україна, 03056, e-mail: vect_ra@ukr.net.

Ursulova Valentyna Ivanivna – Graduate student, Department of scientific, analytical and ecological devices and systems, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», prospect Peremohy, 37, Kiev, Ukraine, 03056, e-mail: vect_ra@ukr.net.

УДК 656.212:681.3

О. О. СОКОЛОВСЬКА, Г. И. ДЮКАРЕВА**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОФИЛАКТИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ И БЕЗОПАСНОСТИ РАЗРАБОТАННЫХ ВИДОВ ПАСТИЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕТРАДИЦИОННОГО СЫРЬЯ**

В данной статье установлена безопасность использования нетрадиционного сырья в производстве пастильных изделий на организм человека, а именно йодосодержащей добавки из морской водоросли ламинарии – эламина и безкалорийного подсластителя растительного происхождения – стевии, которые использовались с целью расширения ассортимента кондитерских изделий для профилактики йододефицита, ожирения и сахарного диабета. Проанализировано результаты клинических испытаний, которые свидетельствуют о позитивном влиянии употребления разработанных пастильных изделий на тиреоидный пакет и гормонов, которые участвуют в регуляции уровня сахара в крови.

Ключевые слова: эламин, стевия, пастильные изделия, йододефицит, сахарный диабет.

У даній статті підтверджено безпеку використання нетрадиційної сировини у виробництві пастильних виробів на організм людини, а саме йодовмісної добавки з морської водорості ламинарії – еламіна і безкалорійного підсолоджувача рослинного походження – стевії, які використовувалися з метою розширення асортименту кондитерських виробів для профілактики йододефіциту, ожиріння та цукрового діабету. Проаналізовано результати клінічних випробувань, які свідчать про позитивний вплив вживання розроблених пастильних виробів на тиреоїдний пакет і гормонів, які беруть участь в регуляції рівня цукру в крові.

Ключові слова: еламін, стевія, пастильні вироби, йододефіцит, цукровий діабет.

This article discusses an issue that is related to the safe and effective use of non-traditional raw material for the production of pastille products. In order to expand the range of pastille products, which are aimed at the prevention of iodine deficiency, obesity and diabetes it is prompted to use the product Laminaria processing – elamin, those composition is rich in minerals, especially iodine and natural calorie-free sweetener - stevia to reduce the carbohydrate load on the endocrine system. Results of clinical research demonstrate the safety of use pastille products, iodine, respectively, and its organic form is defined, which excludes iodine accumulation in the human body and undesirable consequences. Efficiency of developed pastille products is confirmed accordingly teroid package and hormones involved in the regulation of blood sugar, in particular insulin, glucagon, epinephrine and cortisol. As a scientific novelty the first demonstrated the positive impact of pastille products that use non-traditional raw materials, on the human body with an increased tumor marker of pancreas and gall bladder of patients with diabetes mellitus type I and type II with the presence of iodine deficiency. The practical significance of the developed product is the ability to use pastille products using non-traditional raw materials for the prevention of iodine deficiency, obesity and diabetes.

Keywords: elamin, stevia, pastille products, iodine deficiency, diabetes.

Введение. Проблемы йододефицита, ожирения и сахарного диабета остро стоят перед учеными всего мира. Это связано, прежде всего, с ухудшением экологической ситуации как во всем мире, так и конкретно в Украине вследствие аварии на Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС). Одним из неблагоприятных факторов является также малоподвижный образ жизни современного потребителя. В Украине среди пострадавших от последствий аварии, по статистическим данным Министерства здравоохранения Украины, растет заболеваемость общесоматическими заболеваниями, наиболее распространенными являются сердечно-сосудистая патология, заболевания щитовидной железы, сахарный диабет и другие [1].

Следовательно, можно утверждать, что повышение качества пастильных изделий с помощью использования йодсодержащего сырья с одновременной заменой сахара белого натуральными подсластителями является актуальным и своевременным решением проблемы.

Пастильные изделия были выбраны из-за того, что в их состав входит 60...70 % пектинового яблочного пюре. Известно, что наличие разветвленных макромолекул пектина обуславливает способность пастильных изделий выводить из организма человека соли тяжелых металлов и радиоактивные вещества. Сравнительно низкие температурные режимы и умеренное механическое воздействие при производстве позволяют вводить нетрадиционное сырье без ухудшения вкусовых показателей и максимально сохранять полезные свойства.

Особый интерес ученых вызывают йодосодержащие добавки и подсластители натурального проис-

хождения. Результаты анализа литературных данных, которые основываются на экспериментальных и клинических наблюдениях, доказали целесообразность эламина и продуктов переработки стевии для обогащения продуктов питания йодом и профилактики сахарного диабета и ожирения [2].

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. В последние годы данную проблему исследовали такие зарубежные и отечественные ученые [3–7] в частности, было предложено использование натуральных подсластителей и йодосодержащих добавок в пищевой промышленности с целью расширения ассортимента лечебных и лечебно-профилактических продуктов. Однако исследований касательно влияния на организм пастильных изделий, в которых снижено количество сахара белого, заменяя его подсластителем стевией, с одновременным обогащением минеральными веществами, в особенности йода, путем использования продукта переработки морской водоросли эламина, выявлено не было.

Цель и задачи исследования. Основываясь на выше изложенный материал, целью работы было проведение исследований эффективности, безопасности и профилактического действия разработанных видов пастильных изделий с использованием нетрадиционного сырья: экстракта стевии (водного экстракта стевии, стевииозиды) и концентрата эламина сухого практически здоровым людям и людям с различной соматической патологией.

Для достижения поставленной цели необходимо были поставлены следующие задачи: Подтверждена эффективность использования разработанных пастильных изделий касательно и гормонов, которые участву-

© О. О. Соколовська, Г. И. Дюкарева. 2016

ют в регуляції рівня сахара в крові, в особенності інсуліна, глюкагона, адреналіна і кортизолу.

1. Изучить степень усвоения йода организмом человека, который поступает в результате употребления разработанных пастильных изделий.

2. Исследовать влияние разработанных изделий на тироидный пакет и уровень гормонов, которые участвуют в регуляции уровня сахара в крови у практически здоровых людей и людей с различной соматической патологией.

Материалы и методы исследования безопасности и эффективности употребления пастильных изделий с использованием нетрадиционного сырья. На базе лабораторий Харьковского государственного университета питания и торговли были разработаны пастильные изделия с использованием стевии и эламина [8–10] в соответствии с нормативной документацией. После чего проведено исследование, методом клинических испытаний, с помощью специализированного оборудования лаборатории клинических исследований «Медиа Строй» (г. Москва, Россия) на основании договора с Ахтырской ЦРБ (№ 11113 ПО от 12.02.13 г., г. Ахтырка, Сумская обл., Украина) при участии доктора медицинских наук Дульского Ю.Г., главного врача Ахтырской ЦРБ Збаражского П.П., заведующего клинической лаборатории «Медиа Строй», врача высшей категории Пунчука В.С.

В течении 21 дня пациенты употребляли пастильные изделия. Исследования лечебного и лечебно-профилактического воздействия разработанной продукции состояли из определения количества тиреотропного гормона (ТТГ), тиреотропина (ТТГ), тироксина свободного (Т4 своб.), антител к пероксидазе щитовидной железы (АТПО); исследования экскреции йода с мочой; исследования гормонального контроля концентрации глюкозы в крови (инсулин, глюкагон, адреналин (эпинефрин), кортизол).

Исследование экскреции йода с мочой проводили с помощью набора «Йодтест» на базе Ахтырской ЦРБ согласно свидетельству о государственной регистрации № 11113 ПО от 12.02.13 г. В качестве опытного образца использовалась пастилка с экстрактом стевии и эламином, содержащая в рецептуре все обогащающие добавки (водный экстракт стевии, стевियोид, эламин).

Объектом исследования являлись практически здоровые люди и люди с различной соматической патологией.

Под наблюдением находились четыре группы: 1–я группа состояла из 3 практически здоровых (контроль) лиц; 2–я группа (3 чел.) – пациенты с повышенным онкомаркером поджелудочной железы и желчного пузыря (СА 19–9) до 59.8 ЕД/мл норма до 34.0; 3–я группа (3 чел.) – с сахарным диабетом I типа; 4–я группа (6 чел.) – с сахарным диабетом II типа при наличии йододефицита. Возраст испытуемых от 20 до 65 лет. Перед началом исследований каждый пациент был проинформирован о значении, возможном влиянии на организм, сути и объеме исследований.

Предмет исследования было влияние и безопасность употребления разработанных пастильных изделий.

Результаты исследования безопасности и эффективности употребления пастильных изделий с использованием нетрадиционного сырья

Полученные результаты свидетельствуют об увеличении уровня экскреции йода с мочой у всех пациентов, которые употребляли разработанные пастильные изделия. Согласно данной методике норма находится в диапазоне ≤ 70 мкг/л. Увеличившийся процент экскреции йода с мочой у практически здоровых пациентов (≥ 100 мкг/л) объясняется органической природой йода, содержащимся в эламин. Известно, что органический йод не накапливается в организме и выводится с мочой, а неорганический является очень активным веществом. Он легко проникает в кровь, после чего вступает в химические реакции с органическими соединениями в организме, изменяя или уничтожая их.

Значительное содержание йода в моче наблюдается у пациентов с повышенным онкомаркером поджелудочной железы и желчного пузыря ($\geq 100..300$ мкг/л). Это можно объяснить тем, что пациенты с выше указанными симптоматическими заболеваниями чаще всего имеют гормональный дисбаланс, результатом чего является недостаток гормона поджелудочной железы. Однако для подтверждения данной гипотезы требуются более глубокие исследования.

У пациентов, больных сахарным диабетом I типа и II типа с наличием йододефицита, наблюдается прогнозируемый процент экскреции йода с мочой ($\geq 70..90$ мкг/л), что подтверждает гипотезу об усвоении йода в организме, в результате потребления в качестве его обогатителя эламина.

Для более детального изучения лечебного и лечебно-профилактического воздействия на организм разработанных пастильных изделий с водным экстрактом стевии, стевियोидом и эламином целесообразно было исследовать количество ТТГ, ТТГ, Т4 своб., АТПО. Гормональный контроль концентрации глюкозы в крови (инсулин, глюкагон, адреналин (эпинефрин), кортизол) проводили по образцам крови пациентов на базе клинической лаборатории «Медиа Строй».

После употребления опытного образца пастилки на протяжении 21 дня у всех пациентов отмечена стабилизация оптимальных соотношений гормонов тироидного пакета. У практически здоровых пациентов не наблюдалось состояние перенасыщения йодом или аллергических реакций.

У пациентов с повышенным онкомаркером поджелудочной железы и желчного пузыря отмечено уменьшение количества антител к пероксидазе щитовидной железы от 34,8; 34,0; 22,7 к 18,0; 24,0; 27,0 соответственно, что подтверждает органическое происхождение йода. У пациентов с сахарным диабетом II типа и йододефицитом почти на 3...3,5 % к норме этот показатель стабилизируется. Потребление разработанного вида пастилки не повлияло на группу пациентов с сахарным диабетом I типа: количество антител к пероксидазе щитовидной железы почти не изменилось.

На основе полученных данных можно сделать вывод о том, что потребление пастилы с экстрактом стевии, стевииозидом и эламином положительно влияет на содержание гормонов, участвующих в регуляции уровня сахара в крови, особенно на инсулин.

Общеизвестно, что сахарный диабет I типа связан именно со снижением уровня инсулина в крови. Эта тенденция наблюдалась у 7 – 9-го пациента. Показатели инсулина, перед употреблением пастилы с водным экстрактом стевии, стевииозидом и эламином, составили 2,6; 3,3; 2,9 мкЕД/мл (соответственно 7; 8; 9-го пациента), при норме для здорового человека 8...12,5 мкЕД/мл. После потребления исследуемого продукта содержание инсулина повысилось до 4,5; 4,7; 3,9 мкЕД/мл соответственно.

Пациенты с йододефицитом и сахарным диабетом II типа (3-я группа) характеризуются нечувствительностью к собственному инсулину. У пациентов с таким типом заболевания, как правило, наблюдается повышенный инсулин. Это подтверждают результаты полученных исследований – 9,2...14,2 мкЕД/мл. Однако после употребления пастилы, которая кроме водного экстракта стевии и стевииозидов содержит эламин, у пациентов наблюдалась нормализация уровня инсулина в крови – 8,7...12,3 мкЕД/мл. Таким образом, логично предположить, что данный эффект усиливается при насыщении гормонов щитовидной железы.

Итак, проявляя антагонистическое воздействие по отношению к инсулину, нормальное соотношение содержания инсулина и глюкагона обеспечивает оптимальное образование глюкозы в крови. Нехватка инсулина при сахарном диабете I типа сопровождается избытком глюкагона, что приводит к утилизации глюкозы и активизации процесса глюконеогенеза – образования глюкагона.

Увеличение содержания инсулина и глюкагона повышает уровень адреналина и кортизола. Данная зависимость наблюдалась у пациентов с йододефицитом и сахарным диабетом II типа (адреналин – 2,7...3,6 нмоль/л при норме 2,0...2,5 нмоль/л; кортизол – 672...720 нмоль/л при норме 138...635 нмоль/л) и у пациентов с сахарным диабетом I типа (адреналин – 2,7...3,9 нмоль/л, кортизол – 625...695 нмоль/л). После употребления в пищу разработанного вида пастилы в течение периода исследований наблюдается незначительная стабилизация инсулина и глюкагона, и, как следствие, адреналина и кортизола. Поэтому предполагаем, что разработанный вид пастилы с водным экстрактом стевии, стевииозидом и эламином позитивно влияет на сбалансирование гормонального фона пациентов, больных сахарным диабетом и йододефицитом.

Обсуждение результатов исследования безопасности и эффективности употребления пастильных изделий с использованием нетрадиционного сырья. Отметим, что пастила с водным экстрактом стевии, стевииозидом и эламином хорошо переносилась всеми пациентами. Побочные эффекты, в том числе аллергические, токсические и парадоксальные реакции, при употреблении в пищу разработанных изделий не наблюдались. Все пациенты отметили высокие вкусовые качества представленного продукта.

Употребление пастилы в предлагаемом количестве не повлияло на показатели периферической крови на биохимические показатели в группах практически здоровых людей.

Выводы. Учитывая полученные результаты клинических исследований, можно сделать вывод, что исследуемый продукт – пастила, производство которой предусматривает использование водного экстракта стевии, стевииозидов и эламина, имеет терапевтическое влияние на работу эндокринной системы, а исследование анализа крови пациентов, количества ТГ, ТТГ, Т₄ своб., АТПО, экскреции йода с мочой, гормонального контроля концентрации глюкозы в крови (инсулин, глюкагон, адреналин, кортизол) подтверждают нормализацию клинической картины и гормонального баланса в организме человека. Полученные результаты анализов свидетельствуют об эффективном, безопасном и профилактическом воздействии разработанных видов пастильных изделий.

Список литературы:

1. Горбачева, Е. В. Анализ распространения сахарного диабета и диабетической ретинопатии среди участников ликвидации на ЧАЭС г. Харькова и области [Текст] / Е. В. Горбачева, Л. К. Орлова // Двадцать пять лет Чернобыльской катастрофы. Безопасность будущего : сб. науч. тр. – К., 2011. – Вып. 1. – С. 184–87.
2. Фишкіна, Н. А. Новая технология пастилы на пектине [Текст] / Н. А. Фишкіна, Г. Ф. Леонтьева, Ю. Ю. Калдунова // Пищевая промышленность. – 1990. – №11. – С. 40–41.
3. Иорачева, Е. Г. Топинамбуровое пюре – сырьевая основа для зефира [Текст] / Е. Г. Иорачева, С. И. Банова // Актуальні проблеми технології та механізації процесів переробних та харчових виробництв : наук.-практ. конф. : тези доп. – Х., 2003. – С. 294–300.
4. Білецька, Я. О. Формування якості зефіру з використанням еламіну та ягідних пюре [Текст] : автореф. дис...канд. техн. наук : 05. 18. 15 / Я. О. Білецька; [Харківський у-т харч. та торгівлі], – Х., 2012. – 21 с.
5. Проблема мікроелементів у харчуванні населення України та шляхи її вирішення [Текст] / [В. Н. Корзун, І. П. Козятин, А. М. Парац та ін.] // Проблеми харчування. – 2007. – № 1. – С. 5–11.
6. Колісниченко, Т. О. Технологія борошняних формованих виробів функціонального призначення з йодвміщуючими добавками [Текст] : автореф. дис... канд. техн. наук. Т. О. Колісниченко, [Харківський у-т харч. та торгівлі], – Х., 2004. –18 с.
7. Sherine, N. Production and physicochemical assessment of new stevia amino acid sweeteners from the natural stevioside [Text] / N. Sherine, Khattab I.Mona, Massoud Yahya El-Sayed Jad, Adnan A. Bekhit, Ayman El-Faham // Food Chemistry. – 2015. – Vol. 173. – P. 979–985.
8. Спосіб виробництва пастилы з екстрактом стевії та еламіном [Текст] : пат. 92869 Україна, МПК А 23 G 3/00 / Дейниченко Г. В., Дюкарева Г. І., Соколовська О. О.; заявник і власник патенту ХДУХТ. – No u 201402975; заявл. 24.03.14; опубл. 10.09.14, Бюл. 17.
9. Спосіб виробництва пастилы зі стевією та еламіном [Текст] : пат. 92870 Україна, МПК А 23 G 3/00 / Дейниченко Г. В., Дюкарева Г. І., Соколовська О. О. Ляшенко М. Ю.; заявник і власник патенту ХДУХТ. – No u 201402977; заявл. 24.03.14; опубл. 10.09.14, Бюл. 17.
10. Спосіб виробництва зефіру [Текст] : пат. 61725 Україна, МПК А 23 G 3/00 / Дюкарева Г. І., Гончарова К. О., Дейниченко Г. В., Кравченко О. О. заявник і власник патенту ХДУХТ. – No u 201100499; заявл. 17.01.11; опубл. 25.07.11, Бюл. No14.

