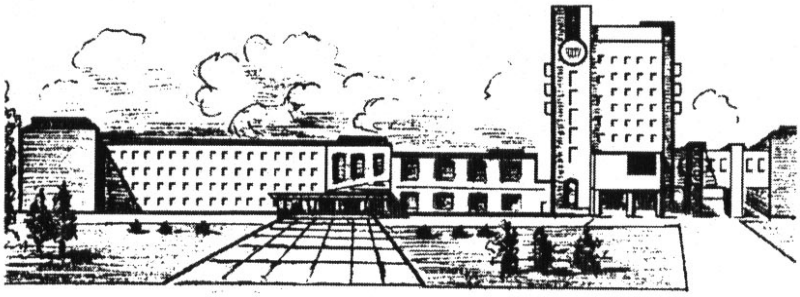
ISSN 2225-7551

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ



В І С Н И К

ЧЕРНІГІВСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

СЕРІЯ «ТЕХНІЧНІ НАУКИ»

НАУКОВИЙ ЗБІРНИК

№ 3 (59)

Чернігів 2012

УДК 62/69+004
ББК 30/35
В53

Друкується за рішенням вченої ради університету (протокол № 7 від 24.09.2012 р.). Вісник Чернігівського державного технологічного університету включено до нового переліку наукових фахових видань ВАК України, затвердженого постановою Президії ВАК України від 01.07.2010 р. № 1-05/5, бюлетень ВАК України № 7, 2010.

Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія "Технічні науки": науковий збірник / Черніг.
В53 держ. технол. ун-т. – Чернігів: Черніг. держ. технол. ун-т, 2012. – № 3 (59). – 245 с.

У цьому випуску "Вісника Чернігівського державного технологічного університету. Серія "Технічні науки" вміщено статті, присвячені теоретичним та експериментальним дослідженням у галузях технічних наук: механіки, механохімії, інтегрованих технологій машинобудування та автотранспорту, технологій зварювання, інформаційно-комп'ютерних технологій, енергетики, технологій збереження природного середовища. Статті написані науковцями, аспірантами, магістрантами та студентами і прорецензовані провідними вченими вищих технічних навчальних закладів та установ НАН України.

"Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія "Технічні науки" буде корисним для науковців різних галузей технічних наук, науково-технічних працівників, аспірантів, магістрантів та студентів вищих технічних навчальних закладів.

УДК 62/69+004
ББК 30/35

Головний редактор:
Казимир В.В., доктор технічних наук, професор, проректор з наукової роботи.
Заступник головного редактора:
Пилипенко О.І., доктор технічних наук, професор.
Члени редакційної колегії:
Болотов Г.П., доктор технічних наук, професор;
Волков І.В., доктор технічних наук, професор;
Денисов Ю.О., доктор технічних наук, професор;
Дубенець В.Г., доктор технічних наук, професор;
Дудла І.О., доктор технічних наук, доцент;
Кальченко В.І., доктор технічних наук, професор;
Кальченко В.В., доктор технічних наук, професор;
Литвинов В.В., доктор технічних наук, професор;
Сенько В.І., доктор технічних наук, професор;
Сиза О.І., доктор технічних наук, професор;
Скоробогатова В.І., доктор технічних наук, професор;
Харченко Г.К., доктор технічних наук, професор;
Чередніченко П.І., доктор технічних наук, професор.
Рецензенти:
Адасовський Б.І., доктор технічних наук;
Бурачек В.Г., доктор технічних наук;
Грузнова С.В., кандидат хімічних наук;
Єрмаков П.П., доктор економічних наук;
Єфіменко Н.А., доктор технічних наук;
Іванова І.М., доктор технічних наук;
Заболотський В.П., доктор технічних наук;
Квасніков В.П., доктор технічних наук;
Кувшинов О.В., доктор технічних наук;
Ляхов О.Л., доктор технічних наук;
Місяць В.П., доктор технічних наук;
Назаренок М.В., доктор технічних наук;
Павленко П.М., доктор технічних наук;
Рижов Р.М., доктор технічних наук;
Сахно Є.Ю., доктор технічних наук;
Середа Б.П., доктор технічних наук;
Фурман І.О., доктор технічних наук.

Заснований у 1996 році. Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 14994-3966 ПР від 27.02.2009 р.

ISSN2225-7551

© Колектив авторів, 2012
© Чернігівський державний технологічний університет, 2012

ЗМІСТ

РОЗДІЛ І. МЕХАНІКА

Ивщенко Л.И., Цыганов В.В., Фролов М.В. Структурная самоорганизация деталей трибосопряжений в условиях сложного термодинамического нагружения....5

Кузяев И.М., Анисимов В.Н. Исследование неизотермических процессов для узлов подшипников скольжения....11

Грицюк В.Ю. Рух тіла по балці....25

Савченко О.В. Задачі багатокритеріальної оптимізації елементів конструкцій з композиційних матеріалів....29

Плешко С.А., Піпа Б.Ф., Марченко А.І. Ефективність використання пружних клинів в'язальних машин....37

РОЗДІЛ ІІ. МЕХАНОХІМІЯ

Можаровский В.В., Кузьменков Д.С., Шилько С.В. Автоматизированная методика определения характеристик материалов для труб с ППУ-ОЦМ изоляцией....42

Корниенко С.П., Чередниченко П.И. Моделирование процесса охлаждения нити с учетом замасливания и трения....47

Скачков В.А., Іванов В.І., Нестеренко Т.М., Мосейко Ю.В. Низькотемпературне ущільнення пористої структури вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів у пласкому реакторі....51

Хребтань О.Б., Кучинська А.М. Дослідження якості та безпечності косметичних кремів для рук....55

РОЗДІЛ ІІІ. ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ І АВТОТРАНСПОРТУ

Петраков Ю.В., Тишкевич Ю.В. Оптимізація режиму різання при фрезеруванні кінцевою фрезою....63

Пасов Г.В. Історія становлення Луцького автомобільного заводу та його перспективи....68

Підгаєцький М.М., Щербина К.К. Утворення складної траєкторії руху зерна при хонінгуванні отворів....77

Фалалеев А.П. Влияние температуры и пластической деформации на эволюцию механических свойств двухфазных автомобильных сталей....81

Федориненко Д.Ю., Плівак О.А., Майданюк С.В. Методика дослідження параметрів точності регульованої гідростатичної втулки шпиндельного підшипника....87

Хоменко І.М., Кобринець А.К. Визначення гідродинамічних показників у спряженні циліндр-спідниця поршня двигуна внутрішнього згоряння....94

Чередніков О.М., Борисов О.О., Семеняко О.Г. Геометрія контакту деталь-індентор під час обробки поверхневим пластичним деформуванням....101

РОЗДІЛ ІV. ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ

Пентегов И.В., Сидорец В.Н., Рымар С.В., Петриенко О.И. Изменение коэффициента расплавления покрытого сварочного электрода в процессе его нагрева и плавления при дуговой сварке сталей без коротких замыканий....110

Харченко Г.К., Руденко М.М., Хоменко М.О., Фальченко Ю.В., Устінов А.І. Виникнення електричного потенціалу на поверхні металевих зразків при високотемпературному синтезі, що самопоширюється, в наношаруватих фольгах....120

Болотов М.Г. Дослідження впливу геометричних та електричних характеристик порожнистого катоду на ефективність нагріву в умовах зварювання 123

Шрон Л.Б., Богуцкий В.Б., Шрон Б.Л., Богуцкий Б.В. Исследование распределения углов и радиусов перехода шва к основному металлу в стыковых сварных соединениях 127

РОЗДІЛ V. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Литвинов В.В., Хоменко І.В. Синтез графічних завдань за допомогою параметричних моделей.....131

Зацерковний В.І. Оцінювання можливості створення регіонального інформаційно-консультаційного центру АПК 136

Игнатенко П.Л. Методы повышения точности измерения в системах автоматизации экспериментальных исследований 142

Ковтун А.А., Рогоза А.В. Природа и свойства дырочных центров в кристаллах KCl высокой чистоты 145

Козленко М.І. Якість цифрової демодуляції широкосмугових сигналів з керованою ентропією в телекомунікаційних та комп'ютерних системах 150

Маслов В.П., Кузьменко П.М., Риндич Є.В. Сучасні тенденції розвитку тримірного рендерингу 155

Нестеренко С.О. Побудова просторової лінії перетину полігональних сіток 159

Переварюха А.Ю. Нелинейные эффекты и проблемы интерпретации в моделировании управляемых биологических процессов 166

Чумак В.К., Зайцев С.В., Вервейко О.І. Математична модель системи MIMO під час дії шумових завад.....177

РОЗДІЛ VI. ЕНЕРГЕТИКА

Буйный Р.А., Дихтярук И.В., Красножон А.В. Устранение зоны нечувствительности основной защиты линий 10 кв при помощи предохранителя-разъединителя ПРВТ-10 184

Лапа М.В., Маловик К.Н. Системный анализ и классификация экспертных знаний о ресурсоспособности оборудования АЭС 190

Мищенко Н.В., Сизая О.И., Мищенко А.Н., Зенченко С.С. Автоматизация поддержания температуры и уровня электролита аккумуляторных батарей 195

Приступа А. Л. Результати експериментальних досліджень безконтактної підзарядки акумуляторів портативних побутових електричних пристроїв за допомогою теслівських процесів.....198

РОЗДІЛ VII. ТЕХНОЛОГІЇ ЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА

Шелковой А.Н., Рузметов А.Р., Свидзинская М.Е., Феденюк Д.В. Оптимизация маршрута пространственного перемещения рабочего в ходе выполнения технологической операции.....203

Денисова Н.М. Шляхи зниження забрудненості повітря робочої зони зварювальних дільниць.....208

Бальченко І.В., Казимир В.В., Клименко В.П. Сучасні методи управління станом аграрної екосистеми 213

Кряжич О.О., Захматов В.Д. Відповідність моделі ППР імпульсної вибухопожежної безпеки потребам підприємства.....220

Таірова Т.М. Системний підхід до аналізу стану безпеки праці в Україні 228

Ткаченко Т. І. Розробка методики статистичного регулювання параметрів якості виробничого процесу на харчових підприємствах.....234

ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ НАУКОВИХ СТАТЕЙ ДО "ВІСНИКА ЧЕРНІГІВСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ. СЕРІЯ "ТЕХНІЧНІ НАУКИ"..... 238

РОЗДІЛ І. МЕХАНІКА

УДК 621.891:669.018.44

Л.И. Ивщенко, д-р техн. наук
В.В. Цыганов, канд. техн. наук
М.В. Фролов, канд. техн. наук
Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье, Украина

СТРУКТУРНАЯ САМООРГАНИЗАЦИЯ ДЕТАЛЕЙ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Рассмотрена износостойкость сплавов ВТ20, ХН77ТЮР (ЭИ437Б), ХТН-61 при трении в условиях сложного динамического нагружения и отрицательных температур. Показано совместное действие динамических и температурных нагрузочных факторов на изменение структурного состояния поверхностного слоя с оказанием существенного влияния на изнашивание деталей. Отмечено образование дисперсных структур повышенной износостойкости при определенном термодинамическом воздействии с учетом особенностей физико-химических свойств материалов трибосопряжения.

***Ключевые слова**: изнашивание, образец, трехмерное нагружение, трение, поверхностный слой.*

Розглянута зносостійкість сплавів ВТ20, ХН77тюр (ЭИ437Б), ХТН-61 під час тертя в умовах складного динамічного вантаження і негативних температур. Показана спільна дія динамічних і температурних факторів навантажень на зміну структурного стану поверхневого шару з наданням суттєвого впливу на зношування деталей. Відмічено утворення дисперсних структур підвищеної зносостійкості при певній термодинамічній дії з урахуванням особливостей фізико-хімічних властивостей матеріалів трибоз'єднань.

***Ключові слова**: зношування, зразок, тривимірне вантаження, тертя, поверхневий шар.*

The wearproofness of alloys of BT20, XH77TЮP (ЭИ437Б), XTH- 61 is considered at a friction in the conditions of difficult dynamic ladening and negative temperatures. The united action of dynamic and temperature loadings factors is rotined on the change of the structural state of superficial layer with providing of substantial influence on the wear of details. Formation of dispersible structures of enhanceable wearproofness is marked at certain thermodynamics influence taking into account the features of physical and chemical properties of materials of tribojoints.

***Key words**: wear, sample, three-dimensional loading, friction, surface layer.*

Постановка задачи. В результате действия динамических нагрузок на детали и узлы машин и механизмов происходит относительное перемещение контактирующих поверхностей, которое приводит к изменению их структурного состояния поверхностного слоя и различной износостойкости. Исследование структурного состояния поверхностных слоев при трении позволяет изучать как общие закономерности изменения и разрушения при фрикционном воздействии, так и специфические процессы, связанные с особенностями материалов и условий их работы. В каждом конкретном случае такие исследования дают возможность наметить пути оптимизации исходной структуры материалов, стабилизации или улучшения их триботехнических свойств. Исследования структурных изменений при трении приобретают большое значение и в связи с развитием инженерных методик оценки износа в зависимости от внешних факторов и характеристик трущихся тел [1]. Их анализ позволяет определить механизм изнашивания, получить данные, необходимые для расчета, оценить степень изменения свойств поверхностных слоев при трении по сравнению с объемными свойствами материалов.

Таким образом, актуальной задачей динамического разрушения является исследование синергетических эффектов, обуславливающих форсированное разрушение. Однако отмеченная в работах различных авторов значительная структурная перестройка поверхностных слоев материалов трибосопряжений трудно сопоставима и не позволяет детализировать конкретные механизмы обеспечения повышенной износостойкости. Вызвано это, прежде всего, условиями проведения исследований, которые часто не соответствуют реальным условиям эксплуатации трибоузлов, что влияет на нестойкие синергетические процессы. Многие трибосопряжения работают в условиях сложного динамического нагружения, связанного с вибрациями, действующими в разных направлениях, а также с влиянием различных температур окружающей среды. Без учета все-

го комплекса факторов нагружения происходит искажение результатов исследования и создание картины процесса изнашивания мало отвечающей реальной.

В частности, влияние отрицательных температур на износостойкость трибосопряжений неоднозначно. Это является, в основном, результатом того, что не наблюдается общих закономерностей увеличения циклической прочности материалов при снижении температуры. Для одних металлов такое повышение может происходить во всем диапазоне низких температур, а для других – рост сопротивления усталостному разрушению ограничивается определенными температурными интервалами, вне которых циклическая прочность остается постоянной или имеет тенденцию к уменьшению [2]. Такое различие в изменении свойств может наблюдаться у материалов одного класса, поэтому при изучении усталости в низкотемпературных условиях рекомендуется проводить испытания каждого исследуемого материала [3].

Результаты предварительно проведенных исследований при нормальной температуре показали, что величина износа по контактной поверхности при трении зависит от характера динамической нагрузки. Сложный характер нагружения приводит к такому напряженному состоянию поверхностных слоев материала, которое инициирует повышенный износ. Как правило, повышенный износ происходит у деталей с однородным равнопрочным поверхностным слоем [4]. Изменение характера нагружения при трении приводит к изменению состояния поверхностного слоя и, как следствие, изменению износостойкости трибосопряжения. При этом сформированная в процессе трения дисперсная структура выполняет функцию диссипативной структуры в рамках синергетического подхода, которая самоорганизуется в условиях сложного динамического контактирования с получением оптимального по износостойкости состояния.

Однако величина корреляции между износостойкостью и однородностью поверхностного слоя существенно отличается и зависит не только от динамики нагружения, но и от физико-химических свойств материала, что указывает на сложность управления синергетическими процессами. Чем более износостойким в указанных условиях испытаний является материал, тем в большей степени происходит структурная самоорганизация и менее сказывается сложность динамического нагружения в контакте трибосопряжения на его износостойкость [4]. Причем для титанового сплава ВТ20 не отмечена существенная корреляция между износостойкостью и однородностью поверхностного слоя, что указывает на другой механизм изнашивания данного сплава.

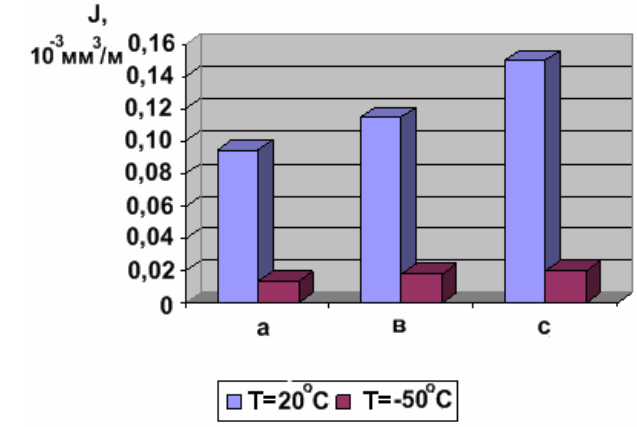
Учитывая, что многие трибосопряжения, в частности, авиационные ГТД, эксплуатируются в условиях низких климатических температур (до -60 ^{o}C), представляют интерес процессы изнашивания различных материалов при условиях, включающих наложение отрицательных температур и различных видов динамического нагружения, в том числе присутствия ударной нагрузки.

Методика исследований. Для возможности оценки изменения величины износа и раскрытия механизма формирования поверхностного слоя деталей трибосопряжений, которые эксплуатируются при сложном термомеханическом нагружении, разработаны соответствующие методики и оригинальные установки [5]. При этом имеется возможность получать и изучать функциональные зависимости фрикционно-износных характеристик материалов пары, осуществлять сравнительную оценку фрикционных пар, производить физическое моделирование процессов в реальных трибосопряжениях. В результате, используя современные методы исследования [6], можно определить связь износостойкости поверхностей трения при конкретных термодинамических режимах и структурного состояния поверхностного слоя.

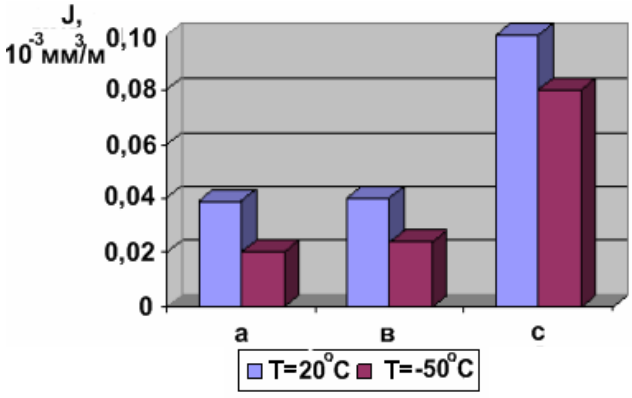
В данной работе представлены результаты исследований износостойкости образцов из сплавов ВТ20, ХН77ТЮР (ЭИ437Б), ХТН-61 в условиях трения с однонаправленным

возвратно-поступательным скольжением (одномерное нагружение), ударе с проскальзыванием (двумерное нагружение), ударе с проскальзыванием в двух взаимно перпендикулярных направлениях (трехмерное нагружение) при нормальных условиях и с охлаждением до температур -60 °С. Нормальная удельная ударная нагрузка составляла от 0 до 0,6 Н/мм^2, взаимное перемещение образцов в продольном направлении происходило с амплитудой 0,17 мм и частотой 66 Гц, в поперечном направлении – 0,05 мм и частотой 33 Гц, время испытаний – до 4 часов. Отрицательная температура при испытаниях достигалась за счет нагнетания паров жидкого азота в камеру узла задания температуры.

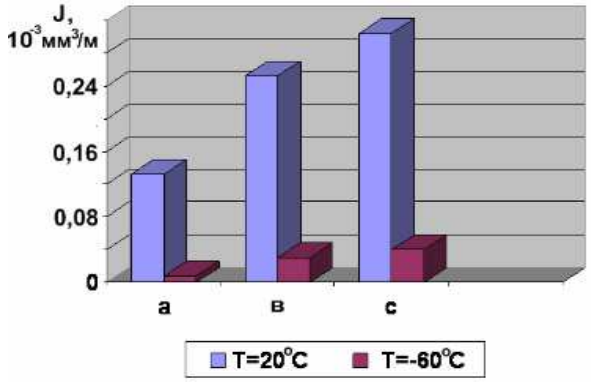
Результаты и их обсуждение. Влияние отрицательной температуры на износостойкость рассмотренных материалов при различных видах нагружения наглядно представлено на диаграммах рисунка 1.



а)



б)



в)

а – одномерное; в – двумерное; с - трехмерное

Рис. 1. Диаграммы изменения интенсивности изнашивания сплавов: а) ЭИ437Б; б) ХТН-61; в) ВТ20 при различных видах нагружения

Как следует из представленных результатов, износостойкость исследуемых материалов при рассматриваемых условиях трения и отрицательных температурах выше, чем при положительных температурах независимо от вида нагружения. Усложнение характера нагружения образцов при трении приводит к увеличению износа как при положительных, так и при отрицательных температурах. В частности сообщение образцам поперечных проскальзываний с амплитудой до 0,05 мм (трехмерное нагружение) приводит к увеличению объемной интенсивности изнашивания сплава ЭИ437Б в 1,3 раза при положительной и отрицательной температуре по сравнению с объемной интенсивностью изнашивания при двухмерном нагружении. Для сплавов ХТН-61 и ВТ20 эти изменения составляют соответственно в 2,5 раза и в 1,2 раза при положительной температуре, в 3,2 раза и в 1,3 раза – при отрицательной температуре.

При этом физико-химические свойства контактирующего материала определяют величину изменения интенсивности изнашивания. Чем более износостойким является материал, тем в меньшей степени влияет отрицательная температура на изменение интенсивности изнашивания. Так, для сплава ВТ20 (рис. 1, *в*) трение в условиях одномерного нагружения при отрицательной температуре (-60 ^{o}C) в сравнении с трением при Т = 20 ^{o}C характеризуется снижением объемной интенсивности изнашивания в 16 раз, двумерного и трехмерного нагружения – соответственно в 8,5 и 7,6 раза. Сплавы ЭИ437Б и ХТН-61 более износостойкие в рассматриваемых условиях трения независимо от вида нагружения (рис. 1, *а, б*). Снижение объемной интенсивности изнашивания этих сплавов при отрицательных температурах (-50 ^{o}C) происходит соответственно при одномерном нагружении в 6,3 и 1,95 раза, при двумерном нагружении – в 6,3 и 1,6 раза и при трехмерном нагружении – в 7,5 и 1,25 раза.

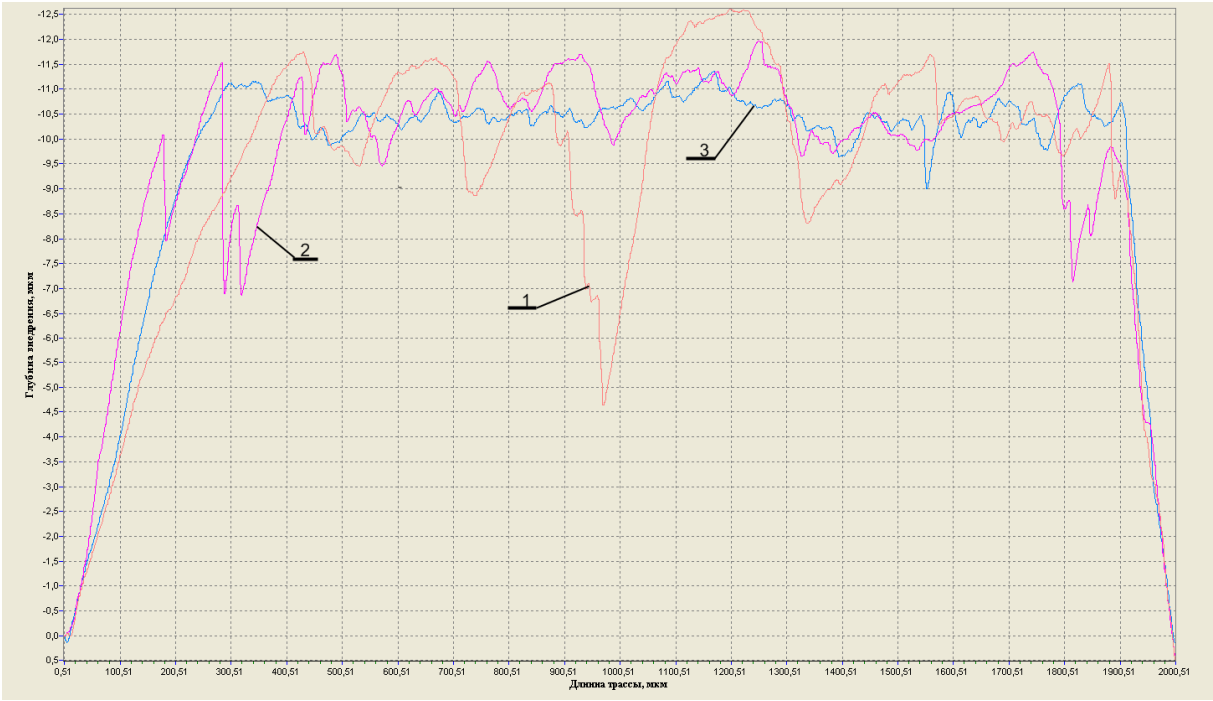
Неравномерность влияния вида динамического контактного нагружения на изменение интенсивности изнашивания исследуемых материалов при отрицательных температурах указывает на сложный характер их взаимосвязи. Для рассмотрения физико-механических процессов при низкотемпературном трении необходима оценка и анализ модификации состояния поверхностного слоя. Как указывают авторы [7; 8], характер закономерностей и количественная величина интенсивности изнашивания полностью определяются механическими свойствами материала, зависящими от его структуры, и степенью влияния на эти свойства низких температур.

Физико-механические свойства поверхностного слоя образцов определяли методом сканирования индентором на специальном приборе "Микрон-гамма". Метод сканирования базируется на непрерывной регистрации сопротивления движению индентора по поверхности (тангенциальная составляющая силы трения индентора) с заданной нагрузкой. Определение статистических связей между сопротивлениями локальных микрообъемов материала контактному деформированию позволяет произвести комплексную оценку состояния поверхностного слоя на трассе сканирования и, в частности, позволяет оценивать среднюю прочность на трассе сканирования, оценивать разброс и неоднородность прочностных свойств, моделировать элементарные акты процессов трения и износа [9].

Оценку состояния поверхностного слоя образцов на приборе "Микрон-гамма" осуществляли в работе с использованием программы для управления, сбора и обработки информации методом сканирования по методике НАУ, представленной в работе [9]. Режимы сканирования: величина нагрузки на индентор – 0,1 Н; скорость сканирования – 40 мкм/с.

Полученные результаты состояния поверхностного слоя образцов после трения с различными условиями динамического нагружения при отрицательных температурах согласуются с экспериментами по оценке соотношения механических свойств, параметров структуры и износостойкости при нормальных условиях. Наиболее наглядно это можно увидеть по изменению показателей поверхностного слоя образцов из сплава ХТН-61. Как

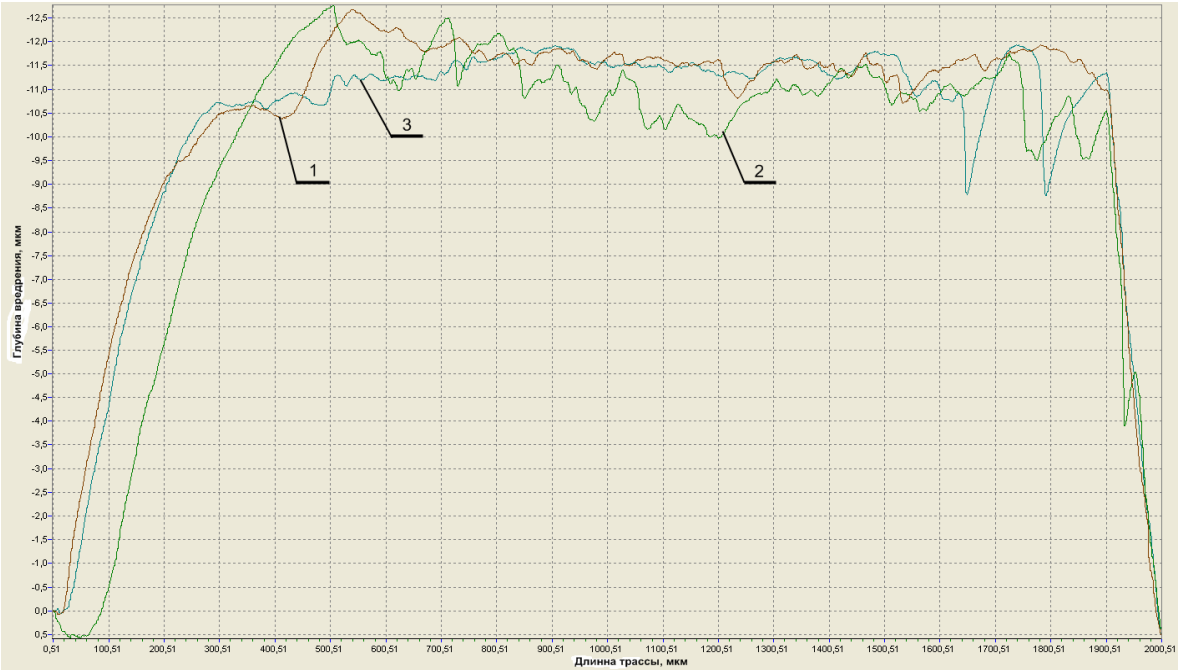
следует из анализа трибограмм силы трения, полученных при сканировании образцов из сплава ХТН-61 после испытаний с отрицательными температурами при различных видах нагружения, представленных на рисунке 2, повышение сложности нагружения в трибосопряжении сопровождается уменьшением разброса силы трения при сканировании соответствующих образцов и, как следствие, повышением износа. Наименьший износ наблюдается при одномерном нагружении с образованием наиболее неравномерного поверхностного слоя (трибограмма 1). Трехмерное нагружение, которое сопровождается наибольшей величиной износа, приводит к выравниванию прочностных и деформационных свойств, повышению однородности равнопрочности поверхностного слоя, что характеризуется уменьшением разброса силы трения при сканировании (трибограмма 3).



1 – одномерное; 2 – двумерное; 3 – трехмерное

Рис. 2. Трибограммы силы трения при сканировании образцов из сплава ХТН-61 после испытаний с отрицательными температурами при различных видах нагружения

Для сплавов ВТ20 и ЭИ437Б отличие в состоянии поверхностного слоя образцов после трения в аналогичных условиях менее существенно. В качестве примера на рисунке 3 представлены трибограммы силы трения при сканировании образцов из сплава ЭИ437Б после испытаний с отрицательными температурами при различных видах нагружения. Наиболее вероятно отсутствие существенной корреляции между износостойкостью этих сплавов и состоянием поверхностного слоя связано с особенностями механизма изнашивания сплава ВТ-20 и меньшей чувствительностью износостойкости сплава ЭИ437Б к воздействию характера динамического нагружения при отрицательных температурах в сравнении со сплавом ХТН-61. Так, для сплава ХТН-61 при отрицательных температурах объемная интенсивность изнашивания изменяется при трехмерном нагружении в сравнении с одномерным нагружением на 75 %, а для сплава ЭИ437Б – только на 25 %.



1 – одномерное; 2 – двумерное; 3 – трехмерное

Рис. 3. Трибограммы силы трения при сканировании образцов из сплава ЭИ437Б после испытаний с отрицательными температурами при различных видах нагружения

Выводы. Таким образом, проведенные исследования позволяют заключить, что совместное действие динамических и температурных нагрузочных факторов инициирует в поверхностном слое деформационные процессы, способствующие изменению структурного и напряженного состояний с оказанием существенного влияния на изнашивание деталей. Повышенный износ как при положительных, так и при отрицательных температурах, как правило, происходит у деталей с однородным равнопрочным поверхностным слоем. Образование дисперсных структур повышенной износостойкости происходит при определенном термодинамическом воздействии с учетом особенностей физико-химических свойств материалов трибосопряжения.

Сложное взаимодействие твердых тел в контактной зоне должно учитываться при построении моделей контактирования и прогнозировании поверхностной прочности материалов при динамических нагрузках и, соответственно, условия проведения испытаний должны быть как можно ближе приближены к реальным условиям эксплуатации. Определение закономерностей и разработка условий формирования износостойкого поверхностного слоя деталей трибосопряжений возможно на основе анализа величины износа и состояния поверхности с учетом реального вида нагружения (однонаправленное скольжение, удар с проскальзыванием, удар с проскальзыванием в двух взаимно перпендикулярных направлениях) и температуры окружающей среды. Это даст возможность рассмотреть физические основы пластически-деструкционных явлений в зоне контакта трибосопряжений с учетом действия продуктов изнашивания поверхности и разработать рекомендации по обеспечению износостойкого поверхностного слоя контактирующих деталей. Рассмотреный механизм формирования поверхностного слоя деталей трибосопряжений при сложном термомеханическом нагружении носит достаточно общий характер и может быть основой для целенаправленного формирования износостойкой структуры поверхности деталей узлов трения при их изготовлении в процессе финишной обработки или путем приработки в специально подобранных режимах и средах.

Список использованных источников

1. Крагельский И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

2. Веркин Б. И. Проблема долговечности металлов при низких температурах / Б. И. Веркин, И. М. Любарский, Н. М. Гринберг и др. // Космич. исслед. на Украине. – 1973. – Вып.1. – С. 14-22.

3. Прочность материалов и конструкций при криогенных температурах / В. А. Стрижало, Н. В. Филин, Б. А. Куранов и др. – К.: Наукова думка, 1988. – 240 с.

4. Ивщенко Л. И. Особенности изнашивания трибосопряжений в условиях трехмерного нагружения / Л. И. Ивщенко, В. В. Цыганов, И. М. Закиев // Трение и износ. – 2011. – Т. 32, № 1. – С. 500-509.

5. Ивщенко Л. И. Ускоренные испытания сложнонагруженных деталей трибосопряжений / Л. И. Ивщенко, В. В. Цыганов, В. И. Черный // Вісник двигунобудування. – 2009. – № 1. – С. 150-154.

6. Запорожец В. В. Выбор критериев и синтез алгоритма оценки видов изнашивания / В. В. Запорожец, В. А. Бердинских, В. В. Варюхно // Трение и износ. – 1988. – Т. 9, № 6. – С. 975-984.

7. Тарасов Г. Ф. Термическая обработка сталей как фактор повышения их износостойкости при низких температурах / Г. Ф. Тарасов, А. И. Горбуля // Вестник Сибирского гос. аэрокосм. ун-та им. академика М. Ф. Решетнева. – 2005. – № 3. – С. 253-257.

8. Костецкий Б. И. О роли вторичных структур в формировании механизмов трения, смазочного действия и изнашивания / Б. И. Костецкий // Трение и износ. – 1980. – Т.1, № 4. – С. 622-638.

9. Игнатович С. Р. Оценка поврежденности поверхностного слоя материалов при циклических нагружениях методами наноиндентирования и наносклерометрии / С. Р. Игнатович, И. М. Закиев, Д. И. Борисов // Проблемы прочности. – 2006. – № 4. – С. 132-139.

УДК 536.24:621.791.55

И.М. Кузяев, д-р техн. наук
В.Н. Анисимов, канд. техн. наук
ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», г. Днепропетровск, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ УЗЛОВ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

Рассмотрены неизотермические процессы, происходящие в процессе эксплуатации подшипников скольжения. Представлено решения для определения температурного поля и температурных напряжений в теле втулки, выполненной из полимерного материала. Решение для определения температурного поля в теле подшипника получено с использованием интегрального преобразования Лапласа. Температурные напряжения находились с учетом вязкоупругих свойств материала втулки подшипника. Разработаны программные блоки САПР для реализации полученных математических моделей с использованием математического пакета Mathcad.

Ключевые слова: подшипник, температурное поле, напряжение, преобразование Лапласа.

Розглянуто неізотермічні процеси, що відбуваються в процесі експлуатації підшипників ковзання. Представлено рішення для визначення температурного поля й температурних напружень у тілі втулки, виконаної з полімерного матеріалу. Рішення для визначення температурного поля в тілі підшипника отримано з використанням інтегрального перетворення Лапласа. Температурні напруження визначалися з урахуванням в'язкопружних властивостей матеріалу втулки підшипника. Розроблено програмні блоки САПР для реалізації отриманих математичних моделей з використанням математичного пакета Mathcad.

Ключові слова: підшипник, температурне поле, напруження, перетворення Лапласа.

Not isothermal processes occurring while in service of bearings of sliding are considered. It is presented decisions for definition of a temperature field and temperature pressure in a body of the plug executed from a polymeric material. The decision for definition of a temperature field in a bearing body is received with use of integrated transformation Laplace. Temperature pressure were taking into account viscoelastic properties of a material of the plug of the bearing. Program blocks SAPR are developed for realization of the received mathematical models with use of mathematical package Mathcad.

Key words: the bearing, a temperature field, pressure, transformation Laplace.

Постановка проблемы. В подавляющем большинстве оборудования, имеющего вращательные элементы, используются подшипники скольжения, одним из основных элементов которых являются вкладыши или втулки, выполненные из антифрикционного материала. При этом данного типа подшипники могут работать в режиме жидкостного трения или без смазки. В последнем случае втулки изготавливаются из самосмазывающихся материалов, что значительно упрощает конструкцию подшипникового узла, устраняя конструктивные элементы, связанные с подачей и отводом смазывающихся материалов.

Основные условия функционирования подшипников скольжения с самосмазывающимися материалами связаны с тем, что в процессе скольжения возникают микроабра-

зивные частицы, которые имеют способность высвобождать твердую смазку из граничного слоя скольжения, внедренную в самосмазывающийся материал. При этом создается прочная пленка твердой смазки на сопрягаемых поверхностях. В процессе износа этой пленки при скольжении, обусловленном высокой скоростью движения или сторонними частицами, возникают дополнительные энергетические условия, приводящие к возрастанию износа, что, в свою очередь, приводит к высвобождению дополнительной порции сухой твердой смазки, вызывающей восстановление смазывающей пленки. Протекание процесса по данной схеме особую ценность имеет при эксплуатации оборудования в тяжелых условиях работы, а именно, при больших уровнях нагрузок и высоких температурных полях, возникающих как под воздействием внешних температурных полей, так и за счет сил трения в зоне контакта с вращающимися и неподвижными элементами подшипника скольжения. Поэтому особое значение при проектировании подшипников скольжения имеет оптимизация температурно-силовых факторов в соответствии с геометрическими параметрами и свойствами используемых рабочих элементов.

Анализ публикаций. Для описания неизотермических процессов, возникающих в подшипниковых узлах скольжения, следует воспользоваться уравнениями баланса тепловой энергии с соответствующими граничными условиями. При этом в зависимости от геометрической конфигурации рабочих элементов выбирается и соответствующая система координат. Как правило, рабочие элементы подшипников скольжения выполнены цилиндрической формы, значит и для построения математической модели следует воспользоваться цилиндрической системой координат. При этом для описания температурного поля в цилиндрических элементах при нестационарных режимах работы, выполнив необходимые допущения, приходим к уравнениям теплопереноса в таком виде [1-4]:

$$\rho \cdot C \cdot \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} = \lambda \cdot \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r,t)}{\partial r^2} \right), \quad (1)$$

где $T(r,t)$ – функциональная зависимость температуры от радиуса r и времени t;

ρ – плотность материала втулки; C, λ – коэффициенты соответственно теплоемкости и теплопроводности.

В работе [5], базируясь на уравнении (1), разработана математическая модель, позволяющая моделировать температурные поля в подшипниковом узле скольжения. При этом в качестве расчетной схемы принята трехслойная модель, в средине которой находится втулка. Параметры втулки, входящие в уравнение (1), обозначаются индексом p. Наружным и внутренним элементами данной модели будут корпус и вал, параметры которых обозначаются соответственно индексами c и s.

С целью определения зависимости температуры от параметров, входящих в уравнение (1), в явном виде следует выбрать соответствующие граничные условия по радиусу и начальное условие по времени.

Для втулки на внутренней границе, вследствие наличия сил трения между ней и валом, следует принять температурное условие второго рода, а именно:

$$\lambda_p \cdot \frac{\partial T_p}{\partial r} = q_{gr} \text{ при } r = Rp_{in}. \quad (2)$$

В выражении (2) введены такие обозначения: Rp_{in} – внутренний радиус втулки; q_{gr} – тепловой поток на границе раздела вал-втулка, который можно представить в нескольких видах (в зависимости от наличия и конструктивного исполнения системы охлаждения вала). Если вал имеет систему для охлаждения, например, вал выполнен с центральным отверстием для подвода хладагента, то тепловой поток на границе можно записать так:

$$q_{gr} = V_s \cdot f_{gr} \cdot P_{gr} - \frac{\lambda_s}{h_s} \cdot \left[T_p(Rp_{in}, t) - T_p(Rp_{in} - h_s, t) \right], \quad (3)$$

где f_{gr} – коэффициент трения между втулкой и поверхностью вала; P_{gr} – давление, развиваемое на границе раздела вал-втулка; h_s – толщина тела вала (разность между наружным и внутренним диаметрами вала); V_s – линейная скорость наружной поверхности вала.

При записи выражения (3) и входящих в него величин пренебрегается разницей между внутренним радиусом втулки и наружным радиусом вала ($Rp_{in} = Rs_{ex}$). Кроме того, также принимается равенство между наружным диаметром втулки и внутренним диаметром вала ($Rp_{ex} = Rc_{in}$).

Аналогичным образом можно, в случае наличия охлаждения, представить граничное условие и на наружной границе втулки, а именно:

$$\lambda_p \cdot \frac{\partial T_p}{\partial r} = q_{ex} \text{ при } r = Rp_{ex}, \quad (4)$$

где

$$q_{ex} = -\frac{\lambda_c}{h_c} \cdot \left[T_p(Rp_{ex}, t) - T_p(Rp_{ex} + h_c, t) \right]. \quad (5)$$

В последние два выражения введены такие обозначения: q_{ex} – тепловой поток, который отводится от наружной границы втулки; Rp_{ex} – наружный радиус втулки; h_c – толщина тела корпуса.

Если же конструктивное исполнение подшипниковых узлов не позволяет выполнить систему охлаждения вала, то большее количество тепла, выделившееся на границе раздела вал-втулка, будет накапливаться в этой зоне. Определенная часть тепла будет отводиться через торцевые поверхности вала и радиальную поверхность вала вне зоны установки подшипника. В таком случае внутреннюю поверхность втулки можно считать теплоизолированной и граничное условие (2) перепишется так:

$$\lambda_p \cdot \frac{\partial T_p}{\partial r} = q'_{gr} \text{ при } r = Rp_{in}, \quad (2а)$$

где

$$q'_{gr} = V_s \cdot f_{gr} \cdot P_{gr} - q_{ot}. \quad (3а)$$

Величина q_{ot} представляет собой тепло, отводимое через торцевые поверхности вала и радиальную поверхность вала вне зоны установки подшипника.

Решение, как обычных дифференциальных уравнений, так и уравнений в частных производных типа (1) удобно находить с использованием операционного исчисления, основанного на интегральном преобразовании Лапласа [6-8].

Операционный метод решения задачи можно свести к следующим этапам:

– первый: от искомой функции (оригинала) $f(t)$ переходят к функции изображения $F(s)$, при этом величина t соответствует действительности переменной, а s – в общем случае может быть и комплексной переменной;

– второй: над изображением $F(s)$ выполняют операции, которые соответствуют заданным операциям над $f(t)$ и получают операторное уравнение относительно $F(s)$. При этом операции над изображением оказываются значительно более простыми, например, дифференцирование оригинала соответствует умножению изображения на переменную s, а интегрирование – деление на s и т. п.;

– третий: полученное операторное уравнение решают относительно $F(s)$, что, как правило, сводится к простым алгебраическим действиям;

– четвертый: от найденного изображения $F(s)$ переходят к оригиналу $f(t)$, который является искомой функцией.

Для перехода от оригинала к изображению в общем случае можно использовать такое выражение:

$$F(s)=\int_0^{\infty} e^{-s\cdot t}\cdot f(t)dt. \qquad (6)$$

Чтобы осуществить обратный переход (от изображения к оригиналу) опять же в общем случае можно воспользоваться таким соотношением:

$$f(t)=\frac{1}{2\cdot\pi\cdot i}\int_{a-i\infty}^{a+i\infty} e^{s\cdot t}\cdot F(s)ds, \qquad (7)$$

где i – мнимая единица.

Для упрощения прямого и обратного переходов, чтобы каждый раз не пользоваться уравнениями (6) и (7), разработано большое количество теорем. Так, для прямого перехода от оригинала к изображению основной теоремой является теорема о дифференцировании оригинала, которая для производной *n*-й степени имеет вид:

$$f^n(t)\leftrightarrow s^n\cdot F(s)-s^{n-1}\cdot f(0)-s^{n-2}\cdot f'(0)-...-f^{(n-1)}(0), \qquad (8)$$

где $f(0)$ – начальное условие для искомой величины; $f'(0)$, $f^{(n-1)}(0)$ – начальные условия для производных от искомой величины, начиная от первой и заканчивая $(n-1)$.

Кроме того, для решения уравнения (1), с учетом прямого и обратного переходов, также используют такие теоремы:

– теорему умножения (теорему Бореля):

$$F(s)\cdot G(s)\leftrightarrow\int_0^{t} f(\tau)\cdot g(t-\tau)d\tau, \qquad (9)$$

– вторую теорему разложения:

$$\frac{A(s)}{B(s)}\leftrightarrow\sum_{k=1}^{n}\frac{A(s_k)}{B'(s_k)}e^{s_k\cdot t}, \qquad (10)$$

где s_k – значения полюсов; $\leftrightarrow$ – двухсторонняя стрелка означает возможность взаимного перехода; $B'(s_k)=\frac{d}{ds}B(s)\Big|_{s=s_k}$.

Цель статьи. Получить математические модели, позволяющие моделировать неизотермические процессы в узлах подшипников скольжения. Полученные уравнения должны позволить описывать температурные поля и температурные напряжения в теле подшипника с учетом его вязкоупругих свойств.

Изложение основного материала. Используя прямое преобразование Лапласа по времени для уравнения (1) с учетом выражения (8), получаем такое операторное уравнение:

$$\left(T^L{}_{,r}\right)_{,r}+1/r\cdot T^L{}_{,r}-s/a\cdot T^L=T_n/a, \qquad (11)$$

где T^L – изображение температуры $T(r,t)$; $_{,r}$ – символ производной по координате r; T_n – начальная температура рассматриваемого элемента; a – коэффициент температуропроводности $(a=\lambda/(C\cdot\rho))$.

Уравнение (11) является одной из разновидностью уравнений Бесселя [8; 9], для данного случая его решение имеет следующий вид:

$$T^L=T_n/s+C_1\cdot J_0\left(\sqrt{s/a_1}\cdot i\cdot r\right)+C_2\cdot Y_0\left(\sqrt{s/a_1}\cdot i\cdot r\right), \qquad (12)$$

где J_0, Y_0 – функции Бесселя соответственно первого и второго рода нулевого порядка; i – мнимая единица; C_1 и C_2 – константы интегрирования.

Выполняя соответствующие преобразования с учетом приведенных зависимостей, получено решение тепловой задачи для подшипникового узла в таком виде:

$$T(r,t) = T_n - Q_{gr} - Q_{ex}, \quad (13)$$

где

$$Q_{gr} = q_{gr} \cdot \frac{2 \cdot Rp_{in}}{\lambda_p} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{C1_k(r)}{P_k^2 \cdot (2/P_k \cdot \psi 1_k - \psi 2_k)} \cdot \theta_k(t);$$

$$Q_{ex} = q_{ex} \cdot \frac{2 \cdot Rp_{in}}{\lambda_p} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{C2_k(r)}{P_k^2 \cdot (2/P_k \cdot \psi 1_k - \psi 2_k)} \cdot \theta_k(t).$$

Комплексы, входящие в последние выражения, имеют вид:

$$\psi 1_k = Y_1(P_k \cdot Rp_{ei}) \cdot J_1(P_k) - Y_1(P_k) \cdot J_1(P_k \cdot Rp_{ei}); \quad (14)$$

$$\psi 2_k = Rp_{ei} \cdot \begin{bmatrix} Y_0(P_k \cdot Rp_{ei}) \cdot J_1(P_k) - \\ -Y_1(P_k) \cdot J_0(P_k \cdot Rp_{ei}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_1(P_k \cdot Rp_{ei}) \cdot J_0(P_k) - \\ -Y_0(P_k) \cdot J_1(P_k \cdot Rp_{ei}) \end{bmatrix}; \quad (15)$$

$$C1_k(r) = J_1(P_k \cdot Rp_{ei}) \cdot Y_0(P_k \cdot Rp_{ri}) - Y_1(P_k \cdot Rp_{ei}) \cdot J_0(P_k \cdot Rp_{ri}); \quad (16)$$

$$C2_k(r) = Y_1(P_k) \cdot J_0(P_k \cdot Rp_{ri}) - J_1(P_k) \cdot Y_0(P_k \cdot Rp_{ri}); \quad (17)$$

$$\theta_k(t) = exp(-Ct_k \cdot t) + Ct_k \cdot t - 1. \quad (18)$$

В уравнения (14) – (18) входят такие обозначения (не введенные ранее): J_1, Y_1 – функции Бесселя соответственно первого и второго рода первого порядка; $Rp_{ei} = Rp_{ex}/Rp_{in}$; $Rp_{ri} = r/Rp_{in}$; $Ct_k = a_p \cdot (P_k)^2 / Rp_{in}^{\ 2}$; P_k – нули, которые определяются из выражения:

$$Y_1(Rp_{ei} \cdot P_k) \cdot J_1(P_k) - Y_1(P_k) \cdot J_1(Rp_{ei} \cdot P_k) = 0. \quad (19)$$

Определение нулей P_k по уравнению (19) для конкретных геометрических размеров подшипника приведено в программном блоке САПР-1. Графическое представление нулей изображено на рис. 1. Следует отметить, что как рисунке 1, так и все последующие рисунки, полученные в результате расчетов в программных блоках с использованием пакета Mathcad, дополнительно обрабатывались с помощью прикладного пакета Photoshop.

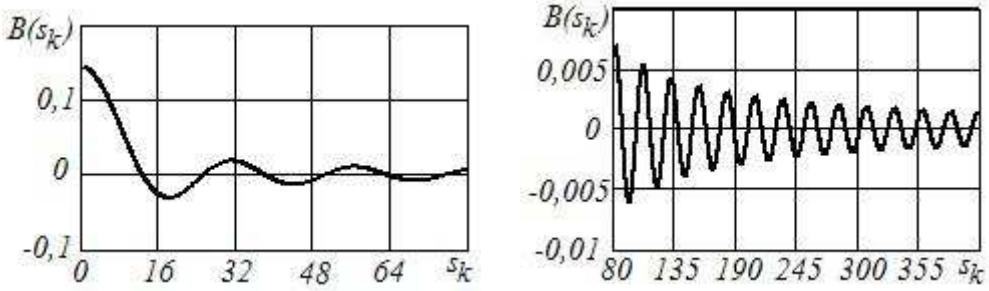
Программный блок САПР-1

Определение нулей P_k по уравнению (19)

$$Rp_{ex} := 12.5mm \quad Rp_{in} := 10mm$$

$$Rp_{ei} := \frac{Rp_{ex}}{Rp_{in}} \quad Rp_{ei} = 1.25 \quad s_k := 0,0.1..410$$

$$B(s_k) := Y1(Rp_{ei} \cdot s_k) \cdot J1(s_k) - Y1(s_k) \cdot J1(Rp_{ei} \cdot s_k)$$



а) б)

Рис. 1. Графическое определение нулей:
а – на начальном отрезке; б – на конечном отрезке

$$P_k := \left| \begin{array}{l} P1_0 \leftarrow 4 \cdot \pi \\ \text{for} \quad k \in 0..31 \\ \quad Pa \leftarrow P1_k \\ \quad P_k \leftarrow root(B(Pa), Pa) \\ \quad P1_{k+1} \leftarrow (k+2) \cdot 4 \cdot \pi \\ P \end{array} \right.$$

Начальные значения нулей

$P_k^T =$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	12.59	25,14	37,71	50,27	62,84	75,40	87,97	100,53	113,1	125,67

Чтобы решить уравнение (13) с учетом соотношений (14) – (18), при выполнении условия (19), необходимо дополнительно определить температуры на границах втулки, а именно: $Tp(Rp_{in},t)$ и $Tp(Rp_{ex},t)$. Для этого на основе выражения (13), при подстановке в него соответствующих граничных значений, можно представить такое соотношение в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} Tp(Rp_{in},t) \\ Tp(Rp_{ex},t) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 - \frac{2 \cdot Rp_{in} \cdot \lambda_s}{h_s \cdot \lambda_p} \cdot Cv_1(t), & -\frac{2 \cdot Rp_{in} \cdot \lambda_c}{h_c \cdot \lambda_p} \cdot Cv_2(t), \\ -\frac{2 \cdot Rp_{in} \cdot \lambda_s}{h_s \cdot \lambda_p} \cdot Cn_1(t), & 1 - \frac{2 \cdot Rp_{in} \cdot \lambda_c}{h_c \cdot \lambda_p} \cdot Cn_2(t), \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} TP_0 \\ TP_1 \end{bmatrix}, \tag{20}$$

где

$$TP_0 = T_n - VP \cdot Cv_1(t) - TR_e \cdot Cv_2(t) - TR_i \cdot Cv_1(t);$$

$$TP_1 = T_n - VP \cdot Cn_1(t) - TR_e \cdot Cn_2(t) - TR_i \cdot Cn_1(t);$$

$$VP = \frac{V_s \cdot f_{gr} \cdot P_{gr} \cdot 2 \cdot Rp_{in}}{\lambda_p};$$

$$TR_e = \frac{Tp(Rp_{ex},t) \cdot 2 \cdot Rp_{in} \cdot \lambda_c}{h_c \cdot \lambda_p}; \; TR_i = \frac{Tp(Rp_{in},t) \cdot 2 \cdot Rp_{in} \cdot \lambda_s}{h_s \cdot \lambda_p}$$

$$Cv_1(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{C1_k(Rp_{in}) \cdot \theta_k(t)}{P_k \cdot \psi_k}; \; Cv_2(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{C2_k(Rp_{in}) \cdot \theta_k(t)}{P_k \cdot \psi_k};$$

$$Cn_1(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{C1_k(Rp_{ex}) \cdot \theta_k(t)}{P_k \cdot \psi_k}; \; Cn_2(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{C2_k(Rp_{ex}) \cdot \theta_k(t)}{P_k \cdot \psi_k};$$

$$\psi_k = 2 / P_k \cdot \psi 1_k - \psi 2_k.$$

Прежде чем воспользоваться полученными формулами для определения температуры в подшипнике, следует иметь соответствующие зависимости коэффициента трения f_{gr} от основных параметров в зоне контакта, а именно: температуры, давления и скорости скольжения.