Bibliography (transliterated):

1. Gorbacheva, E. V., Orlova, L. K. (2011). Analiz rasprostraneniya saxarnogo diabeta i diabeticheskoy retinopatii sredi uchastnikov likvidacii na ChAES g. Xarkova i oblasti. Dvadcat pyat let Cher-

- nobyiskoj katastrofy. Bezopasnost budushhego : sb. nauch. tr. Kiev, 1, 184–87.
2. Fishkina, N. A., Leonteva, G. F., Kaplunova Yu. Yu. (1990). Novaya tehnologiya pastily na pektine. Pishhevaya promyshlennost, 11, 40–41.
 3. Iorgacheva, E. G., Banova, S. I. (2003). Topinamburovoe pyure – syrevaya osnova dlya zefira. Aktualni problemi tehnologii ta mexanizacii procesiv pererobnix ta xarchovix virobnictv : nauk.-prakt. konf. : tezi dop. Kharkov, 294–300.
 4. Bilecka, Ya. O. (2012). Formuvannya yakosti zefiru z vikoristannyam elaminu ta yagidnix pyure: avtoref. dis...kand. techn. nauk : 05. 18. 15; [Xarkivskij u-t xarch. ta torgivli], Kharkov, 21.
 5. Korzun, V. N., Kozyatin, I. P., Parac, A. M. ta in. (2007). Problema mikroelementiv u xarchuvanni naselennya Ukraїni ta shlyaxi її virishennya. Problemi xarchuvannya, 1, 5–11.
 6. Kolisnichenko, T. O. (2004). Tehnologiya boroshnyanix formovanix virobiv funkcionalnogo priznachennya z jodvmishhuuyuchimi dobavkami: avtoref. dis... kand. techn. nauk., [Xarkivskij u-t xarch. ta torgivli], Kharkov, 18.
 7. Sherine, N., Khattab I. Mona, Massoud, Yahya El-Sayed Jad, Adnan A. Bekhit, Ayman, El-Faham (2015). Production and physicochemical assessment of new stevia amino acid sweeteners from the natural stevioside. Food Chemistry, 173, 979–985.
 8. Dejnichenko, G. V., Dyukareva, G. I., Sokolovska, O. O. (2014). Sposib virobnictva pastili z ekstraktom stevii ta elaminom [Tekst] : pat. 92869 Ukraїna, MPK A 23 G 3/00; zayavnik i vlasnik patentu XDUXT. No u 201402975; zayavl. 24.03.14; opubl. 10.09.14, Byul. 17.
 9. Dejnichenko, G. V., Dyukareva, G. I., Sokolovska, O. O. (2004). Lyashenko M. Yu. Sposib virobnictva pastili zi stevieyu ta elaminom [Tekst]: pat. 92870 Ukraїna, MPK A 23 G 3/00 /; zayavnik i vlasnik patentu XDUXT. No u 201402977; zayavl. 24.03.14; opubl. 10.09.14, Byul. 17.
 10. Dyukareva, G. I., Goncharova, K. O., Dejnichenko, G. V., Kravchenko, O. O. (2014). Sposib virobnictva zefiru [Tekst] : pat. 61725 Ukraїna, MPK A 23 G 3/00 / zayavnik i vlasnik patentu XDUXT. No u 201100499; zayavl. 17.01.11; opubl. 25.07.11, Byul. No14.

Надійшла (received) 25. 03.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Исследования профилактического влияния и безопасности разработанных видов пастильных изделий с использованием нетрадиционного сырья/ Е. А. Соколовская, Г. И. Дюкарева// Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХП», 2016. – No 17(1189). – С.101–104. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Дослідження профілактичного впливу і безпеки розроблених видів пастильних виробів з використанням нетрадиційної сировини/ О. О. Соколовська, Г. І. Дюкарева// Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХП», 2016. – No 17(1189). – С.101–104. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Research of the safety and preventive action of the elaborated kinds of pastille products with the use of dietetic adjuncts / O. Sokolovska, G. Dyukareva//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 17 (1189).– P.101–104. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Соколовская Елена Александровна – Харьковський державний університет харчування і торгівлі, асистент кафедри "Товароведение и экспертиза товаров"; ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051; тел.: 099-787-34-37; e-mail: dreamhouse@yandex.ru.

Соколовська Олена Олександрівна – Харківський державний університет харчування і торгівлі, асистент кафедри "Товарознавство та экспертиза товарів"; вул. Клочківська, 333, м Харків, Україна, 61051; тел. : 099-787-34-37; e-mail: dreamhouse@yandex.ru.

Sokolovska Olena – Kharkiv State University of Food Technology, Assistant of the Department "Commodity and examination of goods"; Str. Klochkovsky, 333, Kharkiv, Ukraine, 61051; tel. : 099-787-34-37; e-mail: dreamhouse@yandex.ru.

Дюкарева Галина Ивановна – кандидат технических наук, Харьковський державний університет харчування і торгівлі, професор кафедри «Товароведение в таможенном деле», ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051; тел.: 097-815-17-29; e-mail: inna.agerova@mail.ru

Дюкарева Галина Іванівна – кандидат технічних наук, Харківський державний університет харчування і торгівлі, професор кафедри «Товарознавство в митній справі», вул. Клочківська, 333, м Харків, Україна, 61051; тел. : 097-815-17-29; e-mail: inna.agerova@mail.ru.

Dyukareva Galina – Candidate of Technical Sciences, Kharkiv State University of Food Technology, professor of "Commodity in customs", ul. Klochkovsky, 333, Kharkiv, Ukraine, 61051; tel. : 097-815-17-29; e-mail: inna.agerova@mail.ru.

УДК 628.16.06

М. В. БЕРНАЦЬКИЙ**МАГНІТНО - РЕАГЕНТНА ТЕХНОЛОГІЯ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ ТА УСТАНОВКА ДЛЯ ЇЇ РЕАЛІЗАЦІЇ**

Наведено відомості і експериментальні дані про розробку технології магнітно-реагентного очищення води та результати експериментальних досліджень очищення води в магнітному полі від феро-, діа- і парамагнітних домішок. Встановлено залежність для визначення ефективності очищення води, яка враховує конструктивні та технологічні параметри водоочисної установки і характеристики забрудненої води. Наведено конструкцію установки для реалізації технології магнітно-реагентного очищення води. Результати досліджень можуть бути використані для раціональної організації водно-хімічного режиму теплових мереж і водопідготовки.

Ключові слова: магнітний відстійник, магнітно-реагентна технологія очистки води, магнітний силовий фактор, магнетит, ефективність очищення.

Приведены сведения и экспериментальные данные о разработке технологии магнитно-реагентной очистки воды и результаты экспериментальных исследований очистки воды в магнитном поле от ферро-, диа- и парамагнитных примесей. Установлена зависимость для определения эффективности очистки воды, которая учитывает конструктивные и технологические параметры водоочистной установки и характеристики загрязненной воды. Приведена конструкция установки для реализации технологии магнитно-реагентной очистки воды. Результаты исследований могут быть использованы для рациональной организации водно-химического режима тепловых сетей и водоподготовки.

Ключевые слова: магнитный отстойник, магнитно-реагентная технология очистки воды, магнитный силовой фактор, магнетит, эффективность очистки.

In a paper usage of the compact installations with magnetic sumps of cellular frame for implementation is scientifically substantiated magnetic - reaction technologies of clearing of waters permitting to reduce the area and volume of refining facilities at maintenance of high performance of their activity.

Is designed and is investigated (studied) a new design of a magnetic sump of cellular frame intended for clearing of polluted waters from ferro-, dea- i of paramagnetic impurity (additives); is designed a technique of definition of efficiency of clearing of water, which one allows for design and technological parameters of a sump, and also parameters of an incoming water; the trial-and-error constants of relations describing a purification process of water in a magnetic sump are determined; the process of mechanical neogenesis ferromagnetic of a reactant - magnetite is investigated(studied); the designs and guidelines tangent calculation of magnetic sumps as independent facilities and in combination to filters FSL are designed.

The outcomes of a paper utilised at mining «of the Guidelines on designing, the manufacturing i exploitation of the trial type magnetic - reaction of clearing of water », approved State dwelling communal manage of Ukraine.

Keywords: the magnetic sump, magnetic - reaction technology of clearing of water, magnetic power factor, magnetite, efficiency of clearing.

Вступ. Системи комунально-побутового водяного опалення, в яких основним теплоносієм традиційно є вода, являються крупними споживачами паливно-енергетичних ресурсів і підвищення ефективності їх роботи може забезпечити значну економію дорогого дефіцитного палива [1, 2]. Вимоги щодо підготовки води, які пред'являють до комплексу заходів, що проводяться при роботі котлів і теплових мереж в основному можна сформулювати так: водопідготовка для теплових мереж і водно-хімічний режим в них повинні запобігти утворенню всіх видів забруднень та корозійних пошкоджень, а також їх відкладень на внутрішніх поверхнях водогрійного обладнання, елементах траси і мережі із врахуванням вимог надійності і економічності.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Для тепло і гарячого водопостачання населення та промислових об'єктів в основному використовується вода господарсько-питного призначення відповідно санітарних вимог ГОСТ 2874-82 „Вода питьевая” і СанПіН 2.11.4.559-96. Перед подачею такої води в мережу опалення проводять комплекс заходів по поліпшенню її якості відповідно СНіП 2.04.07-85 „Тепловые сети”. Останнім часом на існуючих і нових теплових мережах все ширше впроваджуються сучасні вітчизняні і імпорتنі котли, обладнання яких потребують біль жорстких вимог до якості як підживлюючої, так і мережевої води, які регламентуються інструкціями по експлуатації цих установок.

Особливістю закритих опалювальних мереж є те, що в них на протязі опалювального сезону циркулює практично одна і та ж вода, оскільки, як встановлено практикою експлуатації, добавка води на поповнення її втрат не перевищує 1,5 – 2 % від загальної кількості. Це означає, що вилучення продуктів корозії, накипу-утворення, механічних та інших домішок, які попали в циркуляційний контур або утворилися в ньому в процесі нагрівання води, є досить важливою задачею внаслідок незначної продувки системи. Проте, незважаючи на ці вимоги, в практиці експлуатації досить частими є випадки порушення цих норм пов'язаних з неповною деаерацією води, або попаданням до неї повітря в баках – акумуляторах при неввірно організованому підводі до них деаерованої води, а також при виконанні ремонтних робіт внаслідок аварій.

Відкладення, що утворюються на поверхні нагрівання і в теплообмінниках є досить різноманітними за своїм хімічним складом, структурою, густиною і теплопровідністю [3–5]. Зустрічаються рихлі, пористі відкладення, які схожі на туф або пемзу.

В переважній більшості попередня обробка води для теплових мереж полягає в її пом'якшенні, для чого використовують різні методи (реагентні, фільтрування через спеціальні сорбенти, іонного обміну), серед яких, починаючи із середини 30-х років найбільше розповсюдження отримав метод іонного обміну, який базується на здатності деяких, практично нерозчинних у воді матеріалів (іонітів), змінювати в бажаному напрямку іонний склад води, і дозволяє

© М. В. Бернацький. 2016

досягнути найбільш глибокого ефекту пом'якшення (до $0,01 \dots 0,02$ мг-екв./дм³), що не можна забезпечити іншими методами. [6, 7]. Проте, ці методи пом'якшення мають ряд недоліків, основними із яких є: висока вартість і трудомісткість монтажу та налагодки обладнання, значні експлуатаційні енерговитрати та на заміну і добавку іонообмінних матеріалів, значні об'єми каналізаційних стоків, нестабільність в роботі. Тому, особливо це стосується невеликих локальних мереж, вода в багатьох випадках взагалі не проходить ніякої підготовки, що нерідко приводить до аварій обладнання.

Останнім часом досить популярною технологією є використання інгібіторів (комплексонів) по недопущенню корозійних відкладень в системах тепловодопостачання, при якій використовуються реактиви на основі фосфонатів і полікарбоксилатів – стабілізаційна обробка води [8]. Необхідно відмітити, що комплексони не вилучають із води накипоутворюючі елементи, а мають здатність руйнувати дуже міцні сполуки солей за рахунок взаємодії з іонами, „вириваючи” їх із кристалів, а також руйнувати раніше утворені шламкові відкладення, роблячи їх рихлими за структурою. Напівзруйновані залишки накипу і шламу осідають в застійних зонах – колекторах котлів, фільтрах-відстійниках, а тому необхідно ретельно дотримуватись окремого для кожного котла графіка проведення продувки і своєчасного очищення фільтрів-відстійників. Крім цього, впровадження такої технології потребує додаткового монтажу теплообмінного обладнання і хімічних блоків.

Одним із варіантів вирішення цієї проблеми може бути використання магнітних очисних пристроїв, великою перевагою яких у порівнянні з іншими апаратами, є те, що вони здатні пропускати через себе великі об'єми води при власних малих габаритах з високою ефективністю процесу водоочистки і відносно невеликими експлуатаційними витратами, а концентрація домішок в неочищеній воді може коливатись в широких межах (від долей мг/дм³ до г/дм³) і самі домішки можуть мати найрізноманітніші фізико-хімічні властивості. Промислове використання таких установок для тонкої очистки рідин було розпочате в кінці 60-х - на початку 70-х років після створення фірмою "Крафтверк Уніон" (ФРН) промислових конструкцій електромагнітних фільтрів. В подальшому даний метод впроваджується в США, Японії, Швеції, Австралії, СРСР, Україні та ін.

Ціль та задачі дослідження. Метою досліджень є забезпечення очищення циркуляційної води систем опалення від феро- і парамагнітних домішок з використанням реагентів і магнітного поля. Відповідно до вказаної мети були визначені такі задачі досліджень:

1. Розробити експериментальні установки для дослідження магнітно-реагентного очищення води від пара- та феромагнітних домішок.
2. Дослідити вплив доз реагентів, силових характеристик магнітного поля, температури води, водневого показника рН та ін. на процес магнітно-реагентного очищення води.
3. Розробити конструктивні рішення установок для реалізації очищення води магнітно-реагентним способом.

При проведенні експериментів використовували сучасні методи досліджень та обладнання: оптична система контролю прозорості води, яка складалась із гелій-неонового лазера і фотодіода, фотоколориметр ЛМФ-72, генератор магнітного дисперсного матеріалу „Елемаг”. Дослідні дані обробляли за допомогою ПЕОМ, результати експериментів – відповідно до рекомендацій Міжнародного союзу чистої і прикладної хімії за методами визначення і формою позначення помилок, відхилень, одержуваних при масових аналітичних дослідженнях.

Об'єкт досліджень – магнітні установки очистки води систем водяного опалення та води із значним вмістом пара і діамагнітних домішок.

Предмет досліджень – процес очищення води в магнітних відстійниках сотової структури.

Магнітно-реагентну очистку води використовують у разі необхідності вилучати парамагнітні і діамагнітні домішки. Введення в очищувачу воду феромагнітного реагенту (магнетиту) і коагулянту або луку дозволяє отримати агрегати, до складу яких входять феромагнітні частинки магнетиту і продукти коагуляції, що здатні реагувати на дію магнітного поля. Якщо помістити очищувачу воду з утвореними в ній феромагнітними агрегатами в магнітне поле, то їх гідравлічна крупність значно збільшується, причому швидкість направленої руху зростає по мірі наближення до поверхні магніту, тобто зростає з ростом магнітного силового фактора. Як приклад багатфакторного впливу на феромагнітну частинку магнітного поля розглянемо вплив ряду факторів на частку, вміщену в рідину.

На одиночну частку масою $m_c = \omega_c \times \rho_c$ діє виштовхувальна сила $A = \omega_c \times \rho_e$ і маса самої частки. При $\rho_c > \rho_e$ співвідношення між діючими на частку силами має вигляд $m_c > A$. У цих умовах напрямок руху частинки зорієнтоване зверху вниз. Під час такого руху формується зустрічний рух рідини зі швидкістю w_1 , перешкоджаючи низхідному руху. В результаті впливу на частку всіх згаданих сил вона буде осідати зі швидкістю V_1 (рис. 1, а). Діапазон зростання можливої швидкості осідання обмежений вірогідною різницею питомої маси частинок домішок і рідини, в якій частка розташована.

Розглянемо випадок при додаванні в рідину іншої частинки (характеризується магнітними властивостями) з масою $m_m = \omega_m \times \rho_m$, з питомою масою $\rho_m > \rho_c$, розміром меншим попередньої ($\omega_c > \omega_m$ або $1/6 \times \pi d_c^3 > 1/6 \times \pi d_m^3$, тобто $d_c > d_m$) (рис.1, б). Завдяки можливій різниці потенціалів між поверхнями обох частинок вони утворюють нову більшу частку. Очевидно, маса нової частинки дорівнює масі двох частинок $m_a = m_c + m_m$, а загальний їх обсяг відповідає сумі об'ємів кожної з них, тобто $\omega_a = \omega_c + \omega_m$. За цих умов співвідношення між масою агрегату і силою його виштовхування відрізняється від такого ж параметра для першого випадку, що розглядається. У цьому співвідношенні значення сили, що визначається масою частки зростає, а, отже, швидкість осадження частинки збільшується ($V_2 > V_1$). Під час такого руху формується зустрічний рух рідини зі швидкістю w_2 , перешкоджаючи низхідному руху. Сила перешко-

ди швидкості випадання в осад частинки пропорційна швидкості її осідання ($w_2 > w_1$).

Шляхом додавання «сорбенту» в рідке середовище з'являється можливість управляти інтенсивністю процесу його прояснення. Однак діапазон такої можливості обмежений вірогідною різницею питомих мас частинок домішок і «сорбентів».

Розглянемо третій випадок (рис. 1, в) – вплив магнітного поля на рідину і агрегат, утворений з першої і другої частки (див. попередній другий випадок). Агрегат, завдяки наявності в його складі феромагнітної частки також володіє магнітними властивостями. Магніт, розташований під нижньою частиною по-

судини з рідиною діє на агреговану частку. Напрямок векторів гравітаційної та магнітної сил, діючих на таку частку збігаються. Сума векторів обох сил обумовлює зростання швидкості руху частинки в напрямку магніту ($V_3 > V_2$). При збільшенні швидкості осідання частинок зростають значення вихрових висхідних потоків ($w_3 > w_2$). Однак швидкість осідання частинки набагато перевершує аналогічний параметр при відсутності впливу магнітного поля. Із збільшенням магнітного силового фактора швидкість руху частинки зростає, і, як наслідок, з'являється можливість управляти процесом прояснення рідини.

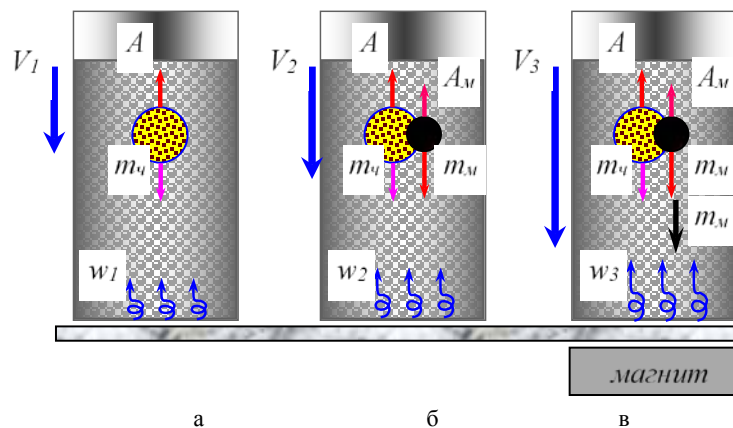


Рис. 1 – Схеми осадження феромагнітних агрегатів: а – частка в гравітаційному полі; б – частка забруднення агрегована з часткою феромагнітного дисперсного матеріалу в гравітаційне поле; в – частка забруднення агрегована з часткою феромагнітного дисперсного матеріалу в гравітаційних і магнітних полях

Перевірка цієї гіпотези здійснювалася в лабораторних умовах. Установка була виконана у вигляді трикутної кювети з прозорого матеріалу. Розміри кювети: ширина 2 см, висота 12 см, кут - 45°. Як джерело світла використовувався лазерний випромінювач (рис. 2).

Промінь лазера орієнтувався перпендикулярно до поверхні кювети в точку m , розташовану на 2/3 від вершини кута. Промінь лазера, проходячи через кювету, фокусувався на фотоприймачі. За інтенсивністю променя лазера проводився контроль світлопропускання досліджуваного розчину, розташованого в кюветі. Зміна динаміки інтенсивності світлопропускання після перетворювача контролювалась на фіксуючому пристрої. Зміна магнітної характеристики системи досягалася шляхом зміни магнітної напруженості магнітного поля.

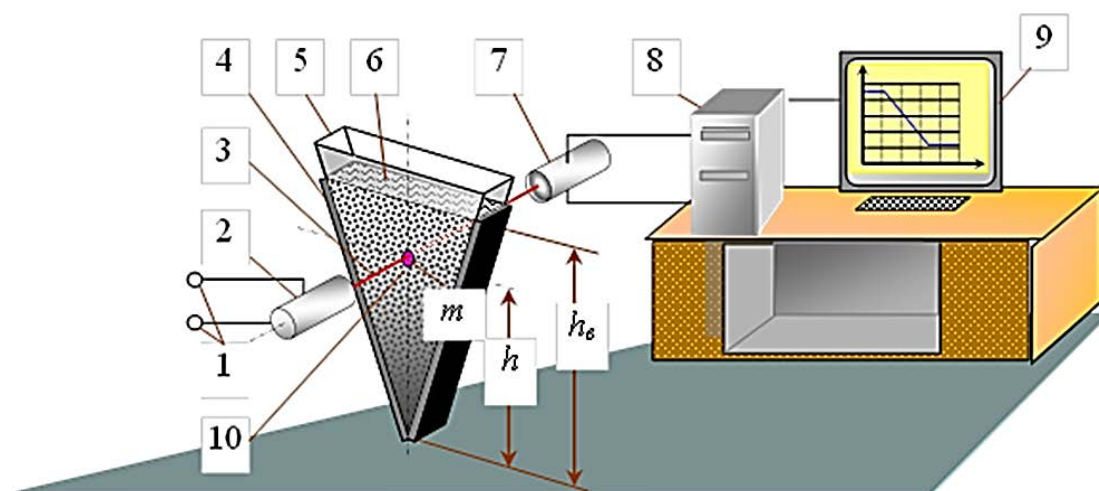


Рис. 2 – Лабораторна установка досліджень процесу очищення води: 1 – джерело живлення; 2 - лазерний випромінювач; 3 – горизонтальна вісь розташування точки « m »; 4 – магнітна система; 5 – кювета з прозорого матеріалу; 6 – досліджувана вода; 7 – фотоприймач і перетворювач світла в електричний сигнал; 8 – перетворювач; 9 – фіксуючий пристрій; 10 – точка « m » на передній стінці кювети, через яку проходить лазерний промінь, h - висота розташування точки « m », h_0 - висота шару суспензії в кюветі.

Використання відстійника, що включає систему непаралельних пластин дає можливість створити неоднорідне магнітне поле, силовий фактор $H \times \text{grad}H$ (H - напруженість, $\text{grad}H$ - градієнт напруженості, який характеризує неоднорідність магнітного поля в заданому напрямі), якого зростає вздовж бісектриси кута до його вершині, забезпечуючи рух феромагнітних частинок в цьому ж напрямку. Для забезпечення процесу зміни структури системи (коагуляція, флокуляція, сорбція) до модельного розчину вводили коагулянт, луг (CaOH_2), $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ та ін), а для створення умов взаємодії продуктів коагуляції з магнітним полем – магнітосприйнятливий дисперсний матеріал - магнетит.

Як досліджуваної середовища використовувалися штучні розчини з оксидів заліза, кальцію, магнію, бентонітової глини, стічної води. Як магнітної основи використовувався магнетит, отриманий хімічним або фізичним методами. Обсяг досліджень визначався кількістю основних факторів, що впливають на процес розділення суспензій. Інтенсивність цього процесу, яка характеризується розрахунковим параметром k , а також залежить від інших факторів. У загальному вигляді згадана залежність має вигляд:

$$k=f(d_m, d_k, t^{\circ}C, H \times \text{grad}H, pH, C_o), \quad (1)$$

де: d_m – доза магнетиту, г/дм^3 ; d_k – доза коагулянту, мг/дм^3 ; $t^{\circ}C$ – температура води, $^{\circ}C$; $H \times \text{grad}H$ – силовий фактор магнітного поля, $\text{А}^2/\text{м}^3$; pH – водневий показник води; C_o – початкова концентрація механічних домішок, мг/дм^3 .

Досліди проведені в статичних умовах. В ході досліджень отримані багато сотень графічних залежностей змін оптичної густини в точці « m » багатофазної системи в часі (рис. 3). Графіки мали нелінійний вигляд.

На першому етапі процесу протягом часу τ зміни оптичної густини багатофакторної системи в точці « m » не спостерігалось, лінія графіку у всьому інтервалі τ була горизонтальною. Цей час є необхідним для переміщення основного фронту концентрації найбільших фракцій домішок багатофазної системи уздовж інтервалу $h_0 - h$ (зона А рис. 3).

Після закінчення часу τ прояснення верхнього шару багатофазної системи тривало, осідали більш дрібні фракції феромагнітних домішок і фракції домішок, володіючих більш слабко вираженими феромагнітними властивостями (зона Б рис. 3). Від геометричних розмірів, маси і феромагнітних властивостей частинок домішок саме цієї частини багатофазної системи залежить тривалість $t_0 - \tau$ – найбільш інтенсивної зміни її оптичної густини в точці « m ».

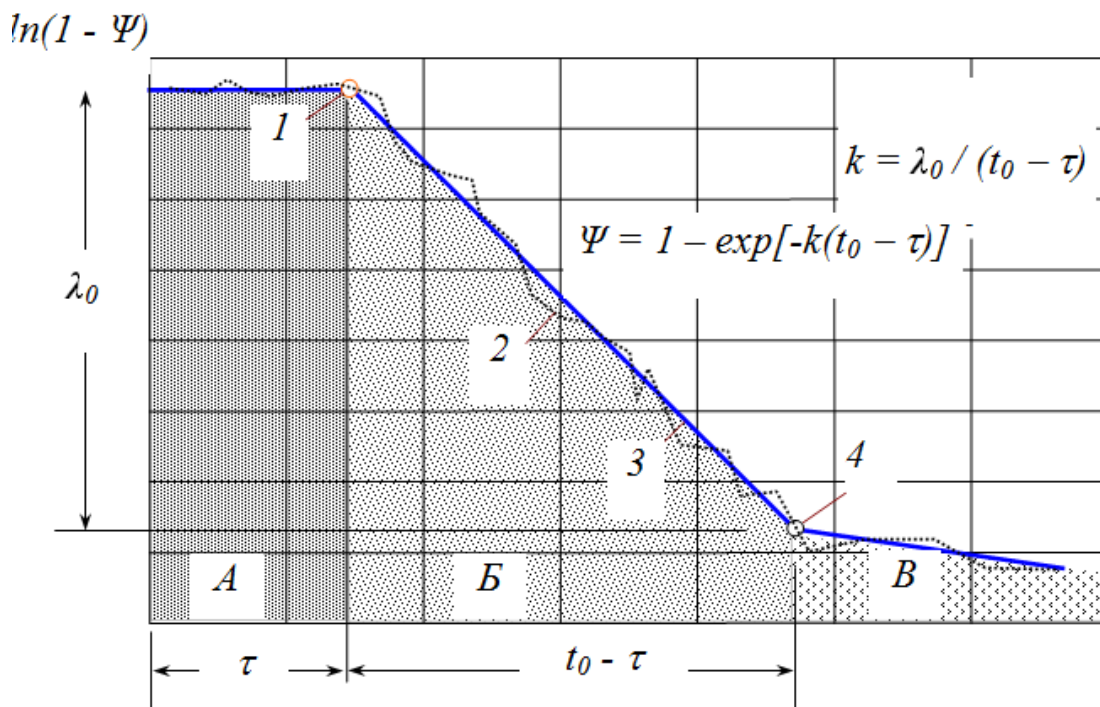


Рис. 3 – Графічна інтерпретація експериментальних досліджень функції $\Psi = 1 - \exp[-k(t_0 - \tau)]$: 1 – початок інтенсивної локалізації домішок; 2 – експериментальна крива; 3 – розрахункова лінія; 4 – точка уповільнення інтенсивності локалізації домішок; τ – параметр, що характеризує тривалість формування агрегатів і їх переміщення в зону точки « m »; t_0 – параметр, що характеризує тривалість інтенсивної локалізації частинок; λ_0 – величина параметра $\ln(1 - \Psi)$, яка спостерігається протягом часу $t_0 - \tau$

Після осідання основної частини домішок багатофазної системи, розташованої над точкою « m » процес зміни оптичної густини помітно знижувався (зона В рис. 3).

В ході обробки експериментальних даних визначались значення розрахункових параметрів t_0 , τ , λ_0 , що характеризують досліджуваний процес.

В результаті досліджень встановлено, що при малих значеннях комплексу $-k(t_0 - \tau)$ величина парамет-

ра Ψ , який характеризує ефективність розділення суспензії, має мале значення. Однак зі зростанням комплексу $-k(t_0 - \tau)$ значення параметра Ψ також зростає і при $-k(t_0 - \tau) \approx 3$ ефективність поділу Ψ досягає більше 95%. Виявлено взаємозв'язок між розрахунковими параметрами k , t_0 і τ . Так, взаємозв'язок між $(t_0 - \tau)$ і розрахунковим параметром k в математичному вигляді має вигляд:

$$t_0 - \tau = 1,56k^{0,5} \quad (2)$$

З урахуванням виявлених взаємозв'язків між розрахунковими параметрами t_0 , τ , k , математичний вираз, представлений на рис. 4 набуде вигляду;

$$\Psi = 1 - \exp(-1,56 \times k^{0,5}) \quad (3)$$

Побудований з математичного виразу графік добре узгоджується в усьому діапазоні зміни k з даними досліджень. Очевидно, таке узгодження свідчить про достовірність виконаних робіт і про існування об'єктивного взаємозв'язку між досліджуваними параметрами.

Слід зазначити, що в досліді при приготуванні багатофазної робочого середовища (суспензії) використовувались домішки різної природи і властивостей, змінювались значення та інших факторів, однак відчутного впливу на взаємозв'язок між k , t_0 і τ , це не робить. На підставі результатів проведених досліджень була розроблена технологічна схема очищення води в магнітному полі з застосуванням реагентів, що володіють магнітними властивостями (рис. 5) [9, 10, 11].

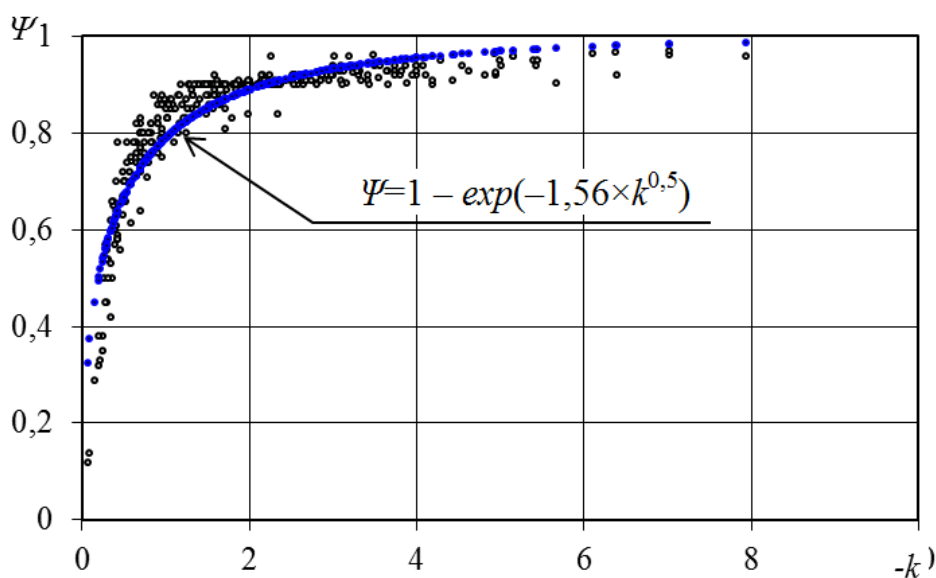


Рис. 4 – Залежність ефективності локалізації домішок Ψ від параметру

Установка працює наступним чином. Вихідна вода, разом із відстоюною в шламозбірнику водою, поступає в змішувач вертикального типу, в який подаються магнітний дисперсний матеріал (магнетит) і реагент (сірчаноокислий алюміній, луг чи інший реагент). Підготовлена таким чином вода поступає в магнітний відстійник де відбувається затримання утворених в зоні відстійника феромагнітних агрегатів. Локалізовані у відстійнику агрегати відводяться у вузол регенерації, де здійснюється відокремлення забруднень від поверхні частинок магнетиту. Регенований магнетит поступає у вузол його приготування, а відокремлені забруднення - в шламозбірник. Частково відстоюна на магнітному відстійнику вода поступає на зернистий фільтр для більш глибокого доочищення. Очищена на фільтрі вода відводиться на знезаражування, в акумулюючі ємності чи водоспоживачу, а

її невелика частина (<1 %) поступає у вузол реагентного господарства та вузол приготування магнетиту.

Промивна вода, що періодично утворюється під час промивки зернистого фільтра, відводиться в шламозбірник. Частково відстоюна в шламозбірнику вода поступає в змішувач установки її очистки. Осад з шламозбірника періодично відводиться на утилізацію - в шламонакопичувачі, заводи по переробці відходів чи на установки спалювання.

Нова технологія поліпшення якості води забезпечує достатню ефективність очистки води від завислих речовин (в тому числі 90 – 96 % на ступені магніто-реагентної очистки) – 99 % (при їх концентрації до 300 мг/дм³), заліза – 95 – 99 % (при місткості заліза до 10 мг/дм³), солей твердості - 85–95 % (при концентрації в вхідній воді до 15 мг-екв/дм³), БСК – 90 – 95 % (при значенні БСК в вхідній воді до 50 мг/дм³), магнетиту і магемиту – 99 - 99,9 % (при їх концентрації до 5 г/дм³).

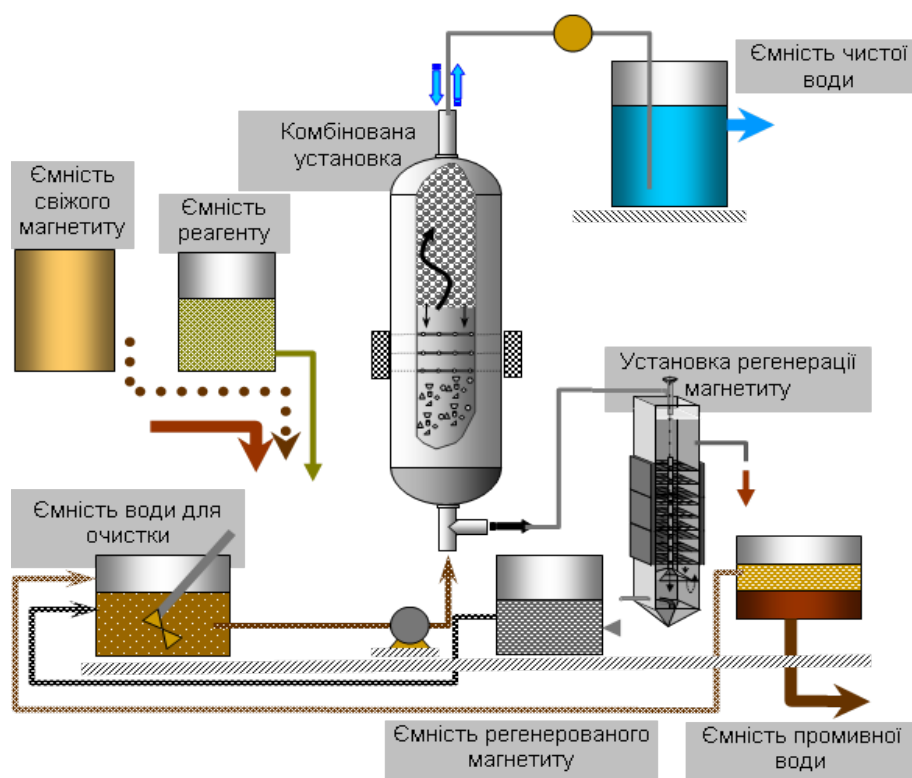


Рис. 5 – Технологічна схема магніто-реагентної очистки води

Висновки. В результаті виконаних досліджень встановлено взаємозв'язок між розрахунковими параметрами k , t_0 і τ , визначені константи між їх співвідношеннями, що дозволяє розробити нові підходи природокористування, створити нові технології сепарації багатозфазних поточних систем. Запропоновано технологічну схему установки очищення багатозфазних рідких систем з магнітними властивостями.

Список літератури:

1. Закон України «Про енергозбереження» [Текст]: Відомості Верховної Ради України (ВВР). – 1994. – № 30. – 283 с.
2. Про комплексну державну програму енергозбереження України. Постанова Кабінету Міністрів України №148 від 05.02.1997 р. / Офіційний вісник України. – 1997. – № 6. – 90 с.
3. Лапотышкина, Н. П. Водоподготовка и водно - химический режим тепловых сетей [Текст] / Н. П. Лапотышкина, Р. П. Сазонов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 200 с.
4. Николадзе, Г. И. Подготовка воды для питьевого и промышленного водоснабжения: учеб. пособие [по спец. «Водоснабжение и канализация» для вузов.] / Г. И. Николадзе, Д. М. Минц, А. А. Кастальский. - М.: Высш.шк., 1984. – 368 с.
5. Шицман, М. Е. Анализ причин формирования железокислородных отложений на теплообменных поверхностях водогрейных котлов ТЭЦ [Текст] / М. Е. Шицман, Н. А. Зройчиков, В. Ф. Панченко и др. // Электрические станции. – 1998. – № 4. – С. 17–24.
6. Стерман, Л. С. Физические и химические методы обработки воды на ТЭС [Текст] / Л. С. Стерман, В. Н. Покровский. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 391 с.
7. Амосова, Э. Г. Опыт применения технологии противоточного натрий-катионирования в промышленной котельной [Текст] / Э. Г. Амосова, П. И. Долгополов, Р. И. Гутникова // Энергозбереження и водоподготовка. – 2003. – №2. – С. 48–50.
8. Федосеев, Б. С. Обобщение опыта применения фосфоновых соединений для обработки подпиточной воды в тепловых сетях [Текст] / Б. С. Федосеев, Ю. В. Ирменин // Теплоэнергетика. – 1994. – № 5. – С. 17–18.
9. Бернацкий, Н. В. Исследование процесса локализации примесей воды в магнитном поле [Текст] / Н. В. Бернацкий // Сборник тезисов докладов региональной конференции «Экологические проблемы рационального использования и охраны водных ресурсов Северо-запада европейской части РСФСР». – Вологда. – 1990. – С. 103.
10. Патент РФ, №2048163, МКИ 6 В 01 D 35/06. Установка для очистки жидкостей [Текст] / Н. Н. Гириль, Н. В. Бернацкий, А. И. Капитанов, В. П., А. И. Попов, В. В. Танковский (РФ). – № 49279752048163, Б.И. №32, 20.11.1995.
11. Научное открытие № 341. Закономерность распределения ферро-, диа- и парамагнитных дисперсных частиц в объеме многофазных текущих сред под многофакторным воздействием на систему [Текст] / В. А. Гурин, Н. Н. Гириль, Н. В. Бернацкий (Украина) и др. Опубл. 09.11. 07 г. Москва, рег. № 421.