Для полиуретана экспериментальные значения коэффициента трения f_e от температуры T_e приведены в таблице 1 (для контактного давления P_{gr} = 0,35 МПа и скорости скольжения V = 0,4 м/с).

Таблица 1

Зависимость коэффициента трения от температуры для полиуретана

T_e, K	293	303	313	323	333	343	353	363	373	383	393	403	413
f_e	0,85	0,94	1,02	1,08	1,13	1,18	1,19	1,2	1,16	1,1	1,04	0,97	0,9

Для того чтобы воспользоваться данными, приведенными в таблице 1, для расчета температурного поля следует выполнить аппроксимацию.

Порядок выполнения аппроксимации с использованием одной из встроенных в пакет Mathcad функций приведен в программном блоке САПР-2. Графики для экспериментальных и аппроксимируемых значений коэффициента трения приведены на рисунке 2.

Программный блок САПР-2

Аппроксимация коэффициента трения

$$T_e := (293 \quad 303 \quad 313 \quad 323 \quad 333 \quad 343 \quad 353 \quad 363 \quad 373 \quad 383 \quad 393 \quad 403 \quad 413)^T$$

$$f_e := (0.85 \quad 0.94 \quad 1,02 \quad 1,08 \quad 1,13 \quad 1,18 \quad 1,19 \quad 1,2 \quad 1,16 \quad 1,1 \quad 1,04 \quad 0,97 \quad 0,9)^T$$

$$fv := pspline(T_e, f_e) \quad T := 293K, 298K..413K \quad f(T) := interp(fv, T_e, f_e, T)$$

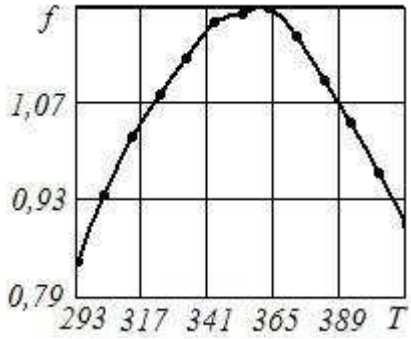


Рис. 2. Графики зависимости коэффициента трения от температуры:
• • • − график для экспериментальных значений (fe_i);
—— − график для аппроксимируемых значений ($f(T)$)

Расчет температурного поля во втулке подшипника, выполненного из полиуретана, с учетом граничных условий (2) и (3) и соотношения (20) приведен в программном блоке САПР-3. Объемный график распределения температуры, полученный из программного блока САПР-3, представлен на рисунке 3.

Программный блок САПР-3

Расчет температурного поля во втулке подшипника, исходя из условий (2) и (3) и соотношения (20)

$$h_c := 10mm \quad h_s := 2mm \quad R_{ec} := Rp_{ex} + h_c \quad R_{is} := Rp_{in} - h_s \quad T_n := 293K \quad T_{ec} := 293K \quad T_{is} := 293K$$

$$\rho_p := 1230 \cdot \frac{kg}{m^3} \quad C_p := 2.1 \cdot 10^3 \cdot \frac{J}{kg \cdot K} \quad \lambda_p := 0.305 \cdot \frac{W}{m \cdot K} \quad \lambda_c := 46.5 \cdot \frac{W}{m \cdot K} \quad \lambda_s := \lambda_c \quad im := 5$$

$$a_p := \frac{\lambda_p}{C_p \cdot \rho_p} \quad t_{max} := 578s \quad i := 0..im \quad dr := \frac{Rp_{ex} - Rp_{in}}{im} \quad r_i := Rp_{in} + dr \cdot i \quad jm := 18 \quad dt := \frac{t_{max}}{jm}$$

$$j := 0..jm \quad t_j := dt \cdot j \quad kk := 31 \quad k := 0..kk$$

$$\psi 1_k := Y1(P_k \cdot Rp_{ei}) \cdot J1(P_k) - Y1(P_k) \cdot J1(P_k \cdot Rp_{ei})$$

$$\psi 2_k := Rp_{ei} \cdot (Y0(P_k \cdot Rp_{ei}) \cdot J1(P_k) - Y1(P_k) \cdot J0(P_k \cdot Rp_{ei})) \ldots$$
$$+ Y1(P_k \cdot Rp_{ei}) \cdot J0(P_k) - Y0(P_k) \cdot J1(P_k \cdot Rp_{ei})$$

$$\psi_k := \frac{2}{P_k} \cdot \psi 1_k - \psi 2_k \quad Ct_k := \frac{a_p \cdot (P_k)^2}{Rp_{in}^2}$$

$$C1_{k,i} := \left(J1(P_k \cdot Rp_{ei}) \cdot Y0\left(P_k \cdot \frac{r_i}{Rp_{in}}\right) - Y1(P_k \cdot Rp_{ei}) \cdot J0\left(P_k \cdot P_k \cdot \frac{r_i}{Rp_{in}}\right) \right)$$

$$C2_{k,i} := \left(Y1(P_k) \cdot J0\left(P_k \cdot \frac{r_i}{Rp_{in}} \right) - J1(P_k) \cdot Y0\left(P_k \cdot \frac{r_i}{Rp_{in}} \right) \right)$$

$$\theta_{k,j} := exp(-Ct_k \cdot t_j) + Ct_k \cdot t_j - 1 \quad F1_{i,j} := \sum_k \frac{C1_{k,j} \cdot \theta_{k,j}}{(P_k)^2 \cdot \psi_k} \quad F2_{i,j} := \sum_k \frac{C2_{k,j} \cdot \theta_{k,j}}{(P_k)^2 \cdot \psi_k}$$

$$Pgr := 0.35 \cdot 10^6 \cdot Pa \quad V_s := 0.4 \frac{m}{s} \quad R\lambda_c := \frac{2 \cdot Rp_{in}}{h_c} \cdot \frac{\lambda_c}{\lambda_p} \quad R\lambda_s := \frac{2 \cdot Rp_{in}}{h_s} \cdot \frac{\lambda_s}{\lambda_p} \quad K_{tr} := \frac{V_s \cdot P_{gr} \cdot 2 \cdot Rp_{in}}{\lambda_p}$$

$$\begin{aligned}
T_p := \; & fgr_0 \leftarrow f\left(T_n \cdot K^{-1}\right) \\
& for \quad i \in 0..im \\
& \quad Tp_{i,0} \leftarrow T_n \\
& for \quad j \in 1..jm \\
& \quad Cv_1 \leftarrow F1_{0,j} \oplus KC_2 \leftarrow F2_{0,j} \oplus Cn_1 \leftarrow F1_{im,j} \oplus Cn_2 \leftarrow F2_{im,j} \\
& \quad M_{0,0} \leftarrow 1 - R\lambda_s \cdot Cv_1 \oplus M_{0,1} \leftarrow -R\lambda_c \cdot Cv_2 \oplus M_{1,0} \leftarrow -R\lambda_s \cdot Cn_1 \\
& \quad M_{1,1} \leftarrow 1 - R\lambda_c \cdot Cn_2 \oplus F_{tr\,j-1} \leftarrow K_{tr} \cdot fgr_{j-1} \\
& \quad TP_0 \leftarrow T_n - F_{tr\,j-1} \cdot Cv_1 - T_{ec} \cdot R\lambda_c \cdot Cv_2 - T_{is} \cdot R\lambda_s \cdot Cv_1 \\
& \quad TP_1 \leftarrow T_n - F_{tr\,j-1} \cdot Cn_1 - T_{ec} \cdot R\lambda_c \cdot Cn_2 - T_{is} \cdot R\lambda_s \cdot Cn_1 \\
& \quad Tgr \leftarrow lsolve(M, TP) \\
& \quad T0_j \leftarrow Tgr_0 \cdot K^{-1} \oplus Tim_j \leftarrow Tgr_1 \cdot K^{-1} \\
& \quad fgr_j \leftarrow f\left(T0_j\right) \oplus f_{vj} \leftarrow \frac{fgr_j + fgr_{j-1}}{2} \\
& \quad for \quad i \in 0..10 \\
& \quad\quad T_{p_{i,j}} \leftarrow T0_j \cdot K \quad if \quad i = 0 \\
& \quad\quad T_{p_{i,j}} \leftarrow Tim_j \cdot K \quad if \quad i = im \\
& \quad\quad T_{p_{i,j}} \leftarrow T_n - \left[K_{tr} \cdot fgr_{j-1} - \left(T0_j \cdot K - T_{is}\right) \cdot R\lambda_s\right] \cdot F1_{i,j} \ldots otherwise \\
& \quad\quad + \left(Tim_j \cdot K - T_{nc}\right) \cdot R\lambda_c \cdot F2_{i,j} \\
T_p &
\end{aligned}$$

$$T_1 := max\left[\left(T_p^{\,T}\right)^{\langle 0 \rangle} \right] \quad T_2 := max\left[\left(T_p^{\,T}\right)^{\langle 4 \rangle} \right] \quad T_1 = 298.417K \quad T_2 = 293K .$$

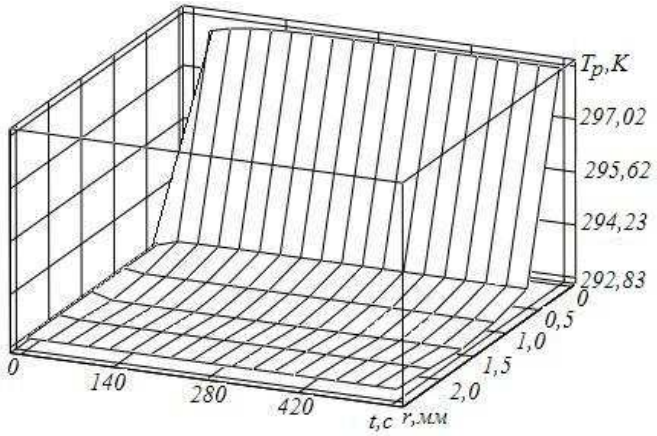


Рис. 3. Объемный график распределения температуры в теле втулки, изготовленной из полиуретана, с учетом граничных условий (2) и (3)

Вследствие того, что на границах втулки будут различные температурные условия, в результате будет возникать перепад температур, вызывающий появление температурных напряжений. Для данной геометрической конфигурации температурные напряжения можно рассчитать по формулам, соответственно для радиальных $\sigma r(r)$, кольцевых $\sigma t(r)$ и осевых $\sigma z(r)$ напряжений [10]:

$$\sigma r(r) = K\sigma \cdot \begin{bmatrix} Rp_{in}^2 \cdot ln(Rp_{ir}) - Rp_{ex}^2 \cdot ln(Rp_{er}) + \\ + Rp_{ex}^2 \cdot Rp_{in}^2 \cdot r^{-2} \cdot ln(Rp_{ei}) \end{bmatrix}; \quad (21)$$

$$\sigma t(r) = K\sigma \cdot \begin{bmatrix} Rp_{ex}^2 \cdot ln(1 - Rp_{er}) - Rp_{in}^2 \cdot ln(1 - Rp_{ir}) - \\ - Rp_{ex}^2 \cdot Rp_{in}^2 \cdot r^{-2} \cdot ln(Rp_{ei}) \end{bmatrix}; \quad (22)$$

$$\sigma z(r) = K\sigma \cdot \left[Rp_{ex}^2 \cdot ln(1 - 2 \cdot Rp_{er}) - Rp_{in}^2 \cdot ln(1 - 2 \cdot Rp_{ir}) \right]. \quad (23)$$

Комплекс $K\sigma$ имеет вид:

$$K\sigma = \frac{\alpha \cdot E \cdot (T_1 - T_2)}{2 \cdot (1 - \nu) \cdot \left(Rp_{ex}^2 - Rp_{in}^2 \right) \cdot ln(Rp_{ei})}, \quad (24)$$

где α – коэффициент линейного расширения; E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона; $T_1 = Tp(Rp_{in})$; $T_2 = Tp(Rp_{ex})$.

Втулки подшипников скольжения в большинстве случаев изготавливают из полимерных материалов, которые являются вязкоупругими материалами, что следует учитывать при расчетах напряженно-деформированного состояния элементов из полимерных материалов и их композитов. При этом существуют несколько методов, учитывающих явления ползучести и релаксации при определении напряжений и деформаций в элементах под воздействием силовых, температурных и других энергетических полей. Одни методы основаны на изначальном использовании вязкоупругих моделей [11-13], а другие – базируются на использовании упругих решений с переходом к вязкоупругому обобщению [14-16].

Используя упругое решение температурной задачи в виде системы (21) – (23) с учетом (24), перейдем к вязкоупругому решению, принимая положения из [14]. При этом следует в первую очередь подчеркнуть, что переход от упругого решения к вязкоупругому опять же связан с интегральным преобразованием Лапласа, а также с его модификацией – интегральным преобразованием Лапласа-Карсона. При этом одной из основных теорем из операционного исчисления является теорема умножения, представленная уравнением (9).

При переходе от упругого решения к вязкоупругому, после соответствующих преобразований появляется функция, получившая название связной ползучести и зависящая от параметра ζ, значение которой может быть разным. Аналитически данная функция записывается таким образом:

$$Z_\zeta = \frac{1}{1 + \zeta \cdot \omega}. \quad (25)$$

Во многих случаях значение ζ составляет 0,5 и 2.

Параметр ω через коэффициент Пуассона записывается так:

$$\omega = \frac{1 - 2\nu}{1 + \nu}. \quad (26)$$

При моделировании сложного напряженного состояния зачастую недостаточно иметь значение только модуля упругости Юнга E, но и следует знать модуль сдвига G и объемный модуль B. Данные величины связаны между собой такими выражениями:

$$\left.\begin{aligned} G &= \frac{E}{2\cdot(1+\nu)}, \\ B &= \frac{E}{3\cdot(1-2\cdot\nu)}. \end{aligned}\right\}. \qquad (27)$$

С учетом последних выражений запишем соотношение для величины ω, а также ее изображение после преобразования Лапласа-Карсона, принимая условие независимости объемного модуля B от времени:

$$\omega = \frac{2G}{3B} \leftrightarrow \frac{2G^{LK}}{3B} = \frac{R_c^{\ LK}}{3B}, \qquad (28)$$

где $R_c^{\ LK}$ – изображение по Лапласу-Карсону функции сдвиговой релаксации.

В выражении (24) имеется один комплекс, который следует преобразовать при переходе от упругого решения к вязкоупругому, а именно: $E/(1-\nu)$. Выполнив замену данного комплекса через параметр ω, а также осуществив прямое и обратное преобразования, получаем:

$$\begin{aligned} &\frac{E}{(1-\nu)} = \frac{9\cdot B\cdot\omega}{2+\omega}\cdot\frac{2+\omega}{1+2\cdot\omega} = \frac{9\cdot B}{2}\cdot\left(1-\frac{1}{1+2\cdot\omega}\right)\leftrightarrow \\ &\leftrightarrow \frac{9\cdot B}{2}\cdot\left(1-Z_2^{LK}\right)\leftrightarrow \frac{9\cdot B}{2}\cdot\left[1-Z_2(t)\right] \end{aligned}. \qquad (29)$$

Если в первом приближении взять среднее значение величины $(1-\nu)=\nu_c$ и считать ее константой, тогда вместо преобразования (29) можно записать такое соотношение:

$$\begin{aligned} &\frac{E}{\nu_c} = \frac{9\cdot B\cdot\omega}{2+\omega}\cdot\frac{1}{\nu_c} = \frac{9\cdot B}{\nu_c}\cdot\left(1-\frac{1}{1+\omega/2}\right)\leftrightarrow \\ &\leftrightarrow \frac{9\cdot B}{\nu_c}\cdot\left(1-Z_{1/2}^{LK}\right)\leftrightarrow \frac{9\cdot B}{\nu_c}\cdot\left[1-Z_{1/2}(t)\right] \end{aligned}. \qquad (30)$$

Необходимо отметить, что при значениях аргумента $\zeta \le 0{,}5$, функцию Z_ζ можно представить так:

$$Z_\zeta(t) = 1-\zeta\cdot\omega. \qquad (31)$$

В таком случае вместо функции ползучести можно записать выражение через коэффициент Пуассона, если он известен. При этом для вязкоупругих задач коэффициент Пуассона должен быть представлен функциональной зависимостью от времени.

С учетом соотношений (26), (30) и (31), а также зависимости коэффициента Пуассона от времени, уравнения (21) – (24) перепишутся таким образом:

$$\sigma r(r,t) = K\sigma(t)\cdot\left[\begin{aligned} &Rp_{in}^2\cdot ln\left(Rp_{ir}\right) - Rp_{ex}^2\cdot ln\left(Rp_{er}\right) + \\ &+ Rp_{ex}^2\cdot Rp_{in}^2\cdot r^{-2}\cdot ln\left(Rp_{ei}\right) \end{aligned}\right]; \qquad (32)$$

$$\sigma t(r,t) = K\sigma(t)\cdot\left[\begin{aligned} &Rp_{ex}^2\cdot ln\left(1-Rp_{er}\right) - Rp_{in}^2\cdot ln\left(1-Rp_{ir}\right) - \\ &- Rp_{ex}^2\cdot Rp_{in}^2\cdot r^{-2}\cdot ln\left(Rp_{ei}\right) \end{aligned}\right]; \qquad (33)$$

$$\sigma z(r,t) = K\sigma(t)\cdot\left[Rp_{ex}^2\cdot ln\left(1-2\cdot Rp_{er}\right) - Rp_{in}^2\cdot ln\left(1-2\cdot Rp_{ir}\right)\right]; \qquad (34)$$

$$K\sigma(t) = \frac{\alpha\cdot 9\cdot B\cdot(T_1-T_2)}{4\cdot\nu_c\cdot\left(Rp_{ex}^2-Rp_{in}^2\right)\cdot ln\left(Rp_{ei}\right)}\cdot\frac{1-2\nu}{1+\nu}. \qquad (35)$$

Для определения экспериментальных значений коэффициента Пуассона ν_e проведены замеры продольной ε_x и поперечной ε_y деформаций во времени t_e. Результаты экспериментов следующие: ε_x = (0,119; 0,2381; 0,3571; 0,4762; 0,5952; 0,7143; 0,8334; 0,9524; 1,0714; 1,1905; 1,3095; 1,4286; 1,5476; 1,6667; 1,7857; 1,9048; 2,0238); ε_y =

(0,053; 0,086; 0,1241; 0,1442; 0,1606; 0,1788; 0,1898; 0,2001; 0,2135; 0,2226; 0,2299; 0,239; 0,250; 0,2573; 0,2646; 0,2737; 0,2792); t_e = (34; 68; 102; 136; 170; 204; 238; 272; 306; 340; 374; 408; 442; 476; 510; 544; 578) с.

Порядок выполнения аппроксимации коэффициента Пуассона приведен в программном блоке САПР-4. Графики для экспериментальных и аппроксимируемых значений коэффициента Пуассона приведены на рисунке 4.

Программный блок САПР-4

Аппроксимация коэффициента Пуассона

$$t1_e := \begin{pmatrix} 34 \\ 68 \\ 102 \\ 136 \\ 170 \\ 204 \\ 238 \\ 272 \\ 306 \end{pmatrix} \quad t2_e := \begin{pmatrix} 340 \\ 374 \\ 408 \\ 442 \\ 476 \\ 510 \\ 544 \\ 578 \end{pmatrix} \quad \varepsilon 1_x := \begin{pmatrix} 0.119 \\ 0.2381 \\ 0.3571 \\ 0.4762 \\ 0.5952 \\ 0.7143 \\ 0.8334 \\ 0.9524 \\ 1.0714 \end{pmatrix} \quad \varepsilon 2_x := \begin{pmatrix} 1.1905 \\ 1.3095 \\ 1.4286 \\ 1.5476 \\ 1.6667 \\ 1.7857 \\ 1.9048 \\ 2.0238 \end{pmatrix} \quad \varepsilon 1_y := \begin{pmatrix} 0.053 \\ 0.086 \\ 0.1241 \\ 0.1442 \\ 0.1606 \\ 0.1788 \\ 0.1898 \\ 0.2001 \\ 0.2135 \end{pmatrix} \quad \varepsilon 2_y := \begin{pmatrix} 0.2226 \\ 0.2299 \\ 0.239 \\ 0.250 \\ 0.2573 \\ 0.2646 \\ 0.2737 \\ 0.2792 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_x := stack(\varepsilon 1_x, \varepsilon 2_x) \quad \varepsilon_y := stack(\varepsilon 1_y, \varepsilon 2_y)$$

$$t_e := stack(t1_e, t2_e) \quad \nu_e := \frac{\overrightarrow{\varepsilon_y}}{\varepsilon_x} \quad t := 34, 38..578$$

$$ij := 0..16 \quad fv := regress(t_e, \nu_e, 2) \quad \nu 1(t) := interp(fv, t_e, \nu_e, t)$$

$$t1_j := 34 \cdot (1 + j) \quad \nu_j := \nu 1(t1_j) \quad \nu_c := mean(\nu) \quad \nu_c = 0.222$$

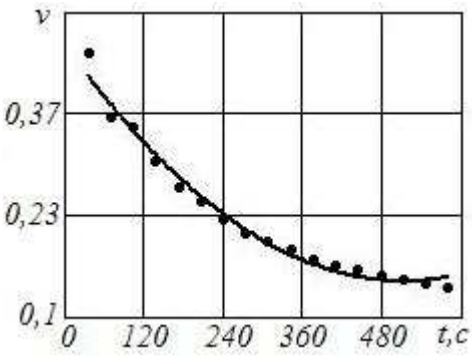


Рис. 4. Графики зависимости коэффициента Пуассона от температуры:
• • • – график для экспериментальных значений (ν_e);
—— – график для аппроксимируемых значений (ν_j)

Порядок выполнения расчетов температурных напряжений для упругой и вязкоупругой задач приведен в программном блоке САПР-5. Плоские графики изменения напряжений для упругой задачи приведены на рисунке 5. Объемные графики изменения напряжений для вязкоупругой задачи изображены на рисунке 6.

Программный блок САПР-5

Расчет температурных напряжений

$$\alpha := 9.5 \cdot 10^{-5} \cdot K^{-1} \quad E := 200 \cdot 10^6 \cdot Pa$$

$$im := 10 \quad i := 0..im \quad dr := \frac{Rp_{ex} - Rp_{in}}{im}$$

$$r_i := Rp_{in} + dr \cdot i$$

$$Rr_i := Rp_{ex}^2 \cdot Rp_{in}^2 \cdot (r_i)^{-2} \cdot ln(Rp_{ei})$$

$$Lni_i := ln\left(\frac{Rp_{in}}{r_i}\right) \quad Lne_i := ln\left(\frac{Rp_{ex}}{r_i}\right)$$

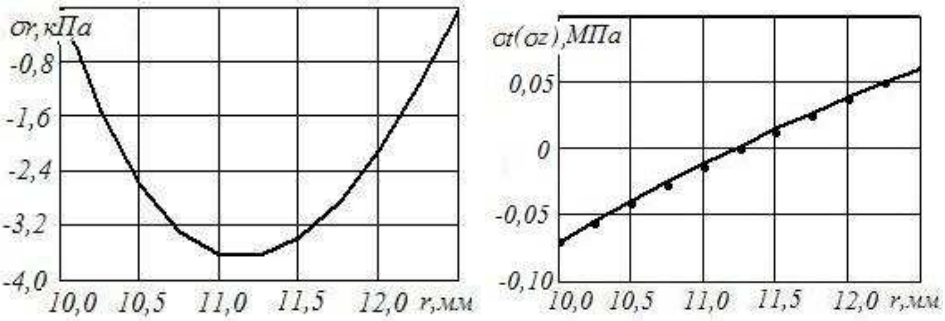
Упругая задача

$$K_{TR} := \frac{\alpha \cdot E \cdot (T_1 - T_2)}{2 \cdot (1 - \nu_c) \cdot \left(Rp_{ex}^2 - Rp_{in}^2\right) \cdot ln(Rp_{ei})}$$

$$\sigma r_i := K_{TR} \cdot \left(Rp_{in}^2 \cdot Lni_i - Rp_{ex}^2 \cdot Lne_i + Rr_i\right)$$

$$\sigma t_i := K_{TR} \cdot \left[Rp_{ex}^2 \cdot (1 - Lne_i) - Rp_{in}^2 \cdot (1 - Lni_i) - Rr_i\right]$$

$$\sigma z_i := K_{TR} \cdot \left[Rp_{ex}^2 \cdot (1 - 2 \cdot Lne_i) - Rp_{in}^2 \cdot (1 - 2 \cdot Lni_i)\right]$$



а) *б)*

Рис. 5. Плоские графики изменения напряжений для упругой задачи с учетом распределения температур по рисунку 3:
а − радиальные напряжения; б − кольцевые (——) и осевые (• • •) напряжения

Вязкоупругая задача

$$B := 122.9 \cdot 10^6 \cdot Pa$$

$$K\sigma_j := \frac{\alpha \cdot 9 \cdot B \cdot (T_1 - T_2)}{4 \cdot \nu_c \cdot \left(Rp_{ex}^2 - Rp_{in}^2\right) \cdot ln(Rp_{ei})} \cdot \frac{1 - 2 \cdot \nu_j}{1 + \nu_j}$$

$$\sigma r_{i,j} := K\sigma_j \cdot \left(Rp_{in}^2 \cdot Lni_i - Rp_{ex}^2 \cdot Lne_i + Rr_i\right)$$

$$\sigma t_{i,j} := K\sigma_j \cdot \left[Rp_{ex}^2 \cdot (1 - Lne_i) - Rp_{in}^2 \cdot (1 - Lni_i) - Rr_i\right]$$

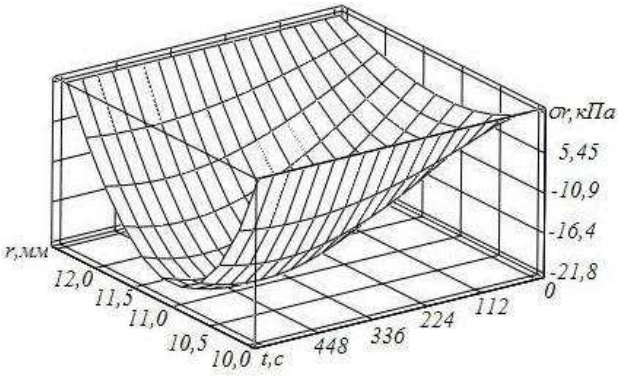
$$\sigma z_{i,j} := K\sigma_j \cdot \left[Rp_{ex}^2 \cdot (1 - 2 \cdot Lne_i) - Rp_{in}^2 \cdot (1 - 2 \cdot Lni_i)\right]$$

$$\sigma z_{0,0} = -8.192 \times 10^4\, Pa \quad \sigma z_{im,im} = 3.371 \times 10^5\, Pa$$

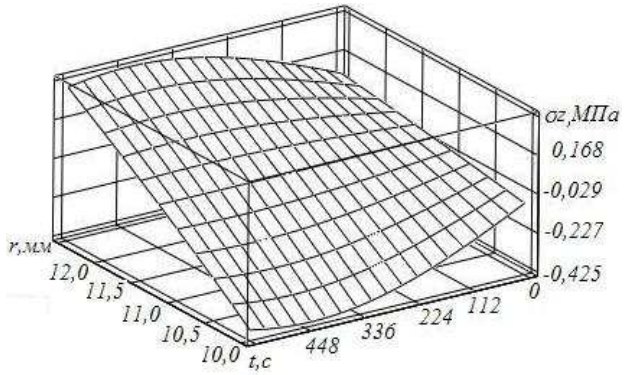
$$max(\sigma z) = 3.663 \times 10^5\, Pa$$

$$min(\sigma z) = -4.249 \times 10^5\, Pa$$

$$min(\sigma r) = -2.182 \times 10^4\, Pa$$



а)



б)

Рис. 6. Объемные графики изменения напряжений для вязкоупругой задачи с учетом распределения температур по рисунку 3: а − радиальные напряжения; б − осевые напряжения

При выполнении граничных условий (2а) и (3а) температурный режим значительно ухудшается. При этом возрастает перепад температур, что в свою очередь приводит к увеличению температурных напряжений. На рисунке 7 представлен объемный график распределения температур при условии, когда от зоны раздела отводится 90 % тепла, полученного от работы трения (скорость скольжения и давление приняты такими же, как и для рис. 3, а время составляет всего 3 с).

Как видно из рис. 7, даже при отводе 90 % тепла из зоны контакта, на границе раздела в течении трех секунд температура достигает 493 К, что может привести к термодеструкции.

На рисунке 8 приведены графики для температурных напряжений, полученные с учетом перепада температур по рисунку 7. При этом следует отметить значительный рост всех компонентов напряжений.

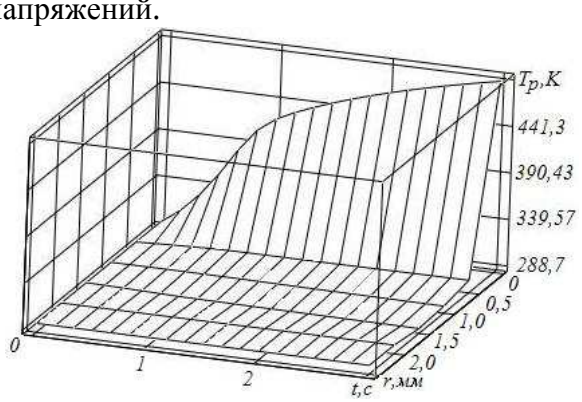
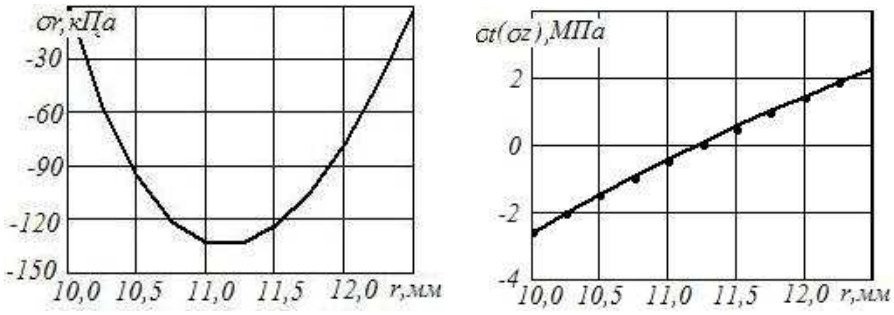


Рис. 7. Объемный график распределения температуры в теле втулки, изготовленной из полиуретана, с учетом граничных условий (2а) и (3а)



а) *б)*

Рис. 8. Плоские графики изменения напряжений для упругой задачи с учетом распределения температур по рисунку 7: а − радиальные напряжения; б − кольцевые (──) и осевые (• • •) напряжения

Выводы.

1. Получены математические модели для анализа распределения температурного поля во втулке (вкладыше) подшипников скольжения, как при наличии охлаждающего отверстия вдоль оси вала, так и без него.

2. Получены математические модели для расчета температурных напряжений с учетом вязкоупругих свойств материала.

3. Разработаны программные блоки на базе математического пакета Mathcad для моделирования температурных полей и температурных напряжений.

4. Результаты, приведенные в программных блоках, показывают, что при определенных соотношениях геометрических и технологических параметров, в соответствии с характеристиками материала, могут возникать значительные температурные поля в зоне контакта втулки с валом, что может явиться причиной термомеханической деструкции. Полученные математические модели позволяют оптимизировать условия эксплуатации подшипников скольжения.

Список использованных источников

1. Лыков В. А. Теория теплопроводности / В. А. Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 599 с.
2. Кузяєв І. М. Моделювання роботи та проектування екструзійних агрегатів з розробкою елементів САПР / І. М. Кузяєв. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2008. – 474 с.
3. Кузяев И. М. Моделирование работы и проектирование экструзионных агрегатов с разработкой блоков САПР. Червячные прессы / И. М. Кузяев, А. Д. Петухов. – Днепропетровск: ГВУЗ УГХТУ, 2012. – 413 с.
4. Кузяєв І. М. Механіка та реологія полімерів: навч. посіб. [для студ. вищ. навч. закл.] / І. М. Кузяєв. – Дніпропетровськ: УДХТУ, 2002. – 386 с.
5. Кузяев И. М. Анализ температурных процессов в подшипниках скольжения с учетом трения / И. М. Кузяев, В. Н. Анисимов // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – 2012. – № 1. – С. 27-40.
6. Лаврентьев М. А. Методы теории функций комплексного переменного / М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат. – М.: Наука, 1973. – 736 с.
7. Диткин В. А. Интегральные преобразования и операционное исчисление / В. А. Диткин, А. П. Прудников. – М.: Наука, 1974. – 544 с.
8. Кузяєв І. М. Основи математичного моделювання процесів по переробці полімерних матеріалів: навчальний посібник / І. М. Кузяєв, О. Н. Півень, В. П. Місяць. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2012. – 283 с.
9. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям: пер. с нем. С. Ф. Фомина / Э. Камке. – М.: Наука, 1976. – 576 с.
10. Кантарович З. Б. Основы расчета химических машин и аппаратов / З. Б. Кантарович. – М.: ГНТИМЛ., 1960. – 743 с.
11. Виноградов Г. В. Реология полимеров / Г. В. Виноградов, А. Я. Малкин. – М.: Химия, 1977. – 440 с.
12. Кристенсен Р. Введение в теорию вязкоупругости: пер. с англ. / Р. Кристенсен; под ред. Г. С. Шапиро. – М.: Мир, 1974. – 338 с.
13. Колтунов М. А. Ползучесть и релаксация / М. А. Колтунов. – М.: Высшая школа, 1976. – 277 с.
14. Колтунов М. А. Прочностные расчеты изделий из полимерных материалов / М. А. Колтунов, В. П. Майборода, В. Г. Зубчанинов. – М.: Машиностроение, 1983. – 239 с.
15. Кузяев И. М. Расчет давления в зоне контакта жесткой сферы с вязкоупругой средой / И. М. Кузяев, А. И. Буря // Проблеми трибології. – 2011. – № 1. – С. 136-141.
16. Буря А. И. Анализ деформированно-напряженного состояния при скольжении жесткого тела со сферической поверхностью контакта по наклонной поверхности вязкоупругой среды / А. И. Буря, И. М. Кузяев, М. Е. Казаков [и др.] // Труды 8-го Междунар. симпозиума по фрикционным изделиям и материалам. ЯРОФРИ-2010. – 2010. – С. 23-28.

УДК 539.3:539.4

В.Ю. Грицюк, канд. техн. наук
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

РУХ ТІЛА ПО БАЛЦІ

Зазвичай під час розрахунку руху тіла по балці досліджується вплив тільки горизонтальної швидкості руху тіла по балці на результати розрахунку цієї системи. У представленій роботі досліджується також вплив початкової вертикальної складової швидкості руху тіла.

Ключові слова: *балка, тіло, рух.*

Обычно при расчёте движения тела по балке исследуется влияние только горизонтальной скорости движения тела по балке на результаты расчёта данной системы. В представленной работе исследуется также влияние начальной вертикальной составляющей скорости движения тела.

Usually, in case calculating of body movement along a beam, the influence only of the body horizontal velocity to the system calculation results is investigated. In this paper we investigate the influence of the initial vertical velocity component of the body.

Вступ. На стержневі системи можуть діяти різні види динамічного навантаження: вібраційне, рухоме, ударне, сейсмічне. Під час руху тіла вздовж балки, безумовно, вирішальним є величина складової швидкості руху тіла вздовж балки [1; 2]. Однак можуть впливати й інші фактори. Досі не досліджувався вплив початкової складової швидкості, яка перпендикулярна до подовжньої осі балки. У представленій роботі досліджується вплив цих двох складових швидкості.

Математична модель. Розглянемо рух тіла по шарнірно-опертій балці (рис. 1).

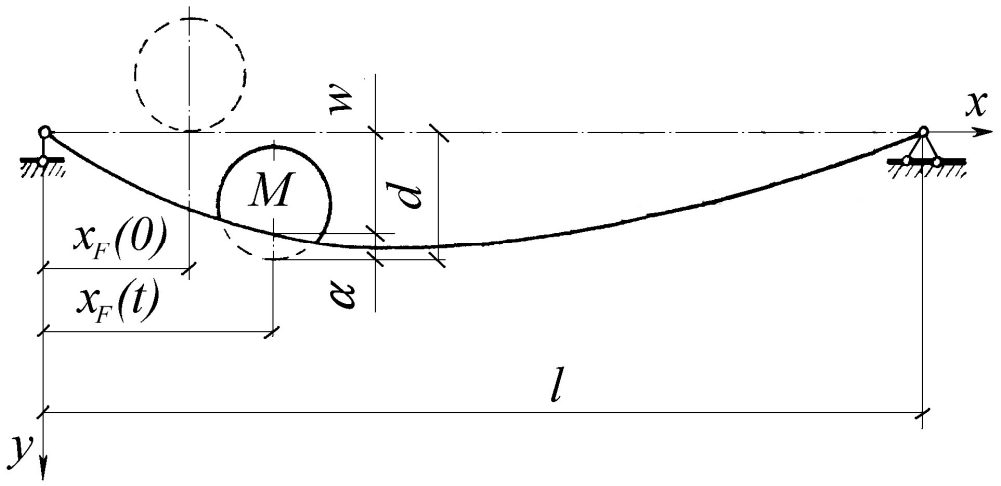


Рис. 1. Розрахункова схема

Силу контактної взаємодії $F(t)$ тіла і балки можна знайти з рівняння

$$d(F) = \alpha(F) + w_F(x_F, F), \tag{1}$$

де d – вертикальні переміщення тіла; α – вертикальні переміщення тіла, викликані контактними деформаціями у місці взаємодії тіла і балки; w_F – вертикальні переміщення балки у місці знаходження тіла; x_F – горизонтальна координата цього місця.

Рівняння (1) є узагальненням відомого рівняння поперечного удару тілом по балці, запропонованого С.П. Тимошенком [3].

Вертикальні переміщення тіла d можна визначити за допомогою формули

$$d(t) = d_0 + \dot{d}_0 t + g\frac{t^2}{2} - \frac{1}{M}\int_0^t F(t_1)(t - t_1)dt_1, \tag{2}$$

де d_0, $\dot{d}_0$ – початкові вертикальні переміщення і швидкість тіла; g – прискорення земного тяжіння; M – маса тіла; t – час.

Якщо горизонтальна швидкість руху тіла v стала, то

$$x_F(t) = x(0) + vt, \tag{3}$$

де $x(0)$ – початкова координата положення тіла на балці.

Переміщення α можна визначити за допомогою статичної контактної задачі Герца.

Для врахування розсіяння енергії у матеріалі балки пружні характеристики її матеріалу запишемо у комплексній формі

$$E = E(1 \pm i\beta), \tag{4}$$

де E – модуль Юнга матеріалу балки; β – коефіцієнт розсіяння енергії у матеріалі балки; i – уявна одиниця.

Розкладаючи переміщення балки і навантаження у тригонометричні ряди, одержуємо вертикальні переміщення балки

$$w(x,t) = \sum_{j=1}^{\infty} X_j(x) \cdot T_j(t). \tag{5}$$

Для шарнірно-опертої по кінцях балки довжиною l власні форми коливань балки

$$X_j(x) = \sin(\alpha_j x), \qquad \alpha_j = \frac{j\pi}{l}. \tag{6}$$

Функції часу

$$T_j(t) = e^{-\mu_j t}\left[T(0)\left(\frac{\mu_j}{\omega_j}\sin\omega_j t + \cos\omega_j t \right) + \frac{\dot{T}_j}{\omega_j}\sin\omega_j t \right] +$$

$$+ \frac{1}{m \cdot \int_0^l X_j(x)^2 dx \cdot \omega_j} \int_0^t F(t)\sin\alpha_j x_F(t) \cdot e^{-\mu_j (t-t_1)} \cdot \sin\omega_j (t-t_1) dt_1, \tag{7}$$

$$\omega_j = \alpha_j^2 \sqrt{\frac{E \cdot I_z}{m}}, \qquad \mu_j = \frac{\beta}{2}\omega_j = \frac{\psi}{4\pi}\omega_j, \tag{8}$$

де ω_j – частоти власних коливань балки; m – маса одиниці довжини балки; I_z – осьовий момент інерції балки.

Реалізація задачі. Рівняння (1) дозволяє визначити силу $F(t)$. Це робиться чисельно на послідовних малих кроках часу τ. Існують різні алгоритми чисельної реалізації [4]. У цій роботі застосовувалася ступінчаста апроксимація ядра інтегралу $F(t)\sin\alpha_j x_F(t)$ у формулі (7).

Реалізація задачі виконувалася за допомогою математичного пакета MathCAD.

Приклад розрахунку. Були виконані розрахунки, які дозволяють проаналізувати вплив горизонтальної швидкості руху тіла по балці і початкової вертикальної швидкості руху тіла на поведінку системи. Результати розрахунків наведені на рисунках 2 і 3.

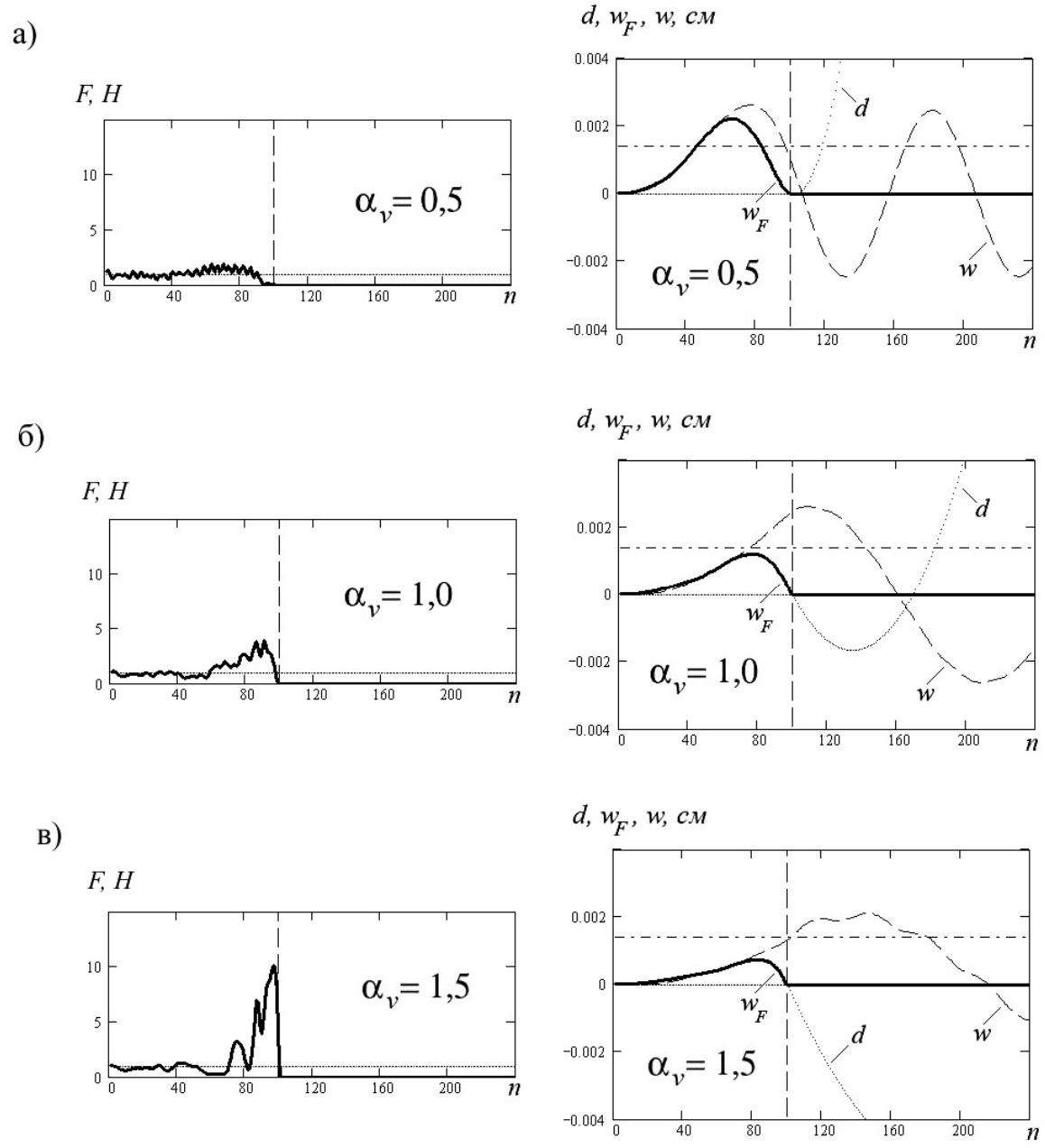


Рис. 2. Вплив швидкості руху тіла вздовж балки на поведінку системи

Розглянемо рух сталевого тіла по сталевій балці. Довжина балки дорівнює 50 см, ширина – 1 см, висота – 1 см. Маса тіла становить 0,25 маси балки, радіус поверхні тіла дорівнює 1 см. Поверхня балки плоска.

Рух тіла починається з лівого кінця балки. Горизонтальна швидкість дорівнює

$$v = \alpha_v \frac{l}{\pi} \omega_1, \qquad (9)$$

де α_v – коефіцієнт горизонтальної швидкості;

ω_1 – частота першої форми власних коливань балки.

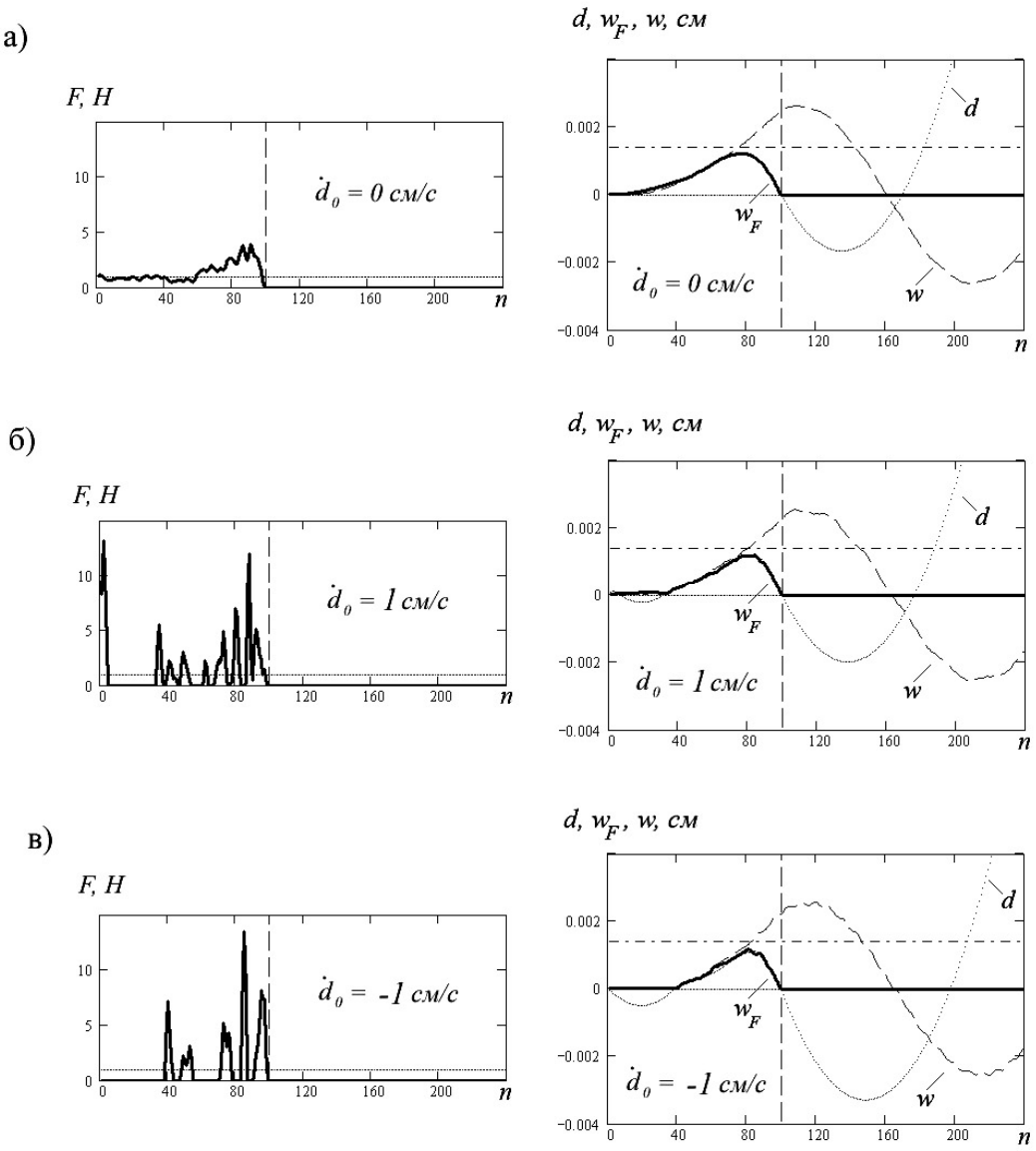


Рис. 3. Вплив початкової швидкості руху тіла поперек балки на поведінку системи

Крок часу τ вибирається такий, що тіло проходить балку за 100 кроків.

Для опису коливань балки враховано 20 гармонік. Сила контактної взаємодії визначалася методом послідовних наближень з точністю до 2 %.

Переміщення і швидкості, спрямовані вниз, вважалися додатними.

На рисунку 2 наведені результати розрахунків при різних значеннях горизонтальної швидкості тіла і при початковому значенні вертикальної швидкості $\dot{d}_0 = 0$ см/с. При $\alpha_v << 1$ максимальне значення прогину середини балки w досягається, коли тіло рухається по балці. При $\alpha_v >> 1$ максимальне значення прогину середини балки w досягається, коли тіло вже давно покинуло балку. При цьому треба відзначити, збурюються більш високі частоти коливань. При $\alpha_v = 1$ максимальне значення прогину середини балки w досягається, коли тіло знаходиться поблизу правого кінця балки.

При наведених значеннях горизонтальної швидкості контактна сила взаємодії збільшується, а прогини балки під тілом зменшуються.

На рисунку 3 наведені результати розрахунків при різних початкових значеннях вертикальної швидкості і при однаковій горизонтальній швидкості ($\alpha_v = 1$). При $\dot{d}_0 = 0$ см/с

динамічні ефекти мінімальні. При ненульовій початковій швидкості збурюються більш високі частоти коливань. Це не випадково, бо відбувається низка ударів тіла по балці. При додатній початковій швидкості, спрямованій униз, через деякий час після початку руху тіла по балці порушується взаємодія між ними. При від'ємній швидкості тіло спочатку летить над балкою, а лише через деякий час починається взаємодія тіла і балки. Динамічні ефекти більше впливають на тіло, ніж на балку.

Висновки. Наведені результати впливу горизонтальної швидкості тіла на поведінку системи. Підтверджені деякі висновки попередніх робіт [1; 2].

Також наведені результати впливу початкової вертикальної швидкості тіла на поведінку системи. У технічній літературі, зокрема у довідковій [1; 2], цей вплив не наводиться. Цікаві не тільки кількісні покажчики, але й якісні. При ненульовій початковій швидкості збурюються більш високі частоти коливань. Це не випадково, бо відбувається низка ударів тіла по балці.

Список використаних джерел

1. Справочник по динамике сооружений / под ред. Б. Г. Коренева, И. М. Рабиновича. – М.: Стройиздат, 1972. – 511 с.

2. Филиппов А. П. Воздействие динамических нагрузок на элементы конструкций / А. П. Филиппов, С. С. Кохманюк, Ю. С. Воробьёв; под ред. А. П. Филиппова. – К.: Наукова думка, 1974.

3. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле / С. П. Тимошенко. – М.: Наука, 1967. – 444 с.

4. Грицюк В. Ю. Алгоритм чисельного розрахунку малих коливань механічних систем / В. Ю. Грицюк // Вісник Чернігівського держ. технол. ун-ту. – 2001. – № 12. – С. 43-46.

УДК 539.3:534.1

О.В. Савченко, канд. техн. наук
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ЗАДАЧІ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ З КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Розглядаються задачі багатокритеріальної оптимізації структури багатошарового стержня з композиційних в'язкопружних матеріалів, армованих волокнами.

Рассматриваются задачи многокритериальной оптимизации структуры многослойного стержня из композиционных вязкоупругих материалов, армированных волокнами.

Multi-criteria optimisation problems for structure of multilayered beam from composite viscoelastic fiber-reinforced materials are considered.

Вступ. Композиційні матеріали широко застосовуються для виготовлення несучих тонкостінних елементів оболонкових конструкцій, зокрема корпусів літальних апаратів, суднових конструкцій, корпусів двигунів, лопаток вітрових генераторів енергії, тобто конструкцій, де потрібне поєднання міцності, жорсткості, демпфірування при малій масі. Конструкції, виготовлені із сучасних композиційних матеріалів, мають істотні переваги перед конструкціями з однорідних матеріалів завдяки можливості одержання одночасно високих характеристик міцності, жорсткості, демпфірування, неможливих для конструкцій з однорідних матеріалів.

Проте ефективність композитних конструкцій залежить від вибору параметрів структури: коефіцієнтів армування, концентрації, топології, тобто розподілення матеріалу в об'ємі. Необхідність вибору оптимального рішення при проектуванні таких конструкцій обумовлює необхідність використання методів оптимізації.

Задачі оптимізації для конструкцій, які працюють в умовах динамічних навантажень, у більшості випадків формулюються як багатокритеріальні, оскільки під час проектування таких конструкцій необхідно забезпечити декілька умов оптимальності, які часто суперечать одна одній. До таких умов, як правило, відносять високі демпфіруючі властивості, мінімум амплітуд коливань, задане розподілення частот, швидкість затухання коливань, мінімальну

масу тощо. До особливостей проектування композитних конструкцій слід також віднести велику кількість проектних параметрів і багатоекстремальність задач оптимізації, необхідність програмного обчислення цільових функцій і градієнтів, що часто призводить до неможливості використання класичних методів оптимізації. Щодо задач динаміки в'язкопружних конструкцій, з'являються додаткові труднощі, пов'язані з вибором методів розв'язання рівнянь динаміки. До проектних параметрів та змінних стану можуть застосовуватися обмеження на діапазон прийнятних рішень. Як відомо, врахування обмежень суттєво ускладнює одержання розв'язку в класичних методах оптимізації, у зв'язку з чим необхідно віддати перевагу методам, які є нечутливими до характеру зміни критеріїв оптимізації і принципово не ускладнюються при наявності обмежень. Такі методи розробляються на основі еволюційних, зокрема генетичних, алгоритмів, які використовують елементи теорії спадковості Дарвіна [1]. Ефективність застосування еволюційних методів було продемонстровано, зокрема, і при розв'язанні задач оптимізації [2].