Bibliography (transliterated):

1. Anderson, N., Bolto, B., Pawlowski, L. (1984). A method for chromate removal from cooling tower blowdown water. Nucl. and Chem. Waste Manag, No5/2, 125–129.
2. Anderson, N. J., Bolto, B. A., Dixon, D. R., Kolarik, L. O., Priestly, A. J., (1982). Water and wastewater treatment with reusable magnetite particles. Water Sci. and Technol, 14, 9–11, 1545–1546.
3. Anderson, N. J., Bolto, B. A., Eldrige, R. J., Kolarik, L. O., Swinton, E. A. (1986). Colour and turbidity removal with reusable magnetic particles. II. Coagulation with magnetic polymer composites. Water Res, 14, 8, 967–973.
4. Gabrielli, F. (1997). Copper Alloy Corrosion and Transport in the Power Plant Cycle. International EPRI – TNEL – VGB Conference on Interaction of Non – Iron Based Materials with Water and Steam. EPRI, Palo Alto CA, USA, 9.1–9.15.
5. Kolarik, L. (1980). Chemistry of sifroflocc process. Chemistry in Australia, 47, 6, 234–237.
6. Kolari, L. (1983). Colour and turbidity magnetic particles. Alkali activated magnetite – a new solid reusable coagulant – adsorbent. Water Res, 17, 2, 141–147.
7. Lechie, J., Merrill, D. (1985). Trace element removal from power plant wastestreams by adsorption. Coprecipitation with amorphous oxyhydroxide. AIChE Symp. Ser, 243, 28–42.

8. Dixon, P., Kolarik, L. (1975). Magnetic microparticles for treatment of natural Waters and wastewaters. Chem. Prot. Environ. Proc. int. Conf., Toulouse, Amsterdam, 179–191.
9. Mitchell, A., Bitton, G., de Latorir, C., Maxwell, E. (1975). Magnetic separation a new approach to water and waste treatment. Program in Water Technology, 3/4, 349–355.
10. Norrgan, D., Werkham, J. (1988). Magnetic capture of fine particles. Prod. and Process. Fine Part: Proc. Jnt. Symp. Montreal, 875.

Надійшла (received) 20.03.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Магнітно – реагентна технологія очищення води та установка для її реалізації/ М. В. Бернацький // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.105–111. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Магнитно - реагентная технология очистки воды и установка для ее реализации/ М. В. Бернацкий // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.105–111. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Magnetic - reagent water treatment technology and device for its realization/ M. V. Bernatsky // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 17 (1189). – P.105–111. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бернацький Микола Васильович – кандидат технічних наук, Національний університет водного господарства та природокористування, доцент кафедри охорони праці і безпеки життєдіяльності, вул. Соборна, 11, м. Рівне, Україна, 33000, тел. 068-146-28-87, 095-770-39-16; e-mail: bkmw@ukr.net.

Бернацький Николай Васильович – кандидат технических наук, Национальный университет водного хозяйства и природопользования, доцент кафедры охраны труда и безопасности жизнедеятельности, ул. Соборная, 11, г. Ровно, Украина, 33000, тел. 068-146-28-87, 095-770-39-16; e-mail: bkmw@ukr.net.

Bernatsky Mikola Vasylovych – candidate of technical sciences, associate professor, National university of water economy and management of nature. Soborna str, 11, Rivne, Ukraine. 33000, tel. 068-146-28-87, 095-770-39-16; e-mail: bkmw@ukr.net.

УДК 629.01 (075.8)

Н. Ю. ФИЛЬ

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЕКТАМИ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ ПРИРОДНЫХ СИТУАЦИЙ НА МАГИСТРАЛЬНЫХ АВТОДОРОГАХ С УЧЕТОМ РИСКОВ

Одной из важнейших составляющих успешного управления проектами предупреждения чрезвычайных природных ситуаций является способность выявлять, оценивать риски и управлять ими. Проведен анализ рисков, которые возможны при управлении проектами предупреждения чрезвычайных природных ситуаций на магистральных автодорогах. Разработана математическая модель планирования работ по проекту предупреждения чрезвычайных природных ситуаций на магистральных автодорогах с учетом рисков, которая относится к классу задач математического программирования со многими критериями. Результаты исследования могут быть использованы при планировании работ различных проектов с учетом рисков.

Ключевые слова: управление проектами, чрезвычайные ситуации, предупреждение, магистральные автодороги, риски, работа.

Однією з найважливіших складових успішного управління проектами попередження надзвичайних природних ситуацій є здатність виявляти, оцінювати ризики і управляти ними. Проведено аналіз ризиків, які можливі при управлінні проектами попередження надзвичайних природних ситуацій на магістральних автодорогах. Розроблено математичну модель планування робіт за проектом попередження надзвичайних природних ситуацій на магістральних автодорогах з урахуванням ризиків, яка відноситься до класу задач математичного програмування за багатьма критеріями. Результати дослідження можуть бути використані при плануванні робіт різних проектів з урахуванням ризиків.

Ключові слова: управління проектами, надзвичайні ситуації, попередження, магістральні автодороги, ризики, робота.

Implementation of project management in project management practices to prevent extreme natural emergency situations on main roads will significantly save the budget of the projects, to reduce the time of their execution, improve the quality of work performed on the project. One of the most important components of successful prevention project management of natural emergency situations is the ability to identify, assess and manage risks. Analysis of risks is conducted in the article. These risks are possible in the prevention project management of natural emergency situations on the main roads.

A mathematical model of the planning of the prevention project of natural emergency situations on the main roads is developed. This model takes into account the risks, which belongs to a class of mathematical programming problems with many criteria.

As a scientific novelty, a mathematical model of the planning of the prevention project of natural emergency situations on the main roads, taking into account risks is first developed.

The practical importance. The model of planning of the prevention project of natural emergency situations on the main roads can be used to create automated decision support systems of prevention project management prevention of natural emergency situations on the main roads, to development of AWS of project executives and managers.

Keywords: project management, emergency, warning, main roads, risks, work.

© Н. Ю. Филь. 2016

Введение. Магистральные автодороги (МАД) Украины сегодня это не только транспортные артерии страны, но драйвер и средство европейского социально-культурного развития. Обеспечение безопасности МАД и улучшения их транспортно-эксплуатационного состояния является необходимым условием для дальнейшего социально-экономического развития государства и общества.

Анализ литературных данных и постановка проблемы. По состоянию на январь 2015 г. протяженность сети автомобильных дорог в Украине составляет 169,6 тыс. километров, ее плотность 281 километр на 1 тыс. кв. километров, что, в основном, соответствует темпам развития национальной экономики. Однако эксплуатационное состояние автомобильных дорог требует значительного улучшения, а дорожное покрытие местами требует полного обновления. По данным ученых, ежегодно государство теряет около 30 млрд. гривен валового внутреннего продукта за неудовлетворительного состояния автомобильных дорог [1, 2].

Состояние финансирования дорожной отрасли государством, и как следствие – состояние автомобильных дорог Украины, с каждым годом все ухудшается. Сотрудничество с МФО, а также иностранными и отечественными банковскими учреждениями является практически единственным путем сохранения дорожной сети, поскольку позволяет дорожным предприятиям и организациям выполнять весь необходимый комплекс работ в соответствии с современными технологическими процессами, а также придерживаться межремонтных сроков хотя бы на нескольких автомобильных дорогах Украины [3, 4].

Вопросам управления в условиях чрезвычайных ситуаций (ЧС) и построения информационных систем поддержки принятия решений в условиях ЧС, посвящены исследования и публикации многих отечественных ученых и специалистов. В последние годы за рубежом активно развиваются научно-практические разработки в области риск-менеджмента [4].

Одной из форм управленческой деятельности различных предприятий, оправдавшей себя на практике, является методология управления проектами [4].

Вопросы экологической и социальной оценки проектов нашли свое отражение в методологии Green Project Management, предложенной Том Mochal и Andrea Krasnoff. Основной идеей GeenPM является включение экологических аспектов организации процессов управления проектом или программой [5, 6].

В исследованиях Jane Allen Jones (Society of Sustainability Professionals, ISSP) [7] было определено, что экологическая и социальная оценка проектов, являются наиболее важными для достижения проектов в соответствии устойчивого развития.

Применения подходов устойчивого развития для управления проектами исследуется в [8]. Авторы разработали инструмент для менеджеров проекта по определению экологических и социальных показателей проекта.

Таким образом, внедрение проектного управления в практику различных предприятий позволяет

значительно экономить бюджеты реализуемых проектов, время их исполнения, повышать качество выполненных работ [9, 10].

Однако комплексные исследования рисков при управлении проектами предупреждения ЧС в транспортно-дорожной отрасли отсутствуют. Кроме того, каждый год в Украине случается около десяти чрезвычайные природные ситуации (ЧПС): оползни, лавины, наводнения и прочее.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является повышение эффективности управления проектами предупреждения ЧПС на МАД за счет разработки и внедрения математической модели планирования работ по проекту предупреждения ЧПС на МАД с учетом рисков.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ рисков, которые возможны при управлении проектами предупреждения ЧПС на МАД.
2. Разработать математическую модель планирования работ по проекту предупреждения ЧПС на МАД с учетом рисков.

Анализ возможных рисков при управлении проектами предупреждения ЧПС на МАД. Управление проектами предупреждения ЧПС на МАД с учетом рисков – это многоступенчатый процесс, который имеет своей целью уменьшить ущерб для объекта при наступлении неблагоприятных событий [4].

Процесс управления рисками базируется на результатах количественной оценки рисков. Это позволяет сопоставлять альтернативные проекты с различным уровнем рисков; выявлять наиболее опасные факторы рисков, которые возможны при реализации проектов предупреждения ЧПС на МАД; создавать базы данных и базы знаний для экспертных систем поддержки принятия решений и разработки нормативно-справочных документов; определять эффективные решения, направленные на снижение рисков.

Риск – это сложное явление, имеющее множество различных составляющих. Это объясняется тем, что в основе риска лежит вероятностная природа результатов управленческой деятельности и неопределенность ситуации, в которой происходят события. Необходимо выявить все риски, которые возможны с учетом проведенных оценок источников возможных ЧПС и технико-эксплуатационных показателей (ТЭП) участков МАД. Главное здесь – не пропустить важных обстоятельств и подробно описать все существенные риски.

Исследуя сущность и специфику рисков проектов предупреждения ЧПС на МАД, отметим в первую очередь, что риски имеют место в различных случаях: при недостатке информации об источнике возможной ЧПС или ТЭП участков МАД; при неудовлетворительном или неполном выполненном проекте предупреждения ЧПС на МАД в прошедший период; при неудачном выборе исполнителей; при ошибках в оценке имеющихся ресурсов и т.д.

При планировании работ по проекту предупреждения ЧПС на МАД возникают другие риски: риски расписания, связанные с невыполнением работ проекта в срок, ресурсные риски, связанные с недоступно-

стью необходимых для проекта ресурсов; бюджетные риски, связанные с возможным превышением бюджета проекта.

Как правило, каждый вид рисков допускает реализацию двух-трех проектов предупреждения ЧПС с учетом их уменьшения. При этом с учетом финансирования формируется портфель проектов предупреждения ЧАС на МАД на перспективу.

Затем оцениваются затраты и эффективности снижения рисков для каждого из проектов, что дает возможность ранжирования проектов предупреждения ЧПС с учетом снижения рисков – формируется портфель проектов предупреждения ЧАС на МАД на текущий период. Далее на основе принятого решения происходит планирование работ по проекту предупреждения ЧПС на МАД, реализация и анализ результатов реализации выбранной стратегии с учетом текущей информации [11].

Таким образом, управление проектами предупреждения ЧПС на МАД должно основываться на мониторинге, оценке и анализе рисков проекта, а затем планировании работ по проекту с учетом рисков.

Математическая модель планирования работ по проекту предупреждения ЧПС на МАД с учетом рисков. Задача планирования работ по проекту предупреждения ЧПС на МАД заключается в следующем. Известно: множество работ $R = \{r\}$, $r = \overline{1, r'}$ которое нужно выполнить и требуемые для них ресурсы ρ_{nm} , r' - число работ по проекту, $n = \overline{1, n'}$; n^r - число ресурсов для r -ой работы по выбранному проекту предупреждения ЧПС на МАД; продолжительность выполнения r -й работы в нормальном режиме Δt_r ; стоимость выполнения r -й работы по проекту в нормальном режиме C_r ; вероятность появления \mathfrak{R}_i , $i = \overline{1, 3}$; технологический порядок выполнения работ $\mu_{\gamma r}$, $\gamma, r = \overline{1, r'}$, где

$$\mu_{\gamma r} = \begin{cases} 1, & \text{если работа } \gamma \text{ должна предшествовать работе } r \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

Необходимо определить последовательность, начало $t_r(\mathfrak{R})$ и продолжительность реализации Δt_r каждой работы проекта предупреждения ЧПС на МАД.

Для решения этой задачи разработана модель планирования реализации работ проекта предупреждения ЧПС на МАД. Частные критерии:

1) минимизировать стоимость выполнения всех работ по проекту предупреждения ЧПС на МАД:

$$C = \min \sum_{r=1}^{r'} \sum_{i=1}^3 C_r [t_r(\mathfrak{R}_i), \Delta t_r(\mathfrak{R}_i)]; \quad (1)$$

2) минимизировать затраты каждого вида ресурсов по проекту предупреждения ЧПС на МАД:

$$P_n = \min \sum_{r=1}^{r'} \sum_{i=1}^3 \rho_m [t_r(\mathfrak{R}_i), \Delta t_r(\mathfrak{R}_i)]; \quad n = \overline{1, n'}; \quad (2)$$

3) минимизировать продолжительность реализации проекта с заданной вероятностью завершения его в срок:

$$\Delta T^* = \min \sum_{i=1}^3 [\Delta T[t_r(\mathfrak{R}_i), \Delta t_r(\mathfrak{R}_i)]]; \quad n = \overline{1, n'} \quad (3)$$

Область допустимых решений задается следующими ограничениями:

1) все работы должны завершиться до конца планового периода $\tau_{\text{зад}}$, определяемого с заданной вероятностью:

$$\sum_{i=1}^3 t_r(\mathfrak{R}_i) + \Delta t_r(\mathfrak{R}_i) \leq \tau \quad ; \quad r = \overline{1, r'}; \quad (4)$$

2) все работы должны выполняться в технологической последовательности:

$$t_r \geq \max \sum_{i=1}^3 \{\mu_{\gamma r} [t_\gamma(\mathfrak{R}_i), \Delta t_\gamma(\mathfrak{R}_i)]; \quad r, \gamma = \overline{1, r'}\};$$

3) сумма ресурсов m -го типа по всем работам проекта не должна превышать заданного значения P_n^{3AD} :

$$\sum_{r=1}^{r'} \sum_{i=1}^3 \rho_m [t_r(\mathfrak{R}_i), \Delta t_r(\mathfrak{R}_i)] \leq P_n^{3AD}; \quad n = \overline{1, n'} \quad (6)$$

Приведенная модель (1)-(6) относится к классу задач математического программирования со многими критериями.

Имея набор работ по предупреждения ЧПС на МАД, можно решать задачу распределения ресурсов по проекту предупреждения ЧПС на МАД.

Выводы. Таким образом, внедрение проектного управления в практику управления проектами предупреждения ЧПС на МАД позволит значительно сэкономить бюджеты реализуемых проектов, сократить время их исполнения, повысить качество выполненных работ по проекту. Одной из важнейших составляющих успешного управления проектами предупреждения ЧПС является способность выявлять, оценивать риски и управлять ими. В работе проведен анализ рисков, которые возможны при управлении проектами предупреждения ЧПС на МАД.

Разработана математическая модель планирования работ по проекту предупреждения ЧПС на МАД с учетом рисков, которая относится к классу задач математического программирования со многими критериями.

В дальнейшем планируется разработать математическую модель распределения ресурсов по проекту предупреждения ЧПС на МАД с учетом рисков.

Список литературы:

1. Хрутьба, В. О. Результати екологічної та соціальної оцінки проекту реконструкції дороги [Текст] / В. О. Хрутьба, Г. О. Вайган, В. І. Зюзюн // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – №4/10 (76). – С. 26–34. doi: 10.15587/1729-4061.2015.47887

2. Екологічні вимоги до автомобільних доріг. Проектування. ГБН В.2.3-218-007:2012 [Текст]. – Державне агентство автомобільних доріг України (Укравтодор), 2012. – 47 с.
 3. Новації в фінансуванні дорожнього господарства України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.ukravtdor.gov.ua/novini/c_novatsii-v-finansuvanni-dorozhnogo-gospodarstva-ukraini.html
 4. *Нефёдов, Л. И.* Модели и методы управления чрезвычайными природными ситуациями на магистральных автомобильных дорогах [Текст] / *Л. И. Нефёдов, Н. Ю. Филь, Ю. Л. Губин, Е. М. Мельниченко* // Харьков : ХНАДУ, 2011. – 136 с.
 5. *Krasnoff, A.* Green Project Management: Supporting ISO 14000 Standards Through Project Management Processes [Electronic resource] / *A. Krasnoff, T. Mochal* // The Green Economy Post. – Available at: <http://greeneconomypost.com/green-project-management-greenpm-iso-14000-11040.htm> – Title from the screen
 6. *McKinlay, M.* Where is Project Management running to...? (International Project Management Association, 22nd World Congress, Rome, 2008) [Electronic resource] / *M. McKinlay* // The official website of the 22nd IPMA World Congress – Rome (Italy), 2008. – Available at: <http://www.ipmaroma2008.it> – Title from the screen
 7. *Jones, J. A.* Project Management: Getting the Job Done [Electronic resource] / *J. A. Jones*. – Available at: <http://www.sustainabilityprofessionals.org/project-management-getting-job-done>.
 8. *Silvius, G.* Sustainability in Project Management [Text] / *G. Silvius, R. Schipper, J. Planko, J. van den Brink, A. Kohler* // Gower, 2012. – 182 p.
 9. *Тесля, Ю. М.* Розробка концептуальних основ матричного управління портфелями проектів і програм [Текст] / *Ю. М. Тесля, Т. В. Латшєва* // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – No1/3 (79). – С. 12–18. doi: 10.15587/1729-4061.2016.61153
 10. *Бушуев, С. Д.* Керівництво з питань проектного менеджменту [Текст] / *С. Д. Бушуев*. – К.: Українська асоціація управління проектами, 1999. – 197 с.
 11. *Нефедов, Л. И.* Модели оценки проектов по предупреждению чрезвычайных природных ситуаций на магистральных автомобильных дорогах [Текст] / *Л. И. Нефедов, Н. Ю. Филь, Е. П. Бабенко, Ю. Л. Губин* // Технология приборостроения. – 2010. – No1. – С. 5–9.
- Bibliography (transliterated):**
1. *Khurutba, V., Weigang, G., Ziuziun, V.* (2015). Environmental and social assessment of road reconstruction projects. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, No4/10 (76), 26–34. doi: 10.15587/1729-4061.2015.47887
 2. *Ekolohichni vymohy do avtomobilnykh dorih* (2012). Proektuvannia. HBN V.2.3-218-007:2012. Derzhavne ahentstvo avtomobilnykh dorih Ukrainy (Ukravtdor), 47.
 3. *Novatsii v finansuvanni dorozhnogo hospodarstva Ukrainy* [Electronic resource]. Available at: http://www.ukravtdor.gov.ua/novini/c_novatsii-v-finansuvanni-dorozhnogo-gospodarstva-ukraini.html
 4. *Nefedov, L., Fil', N., Hubyn, Yu., Melnychenko, E.* (2011). Modely y metody upravleniya chrezvychainymy pryrodnyymy sytuatsiyamy na mahystralnykh avtomobylnykh dorohakh. Khar'kov: KhNADU, 136.
 5. *Krasnoff, A., Mochal, T.* Green Project Management: Supporting ISO 14000 Standards Through Project Management Processes [Electronic resource] The Green Economy Post. – Available at: <http://greeneconomypost.com/green-project-management-greenpm-iso-14000-11040.htm> – Title from the screen
 6. *McKinlay, M.* Where is Project Management running to...? (International Project Management Association, 22nd World Congress, Rome, 2008) [Electronic resource]. The official website of the 22nd IPMA World Congress – Rome (Italy), Available at: <http://www.ipmaroma2008.it> – Title from the screen.
 7. *Jones, J. A.* Project Management: Getting the Job Done [Electronic resource]. Available at: <http://www.sustainabilityprofessionals.org/project-management-getting-job-done>
 8. *Silvius, G., Schipper, R., Planko, J., van den Brink, J., Kohler, A.* (2012). Sustainability in Project Management. Gower, 182.
 9. *Teslia, I., Latysheva, T.* (2016). Development of conceptual frameworks of matrix management of project and programme portfolios. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, No1/3 (79), 12–18. doi: 10.15587/1729-4061.2016.61153
 10. *Bushuiev S.* (1999). Kerivnytstvo z pytan proektnoho menedzhmentu. Kiev: Ukrainaska asotsiatsiia upravlinnia proektamy, 197.
 11. *Nefedov, L., Fsl', N., Babenko, E., Hubyn, Yu.* (2010). Modely otsenky proektov po preduprezhdeniyu chrezvychainykh pryrodnykh situatsiy na mahystralnykh avtomobylnykh dorohakh . Tekhnolohiya pryborostroeniya, 1, 5–9.

Поступила (received) 20.03.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Управление проектами предупреждения чрезвычайными природными ситуациями на магистральных автодорогах с учетом рисков/ Н. Ю. Филь // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.111–114. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.

Управління проектами попередження надзвичайними природними ситуаціями на магістральних автошляхах з урахуванням ризиків/ Н. Ю. Филь // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.111–114. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.

Prevention project management of natural emergency situations on main roads allowing the risks/ N. Fil' //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 17 (1189).– P.111–114. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Філь Наталія Юрївна – кандидат технічних наук, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри «Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій»; вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна, 61002; e-mail: fil_nu@i.ua.

Филь Наталья Юрьевна – кандидат технических наук, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, доцент кафедры «Автоматизации и компьютерно-интегрированных технологий»; ул. Ярослава Мудрого, 25, г. Харьков, Украина, 61002, e-mail: fil_nu@i.ua.

Fil' Nataliya – candidate of technical sciences, associate professor, Kharkiv National automobile and highway University; vul. Yaroslava Mudroho, Kharkiv, Ukraine, 61002, e-mail: fil_nu@i.ua; e-mail: fil_nu@i.ua.

УДК 504.05.662

М. І. АДАМЕНКО, С. В. ГАРБУЗ

ІНФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ ВИКИДАМИ ІЗ РЕЗЕРВУАРІВ З ЗАЛИШКАМИ НАФТОПРОДУКТІВ ПІД ЧАС ЇХ ПРОВІТРЮВАННЯ

У статті розглядається несприятливий екологічний вплив на довкілля викидів із резервуарів з залишками нафтопродуктів під час їх провітрювання перед проведенням ремонтних та інших видів робіт, а також перед зміною класу нафтопродуктів. Наведено комплекс математичних розрахунків для різних видів екологічного впливу об'єктів нафтогазового комплексу на атмосферу, що надають можливість оцінити межі розповсюдження екологічної кризової ситуації у навколишньому середовищі. Передбачено заходи, що попереджають розвиток можливих аварій, пов'язаних з викидом небезпечних речовин в атмосферу, а також нещасних випадків на виробництві.

Ключові слова: екологічний ризик, атмосфера, забруднювачі повітря, двокомпонентна суміш, дифузія

В статье рассматривается неблагоприятное экологическое воздействие на окружающую среду выбросов из резервуаров с остатками нефтепродуктов во время их проветривания перед проведением ремонтных или иных работ, а также перед сменой класса нефтепродуктов. Приведен комплекс математических расчетов для различных видов экологического воздействия объектов нефтегазового комплекса на атмосферу, что дает возможность оценить пределы распространения кризисной экологической ситуации. Предусмотрены мероприятия, предупреждающие развитие возможных аварий, связанных с выбросом опасных веществ в атмосферу, также несчастных случаев на производстве.

Ключевые слова: экологический риск, атмосфера, загрязнители воздуха, двухкомпонентная смесь, диффузия

The article examines the adverse ecological impact on the environment of emissions from reservoirs of oil residues during their airing before the repairs or other works, as well as before the changing of the class of petroleum products. Was shown a complex of mathematical calculations for various types of ecological impact of objects of oil and gas complex on the atmosphere, that allows to estimate the limits of spreading the crisis environmental situation. Provides measures which prevents the development of possible accidents involving the release of hazardous substances into the atmosphere and industrial accidents. The result of this work is a devising mechanism and creation of informational model of spreading pollutions in the atmosphere with given initial and boundary conditions, which allows to predict the spreading of pollutant concentration in space and time for almost all possible situations. In addition, to reduce the duration of reservoirs cleaning and reducing the level of fire and explosion hazard process of their ventilation is also necessary to study regularities of turbulent transport of petroleum products vapor and convective mass transfer in the gas space of reservoirs in their venting.

Keywords: ecological risk, atmosphere, air pollutants, two-component mixture, diffusion

Вступ. Забруднення атмосферного повітря – одна із самих гострих екологічних проблем багатьох країн світу, отже атмосфера – середовище для розміщення газоподібних відходів виробництва. Процес самоочищення атмосфери, притаманний їй, нездатний подолати самостійно навантаження, що діяльність людей покладає на неї. Екологи б'ють на спалах. Вплив забрудненого повітря на здоров'я населення проявляється через скорочення середньої тривалості життя, збільшення кількості передчасних смертей, ріст захворюваності й негативний вплив на працездатність.

Проблемам безпеки об'єктів нафтогазового комплексу приділяється особлива увага на всіх рівнях законодавчої й виконавчої влади, при цьому одним з найактуальних питань залишається забезпечення захисту людей і територій від впливу небезпечних факторів, які можуть виникнути при надзвичайних ситуаціях на складах нафти та нафтопродуктів. Однієї із проблем, яку постійно потрібно вирішувати на об'єктах нафтогазового комплексу, є проведення безпечної передремонтної підготовки нафтових резервуарів.

Отже основна проблема полягає в мінімізації екологічно-шкідливих викидів в атмосферу із резервуарів з залишками нафтопродуктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Обговорення означеної проблеми у сучасній науковій та публіцистичній літературі ведеться достатньо широким колом як вітчизняними так і закордонними науковцями [1–9].

З проблеми органічно витікає наукова задача щодо забезпечення сталої фільтрації (очищення) викидів із резервуарів з залишками нафтопродуктів під час їх провітрювання перед ремонтними, профілактичними та іншими видами робіт або при зміні класу

нафтопродуктів, що в них зберігаються, з мінімальною кількісною складовою потрапляння шкідливих речовин в атмосферу.

Створення інформаційної моделі розповсюдження забруднення атмосфери викидами із резервуарів з залишками нафтопродуктів під час їх провітрювання. Основним фактором екологічного впливу на навколишнє середовище для аероекологічної оцінки вважають формування хмари забрудненого повітря.

У статті наведено комплекс математичних розрахунків для різних видів екологічного впливу на атмосферу об'єктів, що розглядаються, що надають можливість оцінити межі розповсюдження екологічної кризової ситуації у навколишньому середовищі.

Аналітичну модель для опису просторового розподілу концентрації небезпечних для здоров'я людини та навколишнього природного середовища речовин як у нестационарному, так й у стаціонарному випадках розвитку можливих аварій, що пов'язані з викидом небезпечних речовин, можна розробити на основі загальної теорії механіки суцільних середовищ [3–15].

Припустимо, небезпечна забруднююча речовина (пари залишків нафтопродуктів) разом з повітрям створює двокомпонентну газову систему. Концентрація речовини, що забруднює атмосферу, визначається її щільністю $\rho_z(\vec{r}, t)$ (кг/м³) в двокомпонентній системі. Сумарна щільність ρ_Σ такої двокомпонентної системи дорівнює

$$\rho_\Sigma(\vec{r}, t) = \rho_z(\vec{r}, t) + \rho_n(\vec{r}, t), \quad (1)$$

де ρ_n – щільність повітря.

Забруднення атмосфери у різних точках простору у різні моменти часу цілком задається функцією $\rho_3(\vec{r}, t)$. Наша задача отримати повну систему рівнянь, вирішуючи яку можна знайти $\rho_3(\vec{r}, t)$ при заданих початковому розподілі концентрації забруднюючої речовини $\rho_3(\vec{r}, t=0)$ та граничних умовах.

У двокомпонентному газі забруднення рухається зі швидкістю $\vec{v}_3(\vec{r}, t)$, а повітря – зі швидкістю $\vec{v}_n(\vec{r}, t)$. Поряд зі швидкостями \vec{v}_3 та \vec{v}_n введемо також конвективну (загальну) швидкість $\vec{V}_k(\vec{r}, t)$ двокомпонентного газу рівністю

$$\rho_\Sigma \vec{V}_k = \rho_3 \vec{v}_3 + \rho_n \vec{v}_n. \quad (2)$$

Якщо двокомпонентна суміш перебуває у спокої, то $\vec{V}_k = 0$. Тоді згідно з (2) маємо

$$0 = \rho_3 \vec{v}_{3,0} + \rho_n \vec{v}_{n,0}, \quad (3)$$

де $\vec{v}_{3,0}$ та $\vec{v}_{n,0}$ – відповідно швидкості руху забруднюючої речовини та повітря у двокомпонентній системі, яка у цілому перебуває у стані спокою, тому що $\vec{V}_k = 0$.

Зміна концентрацій компонент у двокомпонентній системі, яка перебуває у стані спокою, як відомо, називається дифузією. Дифузія обумовлена зустрічним рухом компонент з відповідними швидкостями $\vec{v}_{3,0}$ та $\vec{v}_{n,0}$, які не дорівнюють нулю.

Явище дифузії забруднюючої речовини визначається вектором дифузії

$$\vec{i}_3 = \rho_3 \vec{v}_{3,0}, \quad (4)$$

який, згідно з (4), дає кількість забруднювача, що переноситься дифузією в одиницю часу крізь одиницю поверхні, перпендикулярну вектору $\vec{v}_{3,0}$.

Аналогічно вектор дифузії повітря у двокомпонентному газі визначається рівністю

$$\vec{i}_n = \rho_n \vec{v}_{n,0}. \quad (5)$$

Згідно (3), (4), (5) виконується рівняння

$$\vec{i}_3 = -\vec{i}_n. \quad (6)$$

Фізичною причиною дифузії є зустрічний тепловий рух молекул забруднювача та молекул повітря з середніми швидкостями $\vec{v}_{3,0}$ та $\vec{v}_{n,0}$.

Виділимо у швидкостях руху забруднювача \vec{v}_3 та повітря \vec{v}_n конвективну швидкість руху двокомпонентного газу \vec{V}_k та швидкості дифузійного руху рівностями

$$\vec{v}_3 = \vec{V}_k + \vec{v}_{3,0}, \quad (7)$$

$$\vec{v}_n = \vec{V}_k + \vec{v}_{n,0}. \quad (8)$$

Відзначимо, що при цьому визначенні підстановка (7) та (8) у праву частину рівності (2) з урахуванням (1) дає ліву частину рівності (2).

Перейдемо до отримання повної системи рівнянь, яка описує зміну концентрації забруднювача у просторі та часі. Почнемо з закону збереження маси забруднювача. З цією метою розглянемо деякий замкнений об'єм V , який обмежує замкнена поверхня f . Маса забруднювача в об'ємі V , очевидно, дорівнює

$$M_3 = \int_V \rho_3(\vec{r}, t) d^3r. \quad (9)$$

Зміна маси забруднювача у замкненому об'ємі V в одиницю часу t дорівнює

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho_3 d^3r = - \oint_f \rho_3 \vec{v}_3 d\vec{f} + \int_V Q_3 d^3r. \quad (10)$$

Тут перший інтеграл по замкненій поверхні f у правій частині рівняння (10) дає зміну маси забруднювача в об'ємі V в одиницю часу за рахунок його руху крізь замкнену поверхню f . Другий інтеграл у правій частині рівняння (10) дає зміну маси забруднювача в об'ємі V в одиницю часу за рахунок наявності у ньому джерел та викидів забруднювача, що задаються функцією Q_3 .

Джерела зв'язані з зовнішніми викидами забруднювача в атмосферу та можуть бути описані функцією $Q_{\text{дж}}(\vec{r}, t)$. Функція $Q_{\text{дж}}(\vec{r}, t)$ задає масу забруднювача, яку викидають джерела за одиницю часу в одиницю об'єму атмосферного повітря, який містить точку \vec{r} .

Викиди, подібно джерелам, можна описати функцією $Q_{\text{cm}}(\vec{r}, t)$. Функція

$$Q_3(\vec{r}, t) = Q_{\text{дж}}(\vec{r}, t) + Q_{\text{cm}}(\vec{r}, t). \quad (11)$$

Виходячи з теореми Остроградського-Гауса, інтеграл по поверхні, який міститься у правій частині рівняння (10), перетворюємо в інтеграл по об'єму.

Окрім цього вважаємо, що об'єм V не змінюється з часом. Це дозволяє диференціювати по часу підінтегральний вираз у лівій частині рівняння (10). Врешті-решт, отримаємо

$$\int_V \frac{\partial \rho_3}{\partial t} d^3r = - \int_V \text{div} \rho_3 \vec{v}_3 d^3r + \int_V Q_3 d^3r. \quad (12)$$

Враховуючи, що рівність (12) виконується для будь-якого об'єму V , одержимо

$$\frac{\partial \rho_3}{\partial t} = - \text{div} \rho_3 \vec{v}_3 + Q_3. \quad (13)$$

З урахуванням рівностей (4) та (7) запишемо рів-

ність (13) у вигляді

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\operatorname{div} \rho_3 \vec{V}_\kappa - \operatorname{div} \vec{i}_3 + Q_3. \quad (14)$$

Закон збереження маси для повітря співпадає з (14) з точністю до позначення

$$\frac{\partial \rho_n}{\partial t} = -\operatorname{div} \rho_n \vec{V}_\kappa - \operatorname{div} \vec{i}_n + Q_n. \quad (15)$$

Рух двокомпонентного газу, як цілого, описується рівнянням Нав'є-Стокса

$$\rho_\Sigma \left\{ \frac{\partial \vec{V}_\kappa}{\partial t} + (\vec{V}_\kappa \nabla) \vec{V}_\kappa \right\} = -\nabla P + \eta \Delta \vec{V}_\kappa + \left(\xi + \frac{\eta}{3} \right) \nabla \operatorname{div} \vec{V}_\kappa + \vec{F}_{cm}, \quad (16)$$

де η та ξ – відповідно коефіцієнти першої та другої в'язкості, які передбачаються заданими, P – тиск у двокомпонентному газі, а \vec{F}_{cm} – стороння сила, яка передбачається заданою (сторонньою силою може бути, наприклад, сила тяжіння).

Закон збереження енергії двокомпонентного газу записується у вигляді

$$\rho_\Sigma T \left\{ \frac{\partial S}{\partial t} + (\vec{V}_\kappa \nabla) S \right\} = \sigma_{ik} \frac{\partial V_{ki}}{\partial x_k} - \operatorname{div} \vec{q} + \mu \operatorname{div} \vec{i}_3, \quad (17)$$

де T та S – відповідно температура та ентропія двокомпонентного газу.

Тензор в'язкості σ_{ik} , вектор потоку тепла \vec{q} та хімічний потенціал μ двокомпонентного газу передбачаються заданими.

Вираз для вектора дифузії \vec{i}_3 записується з простих феноменологічних міркувань. Будемо вважати, що в горизонтальній площині, яка співпадає з площиною x, y , якості атмосфери не залежать від напрямку, але відмінні у вертикальному напрямку, який співпадає з віссю z . Тоді компоненти вектору дифузії \vec{i}_3 можна записати у вигляді

$$i_{3x} = -D_{||} \rho_\Sigma \frac{\partial \rho_3}{\partial x} - K_T \frac{\partial T}{\partial x} - K_p \frac{\partial P}{\partial x}, \quad (18)$$

$$i_{3y} = -D_{||} \rho_\Sigma \frac{\partial \rho_3}{\partial y} - K_T \frac{\partial T}{\partial y} - K_p \frac{\partial P}{\partial y}, \quad (19)$$

$$i_{3z} = -D_{\perp} \rho_\Sigma \frac{\partial \rho_3}{\partial z} - \chi_T \frac{\partial T}{\partial z} - \chi_p \frac{\partial P}{\partial z}. \quad (20)$$

Перші доданки у правих частинах рівностей (18) – (20) описують дифузію, що обумовлена залежністю ρ_3 від \vec{r} , другі – термодифузію, треті – бародифузію.