Задача проектування оптимальної конструкції полягає у визначенні параметрів армування та структури з метою одержання оптимального проекту, який забезпечує задані умови оптимальності. Зазначимо, що поняття "оптимальний проект" при багатокритеріальній оптимізації є до деякої міри некоректним, оскільки одержати розв'язок, який задовольняє умови екстремальності одночасно всіх заданих критеріїв, неможливо, і необхідно розглядати компромісні варіанти. У результаті приходимо до необхідності врахування точки зору проектувальника для вибору з множини оптимальних розв'язків, які не можна поліпшити за жодним із критеріїв, не погіршивши інших (множини Парето), такого, який буде його влаштовувати.

Постановка задачі та метод дослідження. Композитні конструкції, як правило, проектуються на декількох рівнях. Початкова структура утворюється з гомогенних матеріалів з використанням вибраної і технологічно можливої схеми армування. На цьому етапі розглядається характерний об'єм композиційного матеріалу, і визначаються його ефективні характеристики, які враховують особливості армування і властивості матеріалів, які складають композит. На відміну від однорідного, такий квазіоднорідний матеріал має ряд додаткових внутрішніх параметрів, які істотно розширюють можливості варіювання властивостей отриманого композиційного матеріалу.

Наступним етапом є отримання моношару з такого матеріалу з урахуванням виду напруженого стану і фізичних та кінематичних гіпотез.

Побудова математичної моделі багатошарової конструкції з моношарів композитного матеріалу, яка враховує особливості сумісної роботи шарів, приводить до появи додаткових параметрів, які можуть використовуватися як параметри оптимізації.

Далі одержуються розв'язки для вільних і вимушених коливань відносно параметрів стану для подальшого обчислення критеріїв оптимізації.

На останньому етапі відбувається вибір і застосування методів оптимізації для розв'язання конкретних задач.

У цій роботі використовуються варіанти генетичного алгоритму з реальним кодуванням [3] для визначення оптимальних динамічних характеристик багатошарових конструкцій з композиційних в'язкопружних матеріалів, армованих волокнами. Проектними змінними є характеристики кожного моношару: коефіцієнти армування і концентрації, геометричні параметри структури, товщини шарів, властивості матеріалів, що складають композит.

Фізичні залежності для матеріалів основи й армуючих елементів описуються за допомогою інтегральних рівнянь Больцмана-Вольтерра [4]

$$\sigma(t) = \int_0^t R(t-\tau)\frac{d\varepsilon}{d\tau}d\tau,$$

або у вигляді згортки $$\sigma_t = R * \dot{\varepsilon}_t, \qquad (1)$$

де σ, ε – вектори напружень і деформацій; $R(t-\tau)$ – матриця функцій релаксації; t – час; $\dot{\varepsilon} \equiv \frac{d\varepsilon}{dt}$.

Обґрунтування можливості використання цих рівнянь для широкого класу матеріалів, у тому числі й відмінних від полімерів, наведено в [5]*.

Для отримання ефективних характеристик двофазних або багатофазних композиційних неідеально-пружних матеріалів використовується гіпотеза Фойхта-Рейсса [6].

Математичну модель конструкції побудовано за допомогою напіваналітичного варіанта методу скінченних елементів, при якому для апроксимації переміщень по товщині пакета шарів використовуються многочлени Лагранжа. а по двох інших осях координат переміщення описуються за допомогою глобальних функцій, що враховують умови закріплення на торцях [6; 7].

З урахуванням прийнятої лінійної апроксимації переміщень у межах шару визначено матрицю динамічної жорсткості шару, який розглядався як скінченний елемент:

$$Z(i\omega) = K(i\omega) + (i\omega)^2 M, \quad (2)$$

де $K(i\omega)$ – матриця жорсткості шару, яка залежить від ефективних комплексних модулів матеріалу; M – матриця мас; ω – частота коливань; $i = \sqrt{-1}$.

Синтез матриці динамічної жорсткості багатошарової конструкції з окремих скінченних елементів-шарів виконується за традиційною методикою методу скінченних елементів у варіанті методу переміщень [7].

Рівняння коливань конструкції записується у вигляді

$$Z(i\omega)q = F(i\omega), \quad (2)$$

де $F(i\omega)$ – інтегральне перетворення Фур'є зовнішнього навантаження; q – переміщення узагальнених координат конструкції; $Z(i\omega)$ – загальна динамічна матриця жорсткості.

Побудована математична модель дозволяє визначити масу, частоту і декремент коливань, амплітуду коливань при стаціонарних і нестаціонарних коливаннях за заданими комплексними модулями матеріалів, які складають композиційний матеріал кожного шару.

У цій роботі з використанням побудованої математичної моделі розглянуто задачі багатокритеріальної оптимізації багатошарового стержня з шарами армованих волокнами в'язкопружних матеріалів (рис. 1) з урахуванням розсіяння енергії. Значення комплексних модулів (модуля об'ємної деформації і модуля зсуву) матеріалів приймали такими:

– для матеріалу армуючих волокон $K_1 = 4 \cdot 10^{11} + i \cdot 4 \cdot 10^8$ *Па*, $G_1 = 0,4 \cdot K_1$;

– для матеріалу основи $K_2 = 4 \cdot 10^9 + i \cdot 4 \cdot 10^8$ *Па*, $G_2 = 0,4 \cdot K_2$.

Розглядали 7-шаровий стержень довжиною $L = 2$ *м*.

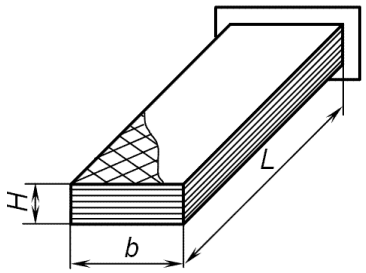


Рис. 1. Багатошаровий стержень з композиційних матеріалів

Вектор проектних параметрів в усіх задачах приймався таким:

* Використання моделі в'язкопружного матеріалу приводить до появи комплексних модулів при гармонійному деформуванні. В усіх інших випадках використання комплексних модулів передбачає перехід до простору інтегральних перетворень Фур'є.

$x = (\eta_1, \eta_2, ..., \eta_7, \varphi_1, \varphi_2, ..., \varphi_7, h_1, h_2, ..., h_7)$,

де η_i, φ_i – відповідно коефіцієнти і кути армування, h_i – товщини шарів.

Обмеження на проектні параметри в усіх випадках приймалися такими:

$$0{,}1 \le \eta \le 0{,}9;\ 0 \le \varphi \le \frac{\pi}{2};\ 0{,}001 \le h \le 0{,}005.$$

Задачі багатокритеріальної оптимізації. Багатокритеріальна або векторна оптимізація полягає у визначенні множини векторів параметрів оптимізації $x = (x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_n) \in X$, які задовольняють прийняті обмеження $g(x) = (g_1(x) \quad g_2(x) \quad \dots \quad g_n(x)) \ge 0$ і оптимізують вектор-функцію критеріїв оптимізації $y = f(x) = (f_1(x) \quad f_2(x) \quad \dots \quad f_n(x)) \in Y$, де X – у цьому випадку простір розв'язків, а Y – критеріальний простір. Допустима множина розв'язків D визначається як множина векторів розв'язків x, які задовольняють обмеження $g(x) \ge 0$:

$D = \{x \in X \,|\, g(x) \ge 0\}$,

а допустима область у критеріальному просторі –

$Y_D = f(D)$.

У більшості випадків критерії оптимізації $f_i(x)$ є конкуруючими, тобто покращення одного приводить до погіршення інших. У цьому випадку визначення оптимальних рішень можливе тільки на основі принципу Парето, відповідно до якого розв'язок $x_k \in D$ називається непокращуваним, якщо в допустимій множині розв'язків не існує іншого розв'язку, який за усіма критеріями не гірше, а хоч би за одним критерієм строго краще, ніж x_k. Множину таких точок-розв'язків називають множиною Парето, а їх відображення в критеріальному просторі – фронтом Парето. Таким чином, першим етапом розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації є визначення множини і фронту Парето.

Відомо декілька найбільш поширених генетичних алгоритмів векторної оптимізації, які відрізняються один від одного способами реалізації основних операцій генетичного алгоритму і способами визначення множини непокращуваних рішень [9]. У цій роботі застосовано варіант генетичного алгоритму, який використовує основану на Парето-домінуванні процедуру ранжирування розв'язків, де ранг кожного розв'язку (індивіда) визначається числом домінуючих його індивідів [3].

Для визначення єдиного оптимального розв'язку необхідно використовувати умови, за якими серед критеріїв оптимізації вибираються більш і менш прийнятні. Ця функція виконується проектувальником.

1. Багатошаровий стержень з максимальною швидкістю затухання коливань на першій формі при мінімальній масі.

Декремент коливань при усій важливості розсіяння енергії в динаміці конструкцій не є єдиним параметром, що визначає затухання коливань. Аналіз результатів оптимізації за критерієм максимального розсіяння енергії, зокрема максимального декремента, не завжди приводить до конструкції з максимальною швидкістю затухання коливань і не повністю враховує параметри жорсткості. Як відомо, декремент коливань пов'язаний зі швидкістю затухання коливань залежністю

$$\Delta = \frac{2\pi}{\omega a}\frac{da}{dt},$$

де ω – частота, a – амплітуда коливань, t – час.

Звідси швидкість затухання коливань – $\frac{da}{dt} = \frac{a}{2\pi}\Delta\omega$, тобто швидкість затухання пропорційна добутку декремента на частоту при заданій величині амплітуди коливань.

Очевидно, добуток частоти на декремент можна використати як критерій швидкості затухання коливань. Врахування частоти непрямим чином впливає на жорсткість конструкції і не допускає істотного зниження коефіцієнта армування.

Критерій оптимальності приймали у вигляді

$$\Phi(x) = \left[-dekr1 \cdot om1, \quad mass\right] \to \min .$$

Результати розрахунку представлено на рисунку 2 у вигляді множини оптимальних розв'язків (фронту Парето). Будь-яка точка множини Парето є оптимальною (непокращуваною) – її неможливо покращити за жодним із критеріїв оптимальності, не погіршуючи інші критерії. Для двокритеріальної задачі фронт Парето визначається точками, що лежать у просторі критеріїв оптимальності на деякій кривій.

При максимальній швидкості затухання $dekr1 \cdot om1 = 19,0212$ і масі $mass = 89,0646$ *кг* вектор проектних параметрів є таким:

x = [0,9000 0,9000 0,1094 0,1031 0,1863 0,9000 0,9000
1,5495 1,5215 1,5708 1,5554 1,5708 1,5632 0,0262
0,0050 0,0048 0,0050 0,0050 0,0050 0,0015 0,0050].

При мінімальній масі $mass = 42,9153$ *кг* і швидкості затухання $dekr1 \cdot om1 = 8,5061$ вектор проектних параметрів є таким:

x = [0,9000 0,5827 0,1000 0,3966 0,2548 0,1000 0,6300
1,5065 1,5708 1,1951 1,5683 1,5708 1,5128 0
0,0050 0,0010 0,0011 0,0010 0,0010 0,0010 0,0050].

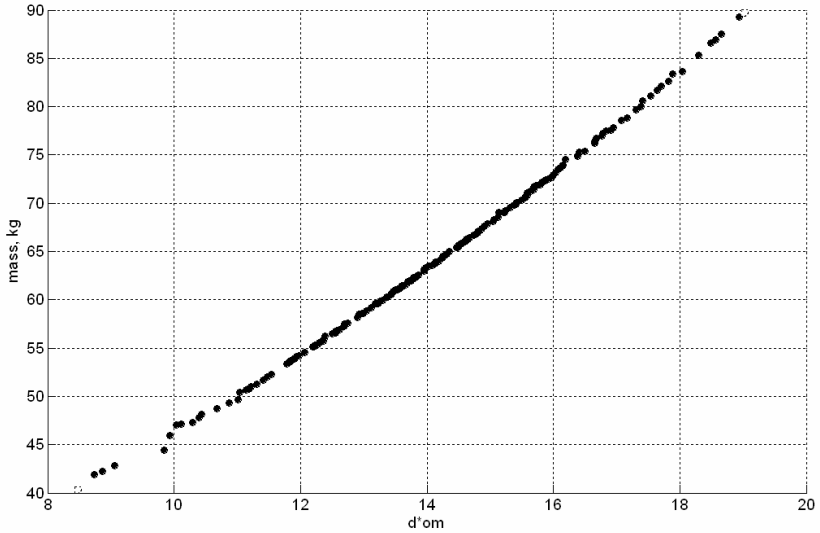


Рис. 2. Фронт Парето при оптимізації 7-шарового стержня за критеріями максимальної швидкості затухання коливань і мінімальної маси

2. Багатошаровий стержень з мінімальною першою і максимальною другою частотою.

Критерій оптимальності приймали у вигляді

$$\Phi(x) = \left[om1, \quad -om2\right] \to \min .$$

Результати розрахунку у вигляді фронту Парето показано на рисунку 3.

Як видно з графіка, характер кривої є складним. При мінімальній першій частоті $om1 = 8,6094$ $1/c$ і другій $om2 = 6976,1843$ $1/c$ вектор проектних параметрів має вигляд:

x = [0,1000 0,1959 0,8999 0,9000 0,9000 0,1000 0,1035
1,5708 1,3944 0,0746 0 1,5708 1,5081 1,5708
0,0010 0,0010 0,0010 0,0010 0,0010 0,0010 0,0010].

При максимальній другій частоті $om2 = 10767,92$ $1/c$ і першій $om1 = 40,3415$ $1/c$ вектор проектних параметрів має вигляд:

x = [0,1047 0,8697 0,9000 0,9000 0,8997 0,9000 0,1051
1,2656 0 0,0004 0,0001 0 1,4791 1,3583
0,0010 0,0010 0,0010 0,0050 0,0010 0,0010 0,0010].

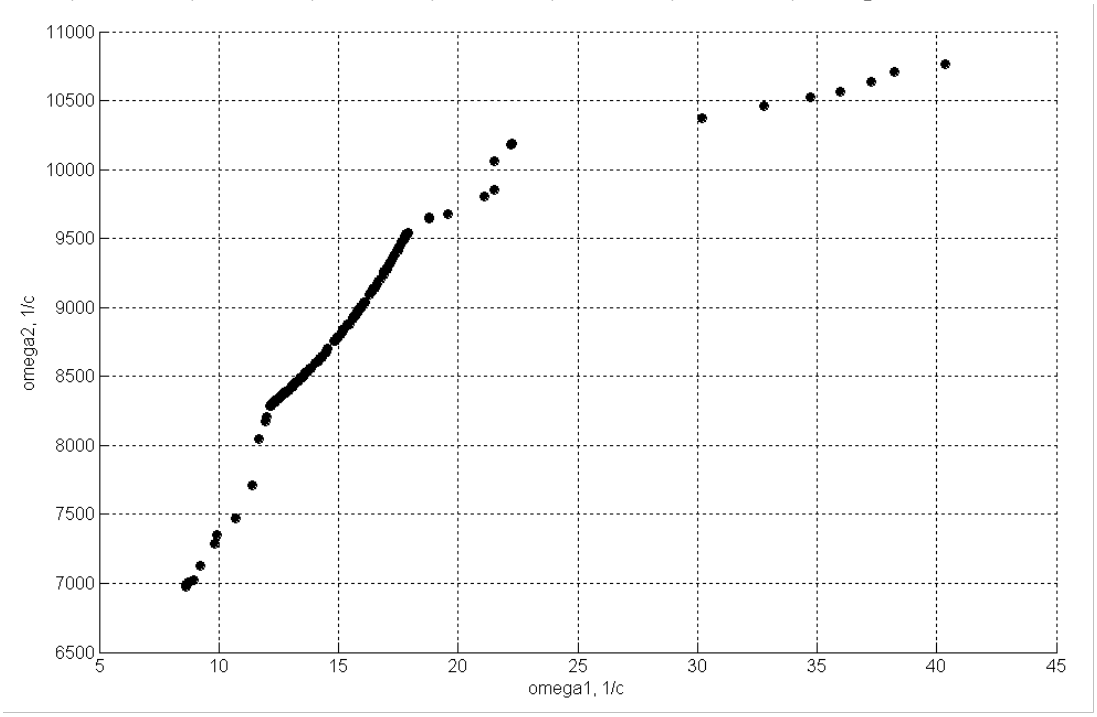


Рис. 3. Фронт Парето при оптимізації 7-шарового стержня за критеріями мінімальної першої і максимальної другої частоти

3. Багатошаровий стержень з максимальним декрементом, максимальною першою частотою і мінімальною масою.

Критерій оптимальності приймали у вигляді

$$\Phi(x) = \left[-dekr1,\quad -om1,\quad mass\right] \to \min .$$

Результати розрахунку показано на рисунку 4 для трьохкритеріальної задачі точки фронту Парето розташовані на деякій площині.

При максимальному декременті $dekr = 0,2194$, першій частоті $om1 = 65,0959\ 1/c$ і масі $mass = 65,2997\ кг$ вектор проектних параметрів є таким:

x = [0,9000 0,8945 0,8772 0,1000 0,8146 0,6769 0,9000
1,5708 1,5708 1,5708 1,5708 0,0475 0 0,0718
0,0041 0,0048 0,0038 0,0011 0,0050 0,0039 0,0045].

При максимальній першій частоті $om1 = 163,6266\ 1/c$, декременті $dekr = 0,0147$ і масі $mass = 91,2645\ кг$ вектор проектних параметрів є таким:

x = [0,8969 0,9000 0,9000 0,6797 0,9000 0,8841 0,9000
0 1,5006 0 0 1,5667 0,4314 0,0496
0,0050 0,0050 0,0046 0,0028 0,0050 0,0046 0,0050].

При мінімальній масі $mass = 29,5191\ кг$, першій частоті $om1 = 56,1504\ 1/c$ і декременті $dekr = 0,0074$ вектор проектних параметрів є таким:

x = [0,8984 0,8643 0,9000 0,8692 0,8794 0,1000 0,9000
0 0,2765 1,5708 0 1,5708 0,1662 0,0801
0,0015 0,0021 0,0010 0,0010 0,0010 0,0010 0,0027].

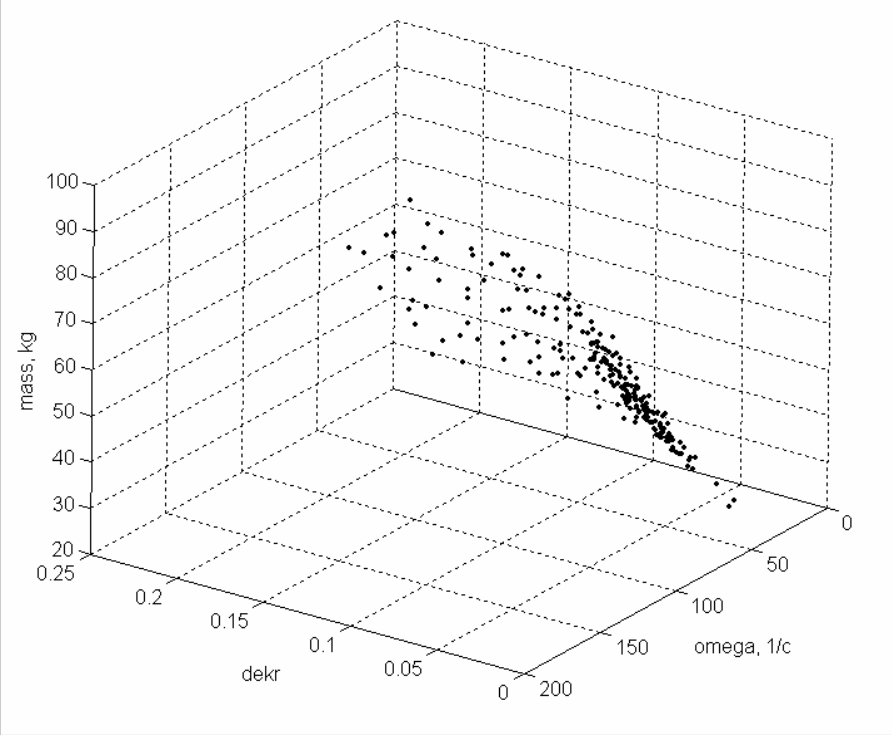


Рис. 4. Фронт Парето при оптимізації 7-шарового стержня за критеріями максимального декремента коливань, максимальної частоти і мінімальної маси

4. Багатошаровий стержень з максимальним декрементом, максимальною швидкістю затухання коливань і мінімальною масою.

Критерій оптимальності приймали у вигляді

$$\Phi(x) = \left[-dekr1,\quad -dekr1\cdot om1,\quad mass\right] \to \min .$$

Результати розрахунку показано на рисунку 5.

При максимальному декременті $dekr = 0,3049$, швидкості затухання $dekr\cdot om1 = 7,1286$ і масі $mass = 64,9725$ *кг* вектор проектних параметрів є таким:

x = [0,6385 0,2078 0,3101 0,6722 0,7980 0,9000 0,4528
1,5685 1,5708 1,5708 1,4666 1,5708 1,5516 1,5708
0,0047 0,0011 0,0050 0,0050 0,0010 0,0010 0,0050].

При максимальній швидкості затухання коливань $dekr1\cdot om1 = 16,7840$, декременті $dekr1 = 0,2840$ і масі $mass = 86,9889$ *кг* вектор проектних параметрів є таким:

x = [0,9000 0,9000 0,1139 0,9000 0,9000 0,9000 0,8984
1,5708 1,5708 1,5708 1,3552 1,2629 1,4419 1,5708
0,0038 0,0050 0,0028 0,0050 0,0039 0,0050 0,0050].

При мінімальній масі $mass = 24,5517$ *кг*, швидкості затухання $dekr1\cdot om1 = 4,0745$ і декременті $dekr = 0,2923$ вектор проектних параметрів є таким:

x = [0,8390 0,7618 0,1000 0,5833 0,9000 0,1020 0,9000
1,4993 1,5488 1,5416 1,5133 1,5708 1,4430 1,4782
0,0010 0,0014 0,0010 0,0010 0,0010 0,0010 0,0022].

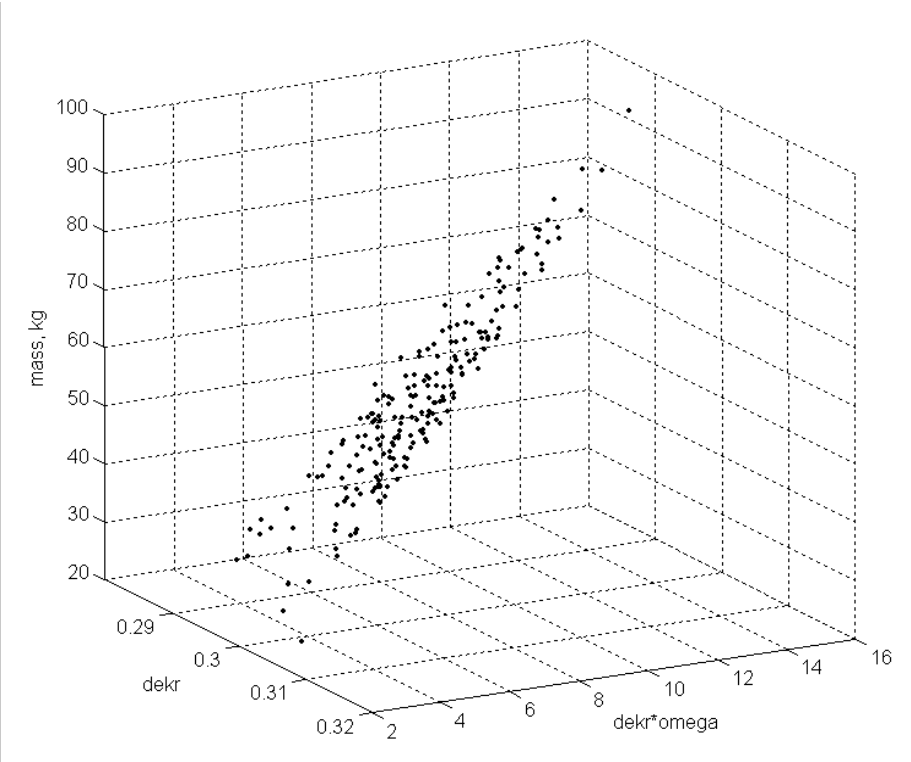


Рис. 5. Фронт Парето при оптимізації 7-шарового стержня за критеріями максимального декремента, максимальної швидкості затухання коливань і мінімальної маси

Як видно з наведених рисунків 2-5, розроблена методика оптимізації дозволяє отримувати множину непокращуваних розв'язків (точок Парето) і відповідний фронт Парето в задачах оптимального проектування багатошарових конструкцій з в'язкопружних матеріалів при великій кількості параметрів проектування. Для вибору єдиного оптимального проекту з множини розв'язків Парето необхідно вибрати варіант, прийнятний для проектувальника або особи, що приймає рішення (ОПР) [10]. З метою зменшення суб'єктивного чинника при виборі найбільш прийнятного варіанта запропоновано ряд методів, зокрема методів, які ґрунтуються на приведенні задачі багатокритеріальної оптимізації до задачі однокритеріальної оптимізації [11]. Отримувані при цьому проекти, як правило, можна поліпшити за одним або декількома окремими критеріями, тобто, власне кажучи, вони не є оптимальними. У зв'язку з цим для вибору прийнятного оптимального проекту доцільно спочатку визначити множину точок Парето і вже потім, при необхідності, використовувати формалізовані процедури вибору.

Висновки. У цій роботі представлено комплексну методику багатокритеріальної оптимізації стержня з в'язкопружних композиційних матеріалів, яка базується на методі визначення ефективних властивостей армованого матеріалу, скінченно-елементному моделюванні багатошарових конструкцій у просторі перетворень Фур'є і еволюційних методах оптимізації. Представлені ілюстрації методики оптимального проектування за допомогою генетичних алгоритмів показують, що ця методика дозволяє одержати конструкцію з оптимальними або заданими параметрами і може використовуватися для проектування композитних конструкцій з великою кількістю проектних параметрів.

Список використаних джерел

1. Гладков Л. А. Генетические алгоритмы / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик; под ред. В. М. Курейчика. – 2-е изд., исправл. и дополн. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 320 с.

2. Liu G. P, Yang J B, Whidborne J. F. Multiobjektive Optimization and Control / Research Studies Press LTD. – 2003. – 320 p.

3. Савченко О. В. Метод пошуку глобального екстремуму в задачах оптимізації конструкцій з композиційних матеріалів / О. В. Савченко, І. О. Савченко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – Чернігів: ЧДТУ, 2009. – № 36. – С. 72-81.

4. Кристенсен Р. Введение в теорию вязкоупругости / Р. Кристенсен; пер. с англ. М. И. Рейтмана. – М.: Мир, 1974. – 338 с.

5. Сорокин Е. С. Об учете упругих несовершенств материалов методами теории наследственной упругости / Е. С. Сорокин, Г. Н. Муравский // Строительная механика и расчет сооружений. – 1975. – № 4. – С. 52-58.

6. Дубенец В. Г. Колебания демпфированных композитных конструкций / В. Г. Дубенец, В. В. Хильчевский. – К.: Вища школа, 1995. – 226 с.

7. Савченко Е. В. Пассивное демпфирование колебаний композитных конструкций: монография / Е. В. Савченко. – Нежин: Аспект-Полиграф, 2006. – 232 с.

8. Дубенец В. Г. Моделирование несовершенно-упругих свойств композитных материалов // Проблемы прочности. – 1988. – № 12. – С. 81-86.

9. Luke S. Essentials of Metaheuristics [online resource] // Online Version 1,2. – July, 2011. – http://cs.gmu.edu/~sean/book/metaheuristics/Essentials.pdf.

10. Лотов А. В. Многокритериальные задачи принятия решений / А. В. Лотов, И. И. Поспелова. – М.: МГУ, 2008. –197 с.

11. Карпенко А. П. Методы оптимизации. Базовый курс [Электронный ресурс] / А. П. Карпенко. – Режим доступа: http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=MO/base.cou.

УДК 677.055

С.А. Плешко, аспірант
Б.Ф. Піпа, д-р техн. наук
А.І. Марченко, канд. техн. наук
Київський національний університет технологій та дизайну, м. Київ, Україна

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ПРУЖНИХ КЛИНІВ В'ЯЗАЛЬНИХ МАШИН

Представлено результати досліджень впливу конструкції клина в'язальної машини на динамічні навантаження, що виникають у зоні взаємодії голки з клином. Запропоновано конструкцію пружного клина, здатної ефективно знизити динамічні навантаження в механізмі в'язання в'язальної машини.

Представлены результаты исследований влияния конструкции клина вязальной машины на динамические нагрузки, возникающие в зоне взаимодействия иглы с клином. Предложено конструкцию упругого клина, способного эффективно снизить динамические нагрузки в механизме вязания вязальной машины.

The results of researches of influence of design of a wedge of knitting machine on dynamic loadings arising in a zone of interaction of a needle with a wedge are submitted. It is offered a design of an elastic wedge capable effectively to lower dynamic loadings in the mechanism of knitting of knitting machine.

Постановка проблеми. Зниження динамічних навантажень, що виникають у зоні ударної взаємодії голок в'язальної машини з клином, є однією з актуальних проблем трикотажного машинобудування [1; 2]. Одним із перспективних напрямків її вирішення є заміна традиційних клинів з жорсткою робочою поверхнею (жорсткі клини) клинами, що містять пружну робочу поверхню (пружні клини) [3-6]. Оцінка доцільності та ефективності використання таких клинів є невід'ємною частиною розробки нових конструкцій пружних клинів.

Аналіз досліджень і публікацій. Численні теоретичні та експериментальні дослідження [3-5], проведені проф. В.М. Гарбаруком, О.М. Хомяком та ін., показують, що зниження динамічних навантажень у механізмах в'язання в'язальних машин може бути досягнуто шляхом використання клинів з пружними робочими поверхнями (поверхня, що взаємодіє з п'ятками голок). У роботі [6] пропонується ряд конструкцій пружних клинів, здатних підвищити ефективність роботи в'язальних машин. Проте, незважаючи на накопичений досвід у практиці досліджень по удосконаленню конструкцій клинів в'язальних машин, вирішення проблеми зниження динамічних навантажень у в'язальних системах шляхом удосконалення клинів все ще залишається актуальною.

Мета статті. Метою роботи є розробка нової конструкції пружного клина та оцінка ефективності використання його у механізмах в'язання в'язальних машин.

Виклад основного матеріалу. Як показують дослідження [2], ефективність клина в'язальної машини оцінюється коефіцієнтом зниження динамічних навантажень у в'язальних системах n, що знаходиться з умови:

$$n = \sqrt{\frac{P_1}{P_2}} = \sqrt{\frac{\delta_2'}{\delta_1'}} = \sqrt{\frac{C_1}{C_2}}, \quad (1)$$

де P_1, P_2 – максимальна сила удару голки об клин відповідно традиційної (жорсткої) конструкції і нової конструкції клина, зокрема пружного клина,

$$P_1 = V\sqrt{\frac{m}{K\delta_1'}}tg\alpha, \quad P_2 = V\sqrt{\frac{m}{K\delta_2'}}tg\alpha, \quad (2)$$

δ_1', δ_2' – піддатливість пари голка-клин при використанні відповідно традиційної (жорсткої) конструкції клина і пружного клина;

C_1, C_2 – жорсткість (зворотна величина піддатливості) пари голка-клин при використанні відповідно жорсткого та пружного клинів;

V – швидкість ударної взаємодії голки з клином;

m – маса голки;

K – конструктивний параметр в'язальної системи [2];

α – кут профілю клина в зоні удару голки (кут зустрічі п'ятки голки з клином).

Як показує аналіз взаємодії голки з клином в період удару [2], деформація системи голка-клин визначається з умови:

$$\delta = \delta_x tg\alpha + \delta_y, \quad (3)$$

де δ – сумарна деформація системи голка-клин;

δ_x, δ_y – деформація системи голка-клин відповідно уздовж осей X і Y.

Аналізуючи умови роботи голки в'язальної машини, приходимо до висновку, що податливість пари голка-клин визначається в основному: вигином і скручуванням п'ятки; вигином штег (направляючі голки); зминанням матеріалу голки, клину та штег у зоні їх контактної взаємодії.

Враховуючи вищенаведене, статична деформація системи голка-клин уздовж осі X може бути визначена з умови:

$$\delta_x = \delta_{1x} + \delta_{2x} + \delta_{3x} + \delta_{4x} + \delta_{5x}, \quad (4)$$

де δ_{1x} – деформація зминання п'ятки голки і клину;

δ_{2x} – деформація вигину п'ятки;

δ_{3x} – деформація зминання тіла голки і штег;

δ_{4x} – деформація вигину штег;

δ_{5x} – деформація скручування п'ятки.

Використовуючи теорію контактної міцності та згину [7], можна отримати:

$$\delta_{1x} = 1{,}16\frac{P}{l_1 E(1+\mu ctg\alpha)sin^2\alpha}; \quad (5)$$

$$\delta_{2x} = P\frac{a^3}{3E_1 J_{1x}}; \quad (6)$$

$$\delta_{3x} = 1{,}16\frac{P}{b^2 E'}\left[\frac{a^2}{l_2} + \frac{(a+b)^2}{l_3}\right]; \quad (7)$$

$$\delta_{4x} = P\frac{(a+b)l^3}{3bE_2J_{2x}}, \quad (8)$$

де P – складова сили удару, що діє вздовж осі X (горизонтальна складова);

l_1, l_2, l_3 – довжина ліній контакту відповідно п'ятки голки з клином, контакту спинки голки зі штегою і контакту голки з виступаючою гранню штеги;

E, E' – наведені модулі пружності відповідно матеріалів пар голка-клин і голка-штега;

E_1, E_2 – модулі пружності матеріалів голки і штеги;

μ – коефіцієнт тертя пари голка-клин;

a – плече сили удару P;

J_{1x}, J_{2x} – моменти інерції перетину п'ятки голки і штеги.

Величина деформації скручування п'ятки голки визначається з умови [4]:

$$\delta_{5x} = 0{,}5h \cdot tg\varphi, \quad (9)$$

де h – ширина п'яти;

φ – кут скручування п'ятки у момент удару.

Оскільки φ мало, можемо прийняти: $\delta_{5x} = 0{,}5h\varphi$. (10)

Як відомо [7]: $\varphi = \frac{M_k\alpha}{GJ_p}$, (11)

де M_k – крутний момент, що виникає при ударі п'ятки голки об клин;

G – модуль пружності матеріалу голки при зрушенні;

J_p – полярний момент інерції перетину п'ятки.

З умови рівноваги голки маємо: $M_k = 0{,}5Nh\left(1-\frac{\Delta}{h}ctg\alpha\right)sin\alpha$,

або, враховуючи, що $P = N\,sin\alpha$: $M_k = 0{,}5P(h-\Delta ctg\alpha)$, (12)

де Δ – товщина п'ятки.

Оскільки для штампованих голок зазвичай $h/\Delta \geq 4$, згідно з [7]: $J_p = \frac{(h/\Delta - 0{,}63)\Delta^4}{3}$.

Враховуючи (11), (12), рівняння (10) набуде вигляду:

$$\delta_{5x} = 0{,}25P\frac{(h-\Delta ctg\alpha)h\alpha}{GJ_p}. \quad (13)$$

Деформація пари голка-клин уздовж осі $У$ може бути визначена з умови:

$$\delta_y = \delta_{1y} + \delta_{2y} + \delta_{3y}, \quad (14)$$

де δ_{1y} – деформація уздовж осі $У$, обумовлена зминанням голки і клину;

δ_{2y} – деформація вигину п'ятки голки уздовж осі $У$;

δ_{3y} – деформація скручування п'ятки.

Аналогічно вищенаведеному: $\delta_{1y} = 1{,}16\frac{P}{l_1E(tg\alpha+\mu)cos^2\alpha}$; (15)

$$\delta_{2y} = P\frac{a^3ctg(\alpha+\rho)}{3E_1J_y}, \quad (16)$$

де ρ – кут тертя пари голка-клин;

J_y – момент інерції перетину п'ятки голки відносно осі $У$.

З достатнім ступенем точності можна записати: $\delta_{3y} = 0{,}5\delta_{5x}\varphi$. (17)

Враховуючи (11), (12) і (13), отримуємо:

$$\delta_{3y} = 0{,}25p^2 h\left[\frac{0{,}5(h-\Delta ctg\alpha)a}{GJ_p}\right]^2. \qquad (18)$$

Для однофонтурних круглов'язальних машин типу КО з голками поз. 0–388, 0–384 [8] ($l_1 = 2{,}5$; $l_2 = 81$; $l_3 = 25{,}5$; $a = 1{,}5$; $b = 3{,}8$; $h = 3$; $h_1 = 73$; $\Delta = 0{,}5$; $\Delta_1 = 0{,}6$ мм; $E_1 = E_2 = E = E' = 2{,}2\cdot 10^5$ МПа; $G = 8{,}1\cdot 10^4$ МПа; $\alpha = 56°$; $\mu = 0{,}17$; $\rho = 9°40'$), використовуючи отримані залежності (5)-(8), (13), (15), (16) і (18), знаходимо:

$\delta_{1x} = 2{,}75\cdot 10^{-9}\ P$; $\delta_{2x} = 163{,}6\cdot 10^{-9}\ P$; $\delta_{3x} = 0{,}412\cdot 10^{-9}\ P$; $\delta_{4x} = 0{,}0062\cdot 10^{-9}\ P$;

$\delta_{5x} = 330{,}2\cdot 10^{-9}\ P$; $\delta_{1y} = 4{,}08\cdot 10^{-9}\ P$; $\delta_{2y} = 2{,}05\cdot 10^{-9}\ P$; $\delta_{3y} = 0{,}036\cdot 10^{-9}\ P^2$ м.

Аналізуючи одержані результати, приходимо до висновку, що під час виконання інженерних розрахунків податливість системи голка-клин, однофонтурних круглов'язальних машин типу КО з достатнім ступенем точності можна визначити з виразу:

$$\delta' = (\delta'_{2x} + \delta'_{5x})\, tg\alpha, \qquad (19)$$

де, δ'_{2x} δ'_{5x} – податливість системи від деформацій δ_{2x}, δ_{5x}:

$$\delta'_{2x} = \frac{\delta_{2x}}{P};\quad \delta'_{5x} = \frac{\delta_{5x}}{P}. \qquad (20)$$

Підставляючи в (19) значення (20) та враховуючи (6), (13), знаходимо:

$$\delta' = \frac{a^3 tg\alpha}{3E_1 J_{1x}} + 0{,}25\frac{(htg\alpha - \Delta)ha}{GJ_p}. \qquad (21)$$

Використовуючи (21) для круглов'язальних машин типу КО отримуємо:

$\delta' = 732\cdot 10^{-9}$ м/Н.

З метою підвищення податливості пари голка-клин, що забезпечує зниження динамічних навантажень в'язальної системи, автори запропонували конструкцію клина, схема якої представлена на рисунку 1. На відміну від відомих клинів з підвищеною податливістю робочої поверхні, запропонованих авторами раніше [6], клин відрізняється простотою конструкції, технологічністю та економією матеріалу.

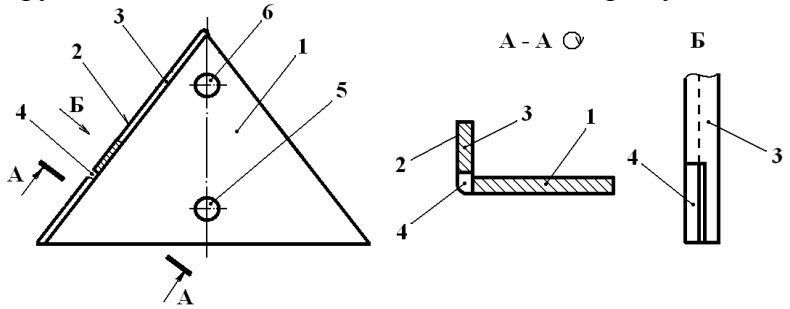


Рис .1. Клин в'язальної машини з відгином з пружною робочою поверхнею

Клин в'язальної машини містить корпус 1, робочу поверхню 2, відгин 3 та наскрізний паз 4. Одна із поверхонь відгину 3 виконує роль робочої поверхні 2, а наскрізний паз 4 розташований у нижній частині відгину паралельно робочій поверхні. Клин містить також два отвори 5, 6 для кріплення корпуса 1 до замкових блоків механізму в'язання (на рис. 1 не показані). Корпус 1 виготовлено із листового матеріалу шляхом штамповки.

Принцип роботи клина такий. При вмиканні, наприклад, круглов'язальної машини голки, встановлені в голковому циліндрі механізму в'язання (на рис. 1 не показані), починають обертатися. При цьому голки, зустрічаючи на своєму шляху робочу поверхню 2, піднімаються вгору (згідно з рис. 1), виконуючи технологічний процес утворення петель трикотажного полотна (на рис. 1 не показано). Наявність наскрізного пазу 4 зменшує жорсткість відгину 3 в зоні ударної взаємодії голок з клином, що призводить до зниження динамічних навантажень у парі голка-клин [2].

Оцінимо ефективність використання запропонованої конструкції клина.

Податливість пари голка-клин δ' у цьому випадку знаходиться з умови:

$$\delta' = \delta'_1 + \delta / P, \tag{22}$$

де δ'_1 – податливість пари голка-клин з жорстким клином;

δ – деформація відгину з пазом нового клину в зоні удару голки;

P – максимальна сила удару голки об клин (горизонтальна складова).

Оскільки [2] $\delta_y = \delta_x ctg\alpha$, вираз (3) набуде вигляду:

$$\delta = \delta_x \left(tg\alpha + ctg\alpha\right) = \frac{2\delta_x}{sin\,2\alpha}. \tag{23}$$

Підставляючи (22) у вираз (23), нехтуючи технологічними навантаженнями та враховуючи результати досліджень [2], одержуємо:

$$\delta' = \frac{2\delta'_1 + A^2}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{2\delta'_1 + A^2}{2}\right)^2 - (\delta'_1)^2}, \tag{24}$$

де $A = \dfrac{\delta_x}{V\sqrt{\dfrac{m}{K}}\,sin^2\alpha}$. (25)

Використовуючи параметри круглов'язальної машини КО [2; 8]: $\delta'_1 = 0{,}725 \cdot 10^{-3}$ мм/Н; $V = 0{,}71$ м/с; $m = 0{,}713 \cdot 10^{-3}$ кг; $K = 0{,}418$; $\alpha = 56^0$ та беручи до уваги уникнення порушення процесу петлетворення [1] $\delta_x = 0{,}2$ мм, згідно з [2] маємо: $\delta' = 36{,}2 \cdot 10^{-3}$ мм/Н. Максимальна сила удару голки об відгин запропонованої конструкції клина при цьому складе 12,2 Н, що приблизно в 7 разів менше в порівнянні з використанням існуючих жорстких клинів [8] круглов'язальних машин типу КО.

Висновки. Отримані результати свідчать про доцільність та ефективність використання запропонованої конструкції пружного клина в механізмі в'язання в'язальних машин.

Використання запропонованої конструкції клина дозволяє:

- підвищити довговічність роботи клина завдяки зниженню динамічних навантажень в зоні взаємодії його з голками;
- підвищити якість трикотажного полотна за рахунок підвищення стабільності роботи пари голка-клин;
- підвищити продуктивність в'язальної машини за рахунок підвищення довговічності роботи клина.

Список використаних джерел

1. Гарбарук В. Н. Проектирование трикотажных машин / В. Н. Гарбарук. – Л.: Машиностроение, 1980. – 472 с.
2. Піпа Б. Ф. Динаміка механізмів в'язання круглов'язальних машин / Б. Ф. Піпа. – К.: КНУТД, 2008. – 416 с.
3. Повышение надежности трикотажного оборудования / Б. Ф. Пипа, В. П. Волощенко, С. Т. Шипуков, В. А. Орлов. – К.: Техника, 1983. – 112 с.
4. Волощенко В. П. Эксплуатационная надежность машин трикотажного производства / В. П. Волощенко, Б. Ф. Пипа, С. Т. Шипуков. – К.: Техніка, 1977. – 136 с.
5. Хомяк О. Н. Повышение эффективности работы вязальных машин / О. Н. Хомяк, Б. Ф. Пипа. – М.: Легпромбытиздат, 1990. – 209 с.
6. Піпа Б. Ф. Удосконалення робочих органів механізмів в'язання круглов'язальних машин / Б. Ф. Піпа, С. А. Плешко. – К.: КНУТД, 2012. – 470 с.
7. Писаренко Г. С. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – К.: Наукова думка, 1975. – 704 с.
8. Машины кругловязальные типа КО-2. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Черновцы, 1992. – 86 с.

РОЗДІЛ ІІ. МЕХАНОХІМІЯ

УДК 539.4:621.6

В.В. Можаровский, д-р техн. наук
Д.С. Кузьменков, канд. физ.-мат. наук
Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, г. Гомель, Беларусь

С.В. Шилько, канд. техн. наук
Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель, Беларусь

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ТРУБ С ППУ-ОЦМ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Разработана методика (автоматизированная) исследования, определения физико-механических свойств материалов труб с ППУ-ОЦМ изоляцией и оболочки ПИ-труб, создана программа, реализующая расчет характеристик стальных труб ППУ. Проведены экспериментальные исследования.

Ключевые слова: *автоматизированная методика, свойства материалов, трубы с изоляцией.*

Розроблена методика (автоматизована) дослідження, визначення фізико-механічних властивостей матеріалів труб з ППУ-ОЦМ ізоляцією та оболонки ПІ-труб, створена програма, яка реалізує розрахунок характеристик сталевих труб ППУ. Проведені експериментальні дослідження.

Ключові слова: *автоматична методика, властивості матеріалів, труби з ізоляцією.*

The technique (automated) researches, definitions of physicomechanical properties of materials of pipes with isolation and environments of PI-pipes is developed, the program realizing calculation of characteristics of steel pipes polyurethane is created. Experimental researches are spent.

Key words: *The automated technique, properties of materials, pipes with isolation.*

Введение. В последнее время борьба с коррозией и потерей тепла в трубопроводах теплосети успешно решается с помощью применения стальных труб с теплоизоляцией в виде изолирующего слоя из жесткого пенополиуретана (ППУ) в спиральновитой герметичной оболочке из тонколистовой оцинкованной стали (далее – трубы с ППУ-ОЦМ изоляцией для надземной прокладок трубопроводов) и внешней гидрозащитной полиэтиленовой оболочки (*ПИ-труб)* для подземной безканальной прокладки [1; 2]. Труба ППУ является прочной конструкцией благодаря адгезии между стальной трубой, изолирующим слоем из ППУ, а также связи между пенопластом ППУ и внешней гидрозащитной полиэтиленовой оболочки. Для изготовления полиэтиленовой оболочки используется термосветостабилизированный полиэтилен низкого давления высокой плотности черного цвета марки 273-79 высшего и первого сорта, выпускаемый по ГОСТ 16338. Показатели основных свойств тепловой изоляции труб ППУ-ПЭ изоляцией должны соответствовать ГОСТ 3073. Требования к трубопроводам с оцинкованной оболочкой изложены в ГОСТ 30732-2006 "Трубы и фасонные изделия стальные с тепловой изоляцией из пенополиуретана с защитным покрытием". Проведение проектными организациями расчетов и экспериментов согласно ГОСТ для таких стальных труб представляет довольно сложную задачу, поэтому возникает необходимость сделать автоматизированную компьютерную программу для создания базы данных и методики расчета.

Автоматизированная методика определения физико-механических свойств материалов труб. В настоящее время возникла необходимость разработки современных методов оценки ресурса оборудования (трубопроводов, сосудов) из новых материалов, в том числе композиционных, на основе диагностической информации. Опыт создания таких комплексных программ и методик имеется [3-5]. Поэтому актуальна разработка программного комплекса на ПЭВМ, позволяющего автоматизировать данный процесс. Разработана автоматизированная методика определения физико-механических свойств материалов труб с ППУ-ОЦМ изоляцией и оболочки ПИ-труб, разработан алгоритм и создана программа, реализующая расчет и хранение различных характеристик стальных труб ППУ. Для наглядной иллюстрации рассмотрим, как работать с автоматизированной методикой опре-

деления физико-механических свойств материалов труб более подробно. На стартовой форме выбирается режим работы с программой: режим просмотра результатов или режим расчета и изменения данных. В режиме просмотра невозможно будет изменять существующие данные в таблице, и рассчитывать новые характеристики. В режиме расчета программа работает в полном функциональном режиме. Приведем краткое описание программы.

После выбора режима работы появляется главное окно программы (рис. 1), где реализованы расчет и хранение различных характеристик стальных труб ППУ: наружного диаметра изолированной трубы, отклонения осевой линии от оси оболочки, водопоглощения, прочности на сдвиг в осевом направлении, прочности на сдвиг в тангенциальном направлении и т. д.

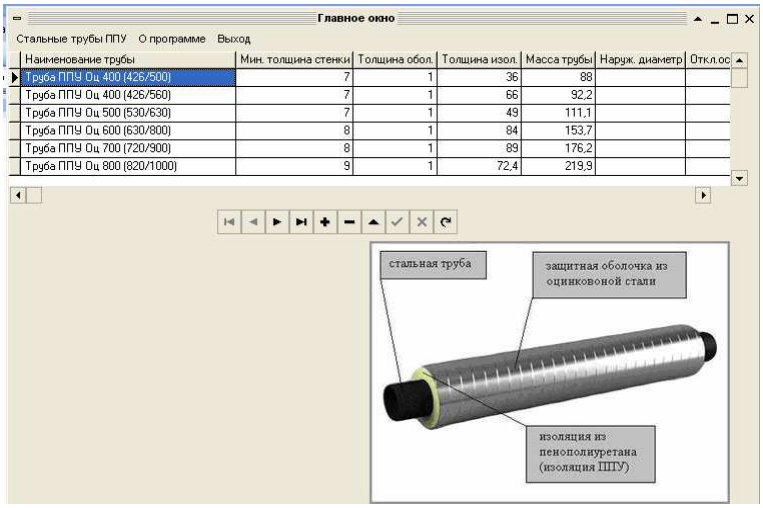


Рис. 1. Главное окно программы

В программе имеется возможность вставки новых записей, удаления существующих и т. д. (рис. 2). Обработаны все возможные случаи ввода некорректных данных. В программе предусмотрена возможность поиска по основным полям, сортировки данных по основным полям (характеристикам стальных труб ППУ), в порядке убывания и возрастания. При выборе другого пункта меню порядок сортировки не сохраняется (таблица БД возвращается в исходное состояние).

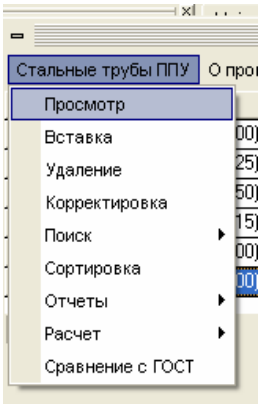


Рис. 2. Структура главного меню

Расчет различных характеристик стальных труб ППУ (текущей выделенной трубы в таблице): наружного диаметра изолированной трубы, отклонения осевой линии от оси оболочки, водопоглощения, прочности на сдвиг в осевом направлении, прочности на сдвиг в тангенциальном направлении и т. д., осуществляется в отдельном окне (рис. 3), в котором также обработаны все возможные случаи ввода некорректных данных. При расчете характеристик, для которых необходимо проводить расчет на 3 или 10 образцах, например, во-

допоглощение, рассчитывается среднее значение соответствующей характеристики, и кнопка «Сохранить», естественно, станет доступной после расчета серии из 3 ил 10 образцов.

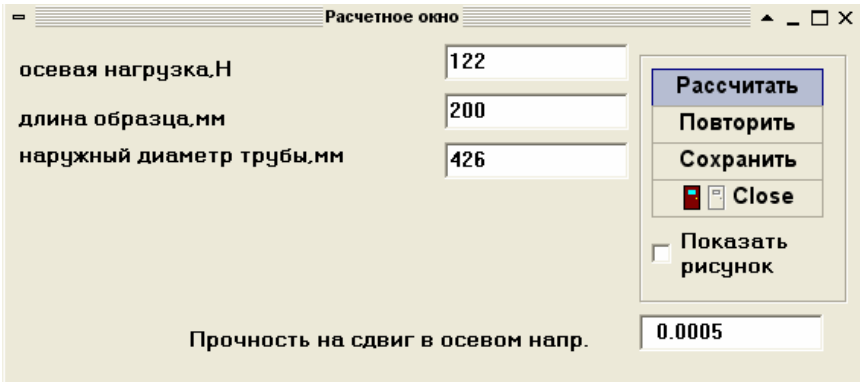


Рис. 3. Расчетное окно с результатами

После нажатия кнопки «Сохранить» рассчитанная характеристика заносится в таблицу базы данных, которая хранится в файле с расширением mdb (Access). Нажав на кнопку «Повторить», можно повторить расчет характеристики стальной трубы. Для некоторых характеристик доступен рисунок (согласно ГОСТ), для появления которого необходимо установить соответствующий флажок на форме (рис. 4).

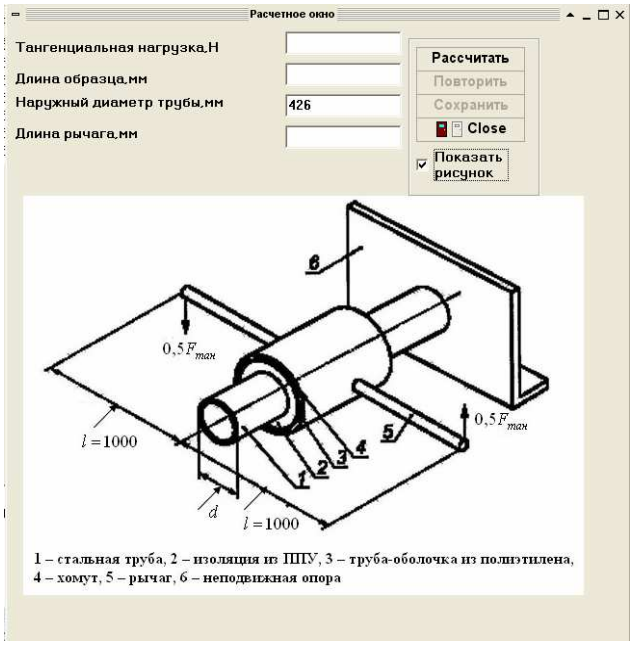


Рис. 4. Расчетное окно с поясняющим рисунком

Также в программе предусмотрена возможность построения отчетов по рассчитанным характеристикам. База данных построена по технологии ADO. Приложение запускается из любого места (флешка, дискета, жесткий диск) без предварительной настройки (алиасы и т. д) и не требует наличие на компьютере специальных программ (Borland Delphi7, BDE Administrotor и т. д.).