Коефіцієнти $D_{||}, D_{\perp}, K_T, \chi_T, K, \chi$ передбачаються заданими. Коефіцієнти дифузії $D_{||}$ та D_{\perp} – позитивні, а коефіцієнти термодифузії K_T і χ_T та коефіцієнти бародифузії K_p і χ_p можуть бути як позитивні, так і негативні.

Аналогічно записується вектор дифузії \vec{i}_n . При цьому повинно виконуватись рівняння (6).

Система трьох скалярних рівнянь (14), (15), (17) та одного векторного рівняння (16) є повна система рівнянь відносно чотирьох функцій $\rho_3(\vec{r}, t)$, $\rho_n(\vec{r}, t)$, $P(\vec{r}, t)$, $\vec{V}_\kappa(\vec{r}, t)$.

При цьому ентропія S та температура T задаються рівняннями стану, згідно з якими $S = S(\rho_3, \rho_n, P)$ та $T = T(\rho_3, \rho_n, P)$. Рівняння стану визначаються якостями двокомпонентного газу, що розглядається, та передбачаються заданими.

При заданих початкових та граничних умовах рішення системи рівнянь (14)–(17) з урахуванням рівностей (18)–(20) дозволяє знайти концентрацію забруднювача $\rho_3(\vec{r}, t)$ у будь-якій точці простору та у будь-який момент часу. Зміна концентрації забруднювача в просторі та в часі згідно з системою рівнянь (14)–(17) та рівностей (18)–(20) визначається конвективним переносом забруднювача зі швидкістю \vec{V}_κ , а також дифузією, термодифузією та бародифузією.

Загальне рішення такої задачі у теперішній час отримати неможливо. Розвиток сучасних комп'ютерних технологій дозволяє для кожного конкретного випадку одержати чисельне рішення для функції $\rho_3(\vec{r}, t)$. Між тим безумовні переваги мають аналітичні рішення задачі про розповсюдження забруднення, які можна отримати в умовах наявності низки припущень, що суттєво спрощують рівняння (14)–(20).

Аналітичні рішення не тільки дають точне рішення задачі при зробленій низці припущень. Крім того, вони дозволяють якісно описати розповсюдження забруднень у досить загальних випадках навіть тоді, коли зроблені припущення не реалізуються. Нижче наводиться низка таких аналітичних рішень.

Перше рішення випливає з рівностей (18)–(20), які дозволяють запропонувати термодифузійний спосіб розподілу забруднень. Нехай у початковий момент часу $t = 0$ у якійсь області простору концентрація забруднювача буде однакою у всіх точках простору, тобто ρ_3 не залежить від координати \vec{r} . Крім того, двокомпонентний газ покоїться, тобто $\vec{V}_\kappa = 0$.

При цьому виникають задачі або зібрати забруднювач в якійсь області простору, де він буде утилізований, або очистити деяку область простору від забруднювача. Рішення цих задач випливає з рівностей (18)–(20).

Задля спрощення будемо вважати, що $D_{||} = D_{\perp}$, $K_T = \chi_T$ та тиск двокомпонентного газу постійний у всіх точках простору, який розглядається. Тоді з рівностей (18)–(20) випливає, що

$$\vec{i}_3 = D_{||} \rho_{\Sigma} \nabla \frac{\rho_3}{\rho_{\Sigma}} - K_T \nabla T. \quad (21)$$

Якщо у якійсь області $\rho_3(t=0) = const$, то перший доданок у правій частині рівності (21) дорівнює нулю. Помістимо у просторі тверде тіло, яке нагріто до деякої температури, що перевищує температуру навколишнього двокомпонентного газу. Тоді у просторі виникне градієнт температури, який згідно з (21), приведе до руху забруднювача у просторі. Якщо температуру твердого тіла підтримувати постійною, то після деякого часу настане стаціонарний стан, при якому \vec{i}_3 обернеться на нуль.

Згідно з (21) стаціонарний стан при заданому градієнті температури можливий тільки за умови, що є градієнт забруднювача. При цьому розподіл концентрації забруднювача $\rho_3(\vec{r})$, що виникає у просторі, впливає з (21), в якому слід \vec{i}_3 покласти рівним нулю. Врешті-решт, маємо

$$D_{||} \rho_{\Sigma} \nabla \frac{\rho_3}{\rho_{\Sigma}} = -K_T \nabla T. \quad (22)$$

Якщо забруднювач такий, що $K_T > 0$, то область навкруги нагрітого твердого тіла очиститься від забруднювача. Якщо $K_T < 0$, то забруднювач буде сконцентрований навкруги нагрітого твердого тіла, де можна його дезактивувати. При дезактивації рівність (22) буде порушуватися. У цих умовах нові порції забруднювача будуть підходити до нагрітого твердого тіла, поблизу якого можливо продовжувати його утилізацію.

Для термодифузійного розподілу забруднювача можливо також використати охоложене тверде тіло, або якусь область простору, в якій температура нижче, ніж температура навколишнього двокомпонентного газу. У цьому випадку, коли $K_T > 0$, забруднювач збереться навколо охолодженої області простору, а при $K_T < 0$, охолоджена область очиститься від забруднювача.

Потрібно, безумовно, враховувати, що градієнт температури може привести до конвективного руху двокомпонентного газу зі швидкістю \vec{V}_k . Наявність конвективного руху можливо врахувати, але це вже інша задача.

Розглянемо рішення інших задач, виходячи з рівняння (14). На жаль, у загальному випадку рівняння (14) не можна вирішувати окремо від решти рівнянь повної системи, тому що поруч з ρ_3 воно містить також швидкість \vec{V}_k , повну щільність ρ_{Σ} , тиск P та температуру T .

Між тим, якщо зробити низку припущень, які спрощують задачу, то рівняння (14) можна вирішувати, не враховуючи решту рівнянь повної системи. Перелічимо ці припущення:

1. Будемо вважати, що внесок термодифузії та бародифузії у зміну концентрації забруднювача $\rho_3(\vec{r}, t)$ малий. Таке припущення виправдане, якщо

температура та тиск постійні або досить слабо змінюються у просторі. Таке припущення виправдане також у випадку, коли K_T, χ_T та K_P, χ_P є малими. У цих випадках другий та третій доданки у правій частині рівності (18)–(20) будуть відсутні.

2. Не будемо враховувати залежність від координати \vec{r} сумарної щільності ρ_{Σ} .

Перше та друге припущення дозволяють записати рівності (18)–(20) у вигляді:

$$i_{xx} = -D_{||} \frac{\partial \rho_3}{\partial x}; i_{yy} = -D_{||} \frac{\partial \rho_3}{\partial y}; i_{zz} = -D_{\perp} \frac{\partial \rho_3}{\partial z}. \quad (23)$$

3. Швидкість конвективного руху \vec{V}_k , що міститься в (14), будемо вважати відомою. Це може бути, зокрема, швидкість вітру, що вимірюється незалежно.

Якщо підставити (23) у (14) та врахувати (11), то одержимо відносно шуканої концентрації забруднювача $\rho_3(\vec{r}, t)$ рівняння

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho_3}{\partial t} + \rho_3 \operatorname{div} \vec{V}_k + \vec{V}_k \nabla \rho_3 - \\ & - \frac{\partial}{\partial x} D_{||} \frac{\partial \rho_3}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} D_{||} \frac{\partial \rho_3}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} D_{\perp} \frac{\partial \rho_3}{\partial z} = \end{aligned} \quad (24)$$

$$= Q_{cm}(\vec{r}, t) + Q_{ож}(\vec{r}, t).$$

При отриманні рівняння (24) ми врахували, що

$$\operatorname{div} \rho_3 \vec{V}_k = \rho_3 \operatorname{div} \vec{V}_k + \vec{V}_k \nabla \rho_3, \quad (25)$$

щоб виділити внесок залежності швидкості \vec{V}_k від \vec{r} у зміну функції $\rho_3(\vec{r}, t)$. Цей внесок дає другий доданок у лівій частині рівняння (24).

Виходячи з рівняння (24), вирішимо низку задач, які реалізуються в практиці.

Розглянемо випадок, коли вітер відсутній, тобто $\vec{V}_k = 0$. Відсутні також джерела забруднення, тобто $Q_{ож} = 0$. Будемо вважати, що коефіцієнти вертикальної та горизонтальної дифузії рівні, тобто $D_{||} = D_{\perp}$ та не залежать від координати. Будемо вважати також, що викиди забруднювача лінійно залежать від концентрації, тобто

$$Q_{cm} = -\sigma_{cm} \rho_3(\vec{r}, t), \quad (26)$$

де коефіцієнт пропорційності σ_{cm} передбачається постійним та позитивним.

Зроблені припущення дозволяють записати рівняння (24) у вигляді

$$\frac{\partial \rho_3}{\partial t} = D_{||} \Delta \rho_3 - \sigma_{cm} \rho_3. \quad (27)$$

Рівняння (27) повинно бути доповнено початковими умовами, які задають розподіл концентрації забруднювача у початковий момент часу $t = 0$. Такий початковий розподіл задається функцією

$$\rho_3(\vec{r}, t=0) = \rho_{0_3}(\vec{r}). \quad (28)$$

Рівняння (27) слід також доповнити граничними умовами на функцію $\rho_3(\vec{r}, t)$.

Для спрощення будемо вважати, що граничні умови відсутні. Таке передбачення виправдане, якщо об'єм газу, який досліджується, знаходиться досить далеко від границь, які впливають на зміни концентрації забруднювача у часі та у просторі.

Рішення рівняння (27) з початковою умовою (28) можна отримати, якщо функцію $\rho_3(\vec{r}, t)$ подати у вигляді інтегралу Фур'є, тобто

$$\rho_3(\vec{r}, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho_k(t) e^{i\vec{K}\vec{r}} d^3 K. \quad (29)$$

Підставлення (29) у (27) дає

$$\int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{d\rho_k}{dt} + D_{\text{лк}} K^2 \rho_{cm} + \sigma_{\vec{K}} \rho \right\} e^{i\vec{K}\vec{r}} d^3 K. \quad (30)$$

З рівняння (30) випливає рівність

$$\frac{d\rho_k}{dt} + D_{\text{лк}} K^2 \rho_{cm} + \sigma_{\vec{K}} \rho = 0. \quad (31)$$

Рішення рівняння (31) запишемо у вигляді

$$\rho_k(t) = \rho_0(\vec{K}) e^{-D_{\text{лк}} K^2 t} e^{-\sigma_{cm} t}, \quad (32)$$

де $\rho_0(\vec{K})$ вже не залежить від часу, але є функція вектору \vec{K} .

Підставлення рішення (32) у (29) дає

$$\rho_3(\vec{r}, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho_0(\vec{K}) e^{-D_{\text{лк}} K^2 t} e^{-\sigma_{cm} t} e^{i\vec{K}\vec{r}} d^3 K. \quad (33)$$

Функція (33), очевидно, є рішенням рівняння (27). Треба підібрати таку функцію $\rho_0(\vec{K})$ щоб задовольнялась початкова умова (28). Для цього покладемо у (33) $t = 0$. Після чого отримуємо

$$\rho_3(\vec{r}, t=0) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho_0(\vec{K}) e^{i\vec{K}\vec{r}} d^3 K. \quad (34)$$

Згідно (28) та (34) функція $\rho_0(\vec{K})$ є функцією Фур'є – образ розподілення забруднення у початковий момент часу $t = 0$. Виходячи зі зворотного перетворення Фур'є, одержимо

$$\rho_0(\vec{K}) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \rho_{0_3}(\vec{r}') e^{-i\vec{K}\vec{r}'} d^3 r'. \quad (35)$$

Підставляючи (29) у (33), отримаємо рішення, яке задовольняє рівнянню (27) та початковій умові (28)

$$\rho_3(\vec{r}, t) = \frac{1}{(2\pi)^3} e^{-\sigma_{cm} t} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \rho_{0_3}(\vec{r}') e^{-D_{\text{лк}} K^2 t} e^{i\vec{K}(\vec{r}-\vec{r}')} d^3 K d^3 r' \quad (36)$$

Виконуючи у (36) інтегрування по \vec{K} , остаточно отримуємо

$$\rho_3(\vec{r}, t) = \frac{e^{-\sigma_{cm} t}}{8(\pi D t)^{3/2}} \int_{-\infty}^{\infty} \rho_{0_3}(\vec{r}') e^{\frac{(\vec{r}-\vec{r}')^2}{4D_{\text{лк}} t}} d^3 r'. \quad (37)$$

Результат (37) розв'язує поставлену задачу. З рішення (37) випливає, що концентрація забруднювача експоненціально зменшується. За час $t_{cm} = \frac{1}{\sigma_{cm}}$ концентрація у кожній точці зменшується в e раз.

Подальше дослідження рішення (37) зручно провести в моделі простої початкової умови, коли в початковий момент часу маса забруднення M_0 знаходиться у малому об'ємі, який міститься на початку координат. Така початкова умова апроксимується дельта-функцією з множителем M_0 , тобто

$$\rho_{0_3}(\vec{r}') = M_0 \delta(\vec{r}'). \quad (38)$$

Підставлення (38) у (37) дає

$$\rho_3(\vec{r}, t) = \frac{M_0}{8(\pi D_{\text{лк}} t)^{3/2}} e^{-\sigma_{cm} t} e^{-\frac{r^2}{4D_{\text{лк}} t}}. \quad (39)$$

Згідно з рішенням (39) в певний фіксований момент часу t характерна область, в якій буде помітна кількість забруднювача, що лишився, визначається розміром L_3 , при якому показник другої експоненти порядку одиниці, тобто

$$\frac{L_3^2}{4D_{\text{лк}} t} \approx 1 \text{ або } L_3 \approx 2\sqrt{D_{\text{лк}} t}. \quad (40)$$

При цьому у всіх точках простору зменшення концентрації забруднювача за рахунок розпаду визначається множителем $e^{-\sigma_{cm} t}$.

Висновки

Рівняння (24) з заданими початковими та граничними умовами дозволяє прогнозувати розподіл концентрації забруднювача у просторі та у часі практично для всіляких можливих ситуацій. Низка рішень рівняння (24) з урахуванням деяких спрощуючих передумов наведена у відповідних публікаціях [3, 4].

Список літератури:

1. Матеріали впровадження нового механізму регулювання викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря [Текст] / за ред. С. С. Куруленка. – К.: ДЕІ Мінприроди України, 2007.

– 216 с.

2. Экология города [Текст] : Учебник. Под общ. ред. Ф. В. Стольберга – К.: Либра, 2000. – 464 с.
3. Захаренко, О. В. Підвищення безпеки життєдіяльності об'єктів хімічної промисловості шляхом моделювання заходів по локалізації надзвичайних ситуацій [Текст] / О. В. Захаренко, М. І. Адаменко, О. А. Клименко // Системи озброєння і військова техніка. – Наук. журнал. – No 2 (18). – Х.: Харків. ун-т Повітряних Сил, 2009. – С. 73–78.
4. Селіванов, С. Є. Проблеми забезпечення екологічної безпеки функціонування потенційно небезпечних об'єктів [Текст] / С. Є. Селіванов, М. І. Адаменко // Збірник наукових праць ХНУ ім. Каразіна. – Х., 2010. – С. 187–194.
5. Адаменко, М. І. Зниження масштабів екологічного впливу аварій на потенційно небезпечних об'єктів шляхом їх своєчасного виявлення [Текст] / М. І. Адаменко // Системи управління, навігації та зв'язку. – Збірник наукових праць. – Вип. 4 (16). – К.: ДП «Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління», 2010. – С. 240–243.
6. Адаменко, М. І. Дослідження меж екологічного впливу хімічно небезпечних об'єктів на навколишнє середовище [Текст] / М. І. Адаменко // Науковий вісник будівництва. – Вип. 35. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2010. – С. 6–8.
7. Адаменко, Н. І. Классификация чрезвычайных ситуаций по видам ресурсов, применяемых для их ликвидации [Текст] / Н. И. Адаменко // Науковий вісник будівництва. – Вип. 18 – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2002. – С. 11–13.
8. Берлянд, М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы [Текст] / М. Е. Берлянд. – Л.: Гидрометеоздат, 1975. – 448 с.
9. Берлянд, М. Е. Атмосферная диффузия и загрязнение воздуха [Текст] / М. Е. Берлянд. – Л.: Гидрометеоздат, 1987. – 163 с.
10. Куценогий, К. П. Рассеяние аэрозолей в приземном слое атмосферы [Текст] / К. П. Куценогий // Прикладная механика и техническая физика. – 1970. – No 4. – С. 180–185.
11. Турбулентная диффузия в нижнем слое атмосферы [Текст] : [ред. Н. Л. Вязова] – Л.: Гидрометеоздат, 1977. – Вып 15 (60). – 54 с.
12. Методы расчёта турбулентных течений [Текст] : [ред. В. Кульман ; пер. с англ.], 1984. – 464 с.
13. Медников, Е. П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей [Текст] / Е. П. Медников. – М.: Наука, 1980. – 176 с.
14. Хинце, И. О. Турбулентность, её механизм и теория [Текст] / И. О. Хинце. – М.: Физматгиз, 1963. – 378 с.
15. Рабинович, М. И. Регулярная и хаотическая динамика структур в течение жидкости [Текст] / М. И. Рабинович, М. М. Суцук. – УФН, 1990. – Т. 160. – Вып 1. – С. 3–64.