В программе предусмотрена возможность сравнения рассчитанных характеристик с ГОСТом. Появится новое окно (рис. 5), где для текущей стальной трубы будет показано сравнение рассчитанных характеристик с ГОСТом и сделан вывод о соответствии или несоответствии трубы с ГОСТ. Окно появится только в том случае, если для данной трубы определен, по крайней мере, один из параметров, требуемых для сравнения. Если не задан ни один параметр, то появится окно с сообщением об ошибке.

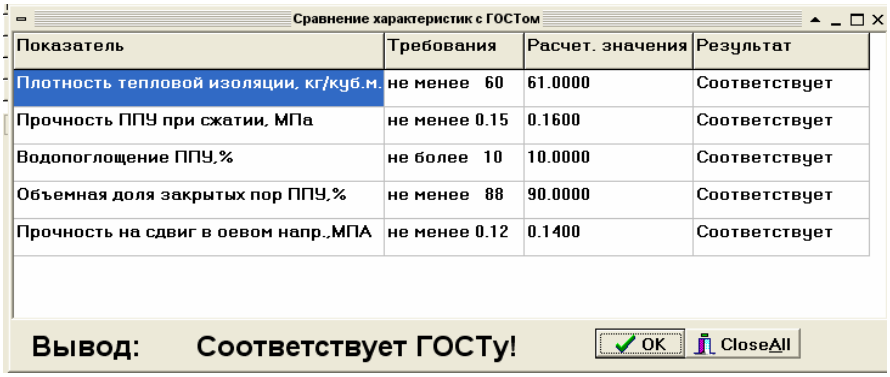


Рис. 5. Сравнение с ГОСТ

Для ПИ-труб меню выглядит таким же образом, как и для ППУ труб. Все действия выполняются точно также. Если работаем с ПИ трубами, а выбираем пункт меню для ППУ труб, то приложение автоматически переключится на работу с таблицей ППУ труб, и наоборот.

Примеры экспериментальных исследований. Для определения физико-механических характеристик труб была разработана методика экспериментального исследования (рис. 6, 7) которая успешно применяется при выполнении хоздоговорных работ.

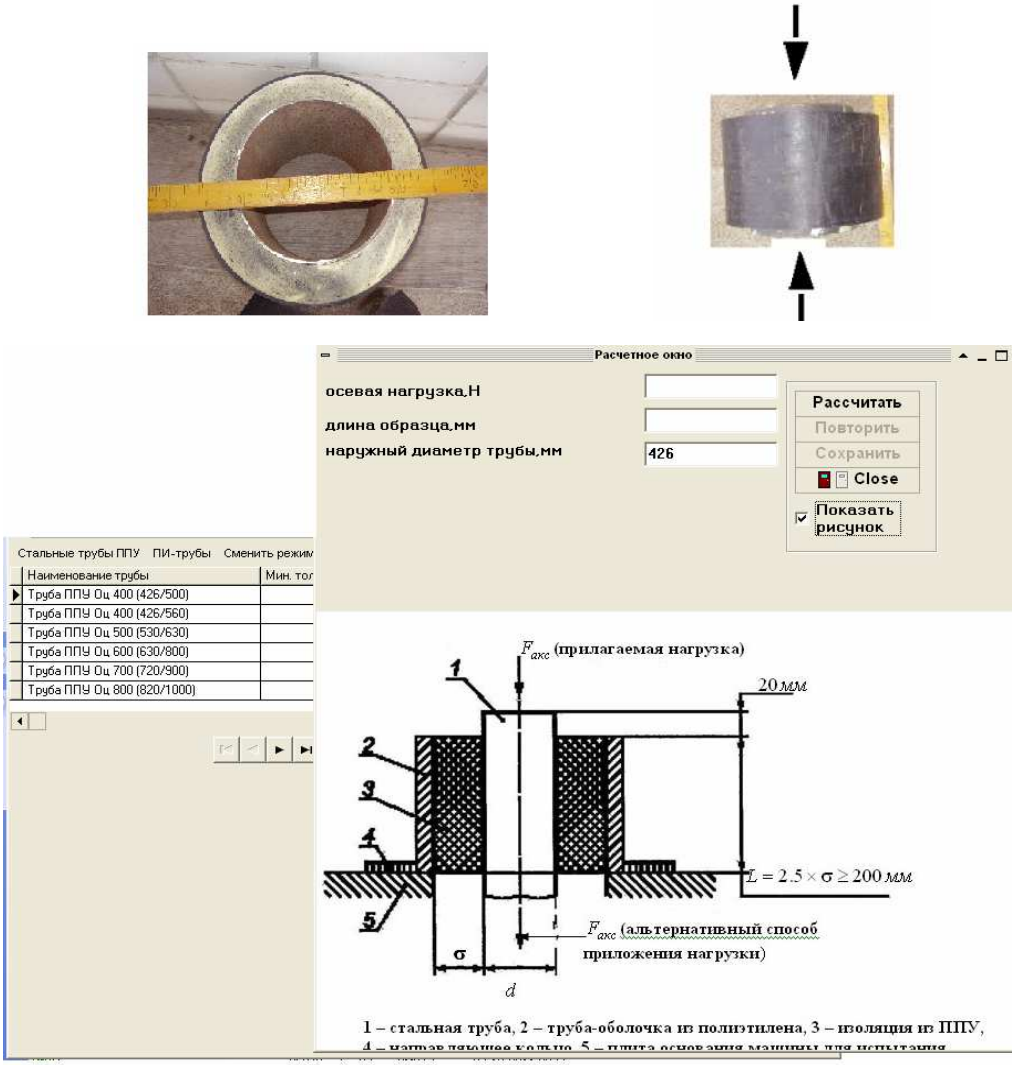
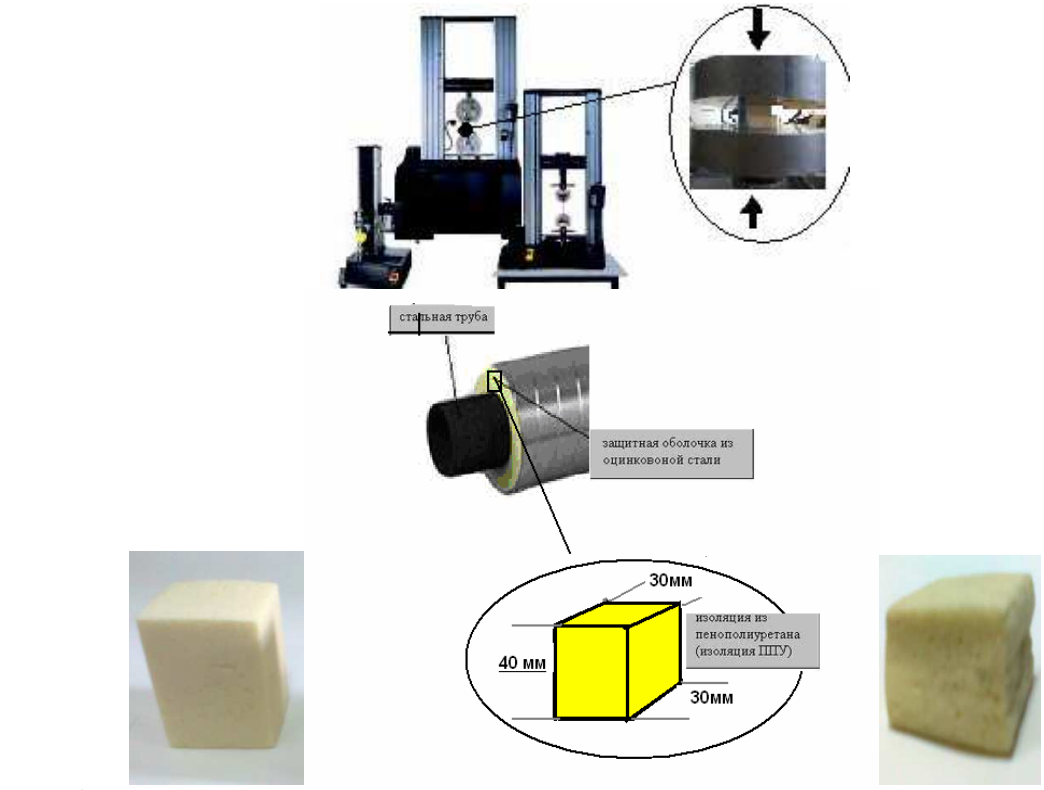


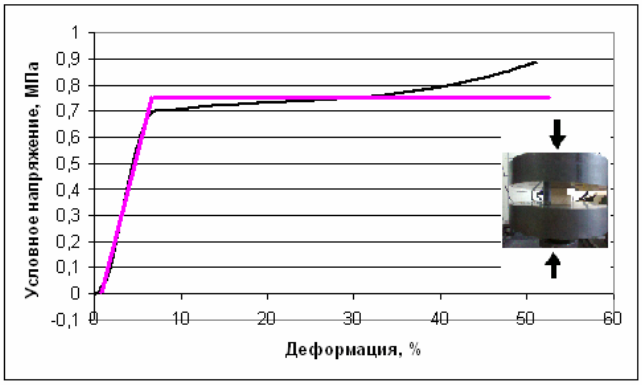
Рис. 6. Определение прочности на сдвиг в осевом направлении (Труба Ст 219х6 1-ППУ-ПЭ ГОСТ 30732-2006)



ППУ до испытаний *после испытаний*

Рис. 7. Испытательная машина INSTRON 5567 для статических испытаний материалов на растяжение, сжатие, изгиб

Аналогично описанной в работе [3] методике проводились эксперименты для труб с ППУ изоляцией. Были также построены зависимости «напряжение – деформация» для материала изодяции ППУ, показанные на рисунке 8. Видно, что линейность указанных зависимостей сохраняется до деформаций 6 %, модуль упругости $E = 11{,}6\,МПа$ после чего имеет место выраженный горизонтальный участок (до деформации 25-30 %). Теоретически эти диаграммы можно описать в виде моделей А.А. Илбюшина $\sigma = E\varepsilon(1-\omega)$, где значение функции $\omega(\varepsilon)$ зависит от диаграммы сжатия и меняется в пределах $0 \le \omega(\varepsilon) \le 1$. На рисунке 8 представлена схематизированная диаграмма сжатия и экспериментальные результаты для $\sigma = E\varepsilon, \omega = 0$ при $0 \le \varepsilon \le \varepsilon_T$ и $\sigma = \sigma_T$, $\omega = 1 - \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon}$.



- экспериментальные результаты; ——*теоретическая модель*

Рис. 8. Диаграмма испытания материала ППУ на сжатие

Далее происходит ужесточение материала, обусловленное смятием и закрытием пор, что проявляется в нелинейном возрастании сжимающего усилия (напряжения).

На основании экспериментальных результатов была реализована автоматизированная методика расчета на прочность образцов с ППУ, а также проведены испытания на водопоглощение в соответствии с ГОСТ 30732-2006 и определение адгезионной прочности соединения теплоизолирующего материала с металлической трубой.

Нагружение образцов и построение экспериментальных зависимостей осуществлялось на испытательной машине Instron 5567 в ИММС им. В.А. Белого НАН Беларуси. Нагружение осуществлялось в диапазоне скоростей от 10 до 50 мм/мин.

Заключение. В результате выполненной работы построена автоматизированная методика определения физико-механических свойств материалов труб с ППУ и изоляцией и оболочки ПИ-труб; разработана методика проведения экспериментов (и проведены эксперименты), которая соответствует ГОСТ, а алгоритм дополнительно включает – определение плотности материала муфты и оболочки ПИ-трубы, определение процентного содержания сажи в материале оболочки ПИ-трубы, определение показателя текучести расплава (ПТР), испытания на термоусадку, статические механические испытания, определение статических механических характеристик материала трубы-оболочки, результаты испытания полиэтиленовой и оцинкованной трубы-оболочки и другие свойства, характеризующие работу системы. Разработанный подход легко можно применить на другие трубопроводные системы, использующие новые композиционные материалы.

Список использованных источников

1. Проектирование и строительство тепловых сетей бесканальной прокладки из стальных труб с индустриальной теплоизоляцией из пенополиуретана в полиэтиленовой оболочке, СП 41-105-2002 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http: //tgsv.ucoz.ru/load/normativy/sp_41_105_2002_proektirovanie_teplovykh_setej_beskanalnoj_prokladki_iz_stalnykh_trub_s_ppu_izoljaciej/3-1-0-4 16. – Дата доступа: 03.11.2011.

2. Batallas, M. Determining the performance of polyurethane foam pipe insulation for high temperature service / M. Batallas, H. Yih, P. Singh //Northern area western conferenc Calgary, Alberta. february 6-9, 2006. – P. 1-18.

3. Расчетно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния цилиндрических труб с учетом неоднородности материала / В. В. Можаровский [и др.] // Проблемы физики, математики и техники. – 2009. – № 1. – С. 77-82.

4. Программный комплекс контроля и диагностики сосудов и трубопроводов / В. В. Можаровский [и др.] // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2002. – № 1. – С. 28-31.

5. Концепція автоматизації процесу контролю технологічного стану промислових трубопровідних систем, посудин і резервуарів / В. В. Можаровський [та ін.] // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Інформаційні системи і мережі». – 2011. – № 699. – С. 175-184.

УДК 674.494.051.532.1

С.П. Корниенко, канд. техн. наук
П.И. Чередниченко, д-р техн. наук
Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ НИТИ С УЧЕТОМ ЗАМАСЛИВАНИЯ И ТРЕНИЯ

В статье приводятся результаты теоретического исследования процесса охлаждения формуемой нити с учетом влияния взаимодействия термодинамики и теплообмена отдельных элементарных нитей между собой, а также с окружающей средой. Показано, что испаряющаяся из замасливателя вода существенно повышает скорость охлаждения, а трение замасленной нити на 5-8 % меньше, чем незамасленной.

Ключевые слова: *формуемая нить, охлаждение, замасливание, теплообмен, трение, испарение.*

У статті наведені результати теоретичного дослідження процесу охолодження нитки, що формується з урахуванням впливу взаємодії термодинаміки і теплообміну окремих елементарних ниток між собою, а також: з

навколишнім середовищем. Показано, що вода, яка випаровується з замаслювана суттєво підвищує швидкість охолодження, а тертя замаслюваної нитки на 5-8 % менше, ніж незамаслюваної.

Ключові слова: *нитка, що формується, охолодження, замаслювання, теплообмін, тертя, випаровування.*

Theoretical experimental results of the cooling process of a filament during the spinning process taking into account the interaction between hydrodynamics and heat exchange of individual filament and environment are given in the article. It is shown that -water evaporation out of lubricant essentially rises the cooling speed, but friction of lubricated filament is 5-8% less than unlubricated filament.

Key words: *filament being spun, cooling, lubrication, heat exchange, friction, evaporation.*

Актуальность проблемы. Одним из важнейших процессов в производстве химических нитей из расплавов полимеров, определяющих структуру и свойства нитей, является процесс охлаждения нитей. От правильного проведения процесса обработки нити на данном участке зависят такие важные показатели, как равномерность по диаметру, ориентация элементарных нитей, способность к вытягиванию, качество нанесения замасливателя, а, следовательно, и качественные показатели вырабатываемой нити. Малоизученность особенностей процесса охлаждения нити приводит к тому, что в промышленности применяются одинаковые по конструкции охлаждающие устройства, как для охлаждения пучка нитей, так и для охлаждения единичных нитей, что приводит к снижению их качества и неэкономичному расходу дорогостоящего кондиционированного обдувочного воздуха [1]. В связи с этим, перед разработчиками оборудования, технологами и машиностроителями возникает необходимость создать не просто работающие устройства, а найти оптимальные или близкие к оптимальным варианты технологических режимов и параметров.

Таким образом, проблема теоретического исследования процесса охлаждения нитей с учетом влияния взаимодействия гидродинамики и теплообмена отдельных элементарных нитей между собой, а также с окружающей средой является актуальной.

Постановка задачи. Отсутствие научно-обоснованной инженерной методики проектирования охлаждающих устройств не позволяет разрабатывать охлаждающие устройства, отвечающие современным требованиям. При проектировании охлаждающих устройств возникает проблема прогнозирования влияния различных факторов на процесс формования и выбора оптимальных режимов охлаждения нитей. Достоверное прогнозирование возможно при использовании математического аппарата, адекватно описывающего реальный технологический процесс формования нити. Отсюда возникает задача разработки математической модели охлаждения движущегося пучка нитей, отображающей влияние процесса замасливания нити на охлаждение и трение движущегося пучка нитей, с учетом влияния взаимодействия гидродинамики и теплообмена отдельных элементарных нитей между собой, а также с окружающей средой.

Основная часть. Формование нитей из расплава является сложным процессом, для которого до настоящего времени не разработана достаточно полная комплексная математическая модель, которая позволила бы учесть все факторы, влияющие на температурное состояние и деформацию формуемых нитей. На существующих формовочных машинах на замасливающем устройстве комплексная нить собирается в пучок и движется затем компактным пучком до приемного устройства. С момента нанесения замасливателя в системе полимер – замасливатель происходят следующие физические процессы:

– выравнивание температуры полимер-замасливатель;

– охлаждение системы полимер-замасливатель за счет испарения летучих компонентов замасливателя;

– охлаждение пучка за счет теплопроводности после испарения летучих компонентов замасливателя;

– взаимодействие пучка и окружающей среды, влияющее на тянущее усилие.

Процесс выравнивания температур полимера и замасливателя может быть оценен следующим образом. Пусть r_n – радиус собранного пучка элементарных нитей; R – радиус пучка нитей, покрытых замасливателем.

Из сопряженных уравнений теплообмена движущейся системы полимер – замасливатель [2; 3] можно получить, опуская промежуточные уравнения, оценку расстояния пройденного пучком от точки нанесения замасливателя до точки выравнивания температур $L_{в.т}$. Тогда оценка отношения:

$$\xi_x = \frac{L_{в.т}}{r_n}$$

описывается следующими соотношениями:

$$\xi_x = -\frac{\ln\left(\frac{0,01}{A_1}\right)}{\sigma};\ \sigma = \frac{x_1^2}{\alpha x_1 + (1-\alpha)x_2}, \qquad (1)$$

где $x_1 = \frac{\rho_n C_{pn} R \cdot u_н}{\lambda_n}$; $x_2 = \frac{\rho_з C_{pз} R \cdot u_н}{\lambda_з}$; ρ_n, C_{pn}, λ_n – теплофизические параметры нити; $\rho_з$, $C_{pз}$, $\lambda_з$ – теплофизические параметры замасливателя; $x_1 = 4$ – первый корень функции I_1; α – отношение массы нити к суммарной массе полимер-замасливатель.

Порядок величины A_1 может быть определен из уравнения:

$$A_1 \int_0^R r I_0(x,r)\,dr = \int_0^{r_n} \left(T_{n_0} - T_*\right) r I_0(x,r)\,dr + \int_{r_n}^R \left(T_{з_0} - T_*\right) r I_0(x,r)\,dr,$$

где T_{n_0} – начальная температура нити; $T_{з_0}$ – начальная температура замасливателя; T_* – установившаяся температура системы полимер-замасливатель.

Для рассматриваемого случая $A_1 \sim 0(1)$, откуда $\xi_* \sim 0(10^3)$, что для рассматриваемых значений параметров полимера и замасливателя (полимер - ПКА-6, замасливатель – вода и жировая эмульсия) дает значение $L_{в.т} \approx 0$ (0,01 м).

Таким образом, длина участка выравнивания температур по сравнению с длиной участка “точка замасливания – приемное устройство” достаточна мала и при расчете теплообмена ею можно пренебречь. Тогда начальная температура системы полимер – замасливатель определяется из зависимости:

$$T_* = \frac{\alpha C_{pn} T_{n_0} + (1-\alpha) C_{pз} T_{зо}}{\alpha C_{pn} + (1-\alpha) C_{pз}}. \qquad (2)$$

Уравнение теплообмена движущейся системы пучок – замасливатель в одномерной постановке с использованием критериальных соотношений описывающих теплоотдачу за счет вынужденной конвекции и испарения, имеет вид:

$$\frac{dT_н}{dx} = -\frac{2}{\rho_\Sigma C_{p\Sigma} R u_н}\left\{\frac{\lambda_г N_{чт}}{2R}\left(T_н - T_\infty\right) + \kappa\rho_г \frac{DN_{чс}}{2R}\left(C_{нас.} - C_\infty\right)\right\}, \qquad (3)$$

а выражение для расхода испаряющегося замасливателя по длине пучка имеет вид:

$$G = \pi\rho_г \int_0^x DN_{чс}(C_{нас.} - C_\infty)dx. \qquad (4)$$

В уравнениях (3) и (4) используются следующие обозначения: $N_{чт} = KP_r^{0,3} R_e^{0,334}$ – конвективное число Нуссельта; $N_{чс} = KS_m^{0,3} R_e^{0,334}$ – диффузионное число Нуссельта;

$C_{p\Sigma} = \alpha C_{pn} + (1-\alpha) C_{pз}$ – эффективная теплоемкость системы; $\lambda_г$ – теплоемкость окружающей среды; T_∞ – температура окружающей среды; K – удельная теплота парообразования воды (T_n); $T_н$ – температура системы; ρ_m – плотность окружающей среды; D – коэффициент диффузии водяных паров; $C_{нас.}$ – концентрация насыщенных паров воды у нити; C_∞ – концентрация насыщенных паров воды в окружающей среде; $P_r = \frac{\mu_г C_{pг}}{\lambda_m}$ – число Прандля окружающей среды; $S_m = \frac{\nu_г}{D}$ – число Шмидта окружающей среды; $R_e = \frac{2u_н R}{\nu_г}$ – число Рейнольдса для пучка; – $\rho_\Sigma = \alpha\rho_n + (1-\alpha)\rho_3$ – эффективная плотность системы полимер-замасливатель.

Для определения взаимного трения замасленного пучка и окружающей среды можно воспользоваться следующим выражением [3]:

$$\frac{\tau_3}{\tau_0} = \left\{ 1 - 0{,}385\rho_г \left(\frac{\nu_г}{2R} \right)^{0{,}61} \frac{u_н^{1{,}39}}{\left[\frac{\mu_3}{R\ln(R/r_n)} u_н + 1{,}39\rho_г \left(\frac{\nu_г}{2R} \right)^{0{,}61} 0{,}385 u_н^{1{,}39} \right]} \right\}, \quad (5)$$

где τ_3 – напряжение силы трения; τ_0 – напряжение силы трения на сухой нити; μ_3 – динамическая вязкость замасливателя.

Коэффициент трения в режиме турбулентного обтекания:

$$C_f = 0{,}77 R_e^{-0{,}61}. \quad (6)$$

По предложенной модели были проведены расчеты для системы пучок нитей ПКА - 6 – замасливатель (вода 90 %, маслянная эмульсия 10 %), исходя из следующих данных:

– **для пучка нитей:** плотность – $\rho_n = 111{,}8$ кг/м^3; теплоемкость – $C_{pn} = 2464$ Дж/(кг·°К); теплопроводность – $\lambda_n = 0{,}38$ Вт/м·°К;

– **для замасливателя:** плотность – $\rho_з = 1000$ кг/м^3; теплоемкость – $C_{pз} = 4190$ Дж/(кг·°К); теплопроводность – $\lambda_з = 0{,}575$ Вт/м·°К;

– **начальные значения:** длина участка "точка замасливания – приемное устройство" – $L = 2{,}8$ м; скорость движения пучка – $u_н = 66{,}67$ м/с; температура замасливателя – $t_0 = 22$ °С; температура окружающей среды – $t_з = 24$ °С; влажность окружающей среды – $\varphi = 55 \pm 5$ %; эффективный радиус пучка – $r_n = \begin{cases} 0{,}000024 & м \\ 0{,}000031 & м \end{cases}$; начальная температура пучка – $T_{n_0} = \begin{cases} 36{,}3\ ^0C \\ 50{,}3\ ^0C \end{cases}$; отношение массы замасливателя к массе полимера – $\alpha = \begin{cases} 5\,\% \\ 50\,\% \\ 100\,\% \end{cases}$.

Расчеты по полученной математической модели показали, что, несмотря на невысокую температуру полимера, из-за большой скорости движения, вода, составляющая до 90 % замасливателя, испаряется даже при больших значениях α на небольших расстояниях от точки нанесения замасливателя. Вместе с тем, испарение воды существенно повышает скорость охлаждения. Поскольку, испаряющаяся часть замасливателя испаряется на малых длинах, влиянием вдува в пограничный слой можно пренебречь; оценка же трения на сухой и замасленной поверхности показывает, что напряжение трения на замасленной поверхности меньше на 5-8 %, чем на незамасленной.

Выводы. Полученная математическая модель позволила установить, что трение замасленной нити меньше, чем незамасленной. Также установлены теоретические зависимости для определения расхода испаряющегося замасливателя по длине пучка и температуры нити.

Список использованных источников

1. Панкеев А. М. Исследование процессов теплообмена при формовании синтетического волокна: дис. канд. техн. наук: 05.14.04 / А. М. Панкеев. – К., 1978. – 175 с.

2. Зябицкий А. Теоретические основы формования волокон: пер. с англ. / А. Зябицкий. – М.: Химия, 1979. – 504 с.

3. Разработка теоретических основ процесса теплообмена синтетических нитей при формовании: отчет о НИР (заключительный) / Черниговский государственный технологический университет. – Чернигов, 1999. – 151с. – ОЦО № ГР 0197И019282; Инв. № 02004003232.

УДК 621.002:661.666

В.А. Скачков, канд. техн. наук
В.І. Іванов, ст. наук. співробітник
Т.М. Нестеренко, канд. техн. наук
Ю.В. Мосейко, канд. пед. наук
Запорізька державна інженерна академія, м. Запоріжжя, Україна

НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНЕ УЩІЛЬНЕННЯ ПОРИСТОЇ СТРУКТУРИ ВУГЛЕЦЬ-ВУГЛЕЦЕВИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ У ПЛАСКОМУ РЕАКТОРІ

Запропоновано методику розрахунку процесу ущільнення пористої структури вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів у робочому об'ємі плаского реактора. Методика передбачає розрахунок розподілу концентрації реакційного газу (пропану) щодо довжини реактора цього типу з урахуванням його доставляння до нагрітих поверхонь ущільнюваних вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів, подальшої дифузії до їх пористої структури, а також розкладання реакційного газу з осадженням піролітичного вуглецю на стінках реактора та у пористій структурі композиційних матеріалів.

Вступ. Вуглець-вуглецеві композиційні матеріали мають значні переваги перед більшістю матеріалів щодо питомої пружності та характеристик міцності, термо- і хемостійкості, а також характеризуються низькою питомою вагою Проте поширення сфер застосування цих композиційних матеріалів значною мірою стримується їх високою ціною, головну частину якої складає вартість енергетичних витрат на їх виробництво. Найбільш тривалим технологічним циклом виготовлення зазначених матеріалів є ущільнення пористої структури карбонізованих вуглецевих композиційних матеріалів з газової фази, яке реалізують при температурі 1000…1100 °С. Так, зниження температури ущільнення пористої структури вуглецевих композиційних матеріалів до 600…700 °С під час використання зріджених газів, зокрема пропану, дозволяє знайти підхід до проблеми енергозбереження [1].

Аналіз досягнень. Питання щодо ущільнення пористої структури вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів розглянуто у роботах [2-5]. Проте у роботах [2;4;5] не враховано реальну структуру пір вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів та не виконано оцінку її впливу на процес ущільнення. У роботі [3] виконано спробу врахувати пористу структуру в процесі ущільнення вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів, причому пористу структуру було представлено ефективною пористістю з характерним радіусом усередненої пори.

Постановка завдання. Завданням цих досліджень є розробка методики розрахунку процесу ущільнення пористих вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів з урахуванням дифузії реакційного газу до реальної пористої структури цих матеріалів за умов ізотермічного нагрівання.

Основна частина досліджень. Відомо, що реальна пориста структура вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів представляється порограмою з розподілом ефективного радіусу пір у межах від декількох нанометрів до декількох сотень мікрометрів.

Для точнішого розрахунку процесів ущільнення реальних конструкцій з вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів необхідно до розрахункових моделей вводити реальну структуру пористого об'єму вказаних матеріалів.

Технологія ущільнення пористої структури вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів із газової фази може бути реалізованою як за динамічних, так і статичних умов [6].

Динамічні умови передбачають змінний тиск або змінну швидкість подавання реакційних газів. Статичні умови передбачають два основні методи ущільнення: термоградієнтний [5] та ізотермічний.

Для стаціонарного ізотермічного процесу ущільнення пористої структури диференційне рівняння дифузії реакційного газу в модельній порі з ефективним радіусом за умови його розкладання на поверхні пори має вигляд [7]:

$$\frac{d^2C}{d\ell^2} = \frac{2k}{r \cdot D} \cdot C \ , \tag{1}$$

де C – концентрація реакційного газу; ℓ – координата за довжиною пори; k – константа швидкості розкладання реакційного газу на нагрітій поверхні; r – ефективний радіус пори; D – коефіцієнт дифузії у порі.

Рівняння (1) доповнюють граничними умовами:

$$C\big|_{\ell=0} = C_0^{\Pi}; \tag{2}$$

$$\left.\frac{dC}{d\ell}\right|_{\ell=h} = 0 , \tag{3}$$

де C_0^{Π} – концентрація реакційного газу біля входу до пори; h – половина товщини ($2h$) стінки вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів.

Умова (3) передбачає, що процес ущільнення реалізується за ізотермічних умов, які забезпечують симетричні умови відносно серединної поверхні стінки матеріалу, якого ущільнюють.

Вирішення рівняння (1) з урахуванням умов (2) і (3) можна записати як

$$C(\ell) = C_0^{\Pi} \cdot \left[\frac{\exp(z \cdot \ell)}{1+\exp(2z \cdot h)} + \frac{\exp(-z \cdot \ell)}{1+\exp(-2z \cdot h)} \right], \tag{4}$$

де z – корінь характеристичного рівняння $z = (2k / r \cdot D)^{0,5}$.

Розподіл пір у вуглець-вуглецевих композиційних матеріалах характеризується пограмою, що має чотири характерні групи [8]:

– перша група пір розподілена у діапазоні розмірів ефективних радіусів від 0,001 до 0,03 мкм;

– друга група – у діапазоні 0,03…2,50 мкм;

– третя група – у діапазоні 2,50…10,0 мкм;

– четверта група – у діапазоні 10…200 мкм.

Частка пір першої групи складає 38 %, другої групи – 32 %, третьої – 19 % і четвертої – 11 %.

В об'ємі реактора реалізуються два дифузійні потоки реакційного газу: один потік спрямовано від центру реактора на безпористу поверхню його стінки, другий потік – на пористу поверхню вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу.

Потік на безпористу поверхню стінки реактора можна визначити за допомогою метода рівнодоступних поверхонь Франк-Каменецького [9]. У цьому разі концентрацію реакційного газу на поверхні реактора C_0^P можна розрахувати з використанням формули

$$C_0^P = \frac{\beta \cdot C}{\beta + k}\ , \qquad (5)$$

де C – концентрація реакційного газу в ядрі реактора; β – константа швидкості дифузії.

Співвідношення (5) враховує питому швидкість розкладання реакційного газу на безпористій поверхні стінки реактора.

На поверхні вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу реакційний газ розкладається на безпористих ділянках, дифундує до пір чотирьох груп з осадженням піролітичного вуглецю на їх поверхні.

З урахуванням викладеного концентрацію реакційного газу на пористій поверхні вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів C_0^{Π} визначають як

$$C_0^{\Pi} = \frac{\beta \cdot C}{\left[\beta + k \cdot (1 - q_n) + q_n \cdot \pi \cdot \sum_{i=1}^{N} \Omega_i\right]}\ , \qquad (6)$$

де q_n – пористість поверхні вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу;

$\Omega_i = r_i^2 \cdot D_i \cdot z_i \cdot p_i \cdot \left[\frac{\exp(-2z_i \cdot h) - \exp(2z_i \cdot h)}{2 + \exp(2z_i \cdot h) + \exp(-2z_i \cdot h)}\right]$; r_i, p_i – середній ефективний радіус і відносна частка i-ої характерної групи пористої структури вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу відповідно; N – кількість характерних груп пір (N = 4).

Розглядають плаский реактор шириною b_p і довжиною L. У центрі, між бічними стінками реактора, розташовують плоску пластину з вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу шириною b_n і товщиною $2h$. Реакційний газ (пропан) рівномірно обтікає зазначену пластину з обох боків і дифундує з центру потоку пропану до поверхонь стінок реактора та пластини вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу. Стінки реактора та пластина вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу є нагрітими до постійної температури T, за якої пропан розкладається на нагрітих поверхнях з відкладенням твердого осаду – піролітичного вуглецю – відповідно до рівняння

$$C_3H_8 \overset{k}{\Rightarrow} 3C + 4H_2\ . \qquad (7)$$

Константу швидкості розкладання у рівнянні (7) задають у вигляді співвідношення Арреніуса [10]:

$$k = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T}\right), \qquad (8)$$

де E – енергія активації процесу (7); k_0 – передекспонента; R – газова постійна.

Диференційне рівняння перенесення реакційного газу (пропану) щодо довжини плаского реактора з урахуванням його розкладання можна записати як

$$\frac{d(C \cdot U)}{dx} = -k \cdot \beta \cdot C \cdot \left[\frac{b_p}{\beta + k} + \frac{b_n}{\beta + k \cdot (1 - q_n) + q_n \cdot \pi \cdot \sum_{i=1}^{N} \Omega_i}\right], \qquad (9)$$

де U – швидкість течії реакційного газу за довжиною реактора; x – координата, спрямована за довжиною реактора від входу реакційного газу до реактора.

Рівняння (9) враховує перенесення реакційного газу щодо довжини реактора з урахуванням його розкладання на стінках реактора та у пористій структурі карбонізованих вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів.

З рівняння (7) виходить:

$$C_{C_3H_8} = C_{вх}^{C_3H_8} \cdot (1-\alpha); \quad (10.1)$$

$$C_{H_2} = C_{вх}^{C_3H_8} \cdot 4\alpha; \quad (10.2)$$

$$U = U_{вх} \cdot (1+3\alpha), \quad (10.3)$$

де $C_{вх}^{C_3H_8}$ – концентрація пропану на вході до реактора; U – швидкість подавання реакційного газу до реактора; α – питомий ступінь розкладання пропану за довжиною реактора.

Підставляючи до рівняння (9) концентрацію пропану та швидкість потоку реакційної суміші, які задано співвідношеннями (10.1) і (10.3), після нескладних перетворень можна записати

$$\frac{2(1-3\alpha)}{1-\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{dx} + \gamma = 0, \quad (11)$$

де $\gamma = \frac{k \cdot \beta}{U_{вх}} \cdot \left[\frac{b_p}{\beta + k} + \frac{b_n}{\beta + k \cdot (1-q_n) + q_n \cdot \pi \cdot \sum_{i=1}^{N} \Omega_i} \right]$.

Рівняння (11) задає ступінь розкладання пропану за довжиною реактора, яке враховує процеси осадження піролітичного вуглецю на стінках реактора та у пористій структурі пластини вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу.

Розділяючи змінні параметри у рівнянні (11) та здійснюючи інтегрування його лівої частини від 0 до α, а правої частини – від 0 до x, з урахуванням мализни питомого ступеня розкладання пропану, мають

$$\alpha(x) = \frac{(1+8\gamma \cdot x)^{0,5} - 1}{4}. \quad (12)$$

У рівняннях (5) і (6) величина константи швидкості дифузії β і константи швидкості осадження піролітичного вуглецю k є невідомими. Для визначення β необхідно експериментальним шляхом визначити швидкість виходу реакційних газів $U_{вих}$ і розрахувати граничний ступінь розкладання пропану на виході з реактора:

$$\alpha(L) = \frac{1}{3}\left(\frac{U_{вх}}{U_{вих}} - 1 \right). \quad (13)$$

Підставляючи співвідношення (13) до рівняння (12) для $x = L$ і враховуючи змінні параметри, що входять до рівняння (11), одержують

$$\beta = Q + \left(Q^2 - G\right)^{0,5}, \quad (14)$$

де $Q = F \cdot (b_p - V) + k \cdot (b_n - V)$;

$$F = k \cdot (1-q_n) + q_n \cdot \pi \cdot \sum_{i=1}^{N} \Omega_i;$$

$$G = \frac{V \cdot k \cdot F}{V - b_p - b_n};$$

$$V = \frac{U_{вх}\left[(4\alpha+1)^2 - 1\right]}{8k \cdot L}.$$

Формула (14) дає можливість визначити константу швидкості дифузії пропану від ядра реактора до поверхні розкладання.

Висновки. Розроблено методику розрахунку розподілу концентрації реакційного газу (пропану) щодо довжини плаского реактора з урахуванням його доставляння до нагрітих поверхонь, наступної дифузії до пористої структури ущільнюваних вуглець-вуглецевих

композиційних матеріалів і розкладання реакційного газу з осадженням піролітичного вуглецю на стінках реактора та вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу.

Список використаних джерел

1. Скачков В. А. Определение кинетических параметров процесса осаждения пиролитического углерода / В. А. Скачков, Р. А. Шаповалов, В. И. Иванов // Металлургия: научные труды Запорожской государственной инженерной академии. Вып. 3. – Запорожье: ЗГИА, 2000. – С. 52-55.

2. Колесников С. А. Уплотнение углеродных заготовок путем пиролиза газа в промышленных печах / С. А. Колесников, В. И. Костиков, А. М. Васильева // Химия твердого топлива. – 1991. – № 6. – С. 114-122.

3. Математические модели процессов температурной обработки и уплотнения в производстве углеродных композиционных материалов / В. А. Скачков, В. Д. Карпенко, В. И. Иванов, Е. В. Скачков // Вопросы атомной науки и техники. Вып. 4 (76). – Харьков: ННЦ «ХФТИ», 1999. – С. 3-12.

4. Гурин В. А. Газофазные методы получения углеродных и углерод-углеродных материалов / В. А. Гурин, В. Ф. Зеленский // Вопросы атомной науки и техники. Вып. 4 (76). – Харьков: ННЦ «ХФТИ», 1999. – С. 23-31.

5. Гурин В. А. Исследование газофазного уплотнения пироуглеродом пористых сред методом радиально движущейся зоны пиролиза / В. А. Гурин, И. В. Гурин, С. Г. Фурсов // Вопросы атомной науки и техники. Вып. 4 (76). – Харьков: ННЦ «ХФТИ», 1999. – С. 32-45.

6. Скачков В. А. Анализ методов газофазного уплотнения пористых углерод-углеродных композиционных материалов / В. А. Скачков // Металургія: наукові праці Запорізької державної інженерної академії. Вип. 7. – Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2003. – С. 70-77.

7. Моделювання процесу ущільнення вуглецевих композитів піровуглецем у пласкому реакторі / В. О. Скачков, В. І. Іванов, О. С. Воденінкова, О. В. Скачков // Проблеми математичного моделювання: матеріали наук.-методич. конф. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2011. – С. 101-103.

8. Байгушев В. В. Технология производства композиционных углерод-углеродных материалов электротермического назначения: дис. … канд. техн. наук / В. В. Байгушев. – Днепропетровск, 2006. – 140 с.

9. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д. А. Франк-Каменецкий. – М.: Наука, 1967. – 491 с.

10. Теснер П. А. Образование углерода из углеводородов газовой фазы / П. А. Теснер. – М.: Химия, 1972. – 136 с.

УДК 687.5:303.442

О.Б. Хребтань, канд. техн. наук
А.М. Кучинська, асистент
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ТА БЕЗПЕЧНОСТІ КОСМЕТИЧНИХ КРЕМІВ ДЛЯ РУК

Досліджено показники якості та проведено аналіз складу косметичних кремів для рук вітчизняного та зарубіжного виробництва щодо наявності небезпечних інгредієнтів. Встановлено, що крем для рук вітчизняного виробництва мав найкращі органолептичні та фізико-хімічні показники порівняно з косметичним кремом закордонного виробництва. Крім того, в імпортному зразку крему було виявлено речовини, які визнані потенційними алергенами для людини згідно з Сьомою поправкою Директиви з косметичних засобів 76/768 ЄЕС.

Исследовано показатели качества и проведен анализ состава косметических кремов для рук отечественного и зарубежного производства относительно наличия опасных ингредиентов. Установлено, что крем для рук отечественного производства имел наилучшие органолептические и физико-химические показатели в сравнении с косметическим кремом заграничного производства. Кроме того, в импортном образце крема были обнаружены вещества, которые признаны потенциальными аллергенами для человека согласно Седьмой поправке Директивы из косметических средств 76/768 /ЕЭС.

Indicators of the quality of cosmetic creams for hands have been investigated. The analysis of the composition of cosmetic creams for hands of domestic and foreign manufacture on the presence of hazardous ingredients have been investigated. It is established, that the hand cream of the domestic production had the best organoleptic and physical-chemical indicators in comparison with cosmetic cream overseas production. In addition, in the import sample cream were discovered substances, which are recognised as potential allergens for a man, according to the Seventh amendment of the Directive of cosmetics 76/768 /EEC.

Постановка проблеми. Косметичні товари – це комплекс виробів по догляду за шкірою людини, волоссям, порожниною рота та зубами та ін., які використовуються з метою надання гігієнічного, лікувально-профілактичного ефекту, усунення незначних дефектів, попередження передчасного старіння тощо.

Специфічність косметичних товарів полягає в тому, що ці товари безпосередньо контактують з тілом людини. Особливо це стосується такої групи косметичних товарів, як креми. Косметичні креми повинні виготовлятися відповідно до вимог діючих нормативно-технічних документів, які узгоджені з Міністерством охорони здоров'я України та технологічними регламентами щодо санітарних норм і правил.

Вітчизняна косметична продукція має переважно лікувально-профілактичний напрям дії. Це пов'язано зі значним відсотком людей, хворих на алергію, дерматити, викликані забрудненням навколишнього середовища, незадовільним станом екології України.

У сьогоднішній товарознавчій класифікації косметичні товари поділяються на такі групи: лікувально-гігієнічні; декоративні; інші косметичні засоби.

Найбільша за обсягом та різновидами асортиментних підгруп – це група лікувально-гігієнічної косметики. Ця група поділяється на такі підгрупи:

- засоби по догляду за шкірою;
- засоби по догляду за порожниною рота та зубами;
- засоби по догляду за волоссям.

Основний вид косметичних засобів з підгрупи засобів по догляду за шкірою – це креми. Креми – це однорідна маса, що складається з жирових компонентів та спеціальних добавок, парфумерної віддушки та води.

Для виробництва косметичних кремів застосовують різноманітну сировину, асортимент якої постійно розширюється та оновлюється на основі сучасних досягнень медицини, хімії, дерматології, нанотехнологій. Натуральною сировиною для виробництва кремів слугують рослинні та тваринні жири, білки, мінеральні речовини, амінокислоти, вітаміни, екстракти лікувальних трав, фруктові та овочеві соки, натуральний мед, продукти бджільництва та інші активні речовини. Також для виробництва кремів використовується штучна та синтетична сировина.

За даними опитування, проведеного нами в підприємствах роздрібного продажу косметичних товарів м. Чернігова, було виявлено, що найбільшим попитом серед асортименту кремів користуються креми для обличчя та рук.

Оскільки саме руки людини відчувають найбільший вплив навколишнього середовища, несприятливих побутових факторів (холодної, гарячої води, жирів, лугу, кислот, солей тощо), то визначення якості та безпечності кремів для рук – це актуальна проблема товарознавства.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Товарознавчих досліджень якості косметичних кремів та кремів для рук, зокрема, проводилося в Україні дуже мало.

В основному дослідження проводяться кожною конкретною косметичною фірмою в закритому режимі. Результати таких досліджень, найчастіше, не мають широкого розголошення, а позначаються лише на споживчій тарі в маркуванні у вигляді надписів: «Продукція пройшла клінічні випробування», «Дерматологічний контроль пройдено», «Тестовано на тваринах», «Використано екологічно чисту сировину» тощо. Звичайно така інформація дуже обмежена і не дає повної характеристики показників якості та безпечності косметичних засобів, а перевірити її дуже складно та дорого для звичайного споживача.

Найбільш вагомими дослідженнями з якості та безпеки косметичних товарів є наукові дослідження вчених-товарознавців: С.А. Вілкової, Т.М. Поливанової.

Мета статті. Метою статті було дослідження показників якості та безпечності косметичних кремів для рук, які реалізуються в роздрібній торговельній мережі м. Черні-

гова. Порівняти властивості кремів вітчизняного та іноземного виробництва. Виявити небезпечні інгредієнти у складі кремів та зробити висновки щодо досліджуваної косметичної продукції.

Виклад основного матеріалу. За складом та консистенцією креми для рук, в основному, випускають емульсійними. Специфічність емульсійних кремів полягає в тому, що вони не містять великої кількості води. До їх складу входять жиро- і водорозчинні біологічно активні речовини: вітаміни, настоянки та екстракти лікарських трав. Завдяки такому компонентному складу емульсійні креми не тільки живлять, але й зволожують шкіру рук. Саме ця особливість емульсійних кремів є найціннішою, адже однією з причин старіння шкіри є втрата нею вологи внаслідок дії мийних засобів, лужних розчинів, тривалої дії холоду, вітру, сонця.

Сьогодні виділяють два типи емульсійних кремів:

- вода-жир;
- жир-вода.

У кремах типу вода-жир краплі води зважені у жировому середовищі, а в кремах типу жир-вода краплі жиру зважені у воді. Саме від типу емульсійного крему залежить – для якого типу шкіри він буде застосовуватися: сухої, нормальної, жирної та ін.

Емульсійні креми всіх типів швидше та глибше вбираються шкірою, мають високу ефективність, не залишають на шкірі жирного блиску, відчуття масності.

Нами були відібрані два зразки косметичних кремів для рук, які користувалися найбільшим попитом серед споживачів у відділах косметичних товарів торгівельних підприємств «Квартал» та «Союз» м. Чернігова.

Характеристики упакування та маркування зразків кремів для рук та їх зовнішній вигляд представлені в (табл. 1 та на рис. 1).

Таблиця 1

Характеристика упакування та маркування досліджуваних косметичних кремів для рук

Найменування показника, відповідність НТД*	Зразки досліджуваних кремів	
	1	2
	Крем для рук денний серії «Эколлабио»	Крем для рук з біфідокомплексом GARNIER HEND
1	2	3
Вид пакування, дефекти. Відповідність ДСТУ 5010:2008	1. Зовнішнє споживче упакування – картонна коробка з верхнім і нижнім клапанами, літографічним оформленням, без деформації, наскрізних та інших пошкоджень, не забруднене. 2. Внутрішнє споживче упакування – полімерна туба з гвинтовим ковпачком, літографічним оформленням. Пакування цілісне, без дефектів, не забруднене	1. Споживче упакування – полімерна туба з гвинтовим ковпачком, літографічним оформленням. Пакування не забруднене, без деформації, механічних пошкоджень
Маркування на пакуванні. Відповідність ДСТУ 5010:2008	Інформація на маркуванні повністю відповідає вимогам ДСТУ 5010:2008. Не містить особливих застережних заходів. Додаткова інформація розміщена на листівці-вкладиші на зовнішній стороні упаковки. Маркування на пакуванні чітке, контрастне (чорні літери на білому фоні), добре сприймається під час читання	Інформація на маркуванні повністю відповідає вимогам ДСТУ 5010:2008. В інформації маркування не вказаний нормативний документ, згідно з яким виготовлено виріб, що відповідає примітці 4 ДСТУ 5010:2008. Особливі застережні заходи – не наносити на обличчя. Маркування виконано дрібними літерами темно-зеленого кольору, які не чітко розрізняються на зеленому фоні туби. Склад крему нанесений дрібним шрифтом, що ускладнює його сприйняття споживачами

Продовж. табл. 1

1	2	3
Виробник	ТОВ «ЕКОЛЛА», Україна, м. Донецьк	Л Орель Продукціон Дойчланд ГмбХ, Німеччина
Об'єм, мл	90 мл	75 мл
Термін придатності	24 місяці	36 місяців
Призначення	Денний зволожуючий, пом'якшуючий	Зволожуючий, утримує вологу в шкірі, ефективний протягом 24 годин

*Примітка: НТД – нормативно-технічний документ на продукцію.

Зовнішній вигляд зразків кремів наведений (рис. 1).



Рис. 1. Зовнішній вигляд зразків досліджуваних кремів для рук

Результати органолептичних та деяких фізико-хімічних досліджень кремів для рук наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняльна характеристика органолептичних та фізико-хімічних показників дослідних зразків косметичних кремів для рук

Найменування показника*	Крем для рук денний серії «Эколла-био»	Крем для рук з біфідокомплексом GARNIER HEND
Зовнішній вигляд	Однорідна маса без сторонніх включень	Однорідна маса без сторонніх включень
Колір	Білий, без відтінків	Білий з блакитним відтінком
Запах	Має неприємний відтінок запаху ліків	Запах приємний, квітковий
Спроможність увібратися	Повільно убирається (за 20 хвилин), не залишає жирного блиску	Дуже погано убирається (після години нанесення починає убиратися), залишає добре помітний жирний блиск
Стягуючий ефект, відчуття сухості	Має слабкий стягуючий ефект, не сушить шкіру	Відсутній стягуючий ефект, не сушить шкіру
Подразнююча дія	Відсутня	Легкий свербіж, який згодом зникає
Зволожуючий та пом'якшуючий ефект	Пом'якшує шкіру рук, з'являється відчуття пружності	Шкіра після убирання крему масна, з'являється неприємне відчуття набряклості
Водневий показник pH	7,07	7,95
Масова частка вологи та летких речовин, %	86,65	79,90
Колоїдна та термостабільність	Стабільний	Стабільний

*Примітка: порівняння показників дослідних кремів проводилося згідно з вимогами ДСТУ 4765-2007.

Як бачимо з таблиці 2, крем для рук торгової марки GARNIER HEND виявив найгірші показники як за органолептичними, так і за фізико-хімічними показниками порівняно з кремом «Эколла-био». Найголовніші органолептичні показники крему, завдяки яким виконується їх основна функція – зволоження, пом'якшення, у дослідного крему GARNIER HEND були на низькому рівні і, навіть, викликали неприємні відчуття. Також не сприяло високій якісній оцінці крему його погане убирання шкірою. Отже, при відповідності стандартним вимогам фізико-хімічних показників обох зразків косметичних кремів для рук їх органолептичні показники дуже різнилися. За оцінкою споживачів, більш якісним був визнаний крем для рук «Эколла-био».

Безпека косметичних кремів залежить, в першу чергу, від безпеки та якості сировини. Вимоги безпеки до косметичних кремів регламентуються Директивою з косметичних засобів 76/768 ЄЕС [3], зокрема, додатками 2-7 та ДСанПін 2.2.9.027 – 99 [4]. Згідно з цими документами при визначенні безпеки та якості косметичних виробів необхідно враховувати токсикологічні властивості, хімічну основу, мікробіологічні характеристики та ступінь впливу на організм людини речовин, які входять до складу косметичного засобу.

Для перевірки безпечності зразків косметичних кремів для рук ми спочатку проаналізували склад цих косметичних засобів за даними маркування. Поряд з відомими природними складовими (вода, ефірні масла та екстракти рослин), у косметичні креми входили хімічні сполуки, які не відомі широкому загалу споживачів. Характеристики хімічних компонентів, які входили до складу дослідних зразків косметичних кремів, наведені в таблиці 3 та 4.

Таблиця 3

Характеристика хімічних компонентів у зразках косметичних кремів для рук серії «Эколла-био»

Компонентний склад денного крему для рук серії «Эколла-био»	Характеристика хімічного складу та особливості дії в косметичному засобі
Цетеарол	Октаноат цетеарол – органічне масло. Має антиоксидантні властивості, збалансовує рівень pH, консервант. Застосовується як масляний компонент у кремах, зволожує та пом'якшує шкіру
Ізопропіл-мірістат	Ізопропиловий ефір мірістинової кислоти, складний ефір. Пом'якшує шкіру, добре поєднується з усіма інгредієнтами косметичних кремів
Циклометикон	Циклопента-силоксан – кондиціонер. Швидко розподіляється, пом'якшує шкіру, надає шовковистості, зволожує
ПЕГ – 400	Оксид етилену з етиленгліколем, речовина подібна до воску, нетоксичний, має високу здатність до розчинення
Метилпарабен	Метил 4-гідроксибензоат – метиловий ефір пара-оксибензонової кислоти. Консервант, пригнічує розвиток грам-позитивних бактерій, може викликати алергічну реакцію на поверхні шкіри
Дінатрій ЕДТА	Дінатрієва сіль етилендіамінтетра-оцтової кислоти
Бронопол	2-бром-2-нітропропан-1,3-діол – консервант, має біоцидну активність. Під час взаємодії з деякими амінами Бронопол може утворювати нітрозаміни, а при розкладі (при закінченні терміну придатності крему) виділяє формальдегід
Пропілпарабен	Пропіловий ефір парагідроксибензонової кислоти. Консервант, може викликати алергію, подразнення шкіри

Таблиця 4

Характеристика хімічних компонентів у зразках косметичних кремів для рук з біфідокомплексом GARNIER HEND

Компонентний склад крему для рук з біфідокомплексом GARNIER HEND	Характеристика хімічного складу та особливості дії в косметичному засобі
Glycerin*	1,2,3-триоксипропан, трьохатомний спирт. Розчиняє органічні та неорганічні речовини в кремах, пом'якшує, стабілізує структуру крему
Dimethicone	Полідіметілсилок-сан – силіконовий полімер. Надає шкірі водовідштовхувальних властивостей, попереджає подразнення, пом'якшує
PEG – 100	Складний ефір стеаринової кислоти. Підвищує адгезію крему до шкіри, надає гладкості, зволожує
Phenoxyethanol	Монофеніловий ефір етиленгліколю – консервант, має антибактеріальні властивості, антисептик, зберігає хімічну формулу косметичного виробу. Має канцерогенну дію, негативно впливає на центральну нервову систему людини
Methylparaben	Метил 4-гідроксібензоат – метиловий ефір пара-оксибензонової кислоти. Консервант, пригнічує розвиток грам-позитивних бактерій, може викликати алергічну реакцію на поверхні шкіри
Linalool	Різновид терпенового спирту, може викликати алергію
Carbomer	Поліакрилат. Нормує в'язкість кремів, зволожує шкіру, має заспокійливу здатність
Benzyl Salicylate	Ефір бензилового спирту та саліцилової кислоти. Використовується в кремах як ароматизатор та має поглинаючу здатність до ультрафіолетового випромінювання. Під час дії сонячного світла проявляє алергенні властивості
Citral	Монотерпеновий ациклічний альдегід. Е-ізомер – гераніаль має концентрований запах лимону, використовується як ароматизатор та антисептик
Fragrance (F.I.L. B 40319/1)	Парфумерна композиція

*Примітка: допускається за ДСТУ 5010:2008, згідно з пп. 5.1.3.5.