Bibliography (transliterated):

1. Materiali vprovadzhennya novogo mexanizmu regulyuvannya vikidiv zabrudnyuyuchix rechovin v atmosferi povitrya. za red. S. S. Kurulenska. Kiev: DEI Minprirodi Ukraini, 2007, 216.
2. Ekologiya goroda: Uchebnik. Pod obshh. red. F. V. Stolberga. Kiev: Libra, 2000, 464.
3. Zaxarenko, O. V., Adamenko, M. I., Klimenko, O. A. (2009). Pidvishchennya bezpeki zhittediyalnosti ob'ektiv khimichnoi promyslovosti shlyaxom modelyuvannya zaxodiv po lokalizatsii nadzvichajnix situacij. Sistemi ozbroennya i vijskova texnika. Nauk. zhurnal, 2 (18), Kharkov.: Kharkiv. un-t Povitryanix Sil, 73–78.
4. Selivanov, S. E., Adamenko, M. I. (2010). Problemi zabezpechennya ekologichnoi bezpeki funkcionuvannya potencijno nebezpechnix ob'ektiv. Zbirnik naukovix prac XNU im. Karazina, 187–194.
5. Adamenko, M. I. (2010). Znizhennya masshtabiv ekologichnogo vplyvu avarij na potencijno nebezpechnix ob'ektiv shlyaxom ix svoechasnogo viyavleniya. Upravlinnya, navigatsii ta zv'yazku. Zbirnik naukovix prac. Vip. 4 (16). Kiev: DP «Centralnij naukovo-doslidnij institut navigatsii i upravlinnya», 240–243.
6. Adamenko, M. I. (2010). Doslidzhennya mezh ekologichnogo vplyvu khimichno nebezpechnix ob'ektiv na navkolishnє seredovishhe. Naukovij visnik budivnictva, 35, Kharkiv: XDTUBA, XOTV ABU, 6–8.
7. Adamenko, N. I. (2002). Klassifikaciya chrezvyčajnyx situacij po vidam resursov, primenyayemyx dlya ix likvidatsii. Naukovij visnik budivnictva, 18, Xarkiv: XDTUBA, XOTV ABU, 11–13.
8. Berlyand, M. E. (1975). Sovremennye problemy atmosfernoj diffuzii i zagryazneniya atmosfery. Lvov: Gidrometeoizdat, 448.
9. Berlyand, M. E. (1987). Atmosfernaya diffuziya i zagryaznenie vozduxa. Lvov: Gidrometeoizdat, 163.
10. Kucenogij, K. P. (1970). Rasseyaniye aerezolej v prizemnom sloe atmosfery. Prikladnaya mexanika i texnicheskaya fizika, 4, 180–185.
11. Turbulentnaya diffuziya v nizhnem sloe atmosfery: [red. N. L. Vyzova]; Gidrometeoizdat, 1977, 15 (60), 54.
12. Metody raschyota turbulentyx techenij: [red. V. Kulman ; per. s angl.], 1984, 464.
13. Mednikov, E. P. (1980). Turbulentnyj perenos i osazhdenie aerezolej. Moscow: Nauka, 176.
14. Xince, I. O. (1963) Turbulentnost, eyo mexanizm i teoriya. Moscow Fizmatgiz, 378.
15. Rabinovich, M. I., Sushhik, M. M. (1990). Reguljarnaya i haoticheskaya dinamika struktur v techenie zhidkosti. UFN, 160, 1, 3–64.

Надійшла (received) 10.03.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Інформаційна модель розповсюдження забруднення атмосфери викидами із резервуарів з залишками нафтопродуктів під час їх провітрювання/ М. І. Адаменко, С. В. Гарбуз// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.115–121. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2079-5459.

Информационная модель распространения загрязнения атмосферы выбросами из резервуаров с остатками нефтепродуктов во время их проветривания / Н. И. Адаменко, С. В. Гарбуз// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.115–121. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2079-5459.

Informational model of spreading atmospheric pollution of emissions from reservoirs of oil residues during their airing/ M. Adamenko, S. Garbuz// Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 17 (1189). – P.115–121. – Bibliogr.: 15. – ISSN 2079-5459.

Адаменко Микола Ігоревич – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, завідувач кафедри «Охорона праці та безпека життєдіяльності»; пл. Свободи, 4, м. Харків, Україна, 61022; тел. 066-196-97-48; e-mail: nikolajadamenko@mail.ru

Адаменко Николай Игоревич – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, заведующий кафедры «Охрана труда и безопасность жизнедеятельности»; пл. Свободы, 4, г. Харьков, Украина, 61022; тел. 066-196-97-48; e-mail: nikolajadamenko@mail.ru

Adamenko Mikolay – doctor of technical Sciences, Professor, Kharkiv national University named after V.N. Karazin; head of Department "Labour Protection and Safety"; Freedom Square, 4, Kharkiv, Ukraine, 61022; tel. 066-196-97-48; e-mail: nikolajadamenko@mail.ru

Гарбуз Сергій Вікторович – Національний університет цивільного захисту України, викладач кафедри «Пожежна та техногенна безпека об'єктів і технологій»; вул. Чернышевська, 94, м. Харків, Україна, 61023; тел. 095-464-54-91; e-mail: garbuz_88@inbox.ru

Гарбуз Сергей Викторович - Национальный университет гражданской защиты Украины, преподаватель кафедры «Пожарная и техногенная безопасность объектов и технологий»; ул. Чернышевская, 94, г. Харьков, Украина, 61023; тел. 095-464-54-91; e-mail: garbuz_88@inbox.ru

Garbuz Sergii – National University of civil protection of Ukraine, lecturer of the Department of Fire and technogenic safety of facilities and technologies; st. Chernyshevskaya, 94, m. Kharkiv, Ukraine, 61023; tel. 095-464-54-91; e-mail: garbuz_88@inbox.ru

КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ТА КОМП'ЮТЕРНИЙ ДИЗАЙН

УДК 681.3.06

Н. С. АЩЕПКОВА, В. О. БОГДАНОВ

ПОСЛІДОВНИЙ АНАЛІЗ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ

Представлено результати експериментального дослідження системи керування якістю продукції зі спіненого полістиролу. Визначено статистичні параметри вибірки для прийняття рішення про відповідність партії виробів стандартам якості. Представлено результати чисельного рішення задачі послідовного аналізу якості продукції з використанням Mathcad. Застосування розробленого програмного забезпечення дозволяє по початкових даних здійснити перевірку гіпотез, визначити мінімальний обсяг партії перевіряємих виробів, визначити сумарну кількість дефектних виробів, оперативну характеристику $L(p)$ та функцію середнього числа спостережень за критерієм $E(p)$.

Ключові слова: вибірка, гіпотеза, імовірність, ухвалення рішення, критична область, допустимий ризик, метод послідовного аналізу.

Представлены результаты экспериментального исследования системы управления качеством продукции из вспененного полистирола. Определены статистические параметры выборки для принятия решения о соответствии партии изделий стандартам качества. Представлены результаты численного решения задачи последовательного анализа качества продукции с использованием Mathcad. Применение разработанного программного обеспечения позволяет по начальным данным провести проверку гипотез, установить минимальный объем партии проверяемых изделий, определить суммарное число дефектных изделий, оперативную характеристику $L(p)$ и функцию среднего числа наблюдений по критерию $E(p)$.

Ключевые слова: выборка, гипотеза, вероятность, принятие решения, критическая область, допустимый риск, метод последовательного анализа.

This article discusses the development of quality control system for foamed polystyrene products. An important factor is the significant quality dependence of the finished product on careful implementation of all requirements of the technology, because even the slightest dryness of polystyrene foam can cause rejection of the entire batch of products. The aim of the article is the use of statistical methods for quality control. Statistical sampling parameters to decision-making for compliance of batch of products to quality standards are determined using tabular and graphical method of sequential analysis. To ensure product quality manufacturing process includes the quality control of raw materials; control of multicomponent system parameters "temperature-pressure" in the foam maker; time exposure control in silos and quality control of the finished product. Technical controls of product quality use selective ultrasound diagnosis and photography of end surfaces of the products. The results of the experimental research of quality control system of foam polystyrene are shown. Statistical sampling parameters to decision-making for compliance of batch of products to quality standards are defined. The results of the numerical solution of the problem of consistent product quality analysis are shown using Mathcad. Applications of developed software allows for the original data to verify the hypotheses, determine the minimum amount audited batch of products party, determine the total number of defective products, operational characteristics $L(p)$ and function of the average number of observations by criterion $E(p)$.

Keywords: sampling, hypothesis, probability, decision-making, critical region, allowable risk, method of sequential analysis.

Вступ. Пріоритетним напрямком у розвитку виробництва є механізація й автоматизація, впровадження нової техніки й сучасних методів контролю якості продукції. Комплекс цих заходів допоможе знизити витрати, підвищити продуктивність праці й, відповідно, прибуток підприємства. Розглянуто виробництво оздоблювальних матеріалів з пенополістиролу (рис. 1). Пенополістирол (пінопласт) - екологічно чистий матеріал, застосовуваний у будівництві вже

більше 40 років. Він має високу теплоізоляційну здатність, незалежно від кліматичних умов. Основними характеристиками пенополістиролу є:

- екологічність,
- температурна витривалість,
- абсолютна вологостійкість,
- довговічність,
- простота в монтажі.

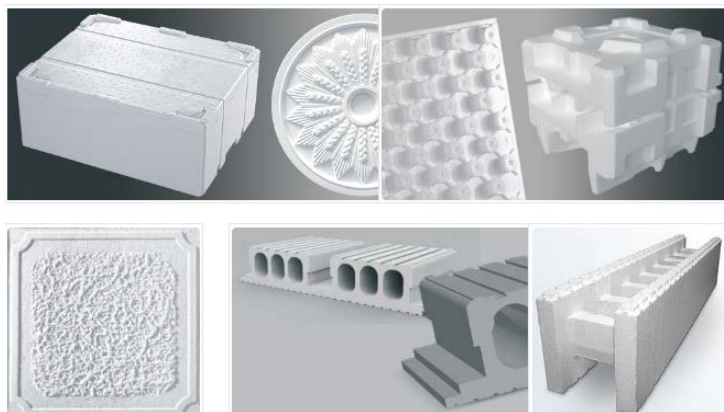


Рис. 1 – Вироби виготовлені з пенополістиролу

© Н. С. Ащепкова, В. О. Богданов. 2016

Спінений полістирол (ВПС) – це спеціальним способом спінений пластик, що містить дрібні пухирці повітря. Технологія виробництва пінопластиролу досить невибаглива, і може бути реалізована за наявності таких ресурсів:

кошти,
 трудові ресурси,
 сировина,
 пар,
 електричний струм,
 вода.

Важливим фактором є суттєва залежність якості кінцевої продукції від ретельного виконання всіх вимог технології, оскільки навіть найменше пересушування пінопластиролу може стати причиною відбракування всієї партії продукції. Тому розробка системи контролю якості продукції для даного виробництва є актуальною задачею.

Об'єкт дослідження. Для забезпечення якості виробів технологічний процес містить вхідний контроль якості сировини; керування параметрами багатозв'язної системи «температура-тиск» у вспінювачі; керування часом витримки у силосах і контроль якості готової продукції. Технічні засоби контролю якості готової продукції застосовують вибіркочну ультразвукову діагностику та фотографування торців виробів. Однак, постає задача визначити статистичні параметри вибірки для прийняття рішення про відповідність партії виробів стандартам якості.

Метод дослідження статистичних параметрів вибірки для прийняття рішення про відповідність партії виробів стандартам якості. Якість продукції будемо вважати достатньою [1, 2], якщо ймовірність відповідності якості буде становити $W \geq 0,8$. Однак з ймовірністю $\alpha < 0,02$ припустимо ухвалення рішення про те, що продукція відповідає нормам, хоча ймовірність відповідності якості $W < 0,7$. Ймовірність α - це ймовірність влучення вибірки в критичну область W обчисленої при гіпотезі H_0 . З іншого боку, з ймовірністю $\beta \leq 0,03$ також припустимо ухвалення рішення про те, що продукція не відповідає необхідній якості, хоча $W > 0,9$. Ймовірність β - це ймовірність невлучення вибірки в область W , обчисленої при гіпотезі H_1 . Таким чином, потрібно перевірити якість продукції при:

$p_0 = 1 - 0,9 = 0,1$ - верхня границя області прийняття й відхилення перевіряємої гіпотези;

$p_1 = 1 - 0,7 = 0,3$ - нижня границя області прийняття й відхилення перевіряємої гіпотези.

Потрібно побудувати оперативну характеристику $L(p)$ і функцію середнього числа випробувань $E(p)$.

Оперативна характеристика критерію $L(p)$ визначає ймовірність того, що процес закінчиться прийняттям перевіряємої гіпотези H_0 . Вона є функцією невідомого параметра розподілу випадкової величини p . Оперативна характеристика показує, наскільки правило перевірки відповідає ухваленню правильного рішення.

Функція середнього числа спостережень за критерієм $E(n)$ характеризує середнє число спостережень

n для заданого критерію й залежить тільки від параметру p .

Скористаємось методом послідовного аналізу, який є одним з методів статистичного дослідження при перевірці гіпотез [1, 4, 6, 9]. Після кожної перевірки здійснюється аналіз всіх попередніх значень контрольованого параметру виробу й приймається одне із трьох можливих рішень. Визначимо три попарно-непересічні області R_{m0} , R_{m1} і R_m безлічі всіх ймовірних вибірок (x_1, \dots, x_m) обсягом m , таких, що якщо вибірка, починаючи з $m = 1$, потрапила в область R_{m0} , то приймається гіпотеза H_0 ; якщо в область R_m - то експеримент триває й проводиться чергове випробування $(m + 1)$.

Область R_{m1} називається критичною областю W і однозначно визначається помилками двох видів. Помилка першого виду: якщо відхиляється гіпотеза H_0 , у той час як вона істинна. Помилка другого роду: якщо гіпотеза H_0 приймається, у той час як істинна конкуруюча гіпотеза H_1 .

Ймовірність помилки першого роду дорівнює α - ймовірності влучення вибірки в критичну область W при гіпотезі H_0 , а ймовірність помилки другого роду дорівнює β - ймовірності невлучення вибірки в область W при гіпотезі H_1 .

Ймовірності α і β допускають практичну інтерпретацію: при великій кількості вибірок частка помилкових значень дорівнює α , якщо вірна гіпотеза H_0 ; і дорівнює β , якщо вірна гіпотеза H_1 .

Процес послідовної перевірки характеризується [2, 3]:

допустимим ризиком, пов'язаним із прийняттям невірних рішень;

оперативною характеристикою послідовного критерію $L(p)$;

функцією середнього числа спостережень за критерієм $E(p)$;

конкретним послідовним критерієм перевірки статистичних гіпотез.

Допустимий ризик визначається вибором чотирьох характеристик [6, 9]:

помилки першого роду - α ;

помилки другого роду - β ;

верхньої границі області прийняття й відхилення перевіряємої гіпотези - p_0 ;

нижньої границі області прийняття й відхилення перевіряємої гіпотези - p_1 .

Помилки α і β , значення p_0 і p_1 вибираються на основі оцінки наслідків, до яких приводить неправильне рішення: ймовірність забракувати партію виробів має не перевищувати величини α , коли істинне значення невідомого параметра $p \leq p_0$; і ймовірність прийняти партію не перевищувала β , коли $p \geq p_1$.

Математичне формулювання даного завдання: нехай x - випадкова величина, що може приймати тільки два значення - 0 і 1; і p - невідома ймовірність того, що x приймає значення 1. Потрібно перевірити гіпотезу H_0 про те, що p не перевищує деякої заданої величини p' . Величина p означає відносне число дефектних виробів у партії. При $p \leq p'$ партія приймається, при $p > p'$ - партія не приймається.

Допустимий ризик, визначається з наступних вимог: імовірність забракувати партію не перевищує заданої величини α , коли $p \leq p_0$; і ймовірність прийняти партію не перевищує β , коли $p \geq p_1$.

Помилка в прийнятті рішення означає що партія виробів вважається якісною при $p \geq p_1$, або партія виробів забракована при $p \leq p_0$. Якщо $p_0 \leq p \leq p_1$, то може бути прийняте будь-яке рішення. Допустимий ризик, характеризується числами p_0, p_1, α і β .

У середньому метод послідовного аналізу вимагає у два рази менше випробувань, ніж класичні методи перевірки гіпотез [5, 7, 8].

Аналіз якості продукції. Для розв'язання задачі перевірки якості виробів скористаємось табличним і графічним методом з використанням Mathcad [10].

Для рішення табличним методом [1, 3]:

1. Визначаємо значення приймального $a(m)$ і бракувального $r(m)$ чисел по формулах:

$$a(m) = \frac{\ln \frac{\beta}{1-\alpha}}{\ln \frac{p_1}{p_0} - \ln \frac{1-p_1}{1-p_0}} + m \cdot \frac{\ln \frac{1-p_0}{1-p_1}}{\ln \frac{p_1}{p_0} - \ln \frac{1-p_1}{1-p_0}},$$

$$r(m) = \frac{\ln \frac{1-\beta}{\alpha}}{\ln \frac{p_1}{p_0} - \ln \frac{1-p_1}{1-p_0}} + m \cdot \frac{\ln \frac{1-p_0}{1-p_1}}{\ln \frac{p_1}{p_0} - \ln \frac{1-p_1}{1-p_0}}.$$

2. Визначаємо сумарне число дефектних виробів $d(m)$ за формулою:

$$d(m) = \sum_{i=1}^m x_i.$$

3. Визначаємо якість виробу, перевіряючи виконання нерівності

$$a(m) < d(m) < r(m):$$

- якщо $a(m) < d(m) < r(m)$ – випробування тривають;
- якщо $d(m) \geq r(m)$ – партія бракується;
- якщо $d(m) \leq a(m)$ – партія приймається.

Початкові умови: m - обсяг вибірки; $d(m) = f^x$ – фактична кількість бракованих виробів з вибірки обсягом m ; α - це ймовірність влучення вибірки в критичну область W обчисленої при гіпотезі H_0 ; β - це ймовірність невлучення вибірки в область W , обчисленої при гіпотезі H_1 . У табл. 1 наведено результати відповідних розрахунків.

Таблиця 1 – Розрахункові значення приймального $a(m)$ і бракувального $r(m)$ чисел

m	$\alpha(m)$	$d(m)$	$r(m)$	m	$\alpha(m)$	$d(m)$	$r(m)$	m	$\alpha(m)$	$d(m)$	$r(m)$
1	-2,396	0	3,062	11	-0,535	2	4,923	21	1,327	5	6,785
2	-2,21	0	3,248	12	-0,349	3	5,109	22	1,513	5	6,971
3	-2,024	1	3,434	13	-0,162	3	5,296	23	1,699	6	7,157
4	-1,838	1	3,62	14	0,024	3	5,482	24	1,885	6	7,343
5	-1,652	1	3,806	15	0,21	3	5,668	25	2,072	7	7,53
6	-1,466	1	3,992	16	0,396	3	5,854	26	2,258	7	7,716
7	-1,279	1	4,179	17	0,582	4	6,04	27	2,444	8	7,902
8	-1,093	2	4,365	18	0,768	4	3,226	28	2,63	8	8,088
9	-0,907	2	4,551	19	0,955	4	6,413	29	2,816	9	8,274
10	-0,721	2	4,737	20	1,141	5	6,599	30	3,002	10	8,46

При аналізі даних таблиці видно, що на двадцять сьомому випробуванні $d(m) \geq r(m)$, отже, партія бракується.

На рис. 2 представлені вихідні дані, розрахункові формули для визначення значень приймальних $a(m)$ і

бракувальних $r(m)$ чисел і результати визначення кількості дефектних виробів $d(m)$ після кожного випробування у табличному виді.