Як бачимо з таблиці 3, до складу досліджуваних косметичних кремів для рук входила велика кількість синтетичних хімічних інгредієнтів, які здебільшого мали алергічні, подразнюючі властивості, а деякі небезпечні канцерогенні властивості.

Особливо небезпечними серед складових косметичних кремів виявилися: Phenoxyethanol, Метилпарабен, Linalool, Бронопол, Пропілпарабен, Benzyl salicylate. Найбільшу кількість небезпечних інгредієнтів мав зразок крему «Эколла-био» – 4 компоненти, зразок крему GARNIER HEND з біфідокомплексом мав три небезпечні компоненти у складі.

Окремо хотілося б розглянути властивості *парабенів*, які входили до складу обох досліджуваних зразків косметичних кремів для рук.

Парабени – це речовини, які отримують під час етерифікації парагідроксібензонової кислоти відповідними спиртами. Парагідроксибензонову кислоту одержують реакцією Колбе-Шмітта з феноляту калію та окису вуглецю. Застосовують парабени та їх солі для косметичних засобів як консерванти бактерицидних та фунгіцидних властивостей.

Загальна хімічна формула парабенів зображена на рисунку 2.

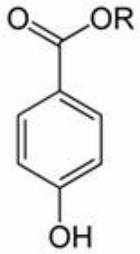


Рис.2. Загальна хімічна формула парабенів

Як бачимо з формули, парабени – це складні ефіри парагідроксібензонової кислоти, де R – алкільний замісник.

Парабени швидко вбираються шкірою людини та утворюють метаболіти: р-гідроксігиппурова кислота (М 1), р-гідроксібензонова кислота (pHBA), р-гідроксібензоновий глюкуронід (М 3), р-карбоксіфунілсульфат (М 4). За результатами наукових досліджень [5; 6] було встановлено, що перевищення вмісту парабенів у складі косметичних кремів можуть викликати алергічні подразнення, контактний дерматит та купероз. Також було виявлено, що метілпарабен у складі кремів для шкіри взаємодіє з ультрафіолетовими променями, що прискорює старіння шкіри [7].

У березні 2005 року набула чинності Сьома поправка до Директиви з косметичних засобів 76/768 ЄЕС, в якій, зокрема, наведено перелік інгредієнтів, що є потенційними алергенами. Нами було виявлено, що у дослідному зразку крему для рук GARNIER HEND є речовини, які зазначені у цьому переліку, а саме: Linalool, Benzyl Salicylate, Citral. В Україні вимоги Директиви з косметичних засобів 76/768 ЄЕС та Сьома поправка – не обов'язкові, адже Україна не входить до ЄС. Але вітчизняним виробникам косметичних засобів необхідно більш ретельно виконувати вимоги національних стандартів, рекомендацій дослідницьких центрів Міністерства охорони здоров'я України.

Висновки.

1. Зразки косметичних кремів для рук відповідали вимогам ДСТУ 5010:2008 щодо упакування та маркування. У зразка крему GARNIER HEND маркування виконано дрібними літерами темно-зеленого кольору, які не чітко розрізняються на зеленому фоні туби. Склад крему нанесений дрібним шрифтом, що ускладнює його сприйняття споживачами. Також споживачам, які за фахом не хіміки, дуже важко зрозуміти сутність хімічних назв інгредієнтів косметичного крему, виконаних іноземною мовою.

2. У результаті перевірки органолептичних та деяких фізико-хімічних показників дослідних косметичних кремів було виявлено, що крем для рук торгової марки GARNIER HEND найгірший як за органолептичними, так і за фізико-хімічними показниками порівняно з кремом «Эколла-био». Найголовніші органолептичні показники крему, завдяки яким виконується їх основна функція – зволоження, пом'якшення, у дослідного крему GARNIER HEND були на низькому рівні і, навіть, викликали неприємні відчуття. Також не сприяло високій якісній оцінці крему його погане убирання шкірою. Отже, при відповідності стандартним вимогам фізико-хімічних показників обох зразків косметичних кремів для рук їх органолептичні показники дуже різнилися. За оцінкою споживачів, більш якісним був визнаний крем для рук «Эколла-био».

3. Як виявили проведені нами дослідження, до складу косметичних кремів для рук входила велика кількість синтетичних хімічних інгредієнтів. Особливо небезпечними серед складових косметичних кремів виявилися: Phenoxyethanol, Метилпарабен, Linalool, Бронопол, Пропілпарабен, Benzyl salicylate. Найбільшу кількість небезпечних інгредієнтів мав зразок крему GARNIER HEND з біфідокомплексом – 5 компонентів, зразок крему «Эколла-био» мав два небезпечні компоненти у складі (Метилпарабен, Пропілпарабен).

4. Для забезпечення високої якості та безпечності косметичних виробів вітчизняного виробництва та імпортної продукції необхідно ретельно дотримуватися вимог відповідних стандартів, рекомендацій МОЗ України та регулярно проводити опитування споживачів, думка яких є найважливішою як для виробників, так і для торгівлі.

Список використаних джерел

1. Продукція парфумерно-косметична. Пакування, маркування, транспортування і зберігання ДСТУ 5010:2008. – [Чинний від 2009-01-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2009. – 6 с. – (Національні стандарти України).

2. ДСТУ 4765:2007. Креми косметичні. Загальні технічні вимоги. – [Чинний від 2009-01-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2009. – 12 с. – (Національні стандарти України).

3. Директива з косметичних засобів 76/768 ЄЕС.

4. ДСанПін 2.2.9.027–99 «Санітарні правила та норми безпеки продукції парфюмерно-косметичної промисловості».

5. Harvey P.W., Everett D.J. «Significance of the detection of p-hydroxybenzoic acid (parabens) in human breast tumours». - Journal of Applied Toxicology Volume 24, Issue 1, pages 1-4 January/February, 2004 DOI : 10. 1002/jat. 957. PMID 14745840.

6. Osamu Handa, Satoko Adachi, Tomohisa Takagi. Methylparaben potentials UV-induced damage of skin keratinocytes. – Toxicology, 3 October, 2006, pages 35-40.

7. Yoshinori Okamoto, Tomohiro Hayashi, Shinpel Matsunami. Combined activation of methylparaben by light irradiation and esterase metabolism toward oxidative DNA damage. – Chemical Research in Toxicology 21 (8), July 26, 2008, pages 15-21.

РОЗДІЛ ІІІ. ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ І АВТОТРАНСПОРТУ

УДК 621.9.01:658.564

Ю.В. Петраков, д-р техн. наук
Ю.В. Тишкевич, аспірант
НТУУ «КПІ», м. Київ, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ РІЗАННЯ ПРИ ФРЕЗЕРУВАННІ КІНЦЕВОЮ ФРЕЗОЮ

У статті викладена методика вирішення нелінійної задачі оптимізації для операції фрезерування кінцевими фрезами. Представлена прикладна програма, що дозволяє автоматично визначити оптимальний режим фрезерування для десяти видів оброблюваних матеріалів і п'яти марок інструментальних матеріалів кінцевих фрез. Встановлено, що залежність продуктивності від глибини припуску і ширини обробки має екстремальний характер, що дозволяє призначати оптимальні сполучення цих параметрів під час проектування управляючої програми верстата з ЧПУ за допомогою CAM систем.

Вступ. Операція фрезерування кінцевою фрезою часто використовується для оброблення 3D поверхонь різних деталей на верстатах з ЧПК. При технологічній підготовці такої операції використовують інтегровані CAD/CAM системи, що дозволяють отримати управляючу програму оброблення у G-кодах. Всі відомі системи автоматизованої підготовки управляючих програм вимагають від технолога-програміста завдання багатьох параметрів майбутнього процесу різання і не дають жодних рекомендацій для вибору таких параметрів [1]. Отже, технолог-програміст під час вирішення такого надважливого завдання користується довідниками, власним досвідом або, в найкращому випадку, рекомендаціями фірми-виробника інструменту. Проте саме від призначеного режиму різання залежить продуктивність операції і виконання всіх вимог за якістю деталі.

Наприклад, під час проектування операції фрезерування 3D поверхонь на верстаті з ЧПК перед технологом-програмістом постає проблема: як швидше обробити заготовку – за один чи два проходи, або за більшу кількість проходів (рис. 1)? Найчастіше така проблема вирішується вибором одного проходу, що при «ручному» призначенні режиму різання приводить до значних втрат продуктивності. Такий стан не може задовольняти сучасне виробництво, коли верстат з ЧПК може реалізовувати будь-який режим різання (звичайно, в обмеженому конструкцією діапазоні), а його можливості не використовуються.

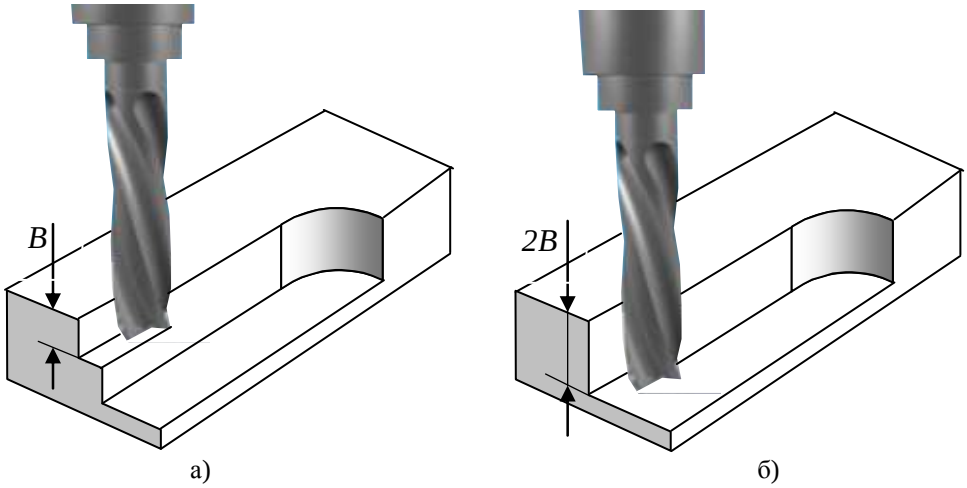


Рис. 1. Фрезерування кінцевою фрезою:
а) на ширину B – за два проходи; б) на ширину 2B – за один прохід

Крім того, відомо, що будь-який процес різання є квазістаціонарним і для ефективного управління необхідно послідовно вирішувати три завдання: 1) стабілізація умов різання; 2) оптимізація процесу; 3) корекція формоутворюючої траєкторії [1]. Саме вирішенню другого завдання під час фрезерування кінцевими фрезами і присвячена ця стаття.

Постановка проблеми. Під час оброблення деталей на сучасних верстатах з ЧПК задача оптимізації може бути сформульована таким чином [2]. Знайти таке поєднання складових режиму різання, коли основний час буде мінімальним, а всі обмеження за конструктивними параметрами верстата, заданою стійкістю інструмента, якістю обробленої поверхні будуть виконані.

Вирішення задачі. Сформульована задача оптимізації зведена до однокритеріальної, розв'язок якої знаходять, відшукуючи такі невід'ємні значення управляючих впливів (подачі S і частоти n обертання шпинделя інструмента) при задоволенні всім обмеженням, що доставляють мінімум критерію оптимальності – основному часу t_o. Таким чином, для випадку фрезерування кінцевою фрезою оптимізаційна математична модель може бути виражена наступною системою рівнянь і нерівностей.

Зв'язок між управлінням S і n та періодом T стійкості інструмента, що визначають його різальну спроможність, одержують за відомою з теорії різання залежністю:

$$V = \frac{\pi D n}{1000} = \frac{C_v D^{q_v} k_v}{T^m H^{x_v} S_z^{y_v} B^{u_v} z^{p_v}},$$

звідки:

$$n S_z^{y_v} = \frac{1000 C_v D^{q_v} k_v}{\pi D T^m H^{x_v} B^{u_v} z^{p_v}} = \frac{318 C_v D^{q_v - 1} k_v}{T^m H^{x_v} B^{u_v} z^{p_v}}. \quad (1)$$

Оскільки всі залежності, що складають математичну модель, є емпіричними, слід не забувати про розмірності фізичних величин, що до них входять. Традиційно ці розмірності не відповідають СІ розмірностям. Так, у залежності (1) частота обертання – n (об/хв), подача – S_z (мм/зуб), глибина різання – H (мм), період стійкості – T (хв), діаметр інструмента – D (мм), ширина фрезерування – B (мм), кількість зубців фрези – z, коефіцієнти і показники емпіричної залежності швидкості різання від режиму обробки – C_v, k_v, x_v, y_v, u_v, q_v, m, p_v.

Потужність різання N_p (кВт):

$$N_p = \frac{P_z V}{6 \cdot 10^4} = \frac{P_z \pi D n}{1000 \cdot 6 \cdot 10^4} = \frac{C_p H^{x_{Pz}} S^{y_{Pz}} B^{u_{Pz}} z \cdot k_{Pz} \pi D n}{1000 \cdot 6 \cdot 10^4 \cdot D^{q_{Pz}} \cdot n^{w_{Pz}}} \le N_{cm} \eta,$$

звідки:

$$n^{1-w_{Pz}} \cdot S_z^{y_{Pz}} \le \frac{6 \cdot 10^7 N_{cm} \eta}{C_{Pz} H^{x_{Pz}} B^{u_{Pz}} z \cdot k_{Pz} D^{1-q_{Pz}} \pi} = \frac{1.91 \cdot 10^7 N_{cm} \eta}{C_{Pz} H^{x_{Pz}} B^{u_{Pz}} z \cdot k_{Pz} D^{1-q_{Pz}}}, \quad (2)$$

де N_{cm} – ефективна потужність верстата у кВт, η – коефіцієнт корисної дії, C_{Pz}, k_{Pz}, x_{Pz}, y_{Pz}, u_{Pz}, q_{Pz}, w_{Pz} – коефіцієнти і показники емпіричної залежності сили різання від режиму фрезерування.

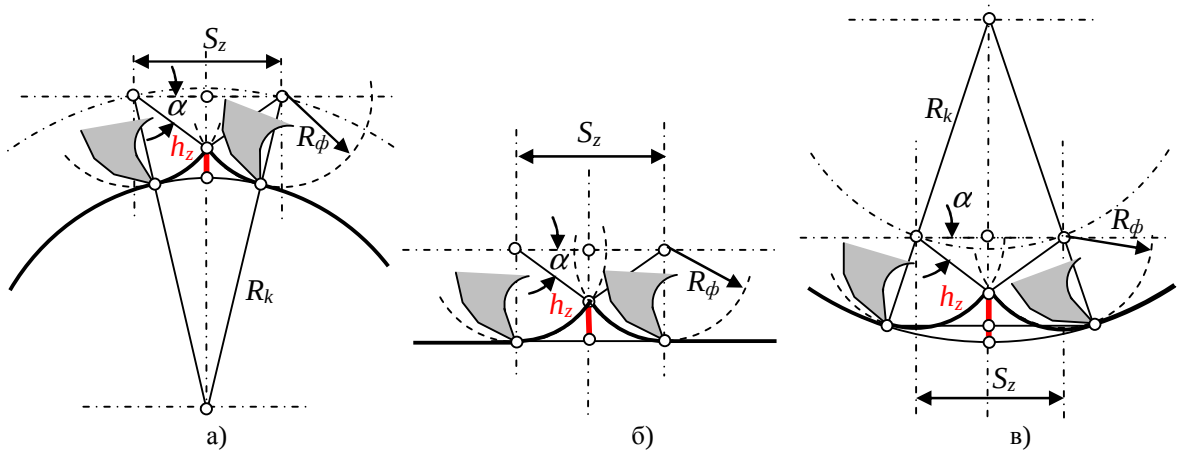
Принципіальна кінематична схема при фрезеруванні базується на об'єднанні двох рівномірних рухів: обертального і поступального, які відбуваються в площині, перпендикулярній до осі фрези. Тому траєкторія відносного робочого руху будь-якої точки леза є подовжена циклоїда (трохоїда). Висота трохоїди дорівнює діаметру фрези, а відстань між її петлями дорівнює шляху, який проходить деталь за один оберт фрези. Траєкторія руху лез окремих зубів зсунуті одне відносно одного на відстань S_z, що дорівнює S/z. При відношенні швидкості руху деталі до швидкості обертання фрези, які мають місце при фрезеруванні, дуга трохоїди за формою ненабагато відрізняється від дуги

кола. Тому трохоїду можна замінити колом з діаметром, який дорівнює діаметру фрези. При цьому похибка від вказаної заміни в реальних умовах не буде перевищувати 1%.

Максимальна висота гребінця, що утворює детерміновану складову h_z мікрорельєфу при фрезеруванні, може бути визначена за геометричними співвідношеннями (рис. 2), де показані два положення зуба фрези при обробці поверхонь різної кривизни. Причому, оскільки центр фрези рухається за формоутворюючою траєкторією з певною подачею, то подача S_z на зуб визначається також за цією траєкторією. Отже, при фрезеруванні випуклої або увігнутої поверхні:

$$h_z = \sqrt{\left(R_к \pm R_ф\right)^2 - \left(S_z/2\right)^2} \mp R_к - R_ф Sin\alpha, \qquad (3)$$

де верхні знаки – при фрезеруванні випуклої поверхні, нижні – увігнутої, $R_к$ – радіус кривизни (випукла поверхня – знак «+» увігнута – знак «–»), $R_ф$ – радіус фрези, – подача на зуб фрези, кут $\alpha = \arccos\left(S_z / 2R_ф\right)$.



а) б) в)

Рис. 2. До визначення шорсткості:
а) випукла поверхня; б) площина; в) увігнута поверхня

При фрезеруванні плоскої поверхні висота h_z розраховується за залежністю:

$$h_z = R_ф - \sqrt{R_ф^2 - \left(S_z/2\right)^2}\ . \qquad (4)$$

З рівнянь (3) і (4) залежно від фактичної кривизни поверхні у місці, що обробляється, можна визначити обмеження, яке накладається на подачу на зуб S_z залежно від параметра R_z шорсткості поверхні:

$$s_z \le [s_{Rz}]_{доп}. \qquad (5)$$

Обмеження за міцністю інструмента може бути визначене за емпіричною залежністю, яка рекомендована в [3]:

$$[S_z]_{ін.доп} = C\frac{D^{5.21}}{\left(Bz\sqrt{kl^2} + D^2\right)^{1.35} H^{1.16}}, \qquad (6)$$

де D, l, z – діаметр і довжина вильоту і кількість зубців фрези, B, H – ширина і глибина фрезерування, C, k – емпіричні коефіцієнти (наприклад, для матеріалу заготовки Сталь 30: $C = 0{,}56$; $k = 2{,}56$).

Наступне обмеження обирається з умови максимально допустимої сили подачі, що забезпечує привод верстата. Тобто складова P_x сили різання має відповідати нерівності:

$$1{,}2 \cdot P_x \le P_n, \qquad (7)$$

де P_n – максимально допустима сила привода подачі верстата.

Звідки, за відомими залежностями теорії різання, маємо таке обмеження:

$$\left[s_p\right]_{don} = \left(\frac{P_n D^{q_{Pz}} n^{w_{Pz}}}{1.2 \cdot C_{Pz} H^{x_{PZ}} B^{u_{Pz}} z \cdot k_{Pz}} \right)^{\frac{1}{y_{Pz}}}. \quad (8)$$

Під час формування обмежень, мають бути обов'язково враховані конструктивні обмеження, що визначаються за можливостями металорізального верстату:

– діапазон подач:

$$s_{min} \le s \le s_{max} \quad (9)$$

– діапазон частот обертання шпинделя:

$$n_{min} \le n \le n_{max}. \quad (10)$$

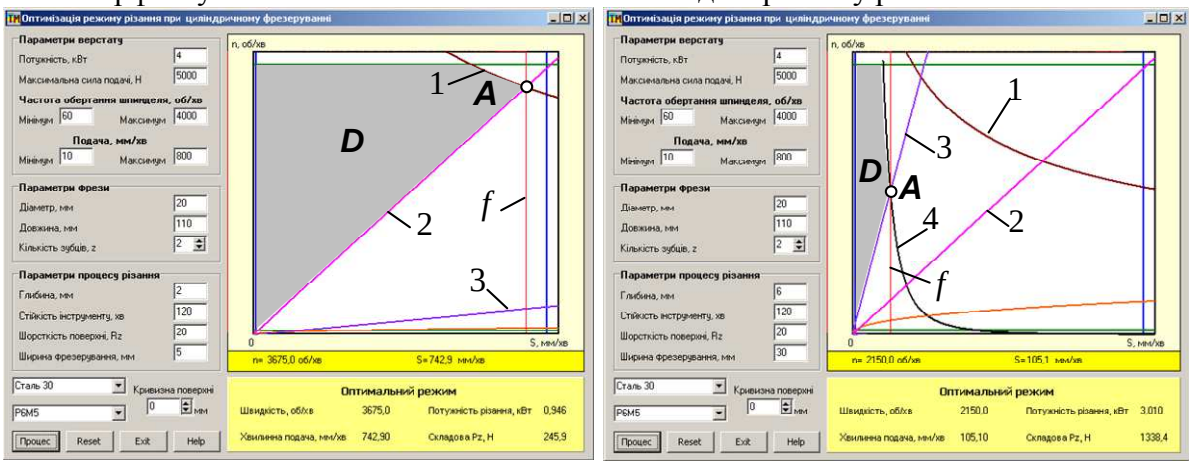
Аналіз сформульованої задачі оптимізації та визначених вище обмежень дозволяє вирішувати задачу у фазовій площині "$s_{хв} - n$", тобто хвилинна подача – частота обертання шпинделя інструмента. В такому разі у якості оцінної функції за критерієм максимальної продуктивності можна прийняти приймають:

$$f = s_{хв} \rightarrow max \quad (11)$$

оскільки при цьому основний час обробки $t_o = \rightarrow min$.

Для розв'язання задачі оптимізації була розроблена прикладна програма, ядро якої складає одержана вище математична модель (1) – (10). Емпіричні коефіцієнти і показники ступеня в математичних моделях, що застосовані, були взяті з довідника [4].

На інтерфейсі, зліва, у відповідні віконця вводяться вихідні дані верстата, інструмента і параметри процесу різання, у меню, що випадає, обирається матеріал заготовки і інструмента, кривизна поверхні і натискається кнопка «Процес» (рис. 3). Прикладною програмою передбачено використання десяти видів матеріалів заготовки і п'яти марок інструментальних матеріалів. Після цього у графічному вікні, справа, з'являються обмеження у вигляді ліній на фазовій площині "$s_{хв} - n$". При переміщенні курсору мишки у графічному вікні пересувається вертикальна лінія f, що представляє оцінну функцію (11). Для визначення оптимального режиму різання достатньо перевести мишку так, щоб ліня f торкалася справа максимально віддаленої від осі частот обертання вершини області D допустимих значень, а перехрестя курсору знаходилось на вершині (точка A на рис. 3). У такому положенні треба натиснути праву клавішу мишки і у відповідному полі інтерфейсу з'являються визначені оптимальні дані режиму різання.



а) б)

а) глибина різання 2 мм, ширина 5 мм; б) глибина різання 6 мм, ширина 30 мм

Рис. 3. Інтерфейс прикладної програми оптимізації

Для вирішення задачі визначення оптимального сполучення глибини і ширини фрезерування за допомогою створеної програми були проведені дослідження залежності оптимального режиму різання від таких параметрів фрезерування.

Відповідно до задач нелінійного програмування, оптимальна точка знаходиться на вершині області можливих значень, що найбільш віддалена від початку координат – точка *A* на рисунку 1. Як і очікувалось, при зміні вихідних параметрів процесу різання (глибини і ширини) оптимальний режим визначається перетином різних обмежень: на рис.3, *а* – точку *A* утворюють обмеження 1 – за стійкістю інструменту і обмеження 2 – за шорсткістю поверхні, а на рис. 3, *б* – точку *A* утворюють обмеження 3 – за міцністю фрези і обмеження 4 – за потужністю верстата.

Результати виконаних досліджень представлені на рисунку 4. Під час оцінювання продуктивності за максимальною швидкістю зрізування припуску ($P = BHS_{хв}$ $мм^3/хв$) була виявлена наявність екстремуму: для кожної глибини різання існує своє значення оптимальної ширини фрезерування.

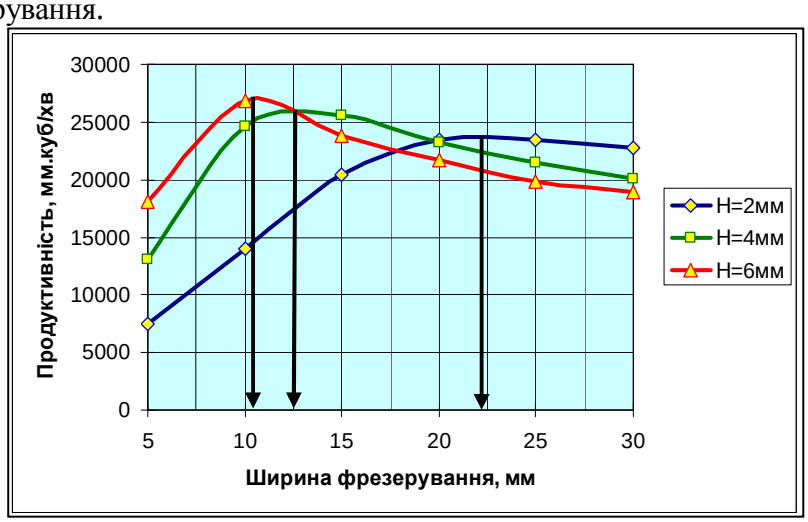


Рис. 4. Залежність продуктивності оброблення від ширини і глибини фрезерування

Аналіз отриманих результатів показує, що, наприклад, при заданій ширині фрезерування 25 мм з глибиною припуску 4 мм доцільно виконувати оброблення не за один прохід, тобто зразу на всю задану ширину фрезерування, а за два проходи (рис. 1). При цьому продуктивність оброблення підвищується у 1,2 рази. Причому, чим більша глибина припуску, тим більший виграш дає застосування оптимального режиму різання.

Крім того, оскільки розв'язок задачі оптимізації відбувається у фазовій площині "$s_{хв}$ – n" за областю, що утворена обмеженнями, якість обробленої поверхні гарантується.

Висновки.

1. Визначено аналітичні залежності висоти гребінця, що утворюється при фрезеруванні, від параметрів режиму різання і кривизни поверхні, що обробляється, які визначають обмеження за шорсткістю при розв'язанні задачі оптимізації.

2. Доведено, що залежності продуктивності фрезерування від ширини і глибини оброблення мають екстремум, що надає можливість при призначенні режиму різання для операцій фрезерування кінцевими фрезами на верстаті з ЧПУ обирати оптимальні сполучення цих параметрів.

3. Створена прикладна програма може бути рекомендована як засіб попереднього проектування управляючої програми для верстата з ЧПУ, яка автоматично визначає саме ті параметри, що вимагаються будь-якою CAM системою.

Список використаних джерел

1. Петраков Ю. В. Розвиток CAM-систем автоматизованого програмування верстатів з ЧПУ: монографія / Ю. В. Петраков. – К.: Січкар, 2011. – 222 с.

2. Петраков Ю. В. Лабораторно-комп'ютерний практикум з теорії різання / Ю. В. Петраков. – К.: Політехніка, 2006. – 190 с.

3. Гжиров Р. И. Программирование обработки на станках с ЧПУ / Р. И. Гжиров, П. П. Серебряницкий. – Л.: Машиностроение, 1990. – 588 с.

4. Справочник технолога-машиностроителя. Т. 2 / под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Суслова. – М.: Машиностроение-1, 2003. – 944 с.

УДК 658.286

Г.В. Пасов, канд. техн. наук
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ІСТОРІЯ СТАНОВЛЕННЯ ЛУЦЬКОГО АВТОМОБІЛЬНОГО ЗАВОДУ ТА ЙОГО ПЕРСПЕКТИВИ

Розглянуто історію розвитку вітчизняного заводу з випуску вантажних, легкових та спеціалізованих автомобілів Луцького автомобільного заводу. Описано основні моделі, які випускало це підприємство, та перспективи його подальшого розвитку.

Рассмотрена история развития отечественного завода по выпуску грузовых, легковых и специализированных автомобилей Луцкого автомобильного завода. Описаны основные модели, выпускаемые этим предприятием, и перспективы его дальнейшего развития.

The history of the development of the domestic plant is considered on issue of the cargo cars, passenger and specialized cars. It is described main models, which were released on this enterprise and prospects of the further its development.

Вступ. Автомобілебудівна галузь відноситься до машинобудівного комплексу. Машинобудування на території сучасної України виникло ще в середині XIX ст. Наявність металу, вигідне транспортно-географічне розташування, зокрема, вихід до узбережжя Чорного та Азовського морів, висока концентрація сільськогосподарського виробництва сприяли розвитку тут важкого, транспортного і сільськогосподарського машинобудування [7].

У переважній більшості розвинутих країн світу провідне місце у структурі транспортного машинобудування займає автомобілебудування. Україна має досить сприятливі передумови для розвитку автомобілебудування: достатнє виробництво металу, розвинута хімічна промисловість, науково-дослідна база і достатня чисельність кваліфікованих кадрів і, що дуже важливо, великий ринок збуту продукції.

В автомобілебудуванні нашої країни сформувалась чітка спеціалізація підприємств на випуск окремих типів машин. Виникнувши в силу особливостей свого розміщення у промислово розвинутих районах України, де були найбільш сприятливі умови для організації внутрішньої і міжгалузевої кооперації, автомобілебудування зараз почало розвиватися і в нових економічних районах [8; 2; 4].

Як відомо, в колишньому Радянському Союзі виробництво автотранспортних засобів розміщувалося нерівномірно (велика частина автозаводів і заводів з випуску комплектуючих виробів знаходилась в Росії). Проте майже кожна колишня республіка СРСР мала (і зберегла) монопольне виробництво якого-небудь виробу. Україна є виробником середніх міських, усіх видів туристичних та міжміських автобусів, великовантажних лісовозів, трубовозів і багатоцільових автомобілів, автонавантажувачів вантажопідйомністю 5 т і вище, а також легкових малолітражних автомобілів першої групи (типу “Таврія”) [1; 3].

Оскільки українське автомобілебудування значною мірою залежало від постачання комплектуючих з країн СНД, що виробилося ще за часів існування Союзу, то економічна самостійність зруйнувала майже всі економічні зв’язки, що привело до занепаду галузі. Так, у порівнянні з 1990 роком, випуск продукції в 1999 році скоротився майже на 87 %.

Автомобілебудування – це одна з галузей машинобудування, що належить до галузей “вільного розміщення”, на які менше, ніж на інші галузі, впливають чинники розміщення.

Спеціалізація зумовлює розширення кооперації виробництва. Автомобільні підприємства кооперуються з іншими галузями промисловості – хімічною, металургійною,

електротехнічною, текстильною та ін. Великі межі концентрації виробництва на основі спеціалізації та кооперації зумовлюють значимість транспортного чинника.

Мета статті. Основна мета статті – розглянути історію та перспективи розвитку Луцького автомобільного заводу.

Виклад основного матеріалу. Історія розвитку підприємств, напевне, один з найбільш багатовекторних процесів, який, утім, щонайяскравіше і розкриває суть становлення економічного потенціалу тієї чи іншої країни.

Луцький автомобільний завод за свою 50-річну історію став беззаперечним прикладом роботи та розвалу планової системи, невизначеності діяльності у перехідний період та поступового шляху до ринкової економіки. Часи становлення й розвитку змінювалися занепадом та кризою. Відмовки вищого керівництва, що посилалося на таку ж складну ситуацію в інших, нікому особливого оптимізму не додавали. З одного боку, власні проблеми, з другого – повна бездіяльність держави і призвели до краху багатьох у минулому потужних підприємств. ЛуАЗ вижив, і не лише вижив, а й, незважаючи на вкрай складні умови, наростив виробництво. Цього не очікували, однак колектив заводу довів, що 50-річну історію не так-то легко перекреслити.

Подолання післявоєнної розрухи дало врешті поштовх до відновлення господарського комплексу Української РСР. Кінець 40-х років стає періодом поступового зростання виробництва. Нові підприємства створюються в усіх містах. 2 лютого 1949 року Рада Міністрів УРСР приймає Постанову “Про реорганізацію міжрайонних майстерень капітального ремонту Міністерства сільського господарства УРСР у ремонтні заводи та їх будівництво”. До списку міст, в яких, на переконання вищого партійного керівництва, і необхідно створити такі заводи, потрапляє Луцьк. Розпочавши будівництво у 1951-у, місцеві чиновники уже за чотири роки змогли врешті спокійно відрапортувати: “Новий об’єкт готовий до приймання”. Не забарився і центр. 25 серпня 1955 року, згідно з наказом Міністерства сільського господарства Української Радянської Соціалістичної Республіки, Луцький ремонтний завод ввели в експлуатацію.

Відносно невеликому підприємству (у загальних масштабах промислового комплексу УРСР) зі штатом 238 чоловік, відводилася доволі значна роль. Основною продукцією заводу стають запасні частини до автомобілів ГАЗ-51 (рис. 1) та ГАЗ-63 (рис. 2), виготовляється ремонтне обладнання, що йде на потреби Міністерства сільського господарства. Уже в перші роки роботи колектив заводу привертає до себе увагу. Планові показники фактично постійно перевиконуються, а продукція, насамперед, відзначається якістю. Всі розуміють, що Луцький завод має перспективу і потребує поступового розширення. На зміни сподіваються, їх очікують.



Рис. 1. ГАЗ-51



Рис. 2. ГАЗ-63

Четверта сесія Верховної Ради Української РСР відіграє ключову роль у подальшому поступі підприємства. Приймається Закон "Про вдосконалення організації управління промисловістю і будівництвом в УРСР", а з ним постає нова система – раднаргоспів. У своїх заявах вище партійне керівництво постійно наголошує: "Система вертикального централізованого управління ліквідована, підприємствам надаватиметься більша самостійність". Чергова казка, в яку всі роблять вигляд, що повірили. У грудні 1958-го така "самостійність" чекала і на Луцький ремонтний завод. Його переводять у підпорядкування Управління загального машинобудування Львівського раднаргоспу. Адміністративний прес новостворених раднаргоспів виявляється не менш обтяжливим для підприємств, аніж регулювання колишніх міністерств.

З вересня 1959 року – нова віха у розвитку Луцького заводу. З цього дня він стає машинобудівним. Відразу змінюється і спеціалізація. Відтепер на заводі починають виготовляти кузови, автокрамниці, авторефрежератори та вироби спеціального призначення. Розпочинається нова семирічка. Виконання поставлених планів малоймовірне, однак доповіді в центр незмінні: "Усе можливо". Початок же роботи заводу вносить свої корективи. Існуючі потужності просто не дозволяють випускати продукцію за планом. Навіть діюче обладнання використовується лише частково. Вирішення проблеми знаходять відразу – створити як основні, так і допоміжні цехи. Починається і підбір кваліфікованих кадрів.

Форсовані методи для всіх звичні. Накази "зверху" не обговорюються і виконуються оперативно. Уже традиційно про можливі проблеми та недопрацювання вирішено подумати пізніше, після здачі об'єктів. Проведена реконструкція дозволяє майже в 10 разів збільшити виробничі площі – від майже 2,5 тисяч квадратних метрів у 1959-му, до більш ніж 23,5 тисяч у 1965-му році. Чиновники знову доводять, що в Радянському Союзі немає нічого неможливого. Головне – чіткий наказ.

Луцький машинобудівний починає набирати обертів. Лише протягом 1960 року на заводі освоєно випуск семи нових виробів. Із поступовим збільшенням площ розширюється і виробнича програма. Через чотири роки на заводі розпочинається випуск ремонтних майстерень і малотоннажних рефрижераторів. Швидкі темпи розвитку, як уже повелося, доволі часто приводять до виробництва насправді нікому не потрібних шедеврів. Рефрижератор, що випускається на Луцькому машинобудівному заводі, стає яскравим прикладом втілення швидких ідей. Після усіх необхідних перетворень, коли випуск рефрижераторів врешті налагоджується, віднаходяться суттєві недоліки. Внутрішній корисний об'єм вантажного відсіку навіть не має одного кубічного метра. Незграбності новому шедевру додає ще одне конструкторське вирішення. Холодильний агрегат змонтували поруч із водієм, замість пасажирського сидіння. Пояснення дається одне – для

нього просто не знайшлося місця. Диво конструкторських вирішень існує неповний рік. Луцька новинка насправді не витримує критики.

Як би там не було, а перше десятиріччя Луцький завод з повним правом може внести до свого позитиву. Перехід від ремонтного заводу до машинобудівного поклав початок новому етапу розвитку. Про підприємство знають не лише в Українській РСР. До заводу державного значення він ще не дотягує, однак місцеву значимість уже переростає. У друге десятиріччя колектив Луцького машинобудівного йде впевненою ходою.

1965-й рік для Луцького машинобудівного заводу стає справді знаменним. Дирекція "оббиває пороги" Львівського раднаргоспу з пропозицією розмістити виробництво автомобілів саме в обласному центрі Волині, колектив же готується до їх випуску. Вище керівництво вагається недовго, Луцький машинобудівний із заслужено гарною репутацією виявляється найкращим варіантом щодо розміщення виробництва нового вантажно-пасажирського автомобіля. Уже в січні при відділі головного конструктора створено два бюро з розробки технічної документації на автомобіль ЗАЗ-969.

Перше на Волині авто з'являється після рішення керівництва Української РСР щодо організації на одному з діючих заводів республіки виробництва нової вантажно-пасажирської моделі, спроектованої на базі вузлів та агрегатів автомобіля "Запорожець". Розробниками нового автомобіля стали колективи Центрального автомобільного автомоторного інституту та конструкторського експериментального відділу автозаводу "Комунар" у Запоріжжі. Нова вантажно-пасажирська модель одержує індекс ЗАЗ-969В. У неї залишається багато спільного із "Запорожцем", однак це вже є принципово інше авто – як за конструкцією, так і за призначенням.

Беззаперечно знаменним для заводу стає грудень 1966 року. В цьому місяці на заводі збирають перші 50 малолітражних автомобілів ЗАЗ-969В. З їхнім випуском на Волині започатковано нову галузь машинобудування – автомобільну. 11 грудня наказом Міністра автомобільної промисловості СРСР Луцький машинобудівний завод перейменовується на автомобільний.

Наприкінці 1960-х років на заводі налагоджено серійний випуск автомобілів. Хоча партії невеликі, є всі сподівання на збільшення потужностей. Проблеми з'являються там, де їх ніхто не очікував. З початку виробництва автомобілів завод працює, керуючись тимчасовими технічними умовами. Нормативний документ, що регламентує вимоги до виробу, задовольняє всіх, однак лише доти, доки не постає необхідність перезатвердити ціну на випущені автомобілі. Практично відразу союзний Державний комітет цін ставить вимогу надати нові розрахунки разом з уже постійними технічними умовами. До такого повороту конструкторський відділ Луцького автозаводу був готовий. Фахівці своєчасно розробляють технічні умови, відразу узгоджуючи їх з частиною основних замовників продукції. Втім, реакція з боку союзних "Сільгосптехніки", Міністерства сільського господарства та Міністерства торгівлі РРФР, які також були визначені як основні замовники луцьких автомобілів, стає зворотною. Чиновники відмовляються погоджувати постійні технічні умови, посилаючись на випуск нібито неякісних автомобілів, що мають багато дефектів та недовговічні в експлуатації. Така позиція міністерств стає незаслуженим ударом по заводу. Його залишають в надзвичайно скрутному становищі. Фактично, автомобілі можуть випускатися за старими техумовами, але без ціни, яку гарантують затвердити лише при наявності нових технічних умов. Завод опиняється на роздоріжжі: з одного боку, є усі можливості продовжувати випускати автомобілі, з другого – їх не можна збувати. Не сподіваючись на допомогу чиновників, керівництво автозаводу приймає рішення самотужки шукати вихід зі складного становища. До Москви їде делегація.

Початок візиту до столиці СРСР втішних результатів не дає. Чиновники передають документи з рук в руки, не підписуючи їх. На п'ятий день перебування в Москві на до-

кументах так і не з'являється жодного підпису. Ситуація стає насправді критичною. Завод не може працювати, а в центрі це нікого не хвилює.

За Луцький автомобіль все ж заступилися. Борис Фіттерман, один з розробників авто, сам іде розмовляти з чиновниками. Результат стає відчутним відразу. Через два дні технічні умови погоджують у всіх відомствах. Виробництву луцьких автомобілів дають зелене світло.

Із затвердженням технічної документації на Луцькому автомобільному заводі виробництво починає знову нарощуватися. 28 грудня 1971 року згідно з наказом Міністерства автомобільної промисловості СРСР ЛуАЗу визначена спеціалізація на випуск легкових автомобілів підвищеної прохідності для потреб сільського господарства та авто спеціального призначення. У зв'язку з цим рішенням на заводі без зупинки конвеєра здійснюється передача виробництва автокрамниць, ремонтних майстерень та всіх інших виробів на спеціалізовані підприємства. Найважче ЛуАЗу розпрощатися із польовими авіаремонтними майстернями. Оскільки це вироби військового призначення для обслуговування винищувачів СУ-7Б, ніхто з директорів не хоче брати на себе відповідальність за виготовлення цих комплексів. Після довготривалих пошуків, врешті досягнуто домовленостей з одним з підприємств Саратовської області.

На Луцькому автозаводі проводиться реконструкція, після чого розпочинають випуск автомобілів моделі ЗАЗ-969. Колісна формула 4\4, коли всі колеса ведучі, стає справжнім проривом у вітчизняному автомобілебудуванні. Модель ЗАЗ-969 стає єдиною в Союзі, що має привід на передні колеса. Новий луцький автомобіль користується попитом на теренах СРСР.

Третє десятиріччя в історії Луцького автомобільного заводу є беззаперечно одним із кращих періодів роботи підприємства. Виробництво набирає своєї оптимальної форми, луцький позашляховик визнається не лише в Радянському Союзі, а й за кордоном. З конвеєра сходить 100-тисячний автомобіль. Колективу є справді що святкувати, його роботу, врешті, належно оцінили. До людей приходить впевненість у завтрашньому дні, а з нею і бажання працювати ще краще.

Початок 1975 року – автозавод входить до складу новоствореного об'єднання з головним підприємством у Запоріжжі – автомобільним заводом "Комунар". Цього ж року розпочинається вже серійний випуск автомобілів ЛуАЗ-967М (рис. 3). Третя модифікація луцького авто цілком задовольняє патріотичні почуття лучан, їй надано назву безпосередньо заводу-виробника. В народі "Ашка" зовні мало чим відрізняється від попередньої моделі ЗАЗ, однак багато вузлів і деталей у ній зроблено на значно вищому інженерному рівні. Беззаперечним плюсом є і заміна 30-ти сильного двигуна на 40-сильний. Ходові та експлуатаційні якості автомобіля значно покращуються.

Конструкторське бюро на досягнутому не зупиняється. Триває розробка принципово нової, четвертої, моделі. 10 серпня 1976 року видається Розпорядження Ради Міністрів СРСР "Про реконструкцію ЛуАЗу на випуск 50-ти тисяч автомобілів на рік". На місцях розуміють, що виконати поставлені завдання без відповідних вкладень з боку держави буде практично неможливо, однак заперечувати рішенням "зверху" ніхто не збирається. Там же вважають, що вкладати кошти в об'єкт стратегічного значення, який знаходиться на західному кордоні УРСР і СРСР, недоцільно. Рішення фактично залишається на папері.



Рис. 3. ЛуАЗ-967М

Якщо не кількістю випущених автомобілів, то, принаймні, їх якістю Луцький автозавод відзначається. У 1979 році на виробництво поставлено нову модель – ЛуАЗ-969М (рис. 4), яка вигідно відрізняється від своїх попередників як зовнішньо, так і рядом технічних удосконалень.



Рис. 4. ЛуАЗ-969М

Ще до свого серійного випуску автомобіль одержує високу оцінку на ВДНГ. В 1978 році на Міжнародному автосалоні в італійському місті Турині луцька малолітражка входить в десятку кращих, у липні ж 1979-го на Міжнародній виставці в Чехословаччині – відзначена золотою медаллю. ЛуАЗ-969М стає своєрідною візитною карткою радянського автомобілебудування. Покладені на нього надії автомобіль виправдовує сповна. На виставках в Бельгії, Греції, Польщі, Болгарії, Угорщині він скрізь отримує позитивні оцінки.

Популярність луцького позашляховика зростає щодня. Йому знаходять застосування не лише в сільському господарстві, а й в геологорозвідці та на лісорозробках. Модернізована модель виділяється серед авто такого ж класу, насамперед, високою прохідністю. ЛуАЗ – 969М залишається єдиним повнопривідним автомобілем у Союзі.

На початку 80-х на луцький автомобіль починають рівнятися на всіх автомобільних заводах СРСР. Всесоюзний журнал “За рулем” проводить порівняння конструктивних особливостей і параметрів автомобілів, які випускає вітчизняна промисловість, насамперед тих,

що призначені для використання в сільській місцевості: ЛуАЗ-969М, "Москвич-21406", "Нива", ВАЗ-2121 та УАЗ-469В. Журнал обирає двадцять показників, які найчастіше зустрічаються у відгуках читачів, і визначають найважливіші технічні якості автомобілів. У підсумку, у своєрідному двадцятиборстві саме луцький автомобіль і визнається найкращим.

Широке визнання луцьких автомобілів, перехід 100-тисячного рубежу до їх виготовлення стали фактично утвердженням заводу як одного з лідерів вітчизняного автомобілебудування. Перспективи для ЛуАЗу вимальовуються райдужні. До того ж у квітні 1983 року перші автомобілі йдуть на експорт. Про Луцький автомобільний завод знають, його продукцію цінують. Усі починають говорити про реальні перспективи розвитку у те, що справи можуть погіршитися, ніхто не вірить.

З середини 80-х завод не припиняє нарощувати обсяги виробництва. Поряд з належним виконанням виробничих програм поза увагою керівництва підприємства не залишається і соціальна сфера. Протягом 1988-1989 років для працівників збудовано сімдесят квартир і два гуртожитки. Увагу до місцевого автомобілевиробника виявляють і іноземні компанії.

У березні підприємство відвідують делегації американської фірми "Крайслер" та швейцарської "Іпатко" – підписані договори про співпрацю. 1990 рік стає вдалим для ЛуАЗу, зібрано найбільше в історії автомобілів – 16500 одиниць. Через два роки наказом генерального директора ВО "Автобаз" Луцький автомобільний завод виводять зі складу об'єднання. Згідно з наказом ФДМУ № 50-Ам від 28 грудня 1995 року завод перетворено із державного підприємства на Відкрите акціонерне товариство "Луцький автомобільний завод" (ВАТ "ЛуАЗ"). Статутний фонд становить 18999540 гривень.

Однак про звершення підприємства лишалося лише згадувати. Завод переживає найважчі часи у своїй історії. Різкий спад виробництва, зростаюча заборгованість по зарплатні стали реаліями в минулому потужного підприємства. У 1995 році у те, що Луцький автомобільний завод зможе "піднятися з колін", вірили лише оптимісти, і ті сподівалися на диво. Іншої думки був новопризначений директор Володимир Гунчик, який разом з працівниками заводу, наперекір усім прогнозам, взялися довести протилежне. Справжньою несподіванкою стала презентація у 1996 році інвестиційної програми розвитку ВАТ "Луцький автомобільний завод". Керівництво області, фінансисти та банкіри з іронією сприйняли майбутні плани, яким амбіційності не бракувало. І як тоді можна було повірити директору заводу, який говорив про продаж 81-го відсотка акцій стратегічному інвестору, який бачив виробництво на ЛуАЗі нових автомобілів європейського зразка – і про все це розповідав у холодній заводській їдальні, яка навіть не опалювалась!

Така невизначеність тривала до 2000 року, який ВАТ "ЛуАЗ" зустрів з надією на краще. У лютому була укладена угода з концерном "Укрпромінвест" на складання автомобілів ВАЗ у Луцьку. 14 квітня відбувся комерційний конкурс з продажу 81,12 % акцій товариства. Переможцем у цьому конкурсі став концерн "Укрпромінвест". Настав новий етап в історії заводу.

Розпочалося великовузлове складання автомобілів ВАЗ-21093 і УАЗ різних модифікацій, вдалося відновити випуск власної продукції – автомобілів ЛуАЗ. У 2000 році складено 2250 автомобілів ВАЗ-21093, 150 автомобілів ЛуАЗ, 648 автомобілів УАЗ.

У 2001 році продовжено освоєння складання додаткових моделей автомобілів ВАЗ-21099, ВАЗ-2107, ВАЗ-2104, ВАЗ-23213 "Нива", УАЗ-3160. Всього їх було зібрано майже 6 тисяч штук. Цього ж року керівництво заводу приймає рішення зупинити виробництво автомобілів ЛуАЗ-1302 і ЛуАЗ-13021 як морально застарілих.

У 2002 році підприємство продовжує нарощувати темпи виробництва, з головного конвеєра заводу зійшло більше 13 тисяч автомобілів ВАЗ, УАЗ, ІЖ, КІА різних моделей. 2003-2004 роки сміливо можна назвати періодом випробувань. У цей час автозаво-

ди захищають підприємство уже від "держави". Власне, початок 2003 року для ЛуАЗу був обнадійливим – у квітні з нового конвеєра зійшов 25-тисячний ВАЗ, у травні у Київському автосалоні були представлені нові автомобілі ЛуАЗ-1301 (рис. 5), ЛуАЗ-1301-08 (рис. 6) (санітарний). Впевненість у майбутньому в автозаводчан підкріплювала і розроблена інвестиційна програма, яка реально виводила Луцький автозавод на якісно інший рівень розвитку, й яка, як згодом з'ясувалося, стала причиною нової "політично-економічної війни".



Рис. 5. ЛуАЗ-1301

17 вересня 2003 року Кабінет Міністрів України своєю постановою затвердив інвестиційну програму ЛуАЗу, якою передбачалося створення нового сучасного автомобільного заводу з виготовлення до 70 тисяч автомобілів на рік. Однак через два тижні, 1 жовтня цього ж року, Указом Президента ця постанова уряду скасовується. Офіційна версія – інвестпрограма ЛуАЗу, зрештою, як і тодішній закон "Про стимулювання виробництва автомобілів в Україні", не відповідали вимогам СОТ. Таке рішення мало ефект "вибуху": на ЛуАЗі зупиняється виробництво, під загрозою опинилося саме існування заводу і доля майже тисячі його працівників.



Рис. 6. ЛуАЗ-1301-08

Незважаючи на довготривалі перевірки, 2004 рік став роком подальшого розширення асортименту продукції ВАТ "Луцький автомобільний завод". 23 січня випущено 30-

тисячний ВАЗ (через чотири місяці з конвеєра зійшов 45-тисячний ВАЗ). На початку лютого була зібрана на головному конвеєрі ЛуАЗу перша партія з 55-ти вантажних автомобілів Hyundai HD 65 з машинокомплектів добре відомої південнокорейської фірми Hyundai Motors Company.

У 2003 році український ринок отримав 11435, а в 2004-му – 22638 автомобілів різних марок (ВАЗ, УАЗ, HYUNDAI, ISUZU).

У 2003 році підприємство покрило збитки попередніх років на 13,3 млн грн., а в наступному отримало 2962 тис. грн. прибутків. У першому півріччі 2005 року заводом задекларовано 5060 тис. грн. прибутків.

Уже в лютому 2005 році було створено корпорацію "Богдан". ВАТ "Луцький автомобільний завод" виступив одним з її співзасновників. Бізнес-планом цього проекту передбачена організація на виробничих площах автозаводу в Луцьку випуску автобусів "Богдан" середнього і великого класу.

У червні 2005 року рада директорів корпорації "Богдан" прийняла рішення про переміщення виробництв: автомобільного з Луцька в Черкаси та автобусного з Черкас до Луцька. На виконання запланованого була розроблена стратегія впровадження автобусної програми на луцькому майданчику ВАТ "ЛуАЗ", яку розділили на два етапи.

Реалізація першого етапу автобусної програми передбачала створення на площах автомобільного заводу в Луцьку зварювального, фарбувального, складального виробництв для середніх, великих, надвеликих автобусів, а також тролейбусів.

Для сприяння виконанню запланованого та налагодження координації з місцевими органами виконавчої та самоврядної влади 23 червня 2005 року підписано Меморандум про співпрацю між Волинською обласною державною адміністрацією, Луцькою міською радою і корпорацією "Богдан". Його реалізація дозволить довести річний рівень виробництва до 1,5 млрд. гривень та значно збільшити бюджетні надходження. Розширення виробничої інфраструктури підприємства супроводжуватиметься розвитком систем енергопостачання, комунікацій, транспорту і житлового будівництва в інтересах жителів міста і регіону.

Загалом, 2005 рік для Луцького автомобільного заводу можна без перебільшення назвати новим етапом розвитку – це і початок великовузлового складання нової моделі сімейства ВАЗ – ВАЗ-2110, яку вперше винесли за межі заводу в Тольятті, це і присвоєння ЛуАЗу кредитного рейтингу "uaBBB-", це і вручення міжнародного сертифікату системи менеджменту якості ISO 9001:2000, що є гарантією беззаперечної якості продукції, яку випускають на підприємстві, це і налагодження великовузлового складання автомобілів KIA та Hyundai. Врешті, півстолітній ювілей, який відзначили на автозаводі, став зайвим підтвердженням потенціалу та можливостей ЛуАЗу.

Висновки. За неповних одинадцять місяців – з червня 2005 по квітень 2006 року – на виробничих площах луцького проммайданчика створено виробничі потужності, які дозволяють випускати до 1,5 тисячі середніх, великих, надвеликих автобусів та тролейбусів на рік різних модифікацій: А-144, А-145, А-231 та Е-231(тролейбус). Інвестиції на впровадження першого етапу автобусної програми становлять більше 40 мільйонів гривень. Реалізація запланованого дозволила додатково створити на луцькому проммайданчику близько 300 робочих місць, розширити номенклатуру виробництва [5].

Загальна динаміка розвитку галузі за підсумками 2011 року викликає оптимістичні прогнози. На думку експертів, в 2011-2015 роках зростання виробництва автомобілів в Україні продовжиться, незважаючи на те, що темпи зростання можуть трохи скоротитися у зв'язку з насиченням внутрішнього ринку. Про перспективу майбутнього зростання свідчить і те, що імпорт продукції автомобільної промисловості значно перевищує експорт.

Список використаних джерел

1. Анохин А. П. Отечественные автомобили / А. П. Анохин. – М.: Наука, 1968. – С. 5-10.
2. Очерки истории техники в России с древнейших времен до 60-х годов XX века / под ред. В. И. Остольского. – М.: Наука, 1978. – 375 с.
3. Паламарчук М. М. Економічна і соціальна географія України з основами теорії: посібник / М. М. Паламарчук, О. М. Паламарчук. – К.: Знання, 1998. – С. 376-392.
4. Пікашова Т. Д. Основи історії науки і техніки / Т. Д. Пікашова, Л. О. Шашкова. – К.: ІЗМН, 1997. – 400 с.
5. Розміщення продуктивних сил: підручник / за ред. В. В. Ковалевського, О. Л. Михайлюк, В. Ф. Семенова. – К.: Знання, КОО, 1998. – С. 376-392.
6. Розміщення продуктивних сил: підручник / за ред. Є. П. Качана. – К.: Вища школа, 1998. – С. 139-149.
7. Рубец А. Д. История автомобильного транспорта России: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / А. Д. Рубец. – 2-е изд., стер. – М.: Академия, 2004. – 304 с.
8. Солтус А. П. Теорія експлуатаційних властивостей автомобіля / А. П. Солтус. – К.: Арістей, 2006. – С. 7-11.

УДК 621.923.5

М.М. Підгаєцький, канд. техн. наук
К.К. Щербина, аспірант
Кіровоградський національний технічний університет, м. Кіровоград, Україна

УТВОРЕННЯ СКЛАДНОЇ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ ЗЕРНА ПРИ ХОНІНГУВАННІ ОТВОРІВ

Запропоновано методику утворення складної траєкторії руху зерна у вигляді фігур Ліссажу в процесі хонінгування отворів, з використанням мехатронного продукційного хонінгувального верстата з адаптивно-програмним керуванням, що дозволить покращити продуктивність обробки та підвищити геометричну точність оброблюємого отвору.

Предложена методика образования сложной траектории движения зерна в виде фигур Лиссажа в процессе хонингования отверстий, с использованием мехатронного продукционного хонинговального станка с адаптивно-программным управлением, что позволит улучшить продуктивность обработки и повысить геометрическую точность обрабатываемой детали.

Proposed a method of formation of the difficult trajectories of movement of grain in the form of Lissajous figures in the course of a honing of bores, with use of the mechatronic productional honing machine with adaptive programmed control that will allow to improve efficiency of processing and improve the geometric accuracy of a processed detail.

Постановка проблеми. Підвищення геометричної точності оброблюємого отвору та покращення продуктивності процесу хонінгування отворів є постійною науково-технічною проблемою процесу фінішної обробки отворів. Одним з перспективних шляхів вирішення цієї проблеми є створення складної траєкторії руху зерна у вигляді фігур Ліссажу за рахунок додавання додаткових коливальних рухів, так названих рухів осциляції, а саме, колових та осьових з різнорідною частотою та амплітудою коливань з використанням спеціальних механізмів осциляції.

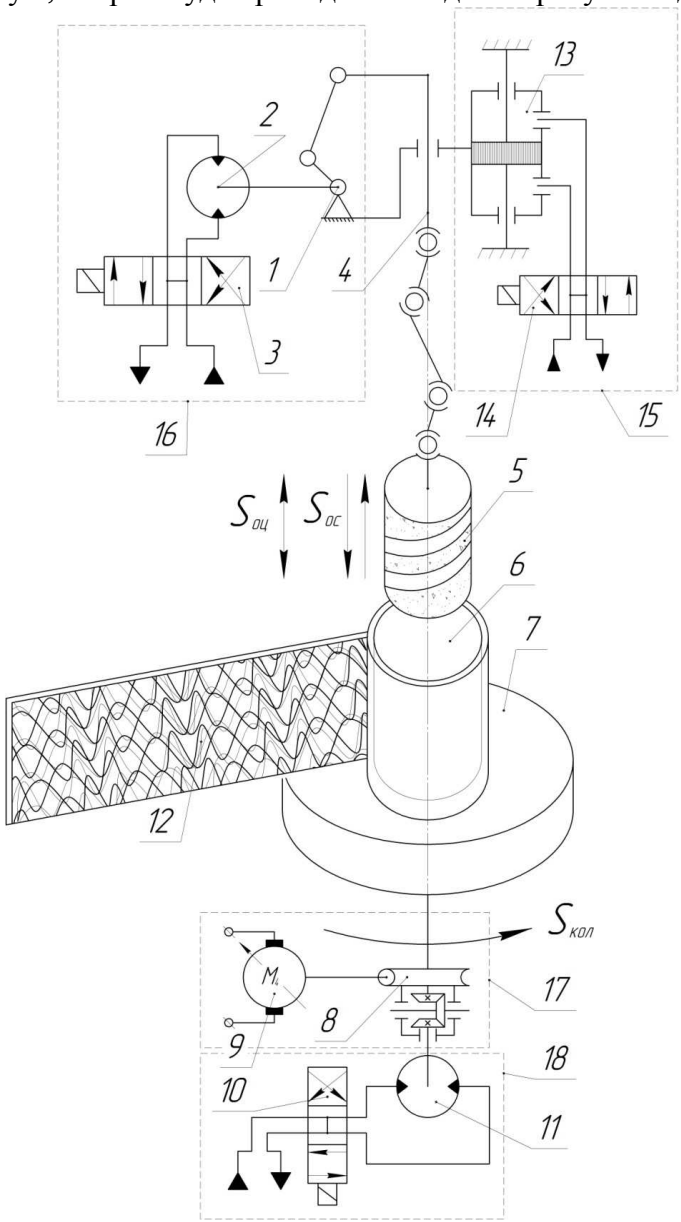
Аналіз досліджень і публікацій. Дослідження механізмів осьової осциляції, що використовуються в сучасних верстатах [1], вказало на неможливість утворення складної траєкторії руху зерна у вигляді фігур Ліссажу. Дослідження існуючих механізмів осциляції з адаптивним керуванням процесом утворення складної траєкторії руху зерна у вигляді фігур Ліссажу [2] вказують на складну конструкцію самих механізмів та систем адаптивного керування, що призводить до нестабільної роботи системи адаптивного керування. Це явище пов’язане з тим, що процеси проходять у різнорідних функціональних середовищах та з зосередженням цих рухів на шпиндельному вузлі верстата, а саме на інструменті.

Мета статті. Метою роботи є розробка простої конструкції механізмів осциляції для створення складної траєкторії руху зерна у вигляді фігур Ліссажу з можливістю

адаптивно-програмного керування та диференціації осцилюючих рухів між вузлами верстата, а саме інструментом та деталлю.

Виклад основного матеріалу. Дослідження вказали на необхідність створення простих за конструкцію та принципом керування механізмів осцилятивних рухів та необхідність диференціації рухів між інструментом та деталлю для уникнення виникнення автоколивань в процесі роботи.

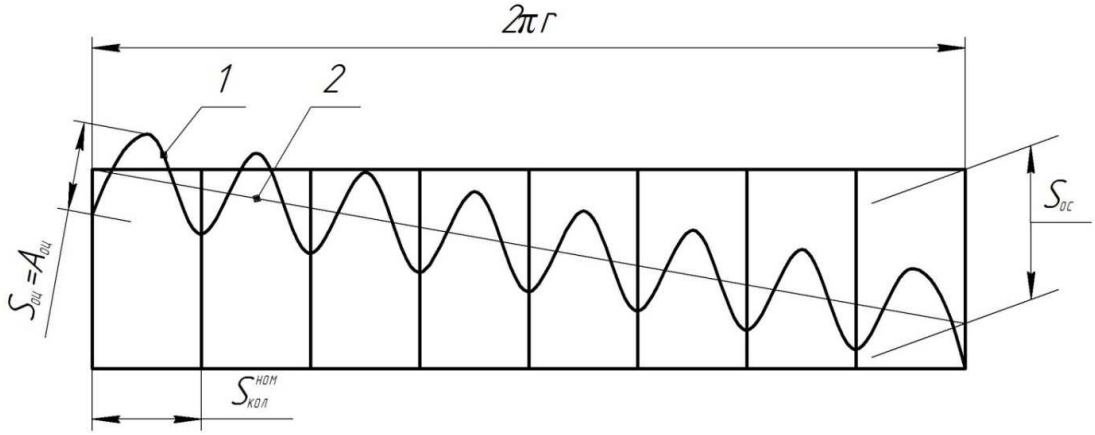
Отже, розглянемо конструкцію механізму осьової осциляції мехатронного продукційного хонінгувального верстату з адаптивно-програмним керуванням (МПХВАК) (рис. 1) [3]. Механізм осьової осциляції буде виконаний у вигляді кривошипно-повзуного механізму 1, котрий буде приводитися в дію за рахунок гідромотору 2.



1 – кривошипно-повзуний мехнізм; 2 – гідравлічний двигун; 3 – гідророзподільник; 4 – шарнірний механізм; 5 – інструмет; 6 – деталь; 7 – стіл; 8 – диференціал; 9 – крововий електродвигун; 10 – гідророзподільник; 11 – гідравлічний двигун; 12 – траєкторія руху зерна; 13 – гідроциліндр; 14 – гідророзподільник; 15 – механізм осьової подачі; 16 – механізм осьової осцилюючої подачі; 17 – механізм колової осцилюючої подачі; 18 – механізм колової подачі

Рис. 1. Схема взаємодії механізмів на мехатронному продукційному хонінгувальному верстаті з адаптивно-програмним керуванням

Побудуємо математичну модель утворення траєкторії руху зерна при осьовій осциляції. Умовно приймемо, що швидкість обертання буде постійною (V_o = const) та часом руху (t = const), розгорнута на площину проекція обробляємого отвору з траєкторію руху зерна наведена на рисунку 2. Необхідно зазначити, що час руху зерна буде визначатися часом одного циклу осьової осциляції. При цьому цей час є базовим для побудови всіх інших траєкторій руху зерна.



1 – траєкторія руху зерна інструменту; 2 – гвинтова лінія; $A_{ос}$ – амплітуда коливань;$S_{ос}$ – осьова подача; $S_{кол}^{ном}$ – номінальна колова подача; $S_{оц}$ – подача осьової осциляції; r – радіус кола

Рис. 2. Покадрова схема траєкторії руху зерна інструменту при осьовій осциляції розгорнута на площину

Отримана траєкторія руху зерна завдяки механізму осьової осциляції буде визначатися за синусоїдальним законом та буде мати такий вигляд [4].

$$\begin{cases} X = V_o * t \\ Y = A_{ос} \sin\left(n_{дв} * i_{кп}\right) + V_{ос} t \end{cases},$$

де X – координата точки на вісі X; V_o – швидкість обертання; t – час переміщення; Y – координата точки на вісі Y; $A_{ос}$ – амплітуда осьових коливань; $n_{дв}$ – частота обертання гідромотору; $i_{кп}$ – передатне відношення кривошипно-повзунного механізму; $V_{ос}$ – швидкість поступального руху інструменту.

Слід зазначити, що МПХВАП має привід обертання деталі, що створює передумову створення механізму колової осциляції МПХВАП саме для надання колових осцилятивних рухів деталі. Механізм колової осциляції МПХВАП представлений на рисунку 1. Він складається з диференціалу 8, гідравлічного двигуна 11 та крокового електродвигуна 9.

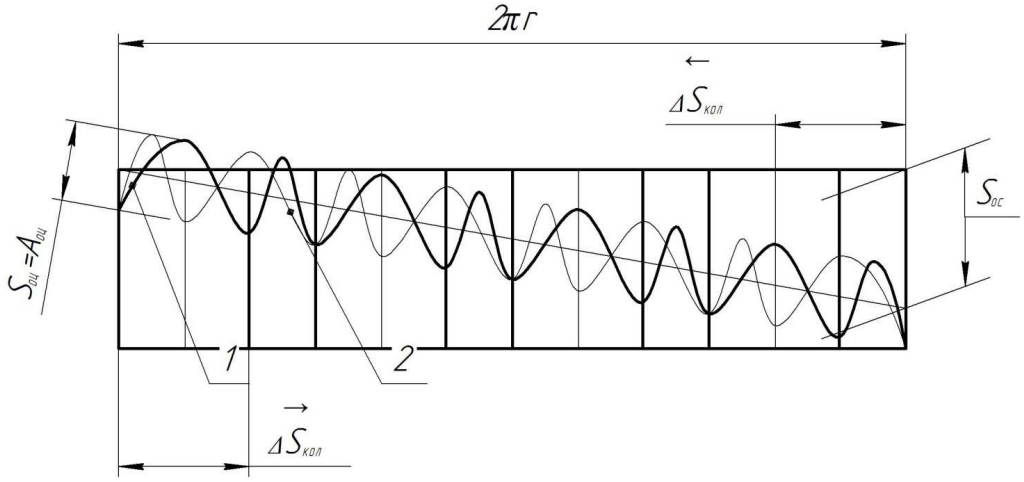
Механізм колової осциляції працює таким чином. Гідравлічний двигун 11 обертається з постійною частотою, а кроковий електродвигун 9 зі зміною частотою. Частота цих коливань сумується диференціалом 43, що призводить до постійної зміни швидкості обертання столу, що створює колове коливання.

При постійній швидкості поступальних рухів інструменту ($V_{ос}$ = const) та постійному часі переміщення (t = const) з круговими коливаннями траєкторія руху зерна інструменту буде мати схожий характер з траєкторією при осьових коливаннях, лише буде направлена в перпендикулярному напрямку, визначатиметься за тим самим синусоїдальним законом [4] та буде визначатися такою математичною моделлю

$$\begin{cases} X = A_o \sin\left(\dfrac{z_3}{z_4} n_{гд} \pm 2\dfrac{z_1}{z_2} n_{кд}\right) t + V_{ос} t \\ Y = V_{ос} * t \end{cases},$$

де A_o – амплітуда кругових коливань; $n_{гд}$ – частота обертання гідравлічного двигуна; $n_{кд}$ – частота обертання крокового двигуна; z_1, z_2, z_3, z_4 – кількість зубів відповідного колеса диференціалу.

Поєднаємо обидва рухи осциляції та отримаємо траєкторію руху зерна (рис. 3).



1 – у прямому напрямку; 2 – зворотному напрямку

Рис. 3. Покадрова схема траєкторії руху зерна інструменту в прямому і зворотному напрямку, розгорнута на площину зі зміною колової подачі у два рази

Отримана траєкторія руху зерна буде визначатися за такою математичною залежністю

$$\begin{cases} X = A_o \sin\left(\frac{z_3}{z_4} n_{гд} \pm 2\frac{z_1}{z_2} n_{кд}\right) t + V_{ос} t \\ Y = A_{ос} \sin\left(n_{дв} * i_{кп}\right) + V_{ос} t \end{cases}.$$

Отримана математична залежність дозволить створити алгоритм роботи системи адаптивного керування МХПВАП.

Також слід зазначити, що отримана траєкторія руху зерна, утворює на поверхні мікрорельєф у вигляді фігур Ліссажу.

Аналіз траєкторії руху зерна на рисунку 3 дозволив визначити залежність, за якою буде змінюватися колова подача в процесі обробки.

$$S_{кол} = f\left(S_{ос}\right) \pm f\left(S_{оц}\right).$$

Отримана залежність вказує на те, що головним факторами створення складної траєкторії руху зерна є значення осьової подачі і значення подачі осьової осциляції.

Висновки. Розроблені конструкції механізмів осциляції, які дозволяють створювати складну траєкторію руху зерна у вигляді фігур Ліссажу на базі МХПВАПК, мають досить просту конструкцію і передбачають безступеневе регулювання, що дозволить оптимально підібрати значення частоти та амплітуди коливань.

Встановлені математичні залежності, які визначають траєкторію руху зерна в процесі хонінгування, на базі яких буде розроблений алгоритм роботи системи адаптивного керування процесом на МХПВАПК.

Ці фактори дозволяють отримувати будь-яку щільність утвореної сітки слідів на мікрорельєфі поверхні деталі, що дасть змогу максимально підвищити продуктивність обробки та покращити геометричну точність оброблюємої деталі.

Список використаних джерел

1. Муратов К. Р. Хонинговальный модульный станок / К. Р. Муратов, А. М. Ханов // Станки и инструмент. – 2006. – № 12. – С. 5-6.

2. Прогрессивные методы хонингования / С. И. Куликов, Ф. Ф. Ризванов, В. А. Романчук, С. В. Ковалевский. – М.: Машиностроение, 1983. – 134 с.

3. Підгаєцький М. М. Продукційний хонінгувальний верстат з адаптивно-програмним керуванням / М. М. Підгаєцький, К. К. Щербина, О. В. Лобода // Техніка в с/г виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Вип. 25. – Кіровоград, 2012.

4. Муратов К. Р. Эффективный метод хонингования прецизионных сквозных отверстий. Современные организационные, технологические и конструкторские методы управления качеством: сборник научных трудов / К. Р. Муратов. – Пермь: ГОУ ВПО ПГТУ, 2006. – С. 70-72.

УДК 629.113.011

А.П. Фалалеев, канд. техн. наук
Севастопольский национальный технический университет, г.Севастополь, Украина

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ЭВОЛЮЦИЮ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДВУХФАЗНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

Экспериментально исследовано влияние температурных режимов кузовного ремонта на эволюцию прочностных характеристик деформационно-упрочненных деталей из двухфазной стали DP980. Найдены коэффициенты эмпирической эволюционной зависимости параметров упрочнения от технологических режимов ремонта. Показано, что для двухфазной стали наблюдается значительное разупрочнение и уменьшение работы упрочнения при нагреве.

Ключевые слова: *двухфазная сталь, кузовной ремонт, деформационное упрочнение, технологический нагрев.*

Експериментально досліджено вплив температурних режимів кузовного ремонту на еволюцію міцності деформаційно зміцнених деталей із двофазної сталі DP980. Знайдені коефіцієнти емпіричної еволюційної залежності параметрів зміцнення від технологічних режимів ремонту. Показано, що для двофазної сталі спостерігається значне зменшення міцності та зменшення роботи зміцнення в зв'язку з нагрівом.

Ключові слова: *двофазна сталь, кузовний ремонт, деформаційне зміцнення, технологічний нагрів.*

Influence of car body repair temperature to the strength of preliminary deformed parts produced from dual phase steel DP980 was experimentally investigated. Coefficients of empirical evolutional function of strength on the technological regimes of repair were found. It is shown that for the dual phase steel there is a tendency of strength and hardening work decreasing due to the technological heating.

Key words: *dual phase steel, car body repair, strength, deformational hardening, technological tempering, technological heating.*

Двухфазные стали получили широкое распространение при изготовлении несущих деталей автомобильных кузовов, отвечающих за пассивную безопасность и поглощение энергии во время столкновения. Механические свойства подобных сталей зависят от термической обработки и от накопленной пластической деформации. В состоянии поставки сталь имеет низкий предел текучести, что позволяет изготавливать детали традиционными методами холодной штамповки, но при пластическом деформировании они значительно упрочняются.

Двухфазные стали получают путем неполной закалки малоуглеродистых сталей в области критических температур фазовых переходов, что формирует ферритно-мартенситную структуру. За счет распределения зерен мартенсита в ферритной матрице двухфазные стали имеют высокую степень упрочнения при деформации, позволяющую поглощать большее количество энергии при столкновении по сравнению с обыкновенными сталями.

Учитывая деформационную и температурную технологическую наследственность двухфазных сталей, при определении их механических свойств необходимо учитывать направления и величины приобретенной пластической деформации, предшествующие температуры и длительности нагрева.

Исследованию эволюции механических свойств двухфазных сталей в зависимости от накопленных пластических деформаций посвящены работы [1; 2]. В работах [2; 3] исследуется влияние температур закалки и отпуска на прочность и пластичность двухфазных сталей. Авторами отмечается существенное изменение величины упрочнения, которое связано с объемом мартенситной фазы в микроструктуре полученной стали. В работах [3, 4]

демонстрируется значительная деградация твердости в зоне термического нагрева при выполнении лазерной сварки. В работе [4] исследовано изменение свойств сталей после воздействия нагрева. Несмотря на большой объем работ, посвященных исследованию влияния нагревов на свойства двухфазных сталей в условиях массового производства, нерассмотренным остается вопрос эволюции механических свойств двухфазных сталей в условиях ремонтного производства. Особенностью ремонтного производства является большие накопленные пластические прямые и обратные деформации, кратковременность температурных воздействий, неизотермические условия нагрева и множество возмущающих воздействий случайного характера. Взаимное влияние пластических деформаций и нагревов на поведение двухфазных сталей является основным вопросом исследования.

Целью работы является исследование влияния температуры технологического нагрева деталей при выполнении кузовного ремонта автомобиля, на эволюцию механических свойств предварительно деформированных двухфазных сталей.

Методика исследования. Для исследования влияния термического воздействия на свойства двухфазной стали проводились испытания образцов на растяжение после остывания при нагревах с разной выдержкой. Образцы укладывались в прогретую муфельную печь на 20 с, 5 мин. и 20 мин., затем охлаждались на воздухе. Выдержка 20 с была выбрана экспериментально для используемых образцов, с учетом, что за это время образцы успевали нагреваться до температуры испытания так, что выдержка при пиковой температуре составляла не более 2 с. Образцы нагревались и выдерживались при температурах 300 °С, 450 °С, 600 °С. После охлаждения образцы растягивались, при этом снималась кривая напряжение – деформации. Образцы растягивали при комнатной температуре на универсальной разрывной машине со скоростью 0,001 с-1. Деформация в процессе испытания измерялась при помощи экстензометров на длине 25 мм. По диаграмме определялись предел текучести, предел прочности, максимальное удлинение до разрушения. Предел текучести определялся при деформации 0,2 %.

Для испытаний использовались образцы двухфазной стали DP980 производителя Тата-стил толщиной 1,2 мм с гальваническим покрытием с химическим составом (C-0,15; Mn – 1,50; Si – 0,31; Al – 0,05; Mo – 0,006; Cr – 0,02; Cu – 0,02; S – 0,006; P – 0,01). Для исследования воздействия температуры на накопленную пластическую деформацию часть образцов предварительно растягивались до значения остаточной деформации 8 %.

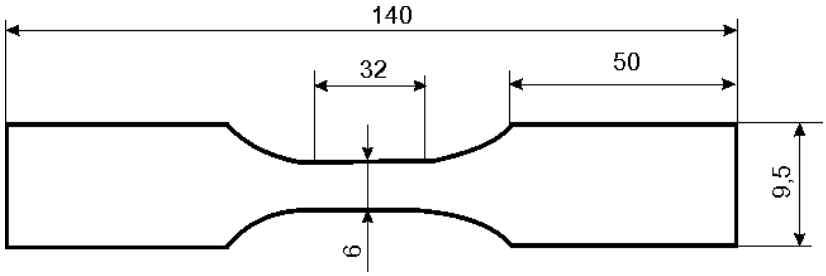


Рис. 1. Образец для испытаний на растяжение

Для исследования на растяжение использовались образцы в соответствии со стандартом ASTM-E08. Геометрия образцов приведена на рисунке 2. Окончательная подготовка поверхности образцов проводилась абразивной шкуркой в направлении растяжения зернистостью 600.

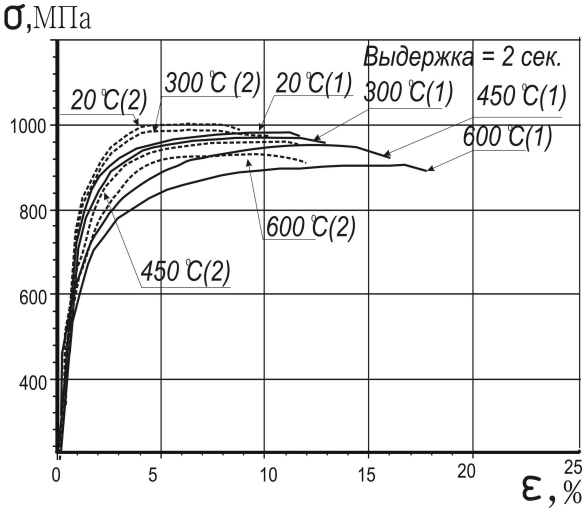


Рис. 2. Диаграммы растяжения стали DP980 после нагрева, выдержке 2 секунды и последующего охлаждения до температуры 20 ℃, пунктирные линии с индексом (2) – предварительно на 8 % растянутые образцы, сплошные линии с индексом (1) – сталь в состоянии поставки

Влияние температуры нагрева и накопленной пластической деформации на механические свойства двухфазной стали.

Предварительная пластическая деформация образцов привела к их упрочнению и уменьшению запаса пластической деформации (рис. 3, пунктирная линия). Предварительные деформации образцов и деформации во время испытания имели одинаковое направление (растяжение), поэтому предварительное упрочнение вызвало увеличение предела пластичности и предела прочности, что видно из сравнения пунктирных графиков и графиков сплошной линией (рис. 3). Такое поведение является типичным для двухфазных сталей и наблюдается как на этапе производства, так и во время смятия кузова при столкновении. При нагреве недеформированных образцов наблюдается деградация их механических свойств. Кратковременный нагрев предварительно деформированных образцов также вызывает деградацию прочности. По мере уменьшения предела прочности наблюдается рост максимального удлинения, что для предварительно деформированных образцов является положительным, так как увеличивает запас по остаточной деформации, необходимой для выполнения ремонтных операций и для обеспечения пассивной безопасности отремонтированного автомобиля.

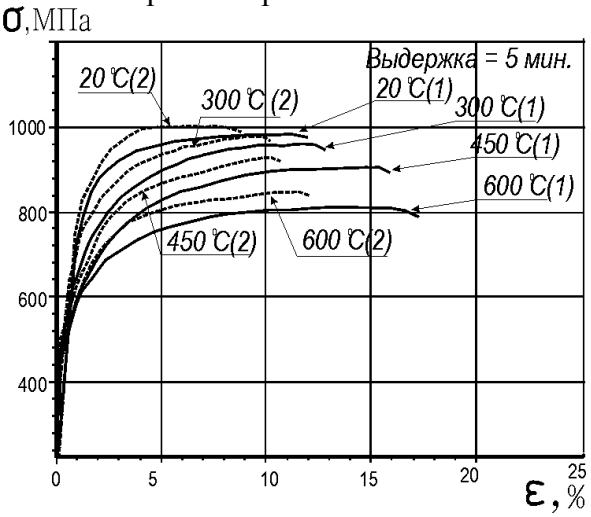


Рис. 3. Диаграммы растяжения стали DP980 после нагрева, выдержке 5 минут и последующего охлаждения до температуры 20 ℃, пунктирные линии с индексом (2) – предварительно на 8 % растянутые образцы, сплошные линии с индексом (1) – сталь в состоянии поставки

При выдержке 5 минут (рис. 4) диаграммы растяжения демонстрируют усиление деградации свойств по сравнению с выдержкой 2 секунды при тех же температурах нагрева. Предварительно деформированные образцы имеют ту же тенденцию к увеличению предела деформируемости и уменьшению предела прочности. По сравнению с образцами в состоянии поставки, предварительно деформированные образцы продолжают демонстрировать более высокие напряжения при деформации.

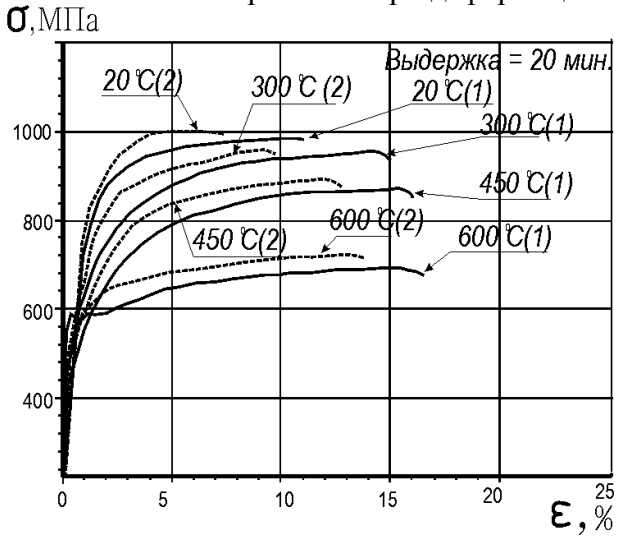


Рис. 4. Диаграммы растяжения стали DP980 после нагрева, выдержке 20 минут и последующего охлаждения до температуры 20 °С, пунктирные линии с индексом (2) – предварительно на 8 % растянутые образцы, сплошные линии с индексом (1) – сталь в состоянии поставки

Графики напряжение-деформация при всех значения технологической выдержки представляли собой семейства расположенных друг под другом характеристик с максимальным значением, не выходящим за пределы графика при предыдущей температуре испытания. Значительное увеличение максимальной деформации (на 9 %) наблюдалось при первой температуре испытания 300 °С (рис. 4, 5). При дальнейшем увеличении температуры изменение величины деформации лежало в пределах погрешности измерения для выдержек 5 и 20 мин. При 2 секундной выдержке (рис. 3) происходил последовательный рост величины максимального удлинения до 8-9 %, что подтверждает предположение о том, что увеличение максимальной пластической деформации наблюдается за счет релаксации напряжений при нагревах до 300 °С в пределах 8-10 %. При незначительной выдержке времени для снятия напряжения во всем объеме материала недостаточно, поэтому при температурах выше 300 °С продолжает наблюдаться увеличение максимального удлинения, но в пределах 10 %.

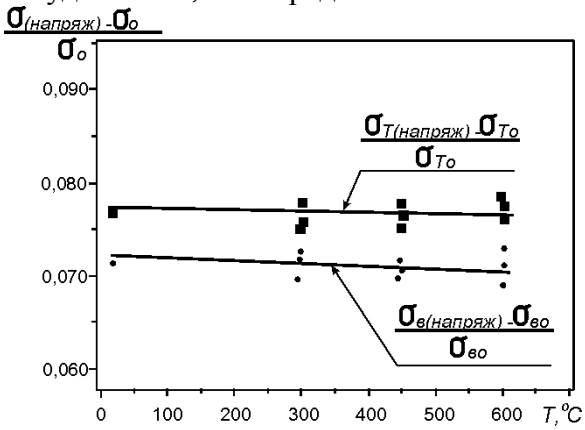


Рис. 5. Эволюция деформационного упрочнения при технологических нагревах

При выдержке 20 минут при температуре 600 °С предварительно деформированные образцы демонстрируют диаграмму растяжения, схожую с недеформированными образцами, но величина максимального удлинения, по прежнему, меньше на 6 %.

Анализ диаграмм растяжения (рис. 3, 4, 5) показал, что предел прочности стали последовательно снижается с увеличением температуры и выдержки. Хотя представленные данные продемонстрировали зависимость свойств стали от объема тепловой энергии, поглощенной металлом, но следует отметить, что анализ результатов экспериментов, не вошедших в данную статью показывает, что график 600 °С (1) (рис. 4) является предельным графиком насыщения и дальнейшее увеличение времени выдержки не приводило к существенным отличиям от него.

Анализ значения предела прочности, который демонстрировали образцы при растяжении, показывает, что температура нагрева приводит к уменьшению этих значений, причем пропорционально длительности нагрева.

Это доказывает, что 20 минутной выдержки достаточно для протекания равновесных процессов и этот режим можно считать изотермическим, в то время как нагрев с выдержками до 20 мин. можно считать неизотермическими и протекающие процессы носят незавершенный характер. Для незавершенных состояний актуальным будет вопрос устойчивости достигнутого состояния, полученных свойств и влияние на них процессов дальнейшего старения.

Технологический нагрев деструктивно воздействовал также и на образцы, которые предварительно были подвержены деформации, но при этом не оказал воздействия на деформационное упрочнение (рис. 6).

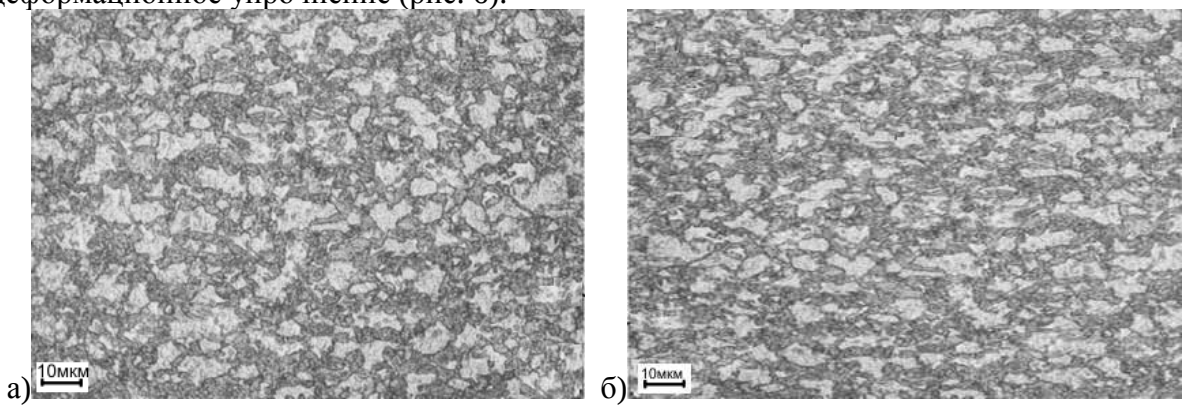


Рис. 6. Микроструктура стали DP980 в состоянии поставки:
а) – деформированная; б) – (увеличение - х1000)

Во всем диапазоне исследуемых температур (300-600 °С) и выдержек (0-20 мин.) доля упрочнения, вызванного накопленной пластической деформацией оставалось практически постоянной (6,9-7,3 %). При таком поведении двухфазной стали в исследуемом диапазоне температур, деформационное упрочнение можно считать независимым от температурного влияния.

Микроструктура базового металла (рис. 7, *а*) состоит из мартенситных зерен (темные участки), равномерно распределенных в ферритной основе (светлые участки). Сталь DP980 содержит большое количество мартенсита (более 60 %), что определяет ее высокую прочность. При деформации ферритные зерна первыми претерпевают формоизменение. Это видно по микроструктуре растянутого металла (рис. 7, *б).*

После нагрева, в исследуемом диапазоне температур, изменений размеров и формы зерен не наблюдалось как для деформированного, так и для обычного материала. Это объясняет слабую чувствительность деформационного упрочнения к температурному влиянию. Под воздействием температуры часть мартенсита в зернах трансформируется

в отпущенный мартенсит, что приводит к уменьшению предела прочности, но одновременно с этим происходит осаждение карбидов, создавая дополнительные препятствия движению дислокаций и увеличивая предел пластичности.

Независимость упрочнения от температурного влияния позволяет моделировать пластичность и прочность по принципу суперпозиции, разделяя различные механизмы эволюции механических свойств. Для деформационного упрочнения двухфазной стали в работе [5] предлагается комбинированная феноменологическая модель на основе законов Людвика и Хокет-Шерби:

$$\sigma = \beta[K(\varepsilon^P)^n] + (1-\beta)[R_0 - (R_0 - B)\exp(-a(\varepsilon^P)^v], \quad (1)$$

где β – комбинирующий фактор, ε^P – пластическая деформация, R_0 – предел прочности стали, K, n, B, a, v – эмпирические коэффициенты. Находя коэффициенты для стали DP980 методом наименьших квадратов, уравнение (1) запишем в виде

$$\sigma = 0{,}6[1280(\varepsilon^P)^{0{,}15}] + (1-0{,}6)[980 - (980-350)\exp(-10{,}88(\varepsilon^P)^{0{,}68}]. \quad (2)$$

Разупрочнение, вызванное ремонтными нагревами, удобно описать [6] эмпирическим уравнением

$$\sigma = R_0 - B_1(B_2 + B_3 \cdot t^{0{,}6})\left(\frac{T}{T_{AC1}} + B_4\right)^{8{,}2}, \quad (3)$$

где T – температура технологического нагрева, T_{AC_1} – первая критическая температура фазового перехода (точка AC_1 диаграммы состояния железо-углерод), t – время выдержки при максимальной температуре, секунды, B_1,B_2,B_3,B_4 – постоянные, определяемые экспериментально.

Тогда для стали DP980 окончательно можем записать

$$\sigma = 768(\varepsilon^P)^{0{,}15} + 0{,}4[980 - 630\exp(-10{,}88(\varepsilon^P)^{0{,}68})] - 3{,}27(0{,}037 + 0{,}002 \cdot t^{0{,}6})\left(\frac{T}{724} + 1{,}27\right)^{8{,}2}. \quad (4)$$

Уравнение (4) учитывает деформационное упрочнение и влияние технологических нагревов. Использование его в комплексной теории пластичности, например, такой как Шабоша, позволяет моделировать поведение двухфазной стали во время ремонта, учитывая сложно-напряженное состояние, накопленную пластическую деформацию, кинематическое упрочнение, температурное воздействие во время технологических операций.

Выводы. Исследовано взаимное влияние накопленной пластической деформации и технологических температурных воздействий на эволюцию свойств двухфазных сталей. Установлено, что деформационное упрочнение сохраняется при воздействии температуры в диапазоне до критических температур фазовых переходов. Такое поведение можно объяснить тем, что зерна в этом диапазоне температур сохраняют свою форму и расположение. Деградация предела прочности стали при воздействии нагревов вызвана незначительным отпуском мартенсита в существующих зернах. При этом несколько повышаются напряжения наступления текучести, в связи с осаждением карбидов по границам мартенситных зерен, что препятствует свободному движению дислокаций.

Даже кратковременный нагрев до температур, сравнимых с критическими температурами фазовых переходов, приводит к деградации свойств стальных конструкций. Это обуславливает необходимость планирования и контроля температуры во время ремонта. Сварочные операций необходимо выполнять по технологии прерывистого шва, с паузами для охлаждения, причем длина швов должна рассчитываться исходя из величины допустимого ослабления. При соединении деталей предпочтение следует отдавать методам с температурами нагрева до критических значений фазовых переходов, таким как высокотемпературная пайка.

Для стали DP980 получена феноменологическая модель эволюции прочностных характеристик, которая одновременно учитывает влияние деформационного упрочнения, технологической температуры нагрева и технологической выдержки при пиковой температуре. Уравнение (4) позволяет проектировать операции ремонта, рассчитывать длину сварочных швов, прогнозировать прочностные характеристики деталей после ремонта.

Интерес дальнейшего исследования представляют величина допустимого ослабления деталей из расчета обеспечения заданного уровня пассивной безопасности, а так же критерии неразрушающего контроля качества ремонта, позволяющие определить текущие свойства стали кузова после ремонта с неизвестными режимами.

Список использованных источников

1. Огородников В. А. Приложение метода определения напряженно-деформированного состояния в пластической области измерением твердости деформированного металла к решению задач технологической механики / В. А. Огородников // Вопросы механики и физики процессов резания и холодного пластического деформирования: сборник научных трудов института сверхтвердых материалов НАН Украины. Серия Г: Процессы механической обработки. – К., 2012. – С. 359-366.

2. Byun T.S. Tensile Properties and Inhomogeneous Deformation of Ferrite-Martensite Dual-Phase Steels / Byun T.S., Kim I.S.// Journal of Materials Science, 28. – 1993. – p. 2923-2932.

3. Erdogan M., The Effect of New Ferrite Content on the Tensile Fracture Behaviour of Dual Phase Steels, Journal of Materials Science, 37. – 2002. – p. 3623-3630.

4. Bag A. Influence of Martensite Content and Morphology on Tensile and Impact Properties of High-Martensite Dual-Phase Steels/ Bag A., K.K. Ray, E.S. Dwarakadasa// Metallurgical and Materials Transactions A, 30. – 1999. – p. 1193-1202.

5. Фалалеев А. П. Моделирование поведения двухфазных сталей на операциях холодной ремонтной вытяжки кузовов автомобилей / А. П. Фалалеев // Наукові нотатки ЛНТУ: зб. наук. праць. Вип.12. – Луцьк, 2012. – С. 85-92.

6. Фалалеев А. П. Влияние температурных режимов кузовного ремонта на эволюцию механических свойств двухфазных автомобильных сталей / А. П. Фалалеев // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту ДонНТУ: науково-виробн. зб. Вип. 13. – Донецьк, 2012. – С. 56-64.

УДК 621.822.172:621.7.079

Д.Ю. Федориненко, канд. техн. наук
О.А. Плівак, асистент
С.В. Майданюк, асистент
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТОЧНОСТІ РЕГУЛЬОВАНОЇ ГІДРОСТАТИЧНОЇ ВТУЛКИ ШПИНДЕЛЬНОГО ПІДШИПНИКА

Запропонована нова конструкція гідростатичної втулки регульованої радіальної опори шпинделя. Розроблена методика вимірювання показників точності опорної поверхні гідростатичної втулки з урахуванням особливостей її будови. Здійснено спектральний аналіз точності контуру опорної поверхні гідростатичної втулки. Визначені статистичні характеристики амплітуд та початкових фаз спектра опорної поверхні втулки. Встановлені закономірності формування амплітуд гармонік спектра контуру опорної поверхні залежно від технології виготовлення втулки.

Ключові слова: *точність, гідростатична втулка, спектральний аналіз, технологія виготовлення.*

Предложена новая конструкция гидростатической втулки регулируемой радиальной опоры шпинделя. Разработана методика измерения показателей точности опорной поверхности гидростатической втулки с учетом особенностей ее строения. Осуществлен спектральный анализ точности контура опорной поверхности гидростатической втулки. Определены статистические характеристики амплитуд и начальных фаз спектра опорной поверхности втулки. Установлены закономерности формирования амплитуд гармоник спектра контура опорной поверхности в зависимости от технологии изготовления втулки.

Ключевые слова: *точность, гидростатическая втулка, спектральный анализ, технология изготовления.*

The new construction of the regulable hydrostatical bush of spindle radial support is offered. The method of measuring of hydrostatical bush base surface exactness indexes is developed taking into account the features of its structure. The spectrology of exactness is carried out to the contour of hydrostatical bush base surface. Statistical descriptions of bush

spectrum amplitudes and initial phases are definite. Conformities to the law of spectrum accordions amplitudes forming are set to the contour of base surface depending on manufacturing of bush methods.

Key words: *exactness, hydrostatical bush, spectrology, manufacturing methods.*

Постановка проблеми. Найбільш відповідальним елементом регульованої шпиндельної гідростатичної опори (ГСО) є гідростатична втулка, від точності виготовлення якої багато в чому залежить точність підшипника в цілому.

Відсутність методик урахування впливу параметрів точності опорних поверхонь підшипника приводить до визначення завищених розрахункових експлуатаційних показників, що, у свою чергу, спричиняє зменшення надійності роботи опори та вихідних показників точності обертання шпинделя під навантаженням з боку процесу різання. Це значно ускладнює обґрунтований вибір експлуатаційних параметрів системи живлення, що обумовлює зниження показників якості шпиндельних вузлів із ГСО і стримує їх впровадження у верстатах.

Аналіз досліджень і публікацій. У роботах Коровчинського М.В. [1], Білоусова О.І. [2] оцінено вплив деяких похибок форми спряжених поверхонь підшипників ковзання на функцію тиску, несучу здатність, витрати рідини. Показано, що несуча здатність, момент тертя, витрата рідини істотно залежать від точності спряжених поверхонь навіть при незначних відхиленнях функції зазору від гармонійної складової.

У роботах Бушуєва В.В. [3], Ковальова В.Д. [4] показано, що деформації опорних поверхонь чинять шкідливий вплив на всі експлуатаційні характеристики ГСО. Вплив шорсткості опорних поверхонь ГСО досліджувався в роботі [5]. Вказано, що в найбільшому ступені шорсткість (при $Rz \le 0{,}4$ мкм) впливає на витрати рідини (до 5 %), несуча здатність при цьому змінюється в межах 0,3 %.

У монографії [6] показано, що геометричні похибки спряжених опорних поверхонь, які формуються під час виготовлення підшипника, спричиняють погіршення його експлуатаційних характеристик, насамперед несучої здатності та жорсткості.

Слід також зазначити, що існуючі методики проектування не враховують вплив деформації, технологічної спадковості гідростатичної втулки на експлуатаційні характеристики шпиндельних ГСО, що не припустимо для регульованих конструкцій опор.

Мета статті. Метою цієї роботи є розробка методики вимірювання, аналізу показників точності опорної поверхні гідростатичної втулки регульованої конструкції та їх впливу на точність шпиндельного радіального підшипника.

Виклад основного матеріалу. Як об’єкт аналізу розглянемо гідростатичну втулку регульованої радіальної ГСО [7], дослідний зразок якої показаний на рисунку 1.

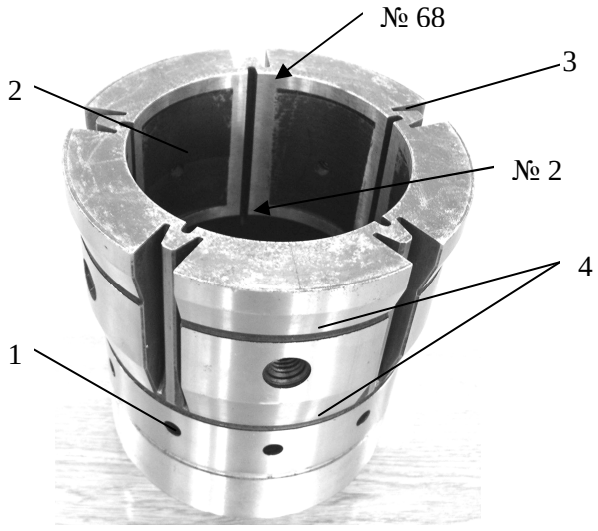


Рис. 1. Дослідний зразок гідростатичної втулки

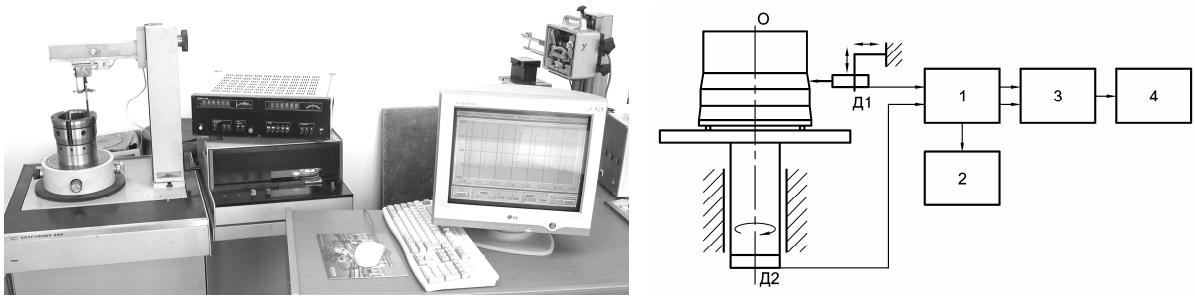
З метою підвищення жорсткості підшипника гідростатична втулка містить п’ять карманів 2, які підключені через постійні дроселі до джерела стисненої рідини. Для компенсації впливу нерівномірності регулювання зазору на точність обробки зазначена втулка виконана з двома короткими конічними поясками 4 з кутом нахилу 15° до осі шпинделя. Для розвантаження опорної частини підшипника від осьових зусиль у різевому з’єднанні на хвостовій частині втулки виконані в тангенціальному напрямку десять наскрізних отворів 1.

З метою надання втулці пружних властивостей на її зовнішній поверхні виконана група пазів криволінійного профілю 3, між якими утворені кармани для підводу рідини (рис. 1), причому зазначені пази розташовані в безпосередній близькості один від одного, а сусідні пази виконані почергово на внутрішній та зовнішній поверхнях втулки.

Оцінювання точності гідростатичної втулки здійснювалося за показниками відхилення від циліндричності та круглості її опорної поверхні. Для вимірювання зазначених показників використано комплекс (рис. 2), який складається з кругломіра 1 моделі 298 зі штатним записуючим пристроєм 2, аналого-цифрового перетворювача (АЦП) 3 та персонального комп'ютера (ПК) 4.

Кругломір дозволяє виконувати вимірювання від круглості та циліндричності. Його побудовано на принципі прецизійного обертання деталі навколо осі О відносно нерухомого щупа Д1. Щуп має можливість переміщуватися вздовж осі деталі.

Під час обертання деталі в прецизійному шпинделі кругломіра необхідно чітко визначати кутові положення деталі відносно щупа, тобто знати координати точок контакту вимірюваної поверхні деталі зі щупом у полярній системі координат. Для вирішення цього завдання в конструкцію приладу було внесено конструктивні доповнення – встановлено додаткові датчики Д2 (рис. 2) для відстежування кутового положення шпинделя приладу. Таким чином, на АЦП з кругломіра передається два сигнали: один – відхилення реального профілю деталі, другий – кутове положення шпинделя.



а) *б)*

Рис. 2. Загальний вигляд:
а) та схема; б) комплексу для вимірювання точності гідростатичної втулки

Визначення відхилень опорної поверхні втулки від циліндричності, круглості здійснено за результатами вимірювання відхилень радіальної координати контурів поперечних перерізів при фіксованому положенні її осі. Вимірювання круглограм здійснено в 70 поперечних перерізах по опорній довжині втулки з кроком між сусідніми перерізами 1 мм.

Вимірювання виконуються в такій послідовності: контроль параметрів вимірюваної деталі (габаритних розмірів, ваги); підготовка приладу до вимірювань, яка включає проведення калібрування приладу; центрування деталі; нівелювання осі деталі до осі шпинделя приладу; встановлення обмежень переміщення щупа для переривчастих поверхонь гідростатичної втулки; проведення вимірювань; обробка результатів вимірювань.

Калібрування приладу відбувається із застосуванням спеціальних установочних мір, які дозволяють встановити прецизійний шпиндель приладу з мінімальним відхиленням відносно його осі, а також отримати масштабні коефіцієнти.

Далі проводиться настроювання приладу з встановленою гідростатичною втулкою, а саме: центрування та нівелювання осі опорної поверхні втулки з метою встановлення мінімального відхилення центру ваги деталі відносно осі шпинделя, а також суміщення осей опорної поверхні втулки і шпинделя приладу.

Вимірювання відхилень від циліндричності на комплексі було зведене до вимірювання профілів опорної поверхні втулки в окремих перерізах, перпендикулярних до її

осі. При цьому шляхом центрування та нівелювання осі деталі було максимально наближено прилеглий циліндр опорної поверхні втулки до уявного циліндра з мінімальним відхиленням від циліндричності в крайніх перерізах.

Для аналізу частотного складу круглограм здійснено їх спектральний аналіз.

Спектральний аналіз здійснено за результатами математичного опису контуру опорної поверхні втулки, для чого здійснено її експериментальні виміри на кругломірі з послідуючою цифровою обробкою. Дискретні значення ординати перерізу поверхні втулки виміряно в 4100 точках (через $1{,}532\times10^{-3}$ ° по куту). Положення поперечних перерізів № 2 та № 68 умовно показані стрілками на рис. 1.

На рис. 3 показано відхилення ординати контуру опорної поверхні, на якому простежуються западини, що обумовлені наявністю поздовжніх пазів втулки.

З метою подальшого аналізу інформації, яка відповідає ділянкам $l_1 \ldots l_6$ (рис. 3) опорної поверхні підшипника, проводилося видалення з дискретного набору значень по куту 360° ординат переривчастого профілю, що відповідають западинам 1. Для цього визначалися проміжки часу, які відповідають западинам 1, і проводилося об'єднання ділянок $l_1 \ldots l_6$ дискретного масиву значень ординат профілю за допомогою функцій submatrix та stack пакета MathCAD. У результаті отримали дискретний набір ординат профілю в функції часу вимірювання, який наведений на рисунку 4.

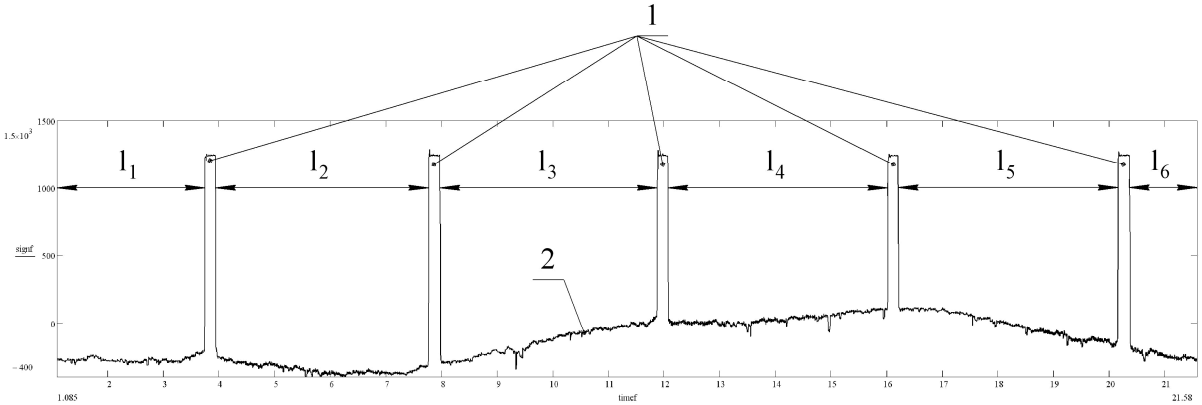


Рис. 3. Відхилення ординати контуру опорної поверхні гідростатичної втулки в перерізі № 2: 1 – западини, які відповідають поздовжнім пазам втулки

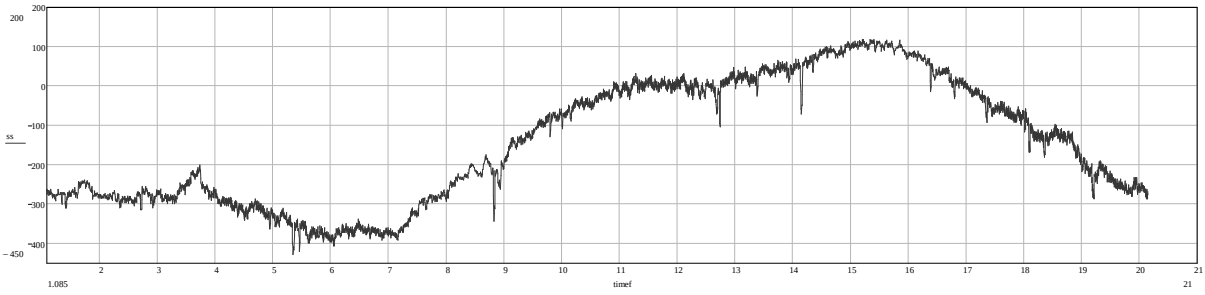
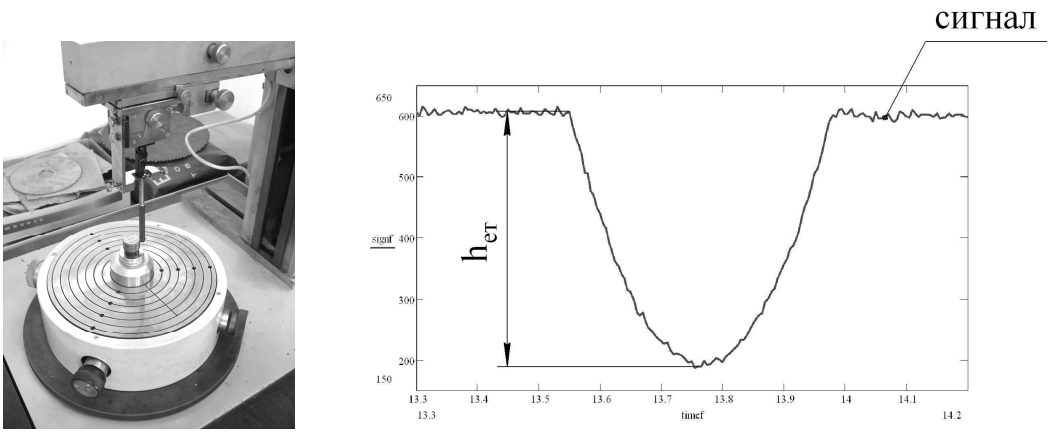


Рис. 4. Відхилення ординати контуру опорної поверхні втулки в перерізі № 2 після видалення западин

Для визначення масштабу осі ординат на рисунку 4 проводився запис круглограми зовнішньої циліндричної поверхні еталонного зразка з лискою в ідентичних до вимірювання втулки умовах (рис. 5).