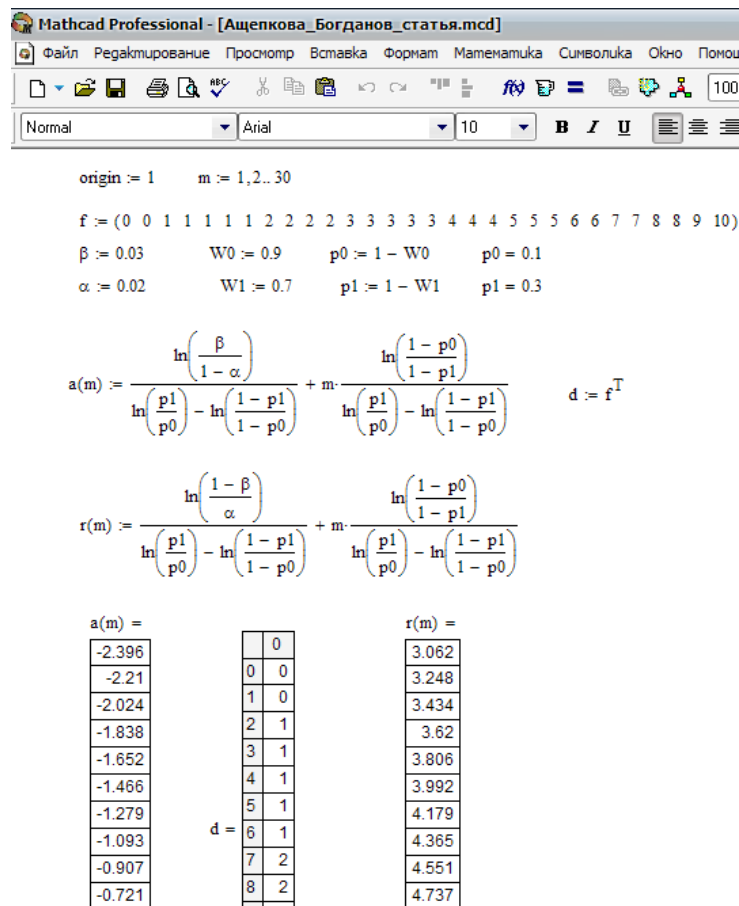


Рис. 2 – Результати рішення завдання послідовного аналізу якості виробів табличним методом за допомогою Mathcad.

Графічний метод передбачає зображення трьох областей [1, 3] у яких:

- партія бракується;
- випробування тривають;
- партія приймається.

Границями області є паралельні лінії $L0(m)$ і $L1(m)$, які називають лініями рішення (рис. 3).

Графічний метод містить наступні етапи:

1. Визначаємо кутовий коефіцієнт ліній рішення S по формулі:

$$S = \frac{\ln\left(\frac{1-p_0}{1-p_1}\right)}{\ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right) - \ln\left(\frac{1-p_1}{1-p_0}\right)},$$

$$S=0,186;$$

2. Визначаємо вільні члени ліній рішення $h0$ і $h1$ по формулах:

$$h0 = \frac{\ln\left(\frac{\beta}{1-\alpha}\right)}{\ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right) - \ln\left(\frac{1-p_1}{1-p_0}\right)},$$

$$h0=-2,583;$$

$$h1 = \frac{\ln\left(\frac{1-\beta}{\alpha}\right)}{\ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right) - \ln\left(\frac{1-p_1}{1-p_0}\right)},$$

$$h1=2,875;$$

3. Визначаємо рівняння ліній рішення $L0(m)$ і $L1(m)$:

$$L0(m) = h0 + S \cdot m = -2,583 + 0,186 \cdot m;$$

$$L1(m) = h1 + S \cdot m = 2,875 + 0,186 \cdot m.$$

і зображуємо їх на графіку (рис. 3).

4. Визначаємо сумарну кількість дефектних виробів $d(m)$ за формулою:

$$d(m) = \sum_{i=1}^m x_i$$

і зображуємо їх на графіку (рис. 3).

5. Перевіряємо якість виробів після кожного випробування. Точка перетинання графіків $L0(m)$ і $L1(m)$ визначає сумарну кількість дефектних виробів.

На рис. 3 представлені результати рішення завдання графічним методом за допомогою Mathcad. Аналіз рис. 3 показує, що існує крапка перетинання ліній, яка описує сумарну кількість *дефектних* виробів, з верхньою лінією рішення. На 27-ому випробуванні $d(m) \geq L0(m)$, отже, партія бракується.

$$h_0 := \frac{\ln\left(\frac{\beta}{1-\alpha}\right)}{\ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right) - \ln\left(\frac{1-p_1}{1-p_0}\right)} \quad h_1 := \frac{\ln\left(\frac{1-\beta}{\alpha}\right)}{\ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right) - \ln\left(\frac{1-p_1}{1-p_0}\right)} \quad S := \frac{\ln\left(\frac{1-p_0}{1-p_1}\right)}{\ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right) - \ln\left(\frac{1-p_1}{1-p_0}\right)}$$

$$L_0(m) := h_0 + S \cdot m$$

$$L_1(m) := h_1 + S \cdot m$$

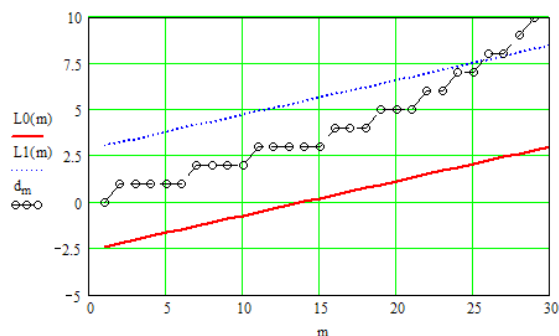


Рис. 3 – Результати рішення завдання послідовного аналізу якості виробів графічним методом за допомогою Mathcad.

Побудуємо оперативну характеристику критерію $L(p)$ по п'яти значеннях p . Згідно з умовою ці значення будуть відповідно рівні:

- для $p = 0$ $L(p) = 1$;
- для $p = p_0$ $L(p) = 1 - \alpha = 1 - 0,02 = 0,98$;
- для $p = S$ $L(p) = h_1 / (h_1 + |h_0|) = 2,875 / (2,875 + |-2,58|) = 0,527$;
- для $p = p_1$ $L(p) = \beta = 0,03$;
- для $p = 1$ $L(p) = 0$.

$$E_1 := \frac{\ln\left(\frac{\beta}{1-\alpha}\right)}{\ln\left(\frac{1-p_1}{1-p_0}\right)} \quad E_2 := \frac{(1-\alpha) \cdot \ln\left(\frac{\beta}{1-\alpha}\right) + \alpha \cdot \ln\left(\frac{1-\beta}{\alpha}\right)}{p_0 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right) + (1-p_0) \cdot \ln\left(\frac{1-p_1}{1-p_0}\right)} \quad E_3 := \frac{-\ln\left(\frac{\beta}{1-\alpha}\right) \cdot \ln\left(\frac{1-\beta}{\alpha}\right)}{\ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right) \cdot \ln\left(\frac{1-p_0}{1-p_1}\right)}$$

$$E_4 := \frac{\beta \cdot \ln\left(\frac{\beta}{1-\alpha}\right) + (1-\beta) \cdot \ln\left(\frac{1-\beta}{\alpha}\right)}{p_1 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right) + (1-p_1) \cdot \ln\left(\frac{1-p_1}{1-p_0}\right)} \quad E_5 := \frac{\ln\left(\frac{1-\beta}{\alpha}\right)}{\ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right)} \quad E := \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ E_5 \end{pmatrix}$$

$$E^T = (13.872 \quad 28.705 \quad 49.014 \quad 23.822 \quad 3.533)$$

$$p^T = (0 \quad 0.1 \quad 0.186 \quad 0.3 \quad 1)$$

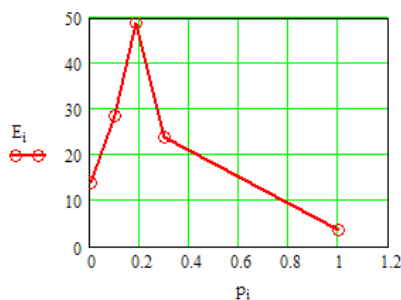


Рис. 5 – Графік функції середнього числа спостережень за критерієм $E(p)$ по п'яти значеннях p .

Висновки

Застосування розробленого програмного забезпечення дозволяє здійснити перевірку гіпотез, визначити мінімальний обсяг партії перевіряємих виробів. Застосування Mathcad дозволяє по початкових даних майже миттєво здійснити послідовний аналіз якості виробів: визначити сумарну кількість дефектних ви

На рис.4 зображений графік оперативної характеристики $L(p)$ по п'яти значеннях p .

$$LL_1 := 1 \quad LL_2 := 1 - \alpha \quad LL_3 := \frac{h_1}{(h_1 + |h_0|)} \quad LL_4 := \beta \quad LL_5 := 0$$

$$p := \begin{pmatrix} 0 \\ p_0 \\ S \\ p_1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad LL := \begin{pmatrix} LL_1 \\ LL_2 \\ LL_3 \\ LL_4 \\ LL_5 \end{pmatrix} \quad i := 0, 1, \dots, 4$$

$$p^T = (0 \quad 0.1 \quad 0.186 \quad 0.3 \quad 1) \quad LL^T = (1 \quad 0.98 \quad 0.527 \quad 0.03 \quad 0)$$

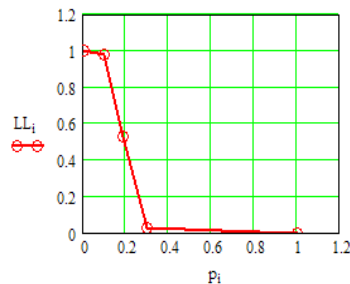


Рис. 4 – Графік оперативної характеристики $L(p)$

На рис. 5 зображений графік функції середнього числа спостережень за критерієм $E(p)$ по п'яти значеннях p .

робів, оперативну характеристику $L(p)$ та функцію середнього числа спостережень за критерієм $E(p)$.

Список літератури:

1. Абрамов, В. А. Сертификация продукции и услуг. Практическое пособие [Текст] / В. А. Абрамов. – М.: Ось – 89, 2001. – 288 с.
2. Бабаевский, Л. Е. Управление качеством: Учебник [Текст] / Л. Е. Бабаевский, В. Б. Протасьев. – М.: Инфра-М, 2001. – 212 с.

3. *Варакута, С. А.* Управление качеством продукции [Текст] / С. А. Варакута. – М.: Инфра-М, 2001. – 207 с.
 4. *Огвоздин, В. Ю.* Управление качеством. Основы теории и практики. Учебное пособие [Текст] / В. Ю. Огвоздин. – М.: Дело и сервис, 2002. – 160 с.
 5. *Окрепшилов, В. В.* Всеобщее управление качеством [Текст] / В. В. Окрепшилов. – СПб.: Изд-во СПб УЭФ, 1996. – 454 с.
 6. *Ноулер, Л.* Статистические методы контроля качества продукции [Текст] / Л. Ноулер. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 111 с.
 7. Управление качеством: Учебник для вузов [Текст] / Под ред. С. Д. Ильенковой. – М.: Банки и биржи, ЮНИТИ, 1998. – 111 с.
 8. Управление качеством продукции: Учеб. пособие [Текст] / Под ред. В. И. Гиссина. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2000. – 256 с.
 9. Статистические методы повышения качества. Пер. с англ. [Текст] / Под ред. Хитоси Куме. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 304 с.
 10. *Кудрявцев, Е. М.* Mathcad 2000 Pro [Текст] / Е. М. Кудрявцев. – М.: ДМК Пресс. – 2001. – С. 555–564.
1. Abramov, V. (2001). Sertyfykatsiya produktsyy u usluh. Prakticheskoe posobyе. Moscow: Os – 89, 288.
 2. Babaevskiy, L.; Protasev, V. (2001) Upravlenye kachestvom: Uchebnyk Moscow: Ynfra–M, 212.
 3. Varakuta, S. (2001). Upravlenye kachestvom produktsyy. Moscow: Ynfra-M, 207.
 4. Ohvozdy, V. (2002). Upravlenye kachestvom. Osnovu teoryy u praktyky. Uchebnoe posobyе. Moscow: Delo y servys, 160.
 5. Okrepylov, V. (1996). Vseobshchee upravlenye kachestvom. SPb.: Yzd-vo SPb UEF, 454.
 6. Nouler, L. (1989). Statysticheskiye metody kontrolya kachestva produktsyy. Moscow: Yzd-vo standartov, 111.
 7. Ylenkova, S. (1998). Upravlenye kachestvom: Uchebnyk dlia vuzov. Moscow: Banky y byrzhny, YuNYTY, 111.
 8. Hyssyn, V. (2000). Upravlenye kachestvom produktsyy: Ucheb. Posobyе. Rostov-na-Donu: Fenyks, 256.
 9. Kume, K. (2000). Statysticheskiye metodu povusheniya kachestva. Translation from English. Moscow: Fynansu y statystyka, 304.
 10. Kudriavtsev, E. (2001). Mathcad 2000 Pro. M.: DMK Press, 555–564.

Надійшла (received) 23. 03.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Послідовний аналіз якості продукції/ Н. С. Ащепкова, В. О. Богданов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.122–127. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Последовательный анализ качества продукции/ Н. С. Ащепкова, В. О. Богданов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.122–127. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

The consecutive analysis of production quality/ N. Ashhepkova, V. Bogdanov //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 17 (1189).– P.122–127. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ащепкова Наталья Сергеевна – кандидат технічних наук, доцент, кафедра механотроніки, Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара, пр. Гагарина, 72, г. Дніпропетровськ, Україна, 49010; e-mail: ashhepkova_natalja@rambler.ru.

Ащепкова Наталья – кандидат технічних наук, доцент, кафедра мехатроніки, Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара, пр. Гагарина, 72, м. Дніпропетровськ, Україна, 49010; електронна пошта: ashhepkova_natalja@rambler.ru.

Ashhepkova Natalja – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of mechatronics, Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, Gagarin av., 72, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, e-mail: ashhepkova_natalja@rambler.ru.

Богданов Вячеслав Александрович – студент, кафедра механотроніки, Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара, пр. Гагарина, 72, м. Дніпропетровськ, Україна, 49010

Богданов Вячеслав Александрович – студент, кафедра мехатроніки, Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара, пр. Гагарина, 72, м. Дніпропетровськ, Україна, 49010

Bogdanov Vyacheslav – student, Department of mechatronics, Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, Gagarin av., 72, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010

ЗМІСТ

Олійник О. О. Модуляційно-поляризаційний метод вимірювання внутрішніх механічних напружень в мікроелектронних структурах SI-AL.....	3
Лоца А. В., Чигарёв В. В. особенности изготовления лито-сварных конструкций из углеродистых сталей.....	8
Артемьев С. Р., Шапоров В. П. Анализ методов получения непрерывных волокон нитевидных кристаллов.....	14
Комир А. И. Реконструкция структуры ядерного графита методами многоточечной статистики	18
Бабак В. П., Щепетов В. В., Недайборщ С. Д. Закономерности трения и износа в вакууме детонационных покрытий Cr-Si-B, содержащих дисульфид молибдена.....	24
Высоцкая Е. В., Рак Л. И., Порван А. П., Цапенко К. В., Гаврюшина Е. А. Определение вероятности снижения адаптационных возможностей у подростков с сердечно-сосудистыми заболеваниями.....	30
Шекольян А. А. Комбинированный датчик ветра для адаптивных авторулевых систем.....	35
Дымко Е. П., Белик Н. Н., Золотарева А. В., Кияшко С. Ю., Демина А. В. Компьютерно-интегрированные технологии в литейном производстве: вопросы управления качеством отливок	41
Калашнікова Т. Ю., Цвір П. О., Приступа С. П., Полозун Р. С. Технологічні аспекти у роботі прикордонної дільничної станції в умовах підвищення рівня інформатизації.....	46
Широкопетлєва М. С., Черепанова Ю. Ю. Про підхід до проектування системи тестування знань з мови SQL.....	50
Вдовиченко В. О., Самчук Г. О. Формування математичної моделі функціонування транспортно-пересадочних вузлів міського пасажирського транспорту.....	56
Лопаткин Р. Ю., Петров С. А., Игнатенко С. Н., Иващенко В. А. Перспективы применения имитационного моделирования в задачах автоматизации и управления технологическими системами.....	61
Фарзалиев М. Г., Садирли С. М. Исследование движения толкателя в канале пространственного кулачкового механизма, составленного из упругих элементов.....	72
Левченко С. А. Электромагнитное и тепловое поля руднотермической плавильной печи.....	76
Рындяев В. И. Направления в создании трансмиссий приводов коксовых машин.....	80
Хмель И. В. Моделирование процесса дезинтеграции магнетитовых кварцитов в барабанной мельнице на основе использования метода конечных элементов.....	83
Лапичак Н. І., Івасів В. В., Небесний Р. В., Мацьків О. О., Шатан А.-Б. В. Одержання акрилатних мономерів з пропіонової кислоти і формальдегіду в присутності метанолу в газовій фазі.....	89
Урсулова В. І. Математична модель розподілу пилових викидів комбикормових заводів.....	94

Соколовська О. О., Дюкарева Г. И. Исследование профилактического влияния и безопасности разработанных видов пастильных изделий с использованием нетрадиционного сырья.....	101
Бернацький М. В. Магнітно - реагентна технологія очищення води та установка для її реалізації.....	105
Филь Н. Ю. Управление проектами предупреждения чрезвычайных природных ситуаций на магистральных автодорогах с учетом рисков.....	111
Адаменко М. І., Гарбу з С. В. Інформаційна модель розповсюдження забруднення атмосфери викидами із резервуарів з залишками нафтопродуктів під час їх провітрювання.....	115
Ащепкова Н. С., Богданов В. О. Послідовний аналіз якості продукції.....	122

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХПІ"**

Збірник наукових праць

Серія:

Механіко-технологічні системи та комплекси

№ 17(1189)

Наукові редактори: д-р техн. наук, проф. Д. О. Дьомін
д-р техн. наук, проф. О. В. Акімов
Технічний редактор В. О. Костик

Відповідальний за випуск канд. техн. наук Г. Б. Обухова

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ «ХПІ».
Кафедра ливарного виробництва.
Тел. (057) 707-68-54; e-mail: c7508990@gmail.com

Обл.-вид. №16-16

Підп. до друку 14.06.2016р. Формат 60x84/16. Надруковано на різнографі
Gestetner 6123CP. Ум.-друк. арк. 8. Облік.вид.арк. 8,75.
Наклад 100 прим. Зам. № 32-16. Ціна договірна

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію суб'єкта видавничої справи
ДК №3657 від 24.12.2009
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Друкарня "Технологічний Центр"
Свідоцтво про державну реєстрацію №1 480 120 0000 021055 від 02.04.2002
Адреса: 61145, м. Харків, вул. Шатилова дача,4, тел. (057)750-89-90