а) *б)*

Рис. 5. Загальний вигляд: а) вимірювання круглограми еталонного зразка та визначення глибини западини; б) h_{em} засобами MathCAD

Урезультаті обробки круглограми в пакеті MathCAD визначалося значення $h_{ет}$ в кодах АЦП ЕОМ, що відповідає лисці на зовнішній поверхні еталона. Лиска має глибину 20 мкм. Таким чином, множенням значень ординат у кодах АЦП на масштабний коефіцієнт отримані значення ординат контуру опорної поверхні в мікрометрах.

Для математичного опису форми опорної поверхні втулки здійснена інтерполяція дискретних значень ординат контуру перерізу кубічними сплайнами. Для цього використані вбудовані функції cspline і interp пакету MathCAD.

Виконано математичний опис контуру опорної поверхні за допомогою ряду Фур'є, що включає 80 гармонік. Враховуючи, що період дискретно заданої функції $T \neq 2\pi$, форма поперечного перерізу подана у вигляді залежності

$$r(\varphi) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{80} Am_k \sin(k\omega_0\varphi + \psi_k), \qquad (1)$$

де ω_0 – базове значення кругової частоти, $\omega_0 = 2\pi/T$.

Амплітуди і початкові фази ряду (1) знаходяться за залежностями [8]:

$$Am_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}\ ,\ \psi_k = arctg\frac{a_k}{b_k}.$$

Коефіцієнти ряду (1) знайдені так [8]:

$$a_0 = \frac{1}{T}\int_0^T r(\varphi)d\varphi\ ,\ a_k = \frac{2}{T}\int_0^T r(\varphi)cos(k\omega_0\varphi)d\varphi\ ,\ b_k = \frac{2}{T}\int_0^T r(\varphi)sin(k\omega_0\varphi)d\varphi\ .$$

Знаходження коефіцієнтів ряду Фур'є, амплітуд і початкових фаз гармонік здійснено в програмному середовищі MathCAD, результати розрахунків для перерізу № 2 наведені на рисунку 6.

$a_{k\omega 0}=$

	1
1	-3.65
2	-0.219
3	-1.889
4	0.092
5	-0.153
6	-0.05
7	-0.096
8	0.147
9	0.012
10	-0.236

$b_{k\omega 0}=$

	1
1	-9.506
2	0.814
3	1.434
4	-0.213
5	-0.491
6	0.059
7	0.12
8	0.212
9	0.219
10	0.079

$Am_{k\omega 0}=$

	1
1	10.183
2	0.843
3	2.371
4	0.232
5	0.514
6	0.077
7	0.154
8	0.258
9	0.219
10	0.249

$\psi_{k\omega 0}=$

	1
1	21.007
2	-15.042
3	-52.794
4	-23.439
5	17.287
6	-40.216
7	-38.728
8	34.693
9	3.173
10	-71.5

Рис. 6. Розрахунок коефіцієнтів ряду Фур'є, амплітуд і початкових фаз гармонічного ряду, який описує контур опорної поверхні втулки

Значення коефіцієнтів ряду, амплітуд і початкових фаз утворюють спектр контуру опорної поверхні втулки. На рисунку 7 наведено спектр амплітуд $Am_{k\omega 0}$ ряду Фур'є контуру втулки в перерізі № 2.

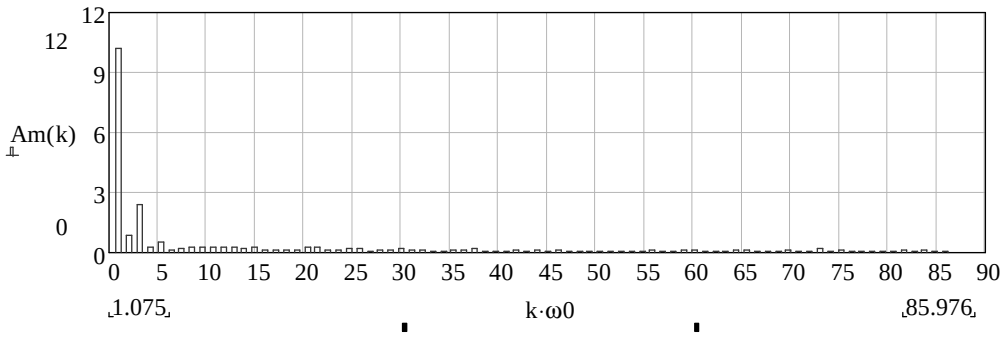


Рис. 7. Спектр амплітуд контуру опорної поверхні гідростатичної втулки в перерізі № 2

На представленому спектрі вісь абсцис є віссю частоти. Враховуючи, що $T \approx 2\pi$ і, відповідно, $k \cdot \omega 0 \approx k$ для зручності подальшого аналізу розглянемо спектр амплітуд у функції номеру k гармоніки.

Суттєвими є амплітуди гармонік з номерами до п'ятої включно (рис. 8). Найбільше значення має перша гармоніка, яка характеризує ексцентриситет контуру опорної поверхні втулки. У спектрі простежуються гармоніки, що характеризують огранювання поверхні, причому найбільшого амплітудного значення приймають гармоніки з номерами 3, 5. Наявна також друга гармоніка, що характеризує овальність контуру. Інші гармоніки мають нерегулярні зміни.

Формування огранювання контуру опорної поверхні втулки з числом граней 3, 5 пояснюється явищем технологічної спадковості технологічних баз та конструктивних форм відповідно.

Огранювання з трьома гранями виникає внаслідок використання трикулачкового самоцентрівного патрону для базування і силового замикання втулки під час остаточної обробки її опорної поверхні. Внаслідок деформації втулки під час обробки з боку трьох кулачків патрону формується відповідне огранювання контуру обробленої поверхні. Огранювання з п'ятьма гранями формується внаслідок спадкування конструктивної форми втулки, що налічує п'ять груп поздовжніх пазів. Під час обробки ділянки втулки, утворені переривчастим профілем опорної поверхні, деформуються майже окремо, що обумовлює виникнення огранювання з п'ятьма гранями.

У спектрі на рис. 8, наведеному для перерізу опорної поверхні втулки № 68, простежується шоста суттєва гармоніка, яка кратна третій гармоніці й обумовлена деформаціями втулки під час використання трикулачкового патрона для фінішної обробки опорної поверхні.

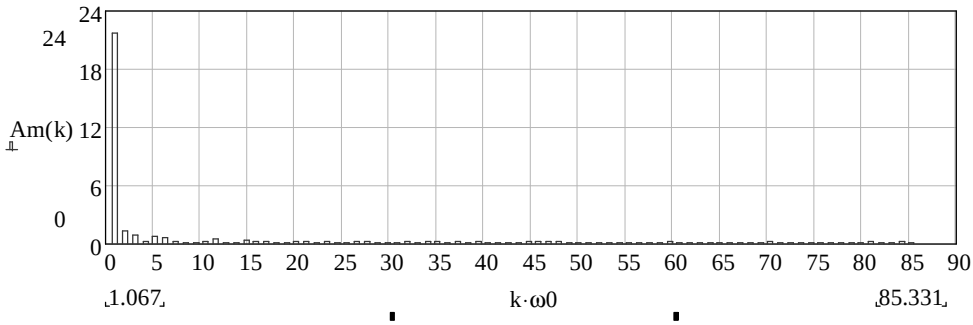


Рис. 8. Спектр амплітуд контуру опорної поверхні гідростатичної втулки в перерізі № 68

З аналізу спектра на рисунку 8 випливає, що гармоніки з номерами 1, 2, 5, 6 істотно зростають по відношенню до спектра контуру опорної поверхні в перерізі № 2, значення четвертої гармоніки лишається приблизно на постійному рівні, а величина третьої гармоніки зменшується.

Статистичною обробкою спектрів амплітуд і початкових фаз гармонік в 70-ти перерізах опорної поверхні втулки отримано математичне сподівання амплітуд m_{Ak} та початкових фаз $m_{\psi k}$ суттєвих гармонік, які наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Статистичні характеристики амплітуд та початкових фаз спектра опорної поверхні гідростатичної втулки

	Номер гармоніки k					
	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6
m_{Ak}, мкм	12,52	1,06	1,19	0,19	0,62	0,36
$m_{\psi k}$, °	-34,3	-9,5	-64,2	-48,5	15,4	-2,1

Отримані статистичні характеристики амплітуд і початкових фаз гармонік спектра є основою для подальшого аналізу функції зазору регульованих ГСО шпинделя.

Висновки. Розроблена методика вимірювання показників точності опорної поверхні регульованої конструкції гідростатичної втулки, яка дозволяє визначити вплив технології виготовлення, геометричних відхилень на експлуатаційні характеристики підшипника.

На основі спектрального аналізу контуру опорної поверхні втулки встановлені закономірності формування точності, обумовлені технологією виготовлення. Необхідний пошук шляхів зменшення впливу технологічної спадковості на точність опорної поверхні гідростатичної втулки.

Список використаних джерел

1. Коровчинский М. В. Прикладная теория подшипников жидкостного трения / М. В. Коровчинский. – М., 1954. – 186 с.

2. Белоусов А. И. Влияние некоторых погрешностей форм вала и обоймы на характеристики гидростатического подшипника / А. И. Белоусов, Т. А. Хромова // Исследование гидростатических подшипников. – 1973. – С. 18-28.

3. Бушуев В. В. Гидростатическая смазка в станках / В. В. Бушуев. – М.: Машиностроение, 1989. – 176 с.

4. Ковальов В. Д. Основи теорії розрахунку та проектування гідравлічних опорних вузлів верстатного устаткування: дис. … д-ра техн. наук: 05.03.01 / Віктор Дмитрович Ковальов. – К.: НТУУ „КПІ”, 2001. – 424 с.

5. Строк Л. В. Влияние шероховатости опорных поверхностей на характеристики незамкнутого осевого гидростатического подшипника / Л. В. Строк, Я. Ю. Пикалов, В. С. Секацкий // Известия Самарского научного центра РАН. – 2011. – Т. 13. – № 1(3). – С. 654-657.

6. Струтинський В. Б. Статистична динаміка шпиндельних вузлів на гідростатичних опорах: монографія / В. Б. Струтинський, Д. Ю. Федориненко. – Ніжин: Аспект-Поліграф, 2011. – 464 с.

7. Пат. 97685 UA, МПК F16C 32/06. Регульований радіальний гідростатичний підшипник / В. Б. Струтинський, Д. Ю. Федориненко, С. В. Бойко; заявник і патентовласник Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут”. – № a201003534; заявл. 26.03.2010; опубл. 12.03.2012, Бюл. № 5.

8. Струтинський В. Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки / В. Б. Струтинський. – Житомир: ЖІТІ, 2001. – 612 с.

УДК 621. 43-242.3

І.М. Хоменко, канд. техн. наук
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

А.К. Кобринець, аспірант
Національний технічний університет "Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ У СПРЯЖЕННІ ЦИЛІНДР-СПІДНИЦЯ ПОРШНЯ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

У роботі наведено метод розрахункового визначення розподілу гідродинамічного тиску в спряженні циліндр-спідниця бочкоподібного поршня, рівнодійної погонного гідродинамічного тиску мастила на поршень у спряженні циліндр-спідниця поршня.

В работе приведен метод расчетного определения распределения гидродинамического давления в сопряжении цилиндр-юбка поршня, равнодействующей погонного гидродинамического давления на поршень в сопряжении цилиндр-юбка поршня.

A method over of calculation determination of distribution of hydrodynamic pressure is in-process brought in an interface cylinder-skirt of piston, resultant linear hydrodynamic pressure on a piston in an interface cylinder-skirt of piston.

Вступ. Поршні сучасних автотракторних двигунів мають овальну в поперечному і бочкоподібну – у поздовжньому перерізах форми. Обґрунтування застосування поршнів такого типу наведено в роботі професора Б.Я. Гінцбурга [1].

Під час роботи двигуна необхідно створення мінімально можливого зазору між стінкою циліндра та поршнем по всій його висоті. Труднощі полягають у тому, що поршень являє собою нерівножорстку конструкцію і його окремі частини під час роботи нагріваються також нерівномірно, а тому неоднаково змінюються в розмірах. При роботі двигуна температура днища поршня може сягати 300…350 °С. Тому зазор між циліндром і поршнем в області вогневого поясу становить 0,4…0,6 мм.

Температура поршня в зоні напрямляючого поясу поршня-спідниці менша і теплове розширення спідниці поршня значно нижче. У зв'язку з цим мінімальний зазор між циліндром двигуна і спідницею поршня у робочому стані становить 0,02…0,04 мм.

Для компенсації неоднакового теплового розширення на працюючому двигуні діаметр поршня від днища до спідниці поступово збільшують. Цим обумовлено конічний або біконічний характер його поверхні (рис. 1).

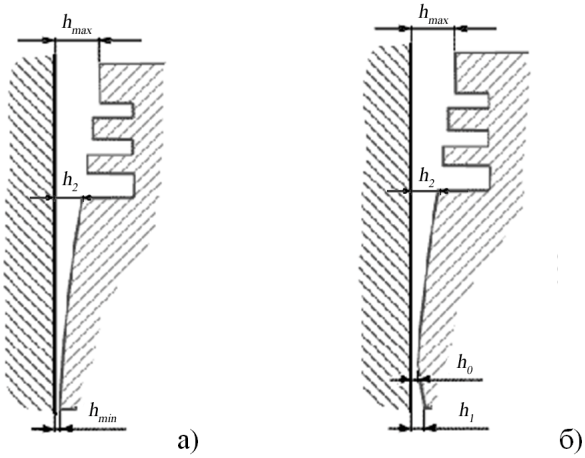


Рис. 1. Схема бокового профілю спідниці поршня: а) конічний; б) біконічний

Повернутий конус у нижній частині спідниці дозволяє поршню працювати більш м'ягко, без різких ударів при перекладанні в нижній і верхній мертвих точках. Крім того, під час руху поршня вниз повернутий конус сприяє виникненню гідродинамічного ефекту, завдяки якому поршень «спливає» на мастильній плівці.

Таким чином, у поздовжньому напрямку в холодному стані поршень має бочкоподібну форму.

Під час профілювання бічної поверхні спідниці, як спрямовуючого елементу під час руху поршня, задовольняються такі вимоги. Зазор між циліндром і максимальним діаметром спідниці має бути мінімальним і в той же час гарантувати роботу поршня без защемлення в циліндрі. Максимальний діаметр спідниці в нагрітому стані повинен бути розташований як можна ближче до осі поршневого пальця для запобігання перекосу поршня по відношенню до осі циліндра.

Профіль поршня підбирають, як правило, емпіричним шляхом для кожної нової конструкції, оскільки величина зазорів одночасно залежить від початкових деформацій поршня й циліндра, що виникають при складанні двигуна, і подальшому їх тепловому розширенні під час роботи.

Профілювання бічної частини спідниці поршня має базуватися на отриманні максимуму гідродинамічної несучої здатності шару мастила за рахунок подовження ділянки l, на якій маємо позитивний кут атаки при прямому або зворотному русі поршня в циліндрі.

З урахуванням реверсивного характеру руху поршня бочкоподібного профілю приймають на такті розширення робочого циклу двигуна прямий хід (ділянка довжиною l2), а на такті стискування – зворотний хід (ділянка довжиною l1) (рис. 2).

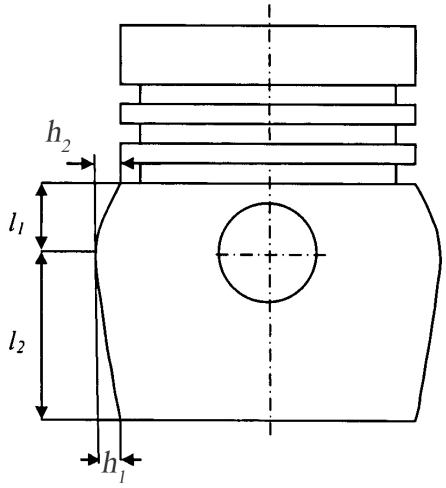


Рис. 2. Схема поршня з бочкоподібним профілем спідниці

При гідродинамічних розрахунках бочкоподібний профіль спідниці поршня може бути представлено двома похилими прямими (2 – рисунок 3) або з включенням між ними прямої, паралельної осі циліндра (3 – рис. 3).

Схему розподілу гідродинамічного тиску мастила у спряженні циліндр-спідниця поршня для схеми 3 (рис. 3) наведено на рис. 4.

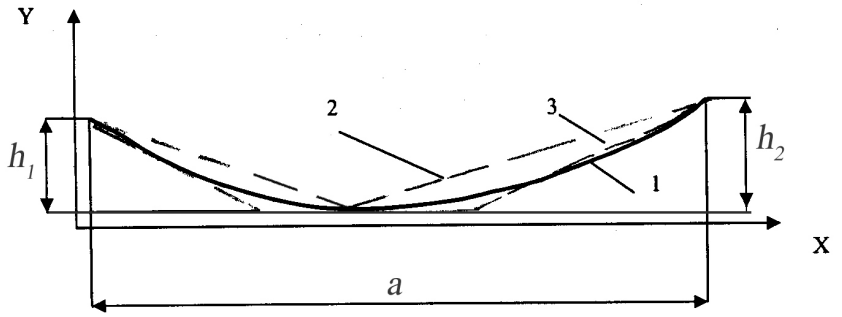


Рис. 3. Розрахункові схеми для визначення гідродинамічної несучої здатності мастила у спряженні циліндр-спідниця поршня

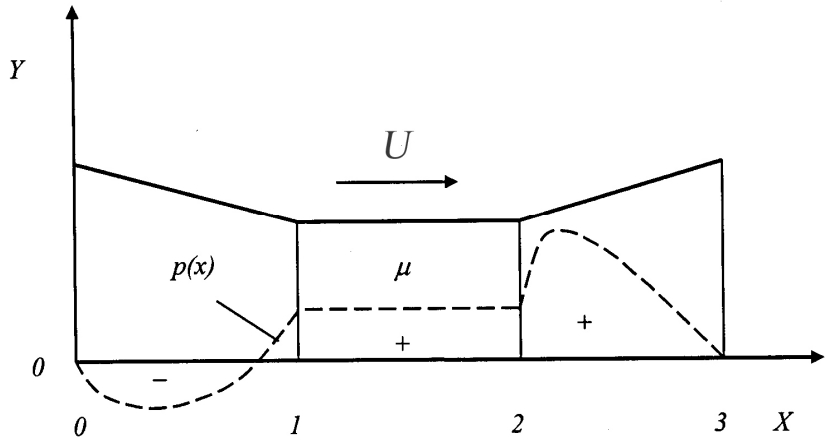


Рис. 4. Розподіл тиску мастила в зазорі спряження циліндр-спідниця поршня

Для ефективного використання гідродинамічної несучої здатності мастильного шару проаналізуємо загальні закономірності її виникнення в шарі мастила між циліндром і спідницею поршня в поздовжньому напрямку його руху. Спочатку розглянемо відому плоску задачу Куетта для руху в'язкої рідини в клиновому зазорі (рис. 5).

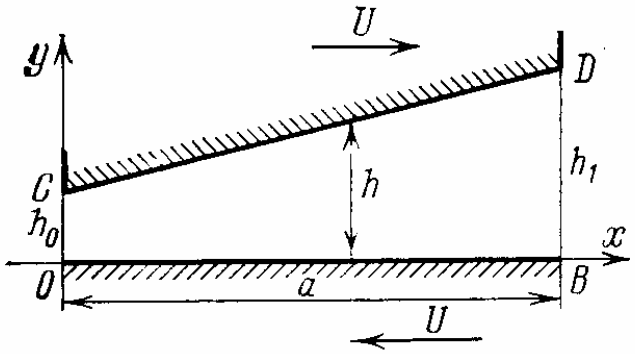


Рис. 5. Схема плоского клинового зазору

Вважаючи переміщення повзуна поступальним, рівномірним і прямолінійним зі швидкістю U , вектор якої паралельний OB і спрямований вправо, надамо рисунку таку ж швидкість у протилежному напрямку. Повзун при цьому штучно стає нерухомим, а відрізок OB буде рухатись зі швидкістю U вліво. В результаті прилипання в'язка рідина буде рухатися у напрямку від широкої частини щілини BD до вузької OC. Систему координат і характерні розміри показано на рисунку 5.

Розв'язуючи відоме рівняння Рейнольдса для наведеного на рис. 5 профілю, Л.Г. Лойцянським отримано функцію розподілу тиску в зазорі і вираз для погонної (віднесеної до одиниці ширини зазору) рівнодійної гідродинамічних сил, що діють на повзун [2]:

$$p(x) = p_0 + \frac{6\mu U a}{k h_0^2}\left[\frac{a}{a+kx} - \frac{1}{2+k} - \frac{1+k}{2+k}\cdot\frac{a^2}{(a+kx)^2}\right]; \tag{1.1}$$

$$R = \frac{6\mu U a^2}{k^2 h_0^2}\left[\ln(1+k) - \frac{2k}{2+k}\right], \tag{1.2}$$

де $k = \frac{h_1}{h_0} - 1 > 0;$

μ – динамічна в'язкість мастила.

Середнє значення погонної гідродинамічного тиску, що діє на повзун, можна визначити, використовавши формулу (1.1):

$$p_{cp} = \frac{1}{a} \cdot \int_0^a p(x)dx. \qquad (1.3)$$

Алгоритм визначення розподілу тиску мастила вздовж зазору в системі MathCAD наведено нижче (тут і далі розрахункові параметри в системі СІ).

$p0 := 0 \qquad \mu := 0.002 \quad U := 6 \quad a := 0.03 \quad h0 := 20 \cdot 10^{-6} \quad h1 := 44 \cdot 10^{-6}$

$k := \frac{h1}{h0} - 1 \qquad N := 100 \quad i := 0..N \quad x_i := a \cdot i \cdot 0.01$

$$p(x) := p0 + 6 \cdot \mu \cdot U \cdot \frac{a}{k \cdot h0^2} \cdot \left[\frac{a}{a + k \cdot x} - \frac{1}{2 + k} - \frac{1 + k}{2 + k} \cdot \frac{a^2}{(a + k \cdot x)^2} \right]$$

Значення середнього гідродинамічного тиску на поршень (Па) і графік розподілу тиску мастила вздовж зазору наведено на рисунку 6:

$$p := \frac{1}{a} \cdot \int_0^a p(x)\,dx \qquad p = 1.442 \times 10^5$$

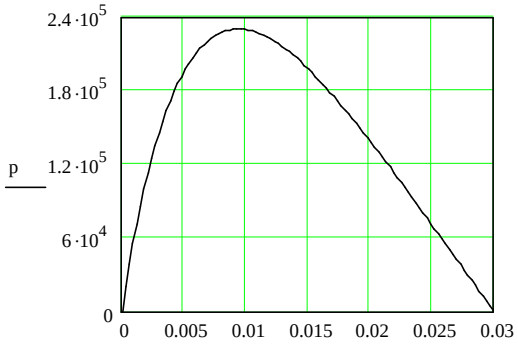


Рис. 6. Розподіл тиску мастила вздовж клинового зазору

Проведений Лойцянським аналіз формули (1.1) показав, що R сягає максимального значення при k=1,2, тобто при $h_1 / h_0 = 2{,}2$ і становить

$$R_{\max} \approx 0.16\mu \frac{Ua^2}{h_0^2}. \qquad (1.4)$$

У роботі Раузе [3] отримана формула для визначення тиску під повзуном у вигляді:

$$p = p_0 + \frac{6\mu Ux(a-x)(h_1 - h_0)}{a \cdot h^2 (h_1 + h_2)}.$$

Максимальне значення погонного рівнодійної гідродинамічного тиску при цьому визначається з виразу:

$$R = \frac{6\mu Ua^2}{(c-1)^2 h_0^2} \left(\ln c - 2\frac{c-1}{c+1} \right), \qquad (1.5)$$

де $c = h_1 / h_0$.

Після диференціювання виразу (1.5) по c і прирівнювання результату нулю встановлено, що:

$$R_{\max} = \frac{0.41\mu U a^2}{h_m^2}, \tag{1.6}$$

де h_m – середня відстань між площинами, що утворюють плоский зазор.

У роботі [5] виділено з (1.2) функцію Релея:

$$R_k = \frac{1}{k^2}\left[\ln(1+k) - \frac{2k}{2+k}\right], \tag{1.7}$$

яку після розкладання в ряд $\ln(1+k)$ для значень перепаду висот профілю спідниці поршня $0 \le k \le 1$ представлено простою лінійною формою $R_k = k/12$.

У результаті отримано функцію для визначення погонної рівнодійної:

$$R = \frac{\mu \cdot U \cdot a^2 \cdot (h_1 - h_0)}{2 \cdot h_0^3}. \tag{1.8}$$

Виходячи з гідродинамічної теорії мащення та мінімізації механічних втрат у спряженні циліндр-поршень доцільно отримати раціональні значення гідродинамічного тиску у спряженні циліндр-спідниця поршня, значення перепадів висот бочкоподібного профілю, представленого лінійними графіками на рис. 3, співвідношень довжин окремих ділянок профілю.

Профілювання бокової твірної спідниці поршня повинно ґрунтуватись на досягненні максимуму гідродинамічної несучої здатності за рахунок зміни перепаду висот профілю спідниці поршня.

Методи та результати. Фізичний процес у спряженні циліндр-спідниця поршня було змодельовано на конфузорно-дифузорному клиновому зазорі, наведеному на рисунку 7. Рухомою частиною прийнято циліндр, що рухається зі швидкістю U (відповідає швидкості руху поршня). Зазначене не впливає на результати, оскільки визначальним є відносний рух елементів спряження. Допускається наявність ділянки, паралельної осі циліндра на межі між конфузором (праворуч на рисунку) і дифузором (ліворуч).

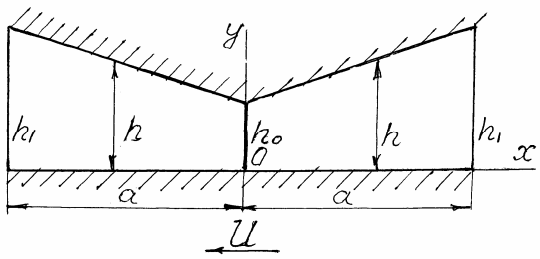


Рис. 7. Розрахункова схема клинового зазору

Функція розподілу тиску в клиновому зазорі, наведеному на рисунку 7, має такий вигляд:

$$p(x) = \frac{1}{h(x)^2\left(h_1^2 - h_0^2\right)} \cdot p_n\left[h(x)^2\left(h^2{}_1 + h^2{}_0\right) - \left(h_0 h_1 + h(x)^2\right)\right] +$$
$$+ \frac{x}{|x|} \cdot \frac{6\mu U a\left[h(x)(h_1 + h_0) - \left(h_0 h_1 + h(x)^2\right)\right]}{h(x)^2\left(h_1^2 - h_0^2\right)}, \tag{1.9}$$

де $h(x) = h_0\left(1 + \frac{k \cdot signx \cdot x}{a}\right)$.

Розподіл тиску мастила у клиновому зазорі у вигляді функції і графіка наведено нижче (рис. 8):

$$h0 := 20\cdot 10^{-6} \quad h1 := 44\cdot 10^{-6} \quad a := 0.02 \quad \mu := 0.002 \quad U := 6 \quad k := \frac{h1}{h0} - 1 \quad N := 100 \quad i := 0..N$$

$$x_i := -a + 0.02\cdot a\cdot i \qquad h(x) := h0\cdot\left(1 + \mathrm{sign}(x)\cdot k\cdot\frac{x}{a}\right)$$

$$f(x) := \frac{\left[6\mu\cdot U\cdot a\cdot\left[h(x)\cdot(h1+h0) - \left(h0\cdot h1 + h(x)^2\right)\right]\right]}{\left[h(x)^2\cdot\left(h1^2 - h0^2\right)\right]}$$

$$p(x) := \frac{1}{h(x)^2\cdot\left(h1^2 - h0^2\right)}\cdot\left[h(x)^2\cdot\left(h1^2 - h0^2\right) - h1^2\cdot\left(h(x)^2 - h0^2\right)\right] + \frac{x}{|x|}\cdot f(x) \qquad p_i := p\left(x_i\right)$$

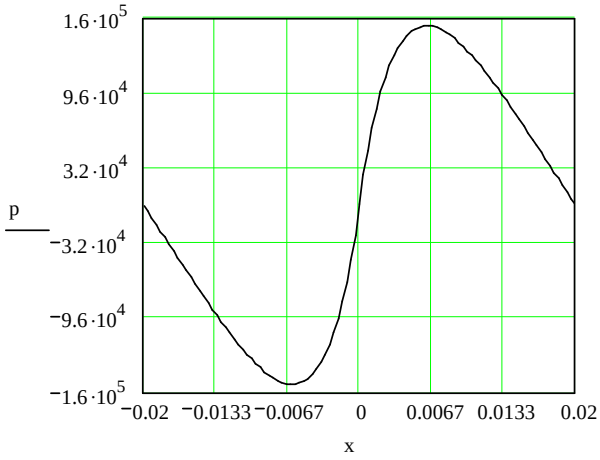


Рис. 8. Розподіл тиску мастила в клиновому зазорі (рис. 7)

У спряженні циліндр-поршень при переміщенні останнього і за наявності шару мастила переважно домінує рідинне тертя; проте залежно від шорохуватості поверхонь циліндра і поршня, навантаження від дії нормальної і гідродинамічної сил, перекосів поршня під час його руху можливо також граничне тертя. Навіть при паралельному переміщенні поршня відносно циліндра завдяки мікрорельєфу їх поверхонь у спряженні виникають клинові зазори, які звужуються або розширюються; що в результаті потоку мастила призводить до виникнення підйомної сили.

За результатами досліджень Ю. В. Рождественського, величина середнього гідродинамічного тиску, наприклад, у дизельного двигуна 8Ч 15/18 при різних режимах роботи становила – pn = 1,307…2,284 МПа, а при прокрутці колінчастого вала двигуна

pn = 0,449…1.262 МПа [6].

Якщо скористатись формулою (1.8) для визначення погонної рівнодійної гідродинамічних сил (Н/м) і віднести її величину до діаметра поршня (наприклад, D = 0,1 м), то отримаємо:

$$p_n = \frac{0.41\cdot 0{,}002\cdot 6\cdot 0{,}03^2}{1024\cdot 10^{-12}\cdot 0{,}1} = \frac{41\cdot 2\cdot 6\cdot 3^2\cdot 10^{-9}}{1024\cdot 10^{-12}\cdot 0{,}1} = \frac{4{,}428\cdot 10^3}{1024\cdot 0.1} = 134{,}5\cdot 10^3 = 0{,}135\,\text{МПа}.$$

Для прийнятих у цій роботі розрахункових параметрів значення згідно з формулою (1.3) pn = 1,44· 105Па = 0,144 МПа.

За наявності горизонтальної дільниці між розширенням та звуженням зазору (рис. 3) отримано функцію, алгоритм визначення якої, разом з графіком розподілу тиску, наведено на рисунку 9.

$$p(x)=\frac{6\mu\cdot U\cdot k\cdot x\cdot[h_1-h_0\cdot(1+signx\cdot k\cdot x/a)]}{h_0\cdot(1+signx\cdot k\cdot x/a)^2\cdot(h_1-h_0)^2}\cdot\Phi(x)+$$
$$+p_n/a\cdot(a-signx\cdot x)\cdot\Phi(x)+F(x)\cdot p_n, \qquad (1.10)$$

$pn := 1.44\cdot 10^{5}$ $U := 6$ $\mu := 0.002$ $a := 0.02$ $b := 0.01$ $h0 := 20\cdot 10^{-6}$

$h1 := 44\cdot 10^{-6}$ $k := \frac{h1}{h0} - 1$ $N := 100$ $i := 0..N$ $x_i := -a + 2\cdot a\cdot i\cdot 0.01$

$\Phi(x) := \Phi\left(\frac{x}{|x|}\cdot x - \frac{b}{2}\right)$ $F(x) := 1 - \Phi(x)$

$$p(x) := 6\cdot\mu\cdot U\cdot k\cdot x\cdot\frac{h1-h0\cdot\left(1+\frac{x}{|x|}\cdot k\cdot\frac{x}{a}\right)}{h0\cdot\left(1+\frac{x}{|x|}\cdot k\cdot\frac{x}{a}\right)^2\cdot\left(h1^2-h0^2\right)}\cdot\Phi(x)+\frac{pn}{a}\cdot\left(a-\frac{x}{|x|}\cdot x\right)\cdot\Phi(x)+F(x)\cdot pn$$

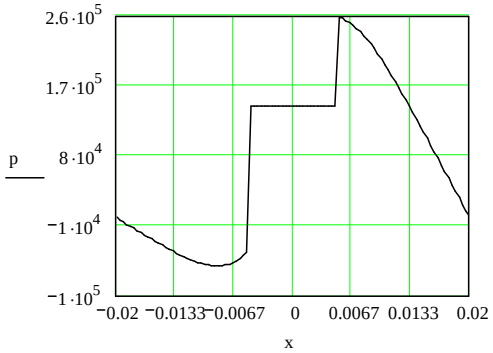


Рис. 9. Розподіл тиску мастила за наявності горизонтальної дільниці в середині клинового зазору

Як видно з рисунка 9, у межах –a…- 0,5b значення тиску мастила у спряженні циліндр спідниця поршня від'ємні. При розрахунках рівнодійної гідродинамічних сил радіальних підшипників ковзання в таких випадках для зон з від'ємним тиском його значення приймають рівним нулю, що відповідає реальним умовам роботи спряження. Враховуючи вказану обставину, визначимо значення погонної рівнодійної гідродинамічних сил, що діють на спідницю поршня (Н/м):

$R := \int_{0.5\cdot b}^{a} p(x)\,dx$ $R = 2.235\times 10^{3}$

Значення рівнодійної гідродинамічних сил необхідно узгоджувати з максимальним значенням нормальної сили від тиску газів і сил інерції, що діють на спідницю поршня, з метою запобігання виникнення граничного тертя у спряженні циліндр-спідниця поршня, а також недопустимого повороту поршня навколо пальця, обумовленого моментом пари сил (лінії дії рівнодійні гідродинамічних сил і нормальної сили зміщені).

Висновки.

1. Важливим фактором, що суттєво впливає на формування і товщину мастильного шару, його несучу здатність у спряженні циліндр-спідниця поршня, є форма й геометрія поверхонь спряження.

2. Гідродинамічна сила у спряженні циліндр-спідниця поршня виникає в результаті звуження зазору, а також – існування мікроклинів, що створюються мікронерівностями контактуючих поверхонь спряження під час руху поршня.

3. Запропоновано формули для визначення гідродинамічного тиску, погонної рівнодійної несучої здатності мастильного клину для характерних елементів спряження циліндр-спідниця поршня.

Список використаних джерел

1. Профилирование юбок поршней / Б. Я. Гинцбург, Г. Я. Васильченко, Н. С. Судойский и др. – М.: Машиностроение, 1973. – 88 с.
2. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа: учебн. для вузов / Л. Г. Лойцянский. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 840 с.
3. Рауз Х. Механика жидкостей: сокр. пер. с англ. / Х. Рауз. – М.: Изд. лит. по строительству, 1967. – 390 с.
4. Сомов В. А. Смазка машин и механизмов / В. А. Сомов. – Л., 1978. – 41 с.
5. Путинцев С. В. Основы расчета и проектирования узлов трения ДВС: учебное пособие / С. В. Путинцев, С. А. Аникин, Р. А. Галата. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 35 с., 17 ил.
6. Рождественский Ю. В. Компьютерное моделирование динамики трибосопряжения «поршень-цилиндр»: учебное пособие / Ю. В. Рождественский. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2009. – 50 с.

УДК 621.787.4

О.М. Чередніков, канд. техн. наук
О.О. Борисов, асистент
О.Г. Семеняко, аспірант
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ГЕОМЕТРІЯ КОНТАКТУ ДЕТАЛЬ-ІНДЕНТОР ПІД ЧАС ОБРОБКИ ПОВЕРХНЕВИМ ПЛАСТИЧНИМ ДЕФОРМУВАННЯМ

Розглянута геометрія контакту деталь-індентор під час обробки поверхневим пластичним деформуванням. Виведена формула для розрахунку площі поверхні контакту деталі з інструментом (деталь-індентор), яка може бути використана під час вибору форми і розмірів інструменту залежно від конкретних умов контакту.

Рассмотрена геометрия контакта деталь-индентор при обработке поверхностным пластическим деформированием. Выведена формула для расчета площади поверхности контакта детали с инструментом (деталь-индентор), которая может быть использована при выборе формы и размеров инструмента в зависимости от конкретных условий контакта.

The geometry of contact a detail-indentor is considered at processing by superficial ilowage. Formula is deduced out for the calculation of area of surface of contact of detail with an instrument (detail-indentor), which can be used for the choice of form and sizes of instrument depending on the concrete terms of contact.

Постановка проблеми. На сьогодні обробка поверхневим пластичним деформуванням знайшла широке застосування в машинобудуванні під час виготовлення деталей, виконаних із сталі, кольорових металів, а також зі спечених порошків. Основним призначенням поверхневого пластичного деформування є підвищення якості поверхневого шару.

Між показниками якості поверхневого шару й умовами обробки при поверхневій пластичній деформації існує тісний взаємозв'язок. Умови обробки задаються через вибір геометричних параметрів деформуючих елементів – інденторів і технологічних чинників, до яких відносяться: глибина впровадження індентора в тіло деталі і зусилля деформації, а також подача. Вони ж визначають і геометричні параметри контактної зони, а через них і зусилля деформації.

Аналіз досліджень і публікацій. До теперішнього часу у сфері дослідження поверхневого пластичного деформування накопичений значний теоретичний і експериментальний матеріал, в якому розглядається вплив конструктивно-технологічних параметрів і чинників на продуктивність і якість обробленої поверхні. В результаті цього встановле-

но, що якість поверхонь деталей залежить від великої кількості технологічних чинників обробки, конструктивних параметрів деформуючих елементів і розмірів деталей [4].

Нині є загальновизнаним, що основним чинником, який впливає на показники якості поверхневого шару під час обробки деталей поверхневим пластичним деформуванням, є зусилля деформації. Проте аналіз літературних джерел і результатів експериментальних досліджень показує, що під час обробки з одним і тим же зусиллям деформації, але різними за розмірами і формою робочої поверхні інденторами результати виходять різні. У зв'язку з цим рядом авторів [4; 2; 3; 1] було висловлено думку, що замість зусилля деформації, як інтегруючий показник, слід прийняти площу поверхні контакту. Проте площа поверхні контакту також не є параметром, що однозначно описує умови і результати обробки [4]:

$$S = 2 \cdot \int_0^{L_k} r_p \cdot arcsin\left(\frac{z_k}{r_p}\right) dl_k, \qquad (1)$$

де L_k – довжина контакту; r_p – залежність зміни поточних значень радіуса індентора від довжини контакту; z_k – напівширина контакту.

L_k, r_p і z_k визначаються виходячи з конкретної схеми обробки.

Наприклад, під час використання як індентора кульки, розрахункова схема матиме вигляд (рис. 1, а; 1, б).

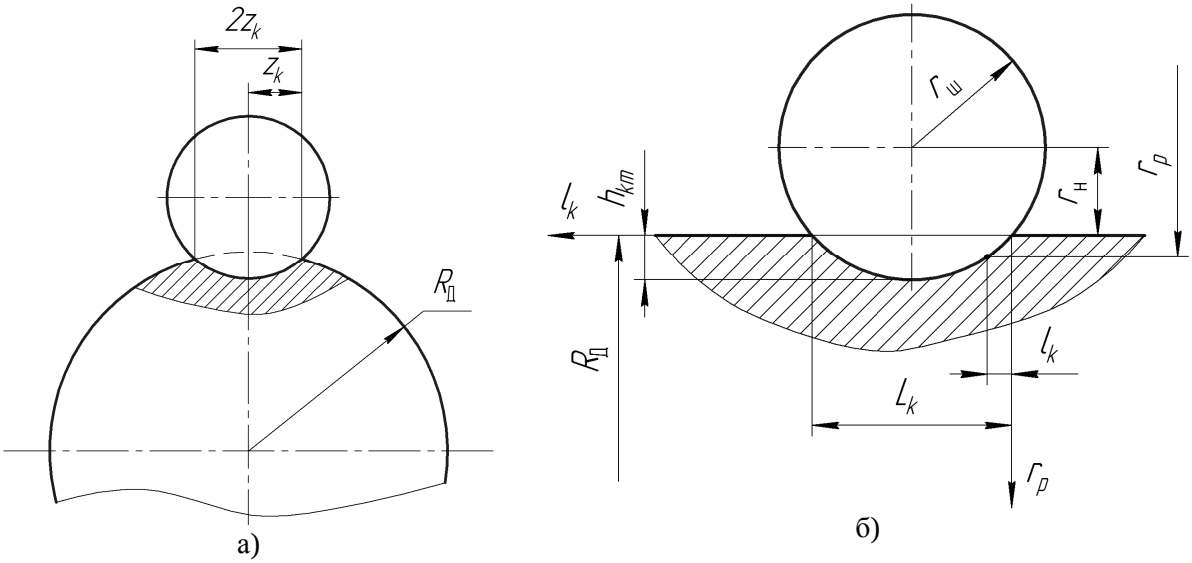


Рис. 1. Схема контакту деталь-індентор під час обробки кулькою:
а) у поперечному перерізі; б) у поздовжньому перерізі

Напівширина контакту визначається за формулою:

$$z_k = \sqrt{R_Д^2 - \left[\frac{\left(R_Д \pm r_p\right) \cdot \left(R_Д \mp h_k\right)}{R_Д \pm \left(r_p \mp h_k\right)}\right]^2}, \qquad (2)$$

де $R_Д$ – радіус оброблюваної деталі; h_k – залежність зміни поточних значень глибини впровадження індентора в поверхню деталі, $0 \le h_k \le h_{km}$.

Верхній знак під час визначення напівширини контакту (2) потрібно використовувати під час впровадження індентора в поверхню вала, а нижній – в поверхню отвору.

Залежність для визначення довжини контакту:

$$L_k = 2 \cdot \sqrt{r_ш^2 - \left(r_ш - h_{km}\right)^2}, \qquad (3)$$

де $r_{ш}$ – радіус індентора; h_{km} – максимальне значення глибини впровадження індентора в поверхню деталі.

Залежності для визначення зміни поточних значень радіуса індентора і глибини впровадження індентора в поверхню деталі від довжини контакту, для цієї схеми:

$$r_p = \sqrt{r_{ш}^2 - \left(l_k - \frac{L_k}{2}\right)^2}\,, \tag{4}$$

де l_k – залежність зміни поточних значень довжини контакту, $0 \le l_k \le L_k$.

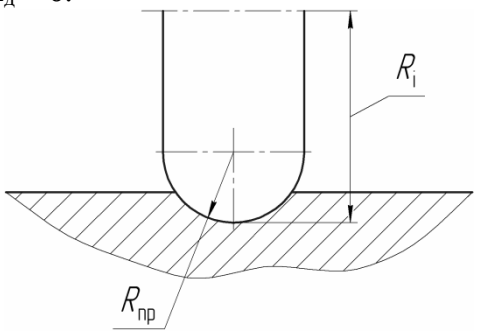
$$h_k = r_p - r_н\,, \tag{5}$$

де $r_н$ – різниця радіуса індентора і максимального значення глибини впровадження індентора в поверхню деталі, $r_н = r_ш - h_{km}$, тобто $h_k = r_p - r_ш + h_{km}$.

Мета статті. Метою роботи є розробка математичної залежності для розрахунку площі поверхні контакту деталі з інструментом (деталь-індентор) під час обробки поверхневим пластичним деформуванням, що дозволить прогнозувати якість під час обробки криволінійних поверхонь із змінними радіусами кривизни, а особливо якість поверхонь маложорстких крутильних кілець з пористих спечених композицій.

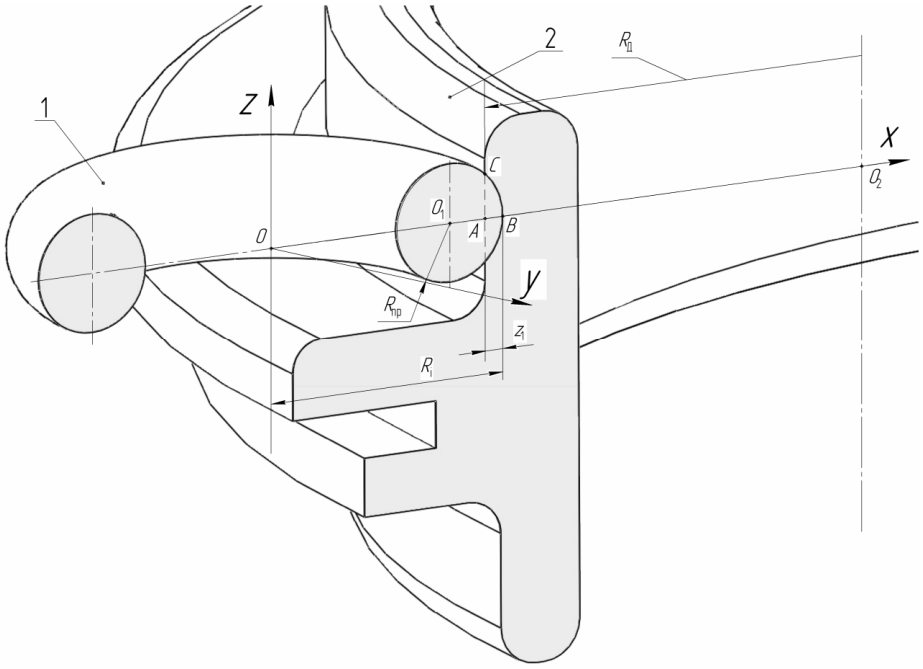
Виклад основного матеріалу. Під час обробки поверхневим пластичним деформуванням використовуються різні за формою індентори, робоча поверхня яких характеризується такими основними геометричними параметрами (рис. 2).

Під час реалізації обробки кулькою [5] найчастіше застосовуються $R_і$ = $R_{пр}$ = 3...25 мм; роликом $R_і \ne R_{пр}$, $R_і$ = 10...100 мм, $R_{пр}$ = 3...25 мм; плашкою $R_і = \infty$, $R_{пр}$ = 3...25 мм; під час обкатування кільцем залежно від діаметра деталі можуть застосовуватися $R_і$ < 0; $R_і$ = – 40...200 мм. Такі види інструментів приводяться до одного вигляду – тору. Тоді узагальнена схема процесу може бути представлена під час обробки зовнішніх циліндричних поверхонь радіусом деталі $R_д$ > 0, плоских поверхонь $R_д = \infty$, внутрішніх циліндричних поверхонь $R_д$ < 0.



$R_і$ – радіус індентора; $R_{пр}$ – профільний радіус
Рис. 2. Геометричні параметри інденторів

Поверхня місця деформації, що належить оброблюваній деталі, може бути визначена як ділянка поверхні індентора, обмежена лінією контакту з оброблюваною поверхнею. Отже, завдання зводиться до визначення площі поверхні контакту двох фігур (рис. 3).



1 – індентор; 2 – оброблювана деталь (маложорстке крутильне кільце)
Рис. 3. Узагальнена розрахункова схема контакту деталь-індентор

Рівняння поверхні деталі має вигляд:

$$(x-a)^2 + y^2 = R_д^2 \tag{6}$$

$$a = OO_2 = R_і + R_д - Z_1, \tag{7}$$

де Z_1 – глибина впровадження індентора в поверхню деталі.

Для складання рівняння поверхні індентора, який є тілом обертання, необхідно знати радіус обертання в довільній точці поверхні. Але оскільки має місце радіус профілю $R_{пр}$, то радіус обертання твірної буде залежати від координати (рис. 4). Виберемо довільну точку E на осі OZ, яка лежить між точками O і F, що мають по Z координати $Z = 0$ і $Z = R_{пр}$ відповідно. Тоді внаслідок того, що $ED'=OD=OO_1+O_1D=R_і-R_{пр}+O_1D$ з прямокутного трикутника O_1DD' знаходимо O_1D:

$$OD = \sqrt{O_1D'^2 - DD'^2} = \sqrt{R_{пр}^2 - Z^2}$$

$$ED' = R_і - R_{пр} + \sqrt{R_{пр}^2 - Z^2} \tag{8}$$

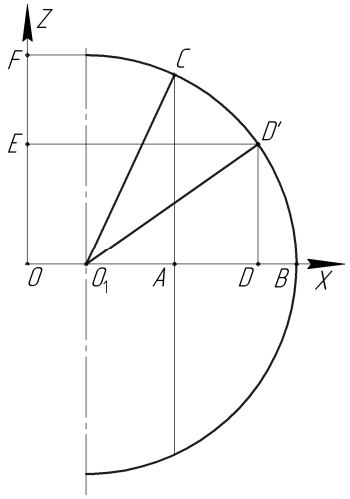


Рис. 4. Графічна інтерпретація робочої поверхні індентора

Знаючи радіус обертання точок твірної індентора залежно від координати *Z*, можна записати рівняння поверхні індентора:

$$x^2 + y^2 = \left(R_{\text{і}} - R_{\text{пр}} + \sqrt{R_{\text{пр}}^2 - Z^2} \right)^2 . \quad (9)$$

Щоб визначити межі зміни, знайдемо координату точки *C* (рис. 3, 4) з прямокутного трикутника:

$$AC = \sqrt{O_1C^2 - O_1A^2} = \sqrt{R_{\text{пр}}^2 - (R_{\text{пр}} - Z_1)^2} . \quad (10)$$

Знайдемо межі зміни *X*, як функції від *Z* . *X* змінюється в межах від кривої перетину поверхонь індентора і поверхні деталі до кривої, що описує твірну індентора при *Y* = 0. Для визначення кривої перетину двох поверхонь необхідно вирішити систему, що складається з рівняння поверхні індентора (9) і рівняння поверхні деталі (6), тобто систему рівнянь (11):

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = \left(R_{\text{і}} - R_{\text{пр}} + \sqrt{R_{\text{пр}}^2 - Z^2} \right)^2 \\ (x-a)^2 = R_{\text{д}}^2 - y^2 \end{cases} . \quad (11)$$

З другого рівняння системи (11) знаходимо:

$$y^2 = R_{\text{д}} - (x-a)^2 .$$

Підставивши отриманий вираз у перше рівняння системи (11) і вирішивши його відносно *X*, отримаємо нижню межу зміни *X*:

$$x = \frac{a^2 + \left(R_{\text{і}} - R_{\text{пр}} + \sqrt{R_{\text{пр}}^2 - Z^2} \right)^2 - R_{\text{д}}}{2 \cdot a} . \quad (12)$$

З рівняння (9) при *Y* = 0 знаходимо верхню межу зміни:

$$x = R_{\text{і}} - R_{\text{пр}} + \sqrt{R_{\text{пр}}^2 - z^2} \quad (13)$$

Якщо гладка однозначна поверхня задана рівнянням *Y* = f (*X*), то площа поверхні виражається формулою:

$$S = \iint_D \sqrt{1 + \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial z} \right)^2} \, dxdz , \quad (14)$$

де *D* – проекція цієї поверхні на площину *XOZ*.

Оскільки така поверхня симетрична щодо координатних площин *XOZ* і *XOY*, то досить знайти площу поверхні, розташовану в першому октанті, обмежену по *Z* площиною *XOY* і точкою *C*, і по *X* – кривими, заданими рівняннями (12) і (13). Оскільки шукана поверхня належить поверхні інструменту, то вирішити рівняння поверхні інструменту (9) відносно *Y*, і підставивши отриманий вираз в (14), знайдемо:

$$S = 4 \int_0^{\sqrt{Z_1(2R_{\text{пр}} - Z_1)}} dz \int_{\frac{a^2 + \left(R_{\text{і}} - R_{\text{пр}} + \sqrt{R_{\text{пр}}^2 - Z^2} \right)^2 - R_{\text{д}}}{2 \cdot a}}^{R_{\text{і}} - R_{\text{пр}} + \sqrt{R_{\text{пр}}^2 - z^2}} \frac{R_{\text{пр}} \cdot (R_{\text{і}} - R_{\text{пр}} + \sqrt{R_{\text{пр}}^2 - Z^2})}{\sqrt{R_{\text{пр}}^2 - z^2} \sqrt{(R_{\text{і}} - R_{\text{пр}} + \sqrt{R_{\text{пр}}^2 - z^2})^2 - X^2}} dx. \quad (15)$$

Для спрощення подальшої викладки позначимо:

$$C(Z) = R_{\text{і}} - R_{\text{пр}} + \sqrt{R_{\text{пр}}^2 - Z^2} \quad (16)$$

і провівши інтегрування по *X*, а потім заміну *t* = *C(Z)*, отримаємо:

$$S = 4 \cdot R_{\text{пр}} \int\limits_{R_{\text{і}}-Z_1}^{R_{\text{і}}} \frac{t}{\sqrt{R_{\text{пр}}^2 - (t + R_{\text{пр}} - R_{\text{і}})^2}} \arcsin\left(\frac{\sqrt{t^2 - (a - R_{\text{д}})^2} \cdot \sqrt{(a + R_{\text{д}})^2 - t^2}}{2 \cdot a \cdot t} \right) dt. \quad (17)$$

Для того щоб показати, що неможливо отримати аналітичний вираз для точного обчислення площі поверхні контакту, покажемо, що інтеграл у формулі (17) не береться в елементарних функціях. Для цього у формулу (17) вводимо спрощення, допустимо, що обробка проводиться кулькою, тобто $R_{\text{і}}=R_{\text{пр}}$. Тоді формулу (17) можна представити у вигляді:

$$S = 4 \cdot R_{\text{і}} \int\limits_{0}^{\sqrt{Z_1(2 \cdot R_{\text{і}} - Z_1)}} \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{a^2 + R_{\text{і}}^2 - Z^2 - R_{\text{д}}^2}{2 \cdot a \cdot \sqrt{R_{\text{і}}^2 - Z^2}} \right) dz. \quad (18)$$

Розглянемо невизначений інтеграл:

$$J = \int \arcsin \frac{a^2 + R_{\text{і}}^2 - Z^2 - R_{\text{д}}^2}{2 \cdot a \cdot \sqrt{R_{\text{і}}^2 - Z^2}} dz. \quad (19)$$

Інтегруючи, по частинах знайдемо:

$$J = Z \cdot \arcsin \frac{a^2 + R_{\text{і}}^2 - Z^2 - R_{\text{д}}^2}{2 \cdot a \cdot \sqrt{R_{\text{і}}^2 - Z^2}} + J_1 \ , \quad (20)$$

де

$$J_1 = \int \frac{Z^2 \cdot (a^2 - R_{\text{і}}^2 - R_{\text{д}}^2 + Z^2)}{\sqrt{\left((a + R_{\text{д}})^2 - R_{\text{і}}^2\right)^2 + Z^2} \cdot \sqrt{\left(R_{\text{і}} - (a - R_{\text{д}})^2\right)^2 - Z^2}} dz \, . \quad (21)$$

Оскільки $R_{\text{і}}^2 - (a - R_{\text{д}})^2 = R_{\text{і}}^2 - (R_{\text{і}} - Z_1)^2 > 0$, то проведемо заміну:

$$\frac{Z}{\sqrt{R_{\text{і}}^2 - (a - R_{\text{д}})^2}} = \sqrt{1 - t^2} \ . \quad (22)$$

Тоді після відповідних спрощень формула (21) прийме вигляд:

$$J_1 = \int \frac{Z_1(2R_{\text{пр}} - Z_1)(1 - t^2)(2R_{\text{д}}(R_{\text{і}} - Z_1) + Z_1(2R_{\text{і}} - Z_1)t^2)}{2\sqrt{a \cdot R_{\text{д}}} \cdot \sqrt{1 - t} \cdot \sqrt{1 - \frac{Z_1(2R_{\text{і}} - Z_1)}{4 \cdot a \cdot R_{\text{д}}} \cdot t^2}} dt. \quad (23)$$

Якщо тепер припустити, що $k = \sqrt{\frac{Z_1(2R_{\text{і}} - Z_1)}{4 \cdot a \cdot R_{\text{д}}}}$, то отримаємо

$$J_1 = -\frac{Z_1(2R_{\text{і}} - Z_1)}{2\sqrt{a \cdot R_{\text{д}}}} \int \frac{f(t^2)}{\sqrt{1 - t^2} \cdot \sqrt{1 - k^2 \cdot t^2}} dt \ , \quad (24)$$

де $f(t^2) = (1 - t^2) \cdot (2R_{\text{д}} \cdot (R_{\text{і}} - Z_1) + Z_1(2R_{\text{і}} - Z_1) \cdot t^2).$ (25)

Так як $f(t^2)$ є поліномом від t^2, то інтеграл у виразі (24) в кінцевому вигляді не береться. Він може бути представлений у вигляді суми еліптичних інтегралів.

Підставляючи J_1 формулу (20), бачимо, що й інтеграл J не береться в кінцевому вигляді. Отже, інтеграл у формулі (18) також не береться в кінцевому вигляді.

Таким чином доведено, що неможливо отримати аналітичний вираз для точного обчислення площі поверхні контакту. Тому доцільно обчислювати площу поверхні конта-

кту у формулі (17) наближеними методами, не представляючи площу поверхні контакту у вигляді суми еліптичних інтегралів.

Для визначення меж застосування формули (17) для обчислення площі поверхні контакту деталі з індентором розглянемо положення точки щодо поверхні деталі (рис. 4). Оскільки поверхня деталі обмежена радіусом $R_д$, точка C може опинитися за її межами внаслідок того, що координата точки C по Z залежить від радіусу профілю індентора $R_{пр}$.

У цьому випадку необхідно проводити інтегрування по Z з врахуванням реальних розмірів деталі, тобто формула (17) непридатна для обчислення площі поверхні контакту. Інший випадок непридатності формули (17), коли ширина індентора така, що точка C виявляється поза поверхнею індентора. В цьому випадку необхідно проводити інтегрування з урахуванням реальних розмірів індентора. Отже, з урахуванням вказаних випадків формула (17) повинна бути скоректована.

$$S = 4 \cdot R_{пр} \int_0^b \frac{C(Z)}{\sqrt{R_{пр}^2 - Z^2}} arcsin\left(\frac{\sqrt{C^2(Z) - (a - R_д)^2} \cdot \sqrt{(a + R_д)^2 - C^2(Z)}}{2 \cdot a \cdot C(Z)} \right) dz, \quad (26)$$

де a – визначається за формулою (7); $C(Z)$ – за формулою (16).

$$b = \min\left(\frac{H_д}{2}, \frac{H_i}{2}, \sqrt{Z_1(2R_{пр} - Z_1)} \right), \quad (27)$$

де $H_д$ – ширина деталі; H_i – ширина індентора.

На основі розглянутих публікацій, формула (1) й отримана формула (26) за допомогою MathCAD, побудовано графіки залежності площі поверхні контакту S = f(r) від радіуса індентора (кульки) r для маложорстких крутильних кілець з пористих спечених композицій діаметрами 56 мм, 89 мм і 150 мм (рис. 5, 6). Для всіх досліджень прийнято: z_1 = 0,3 мм, $R_i = R_{пр}$ = 4-8 мм. Також за допомогою SolidWorks було змодельовано впровадження індентора в деталь для всіх випадків (рис. 7) і отримана площа поверхні контакту. Всі результати зведено в таблицю 1.

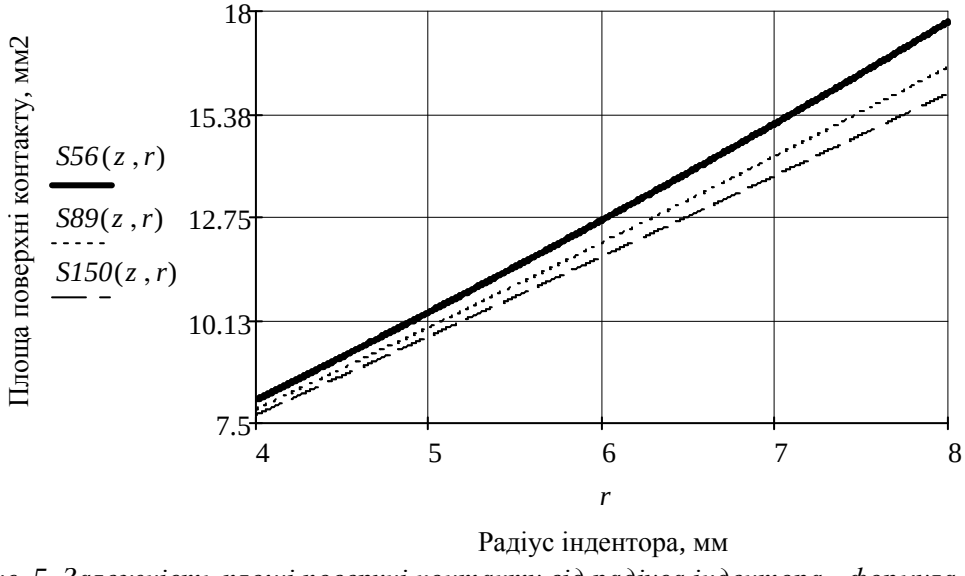
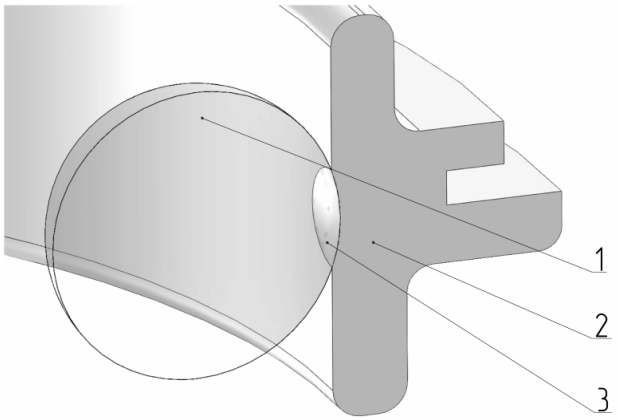


Рис. 5. Залежність площі поверхні контакту від радіуса індентора - формула (1)



1 – індентор; 2 – оброблювана деталь (маложорстке крутильне кільце); 3 – поверхня контакту
Рис. 7. Моделювання схеми впровадження індентора в деталь за допомогою SolidWorks

Таблиця 1

Значення площі поверхні контакту залежно від діаметра кільця і радіуса індентора

$D_{кільця}$, мм	R_i, мм	S_1, мм2	S_2, мм2	S_3, мм2
56	4	8,0884	8,116	8,1127
	5	10,3305	10,3608	10,3566
	6	12,6768	12,7091	12,7041
	7	15,1379	15,172	15,1665
	8	17,7265	17,7621	17,7563
89	4	7,8607	7,8879	7,8848
	5	9,9535	9,983	9,9792
	6	12,102	12,1332	12,1287
	7	14,309	14,3416	14,3363
	8	16,5781	16,6118	16,6059
150	4	7,7139	7,7408	7,7379
	5	9,7156	9,7446	9,7411
	6	11,7471	11,7777	11,7734
	7	13,8092	13,8409	13,8359
	8	15,9027	15,9353	15,9297

Примітка: *$D_{кільця}$ – діаметр маложорсткого кільця; R_i – радіус індентора; S_1 – площа поверхні контакту, визначена за формулою (1); S_2 – площа поверхні контакту визначена за формулою (26); S_3 – площа поверхні контакту, отримана за допомогою моделювання в SolidWorks схеми впровадження індентора в деталь.*

На підставі отриманих значень площі поверхні контакту (табл. 1), можна вважати формулу (26) придатною для розрахунків. Якщо прийняти S_3 за еталон, так як це значення отримано з 3D моделі, то середня різниця значень S_1 відносно S_3 в процентному відношенні буде становити 0,23 %, а середня різниця значень S_2 відносно S_3 у процентному відношенні буде становити 0,04 %. Отже, розрахунки за формулою (26) більш точні, ніж за формулою (1).

Висновки. Отримана залежність площі контакту індентор-заготовка залежно від геометричних параметрів оброблюваної поверхні та інструменту може бути використана під час вибору форми і розмірів інструменту залежно від конкретних умов контакту, під час конструювання нових і вдосконаленні старих методів та засобів поверхневого пластичного деформування.

Наведені формули дозволять прогнозувати якість під час обробки криволінійних поверхонь із змінними радіусами кривизни. Так як питомий тиск необхідний для протікання процесу пластичної деформації, знаходиться у відомій залежності від площі контакту і си-

ли, що прикладається до індентора, то можна регулювати процес зміцнення, змінюючи силу, що прикладається до індентора залежно від площі контакту, яка змінюється.

Аналіз залежностей площі контакту від режимів ППД доводить можливість використання різних за розмірами інденторів. З метою досягнення найбільшої глибини зміцнення слід віддавати перевагу інденторам великих розмірів, при цьому досягаються і кращі показники за шорсткістю поверхні, зменшується вірогідність перенаклепу. Проте в цьому випадку потрібна і більша кількість циклів навантаження, оскільки збільшуються відстані між вогнищами деформацій і збільшуються необхідні силові характеристики пристроїв для забезпечення необхідного питомого тиску під час збільшення площі контакту індентор-заготовка.

Список використаних джерел

1. Дрозд М. С. Расчет глубины распространения пластической деформации в зоне контакта тел произвольной кривизны / М. С. Дрозд, А. В. Федоров, Ю. И. Сидякин // Вестник машиностроения. – 1971. – № 1. – С. 20-23.

2. Жасимов М. М. Форма и площадь поверхности контакта инструмента с деталью при поверхностном пластическом деформировании / М. М. Жасимов // Вестник машиностроения. – 1974. – № 7. – С. 42–44.

3. Кудрявцев И. В. Выбор основных параметров упрочнения валов обкатыванием роликами / И. В. Кудрявцев, Л. Н. Бурмистрова // Вестник машиностроения. – 1983. – № 4. – С. 8-10.

4. Отений Я. Н. Прогрессивные методы обработки глубоких отверстий: монография / Я. Н. Отений, Н. Я. Смольников, Н. В. Ольштынский. – Волгоград: ВолгГТУ, 2003. − 136 с.

5. Руденко П. А. Разработка и исследование технологических методов повышения качества деталей машин и эффективности их изготовления / П. А. Руденко, О. Н. Чередников. – Чернигов: Черниговский филиал Киевского ордена Ленина политехнического института, 1983. – 36 с.

РОЗДІЛ IV. ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ

УДК 621.791.754:51-74

И.В. Пентегов, д-р техн. наук
Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина
В.Н. Сидорец, д-р техн. наук
С.В. Рымар, д-р техн. наук
О.И. Петриенко, канд. техн. наук
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев, Украина

ИЗМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РАСПЛАВЛЕНИЯ ПОКРЫТОГО СВАРОЧНОГО ЭЛЕКТРОДА В ПРОЦЕССЕ ЕГО НАГРЕВА И ПЛАВЛЕНИЯ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ СТАЛЕЙ БЕЗ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

Получены формулы для расчета значений коэффициента расплавления покрытого сварочного электрода при его нагреве и плавлении при дуговой сварке. Формулы учитывают теплообмен между электродом и окружающей средой теплопроводностью через покрытие электрода, конвекцией и теплоизлучением. Исследованы зависимости коэффициента расплавления покрытого сварочного электрода от параметров процесса дуговой сварки сталей без коротких замыканий.

Отримані формули для розрахунку значень коефіцієнта розплавлення покритого зварювального електрода під час його нагрівання й плавлення при дуговому зварюванні. Формули враховують теплообмін між електродом і навколишнім середовищем теплопровідністю через покриття електрода, конвекцією й тепловипромінюванням. Досліджені залежності коефіцієнта розплавлення покритого зварювального електрода від параметрів процесу дугового зварювання сталей без коротких замикань.

Formulas for calculating the values of the melting factor of coating welding electrode during its heating and melting in arc welding have been obtained. The formulas take into account the heat transfer between the electrode and the environment through the electrode coating by convection and radiation. Dependences of the melting factor of the coating welding electrode on the parameters of arc welding of steels without short circuits have been investigated.

Введение. Вопросы повышения технологической, энергетической и экономической эффективности, а так же производительности дуговой сварки сталей продолжают оставаться в числе приоритетных направлений в исследовании сварочных процессов. Во многом эти процессы определяются скоростью плавления сварочного электрода, которая зависит от различных факторов. В связи с этим исследования в определении факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на скорость плавления покрытого сварочного электрода, и их учет в методиках ее расчета, является актуальной задачей.

Вопросам плавления электрода при сварке металлов посвящено большое количество работ, в частности наиболее значимые это работы [1-3]. В основу многих методик расчета параметров сварки положены экспериментальные зависимости, или аналитические формулы, использующие параметры, которые так же базируются на экспериментальных данных. Целью данной работы является создание таких аналитических формул расчета, которые бы наименьшим образом зависели от эмпирических зависимостей, но при этом полученные на основе них параметры, наилучшим образом соотносились с опытными данными. Это позволит упростить анализ процессов, происходящих при сварке сталей покрытыми сварочными электродами при ручной дуговой сварке. Существенный шаг в решении данной проблемы сделан в работе [4] для плавящегося электрода при сварке в среде защитных газов, однако в ней температура электрода принималась как заданный параметр. По своей сути настоящая статья является логическим продолжением этой работы, но для сварки сталей без коротких замыканий покрытыми сварочными электродами с расчетом температуры электрода в процессе сварки и учетом теплообмена между электродом и окружающей средой теплопроводностью через покрытие электрода, конвекцией и теплоизлучением.

Определение коэффициента расплавления электрода. Плавление электрода при дуговой сварке происходит за счет нагрева металла электрода дугой от температуры

окружающей среды T_{oc} до температуры капли T_{kap}. Основной характеристикой плавления электрода является массовая скорость плавления (производительность) G_p, измеряемая массой расплавленного металла электрода в единицу времени (кг/сек) [1-4]. На практике используют так же среднюю скорость плавления, относя количество расплавленного металла электрода ко времени сварки [3]. Скорость плавления зависит от многих факторов (состава электродной проволоки и покрытия, величины сварочного тока, его вида и полярности, длины и диаметра электрода и др.). Опытным путем установлено, что коэффициент расплавления электрода α_p, имеющий размерность кг/(сек·А), в первом приближении прямо пропорционален массовой скорости плавления G_p и обратно пропорционален току сварки I:

$$\alpha_p = G_p/I. \quad (1)$$

При более детальном рассмотрении можно показать, что величина коэффициента расплавления α_p сложным образом зависит от времени сварки, характера сварочного тока I, его величины и полярности, а также от температуры капли T_{kap}. Определение характера изменения коэффициента α_p от времени при дуговой сварке стали покрытым электродом при учете его нагрева (текущее значение температуры T_0) проходящим сварочным током и является одной из основных целей настоящей статьи.

Оценочный расчет при сварке без коротких замыканий

Рассмотрим случай, когда потери тепла на излучение и конвекцию с поверхности электрода не учитываются. Время t нагрева электрода проходящим током от температуры окружающей среды T_{oc} до температуры T_0 при непрерывном процессе сварки без коротких замыканий может быть приближенно найдено из дифференциального уравнения теплового баланса:

$$j^2\rho(T)dt = \gamma C_p(T)dT, \quad (2)$$

где j – плотность тока в электроде, $j = 4I/(\pi d_e)^2$; d_e – диаметр электрода; ρ – удельное электрическое сопротивление металла электрода, являющееся функцией температуры электрода T. Аппроксимационная зависимость $\rho(T)$, для различного химического состава электродных проволок [5; 6] может быть взята из работ [7-9]. Она дает высокую точность при небольших процентах легирующих элементов (от долей до нескольких процентов). При больших процентах легирующих элементов нужно обращаться к справочной литературе [10]; γ – плотность стали, γ = 7860 кг/м^3; C_p – удельная теплоемкость стали, которая является так же функцией температуры T. Можно использовать аппроксимационную зависимость $C_p(T)$ для железа из работ [7; 8], учитывающую точки фазового перехода $A_2 \ldots A_5$ (применима для сталей с небольшим процентом легирующих элементов). За основу брались температурные зависимости удельной теплоемкости чистого железа с использованием данных из [11; 12].

Формулу для определения времени нагрева электрода, с учетом уравнения (2), запишем в виде функции от температуры T_0 и плотности тока j:

$$t(T_0, j) = \frac{\gamma}{j^2}\int_{T_{oc}}^{T_0}\frac{C_p(T)}{\rho(T)}dT. \quad (3)$$

Уточненный расчет при сварке без коротких замыканий

Для боле точного расчета времени нагрева электрода необходимо учитывать потери тепла на теплопроводность покрытия электрода, на излучение и конвекцию с поверхности элемента dl электрода (рис. 1). В этом случае уравнение теплового баланса вместо (2) будет иметь вид:

$$j^2\rho(T_1)dVdt = \gamma C_p(T_1)dVdT_1 + [\alpha_k(T_2)\cdot(T_2 - T_{oc}) + k_\sigma\sigma\cdot(T_2^4 - T_{oc}^4)]dSdt. \quad (4)$$

Здесь T_1 – температура стержня электрода с учетом излучения и конвекции с его поверхности; dV – объем элемента активной части (стали) электрода длиной dl, dV =

$dl\pi d_e^2/4$; α_k – коэффициент конвективной теплоотдачи с поверхности электрода, являющийся функцией температуры поверхности покрытия электрода T_2; σ – постоянная Стефана-Больцмана для излучения с поверхности электрода, $\sigma = 5{,}67\cdot 10^{-8}$ Вт/(м$^2K^4$); k_σ – безразмерный коэффициент степени черноты поверхности (покрытия) электрода, k_σ = 0,63…0,85; dS – площадь боковой поверхности покрытия электрода длиной dl, $dS = \pi(d_e + 2\Delta)dl$; Δ – толщина покрытия электрода (на одну сторону).

На рис. 1 по оси абсцисс отложена длина электрода, причем фиксирована точка расплавления. По мере оплавления электрода место закрепления электрододержателя (символы ×) смещается слева направо. Показаны кривые температур для 4-х моментов времени сварки, когда длины оплавленных частей электрода равны 0, l_1, l_2 и l_3. При этом температуры стали не оплавленной части электрода оказываются соответственно равными T_{oc}, T_{1l1}, T_{1l2} и T_{1l3}. Подъем температур за счет теплопроводности начинается непосредственно вблизи шейки капли, так как распространение тепла от капли происходит с той же скоростью, что и уход расплавленного металла с каплями. Поэтому влиянием теплопроводности на участках электрода вдали от капли можно пренебречь. Утолщенная пунктирная линия показывает рост температуры стали неоплавленной части электрода по мере оплавления электрода при непрерывном процессе сварки.

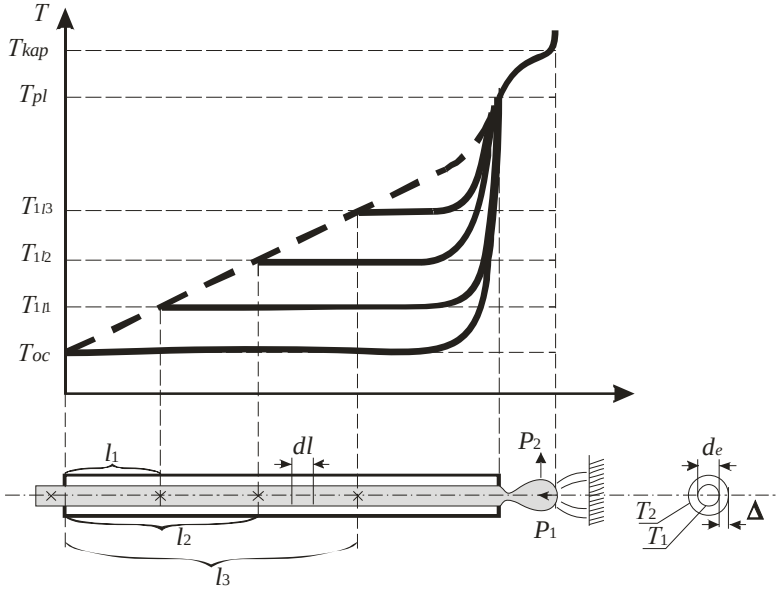


Рис. 1. Длина электрода с формирующейся каплей и график зависимости температуры нагрева электрода T при изменении его длины при сварке

Определим коэффициент конвективной теплоотдачи с поверхности электрода α_k при естественном охлаждении воздухом. Для этого запишем выражения и аппроксимационные формулы характеристик воздуха, полученные на основании работ [13; 14], в зависимости от температуры T_2, K, лежащей в диапазоне 223…1473 K.

Температурный коэффициент объемного расширения воздуха, K^{-1} [13; 14], согласно закону Гей-Люссака

$$\beta_v(T_2) = 1/[0{,}5(T_2 + T_{oc})]. \quad (5)$$

Коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·K),

$$\lambda_v(T_2) = \lambda_{v.0}\left[-0{,}545 + 1{,}545\left(\frac{0{,}5(T_2 + T_{oc})}{T_{293K}}\right)^{0{,}59}\right], \quad (6)$$

где $\lambda_{v.0} = 2{,}586\cdot 10^{-2}$ Вт/(м·K) – значение коэффициента теплопроводности воздуха при температуре $T_{293K} = 293$ K (при 20 ^{0}C).

Теплоемкость воздуха, Дж/(кг·*K*),

$$C_{p,v}(T_2) = C_{p,v.0}\left[\begin{array}{l} 1,756 - 1,888\left(\dfrac{0,5(T_2+T_{oc})}{T_{293K}}\right)^{0,5} + 1,583\dfrac{0,5(T_2+T_{oc})}{T_{293K}} - \\ -0,508\left(\dfrac{0,5(T_2+T_{oc})}{T_{293K}}\right)^{1,5} + 5,738\cdot 10^{-2}\left(\dfrac{0,5(T_2+T_{oc})}{T_{293K}}\right)^{2} \end{array}\right]. \quad (7)$$

Здесь $C_{p,v.0}$ = 1,005·10^3 Дж/(кг·*K*) – значение теплоемкости воздуха при температуре T_{293K}.

Плотность воздуха, кг/м^3,

$$\rho_v(T_2) = \rho_{v.0}\cdot T_{293K}/[0,5(T_2 + T_{oc})], \quad (8)$$

где $\rho_{v.0}$ = 1,205·кг/м^3 – плотность воздуха при температуре T_{293K}.

Коэффициент вязкости воздуха, Н·с/м^2,

$$\mu_v(T_2) = \mu_{v.0}\left[-0,66 + 1,66\left(\frac{0,5(T_2+T_{oc})}{T_{293K}}\right)^{0,47926}\right], \quad (9)$$

$\mu_{v.0}$ = 1,819·10^{-5} Н·с/м^2 – значение коэффициента вязкости воздуха при температуре T_{293K}.

Коэффициент кинематической вязкости воздуха, м^2/с,

$$\nu_v(T_2) = \mu_v(T_2)/\rho_v(T_2). \quad (10)$$

Критерий Грасгофа, характеризующий относительную эффективность подъемной силы, вызывающий свободно-конвективное движение воздуха вдоль поверхности горизонтально расположенного электрода с характерным линейным размером, равным его диаметру с покрытием $d_e + 2\Delta$:

$$\mathrm{Gr}(T_2) = \beta_v(T_2)\frac{g\cdot(d_e+2\Delta)^3}{\nu_v^2(T_2)}(T_2 - T_{oc}), \quad (11)$$

где g = 9,807 м/с^2 – ускорение свободного падения.

Критерий Прандтля, являющийся теплофизической характеристикой теплоносителя (воздуха), равен

$$\mathrm{Pr}(T_2) = \mu_v(T_2)C_{p.v}(T_2)/\lambda_v(T_2). \quad (12)$$

Критерий Нуссельта, определяющий интенсивность теплоотдачи вдоль поверхности горизонтально расположенного электрода при естественном охлаждении соответственно для ламинарного и турбулентного течения воздуха [14]

$$\mathrm{Nu}(T_2) = \begin{cases} 1,18\left[\mathrm{Gr}(T_2)\cdot\mathrm{Pr}(T_2)\right]^{1/4}, \text{ если } \mathrm{Gr}(T_2)\cdot\mathrm{Pr}(T_2) \le 10^3; \\ 0,5\left[\mathrm{Gr}(T_2)\cdot\mathrm{Pr}(T_2)\right]^{1/4}, \text{ если } \mathrm{Gr}_h(T_2)\cdot\mathrm{Pr}(T_2) > 10^3. \end{cases} \quad (13)$$

Коэффициент конвективной теплоотдачи с поверхности горизонтально расположенного электрода при естественном охлаждении

$$\alpha_k(T_2) = \mathrm{Nu}(T_2)\lambda_v(T_2)/(d_e + 2\Delta). \quad (14)$$

Для вертикально расположенного электрода длиной *l*, являющейся его характерным линейным размером, критерий Грасгофа равен:

$$\mathrm{Gr}(T_2) = \beta_v(T_2)\frac{gl^3}{\nu_v^2(T_2)}(T_2 - T_{oc}). \quad (15)$$

Из-за поднимающихся от дуги турбулентных потоков нагретого воздуха критерий Нуссельта будет определяться по формуле [14]:

$$\mathrm{Nu}(T_2) = 0,15[\mathrm{Gr}(T_2)\cdot\mathrm{Pr}(T_2)]^{1/3}, \quad (16)$$

а коэффициент конвективной теплоотдачи с поверхности вертикально расположенного электрода при естественном охлаждении, при учете выражений (12), (15) и (16), будет иметь вид

$$\alpha_k(T_2) = \mathrm{Nu}(T_2)\lambda_v(T_2)/l = 0{,}15[g\beta_v(T_2)\mu_v(T_2)C_{p\cdot v}(T_2)\cdot(T_2 - T_{oc})]^{1/3}\cdot\left(\frac{\lambda_v(T_2)}{\nu_v(T_2)}\right)^{2/3}, \qquad (17)$$

и не зависит от длины электрода l.

Разделяя переменные и интегрируя, преобразуем выражение (4) к виду:

$$t\left(T_0, j, d_e\right) = \gamma\int_{T_{oc}}^{T_0} \frac{C_p\left(T_1\right)}{j^2\rho\left(T_1\right) - \frac{4}{d_e}\left(1+\frac{2\Delta}{d_e}\right)\left\{\begin{matrix}\alpha_k\left[T_2\left(T_1,d_e\right)\right]\cdot\left[T_2\left(T_1,d_e\right)-T_{oc}\right]+\\ +k_\sigma\sigma\cdot\left[T_2^4\left(T_1,d_e\right)-T_{oc}^4\right]\end{matrix}\right\}} dT_1 . \qquad (18)$$

Здесь уже учтено, что если рассматривать слой покрытия электрода как цилиндрическую стенку с толщиной Δ и теплопроводностью λ, то температуры на внутренней T_1 и внешней T_2 поверхностях цилиндра связаны зависимостью [14]:

$$q(T_1,d_e) = 2\lambda\cdot[T_1 - T_2(T_1,d_e)]/\{(d_e + 2\Delta)\ln[(d_e + 2\Delta)/d_e]\}, \qquad (19)$$

где количество тепла, проходящее через покрытие электрода и отнесенное к единице внешней поверхности покрытия, равно

$$q(T_1,d_e) = \alpha_k[T_2(T_1,d_e)]\cdot[T_2(T_1,d_e) - T_{oc}] + k_\sigma\sigma\cdot(T_2^4(T_1,d_e) - T_{oc}^4). \qquad (20)$$

Выразим из уравнений (19) и (20) температуру T_2 и запишем в пакете MathCAD [15] формулу для ее определения:

$$T_2\left(T_1,d_e\right) = \mathrm{root}\left\{T_1 - \theta - \frac{d_e+2\Delta}{2\lambda}\ln\left(1+\frac{2\Delta}{d_e}\right)\cdot\left[\alpha_k\left(\theta\right)\cdot\left(\theta - T_{oc}\right) + k_\sigma\sigma\cdot\left[\theta^4 - T_{oc}^4\right]\right], \theta\right\}, \qquad (21)$$

где root – функция MathCAD, позволяющая определить температуру θ при некотором ее стартовом значении.

Подставляя значения функции $T_2(T_1,d_e)$ в выражение (18), можно найти время нагрева электрода сварочным током от температуры T_{oc} до T_0.

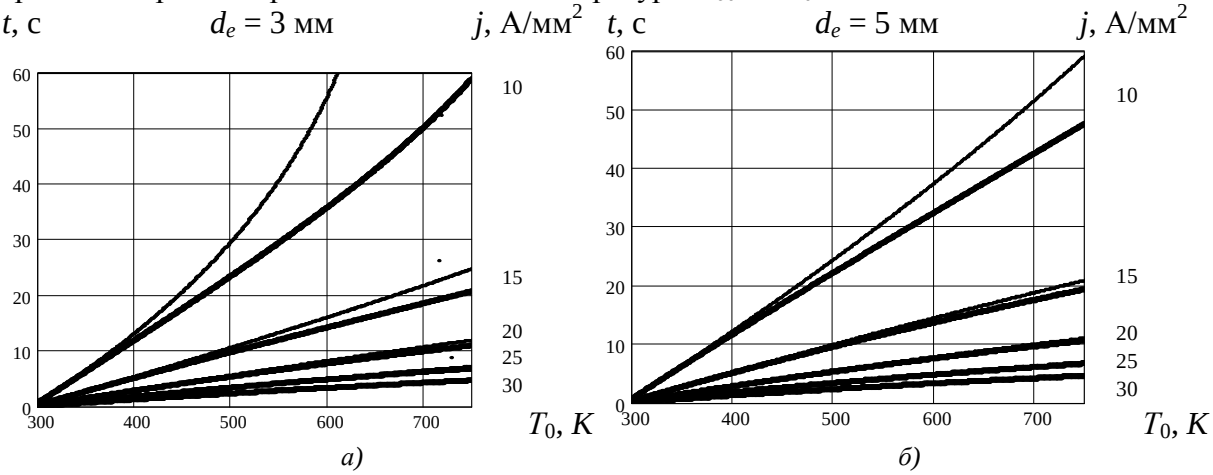


Рис. 2. Зависимости времени нагрева электрода t до температуры T_0 при различных значениях плотности тока в электроде j = 10, 15, 20, 25 и 30 А/мм^2 и различных диаметрах d_e электрода а – 3 мм; б – 5 мм, для вертикально (утолщенные линии) и горизонтально (тонкие линии) расположенных электродов в случае естественного охлаждения

На рисунке 2 построены семейства кривых, показывающих зависимости времени нагрева электрода t от T_{oc} = 300 K до температуры T_0 при различных плотностях тока в электроде j и различных диаметрах электрода d_e для вертикально и горизонтально расположенных электродов (соответственно утолщенные и тонкие линии) в случае естест-

венного охлаждения. С увеличением плотности тока в электроде время нагрева электрода существенно уменьшается, причем для вертикально расположенного электрода существеннее, чем для горизонтально расположенного электрода из-за меньших значений коэффициента конвективной теплоотдачи α_k в первом случае.

При сварке под вытяжкой сварочный электрод находится в условиях принудительного охлаждения. На рисунке 3,*а* построены семейства кривых, показывающих зависимости времени нагрева электрода t от T_{oc} = 300 K до температуры T_0 при различных плотностях тока в электроде j = 6,28, 9,0, 11,0, 15,4 и 18,2 А/мм^2 при сварке без коротких замыканий. Рассматривался электрод Э42-Р диаметром d_e = 6 мм с малоуглеродистой проволокой (0,15 % С) и покрытием ОММ-5 (сплошные линии) и кривые, построенные по опытным данным из работы [1] (пунктирные линии). При этом коэффициент α_k при принудительном охлаждении для указанных плотностей тока принимает соответственно значения 45, 50, 70, 100 и 130 Вт/(м^2K), в зависимости от интенсивности движения воздуха под вытяжкой. На рисунке 3,*б* построены семейства кривых, показывающих зависимости времени нагрева электрода t до температуры T_0 при различных плотностях тока j = 7,0, 9,9, 11,1, 13,3 и 14,6 А/мм^2 при сварке без коротких замыканий в электроде диаметром d_e = 6,2 мм из хромоникелевой проволоки (25 % Cr, 12 % Ni) с покрытием 6-0 (сплошные линии) и кривые, построенные по опытным данным из работы [1] (пунктирные линии). При этом коэффициент α_k при принудительном охлаждении принимал те же значения, что и для рисунка 3,*а*, а удельное электрическое сопротивление металла электрода ρ принималось по данным работы [10].

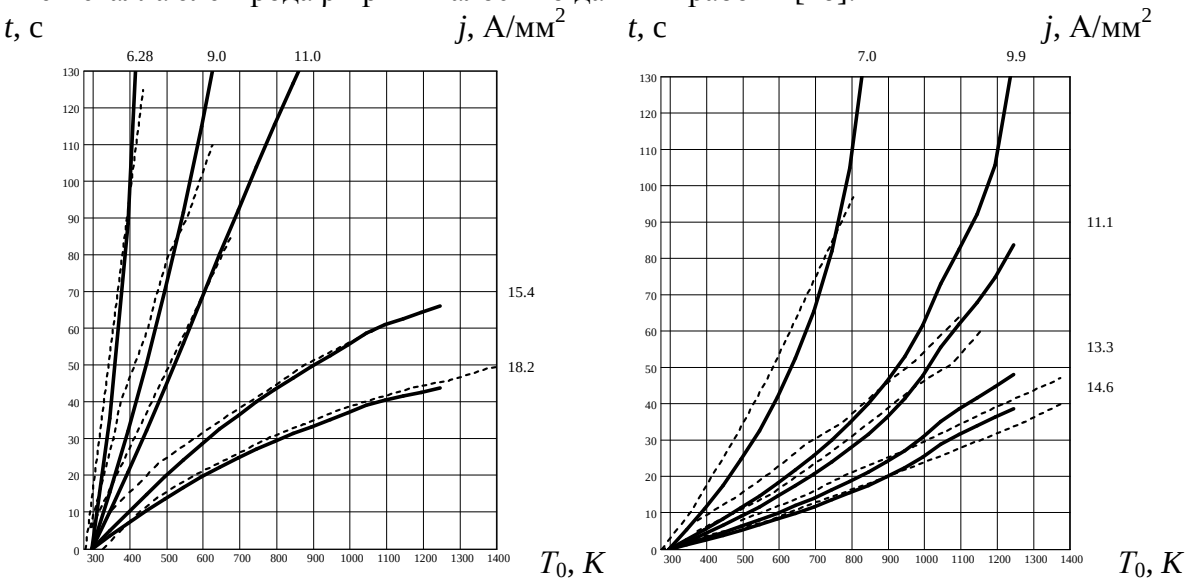


Рис. 3. Зависимости времени нагрева электрода t до температуры T_0 при различных значениях плотности тока в электроде: а – j = 6,28, 9,0, 11,0, 15,4 и 18,2 А/мм^2 диаметром d_e = 6 мм – сплошные линии и опытные данные из работы [1] – пунктирные линии для электрода Э42-Р с малоуглеродистой проволокой (0,15 % С) и покрытием ОММ-5; б – j = 7,0, 9,9, 11,1, 13,3 и 14,6 А/мм^2 диаметром d_e = 6,2 мм – сплошные линии и опытные данные из работы [1] – пунктирные линии для электрода из хромоникелевой проволоки (25 % Cr, 12 % Ni) с покрытием 6-0, в случае сварки без коротких замыканий под вытяжкой (принудительное охлаждение)

Запишем уравнение баланса мощностей в капле при отсутствии коротких замыканий (рис. 1), учтя потери на конвекцию и излучение с капли, когда мощность P_1, поступающая от дуги в каплю, за вычетом мощности P_2, теряемой на конвекцию и излучение с капли, идет на плавление и испарение электрода и перегрев капли до температуры T_{kap} (мощность P_3):

$$P_1 - P_2 = P_3, \tag{22}$$

или [4]:

$$U_{ekv} I - k_{kap} \frac{\pi d_e^2}{4}\left[\alpha_{k,kap}\left(T_{kap}\right)\cdot\left(T_{kap} - T_{oc}\right) + k_{\sigma,kap}\sigma\cdot\left(T_{kap}^4 - T_{oc}^4\right)\right] =$$

$$= \left[G_p\cdot(1-\xi)\left(\int_{T_1}^{T_{kap}} C_p(\theta)\,d\theta + \sum\lambda\right)\right] + G_p\xi\cdot\left(\int_{T_1}^{T_{dug}} C_p(\theta)\,d\theta + \sum\lambda + r\right), \tag{23}$$

где U_{ekv} – эквивалентное напряжение при расплавлении дугой [16]; k_{kap} – усредненное значение отношения площади поверхности капли к поперечному сечению электрода; $k_{kap}\pi d_e^2/4$ – усредненная площадь поверхности капли при среднем диаметре капли $d_{kap} = 2d_e$, $k_{kap} = 12\ldots16$; $\alpha_{k,kap}$ – коэффициент конвективной теплоотдачи с поверхности капли, зависящий от ее температуры T_{kap}; $k_{\sigma,kap}$ – безразмерный коэффициент степени черноты поверхности капли, $k_\sigma = 0{,}53\ldots0{,}65$; ξ – доля испаряемого метала капли от расплавленного металла электрода; $\Sigma\lambda$ – сумма удельных теплот фазовых превращений железа [7; 11; 12], $\Sigma\lambda = \lambda_{A2} + \lambda_{A3} + \lambda_{A4} + \lambda_{A5}$ (удельные теплоты $\lambda_{A2} = 24$ кДж/кг – выделяющаяся при фазовом переходе из ферромагнитного в парамагнитное состояние в точке Кюри (точка A_2 при 1044 K); $\lambda_{A3} = 22$ кДж/кг – выделяющаяся при фазовом переходе α-железо – γ-железо в критической точке A_3 при 1183 K; $\lambda_{A4} = 11$ кДж/кг – выделяющаяся при фазовом переходе γ-α-железо в критической точке A_4 при 1674 K; $\lambda_{A5} = 272$ кДж/кг – удельная теплота плавления, выделяющаяся в критической точке A_5 при 1808 K; T_{dug} – температура дуги; $r = 6300$ кДж/кг – удельная теплота испарения железа.

Уравнение (18) позволяет решить и обратную задачу – найти температуру нагрева электрода T_0 за время сварки t_{sv}. Для этого запишем обратную функцию, которая в пакете MathCAD [15] имеет вид:

$$T_0(t_{sv},j,d_e) = \text{root}[t_{sv} - t(\theta,j,d_e),\ \theta], \tag{24}$$

что позволяет выразить долю испаряемого металла ξ по уравнению (9) работы [4] как функцию от t_{sv}, j и d_e:

$$\xi(t_{sv}, j, d_e) = \frac{G_i}{G_p} = \frac{\int_{T_0(t_{sv},j,d_e)}^{T_{pl}} C_p(\theta)\,d\theta + \Sigma\lambda}{\int_{T_0(t_{sv},j,d_e)}^{T_{dug}} C_p(\theta)\,d\theta + \Sigma\lambda + r}. \tag{25}$$

Здесь G_i – масса испарившегося металла в единицу времени; T_{pl} – температура плавления металла.

Определим коэффициент расплавления α_p при учете испарения, излучения и конвекции тепла с поверхности капли при отсутствии коротких замыканий, который может быть записан из выражения (23) в виде функции:

$$\alpha_p\left(t_{sv}, j, d_e, T_{kap}\right) = \frac{U_{ekv} - \frac{k_{kap}}{j}\left[\alpha_{k,kap}\left(T_{kap}\right)\cdot\left(T_{kap} - T_{oc}\right) + k_{\sigma,kap}\sigma\cdot\left(T_{kap}^4 - T_{oc}^4\right)\right]}{\left[\begin{array}{l}\left(1-\xi(t_{sv}, j, d_e)\right)\cdot\left(\int_{T_0(t_{sv},j,d_e)}^{T_{kap}} C_p(\theta)\,d\theta + \sum\lambda\right) + \\ +\xi(t_{sv}, j, d_e)\cdot\left(\int_{T_0(t_{sv},j,d_e)}^{T_{dug}} C_p(\theta)\,d\theta + \Sigma\lambda + r\right)\end{array}\right]}. \tag{26}$$

Необходимо обратить внимание на то, что плавление наступает при достаточно больших плотностях тока, когда числитель в правой части этого уравнения становится больше нуля. Это условие имеет вид

$$j > \frac{k_{kap}}{U_{ekv}}\left[\alpha_{k,kap}\left(T_{kap}\right)\cdot\left(T_{kap}-T_{oc}\right)+k_{\sigma,kap}\sigma\cdot\left(T_{kap}^4-T_{oc}^4\right)\right]. \quad (27)$$

Причем, чем большую температуру капель T_{kap} необходимо получить, тем требуется большая плотность тока j (иначе нужно переходить на режим сварки с мелкокапельным переносом, что сопровождается резким уменьшением величины коэффициента k_{kap}).

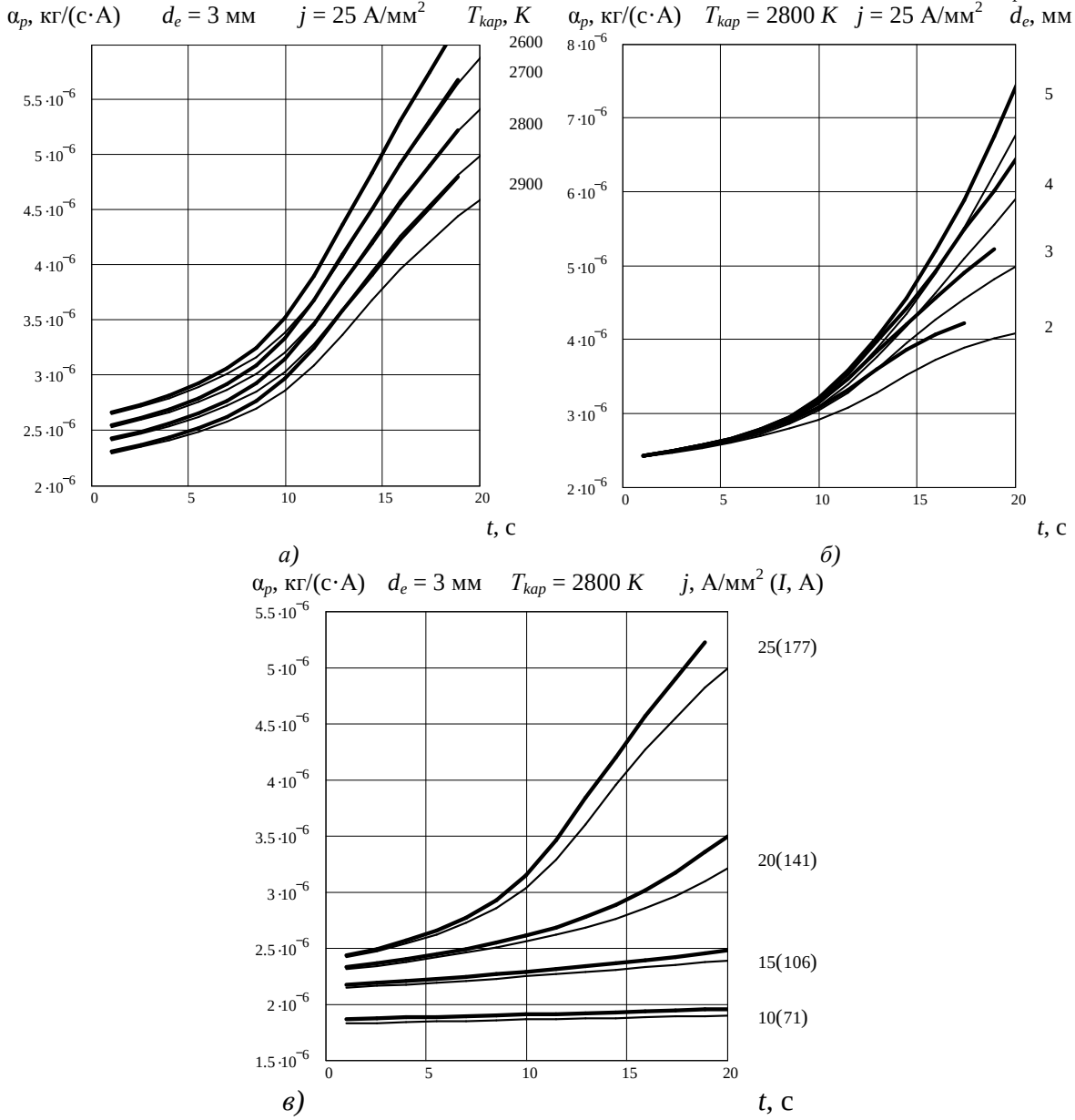


Рис. 4. Зависимости коэффициента расплавления α_p от времени сварки без коротких замыканий t при: а – различных значениях температуры капли T_{kap} = 2600, 2700, 2800 и 2900 К при плотности тока в электроде j = 25 А/мм^2, диаметре электрода d_e = 3 мм; б – различных диаметрах электрода d_e = 2, 3, 4 и 5 мм при плотности тока в электроде j = 25 А/мм^2, температуре капли T_{kap} = 2800 К; в – различных плотностях тока в электроде j (тока I) = 10 (71), 15 (106), 20 (141) и 25 (177) А/мм^2 (А) при диаметре электрода d_e = 3 мм температуре капли T_{kap} = 2800 К для вертикально (утолщенные линии) и горизонтально (тонкие линии) расположенных электродов в случае естественного охлаждения

Решение уравнения (26) с помощью пакета MathCAD [15] позволяет построить зависимости коэффициента расплавления α_p от времени нагрева электрода t при различных параметрах, приведенные на рисунке 4. На рисунке 4, *а* видно, что коэффициент расплавления электрода α_p с течением времени нагрева электрода t увеличивается, причем тем сильнее, чем меньше температура капли T_{kap} (чем меньше T_{kap}, тем меньше значение правой части числителя в выражении (26), и сам числитель увеличивается, увеличивая правую часть этого выражения, иными словами, с уменьшением T_{kap} уменьшаются потери тепла на конвекцию и излучение с поверхности капли и больше тепла идет на расплавление). Величина α_p больше для вертикально расположенного электрода. Из рассмотрения рисунка 4,*б* можно заключить, что коэффициент α_p с течением времени нагрева электрода увеличивается тем сильнее, чем больше диаметр электрода d_e при одной и той же плотности тока j (чем больше d_e, тем больше значение T_0 в знаменателе в выражении (26), и сам знаменатель уменьшается, увеличивая правую часть этого выражения) и так же больше для вертикально расположенного электрода. На рисунке 4,*в* показано, что коэффициент α_p с течением времени нагрева электрода увеличивается, причем тем сильнее, чем выше плотность тока j (ток I) в электроде (чем выше j (I), тем меньше значение правой части числителя в выражении (26), и сам числитель увеличивается, увеличивая правую часть этого выражения), и опять же больше для вертикально расположенного электрода.

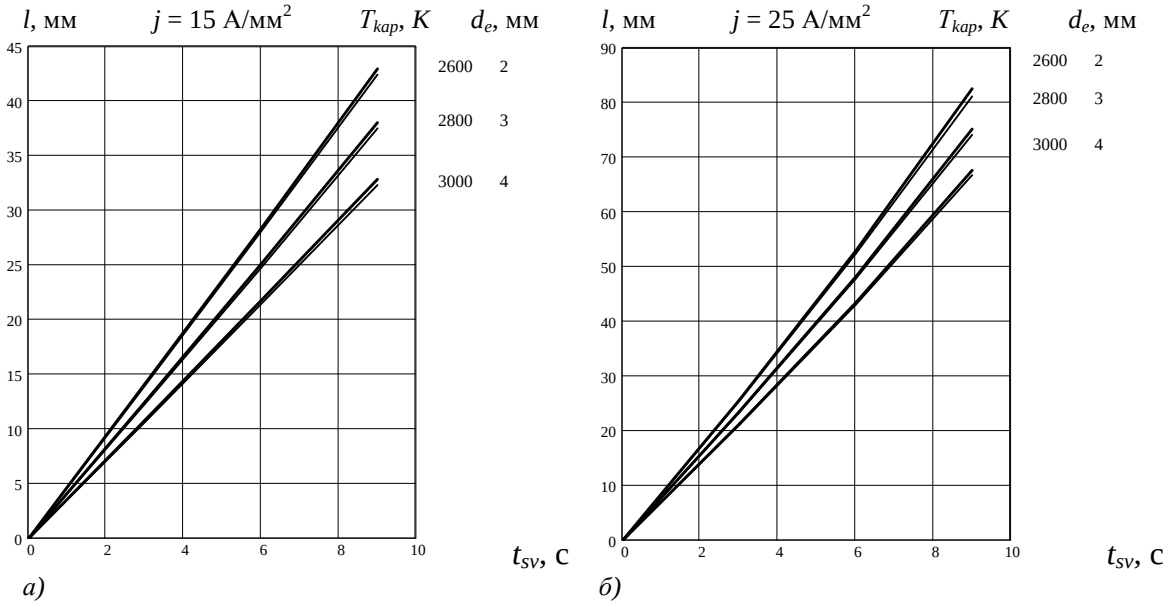


Рис. 5. Зависимости длины оплавленной части электрода l от времени сварки без коротких замыканий t_{sv} при различных значениях температуры капли T_{kap} = 2600, 2800 и 3000 K соответственно при диаметрах электрода d_e = 2, 3 и 4 мм и плотности тока в электроде а – j = 15 А/мм^2 и б – j = 25 А/мм^2 для вертикально (утолщенные линии) и горизонтально (тонкие линии) расположенных электродов в случае естественного охлаждения

Запишем выражение для коэффициента расплавления α_p в виде

$$\alpha_p = \frac{G_p}{I} = \frac{\gamma}{I} \cdot \frac{\pi d_e^2}{4} \cdot \frac{dl}{dt} = \frac{\gamma}{j} \cdot \frac{dl}{dt}, \qquad (28)$$

где dl/dt – скорость плавления электрода.

Длина оплавленной части электрода l за время сварки без коротких замыканий t_{sv} с использованием (26) и (28) может быть определена по формуле

$$l\left(t_{sv}, j, d_e, T_{kap}\right) = \frac{j}{\gamma}\int_0^{t_{sv}} \alpha_r\left(t, j, d_e, T_{kap}\right)dt\,. \qquad (29)$$

Величины l, рассчитанные по этой формуле, приведены на рисунке 5, *а* и *б*. Из рисунков видно, что длина оплавленной части электрода l за время сварки без коротких замыканий t_{sv} увеличивается, причем тем сильнее, чем больше плотность тока в электроде j и меньше температура капли T_{kap} (чем больше j и меньше T_{kap}, тем меньше значение правой части числителя в выражении (26), и сам числитель увеличивается, увеличивая правую часть этого выражения, причем сильнее, чем ее уменьшение за счет увеличения знаменателя при уменьшении d_e).

Исследование процессов нагрева электрода при сварке с короткими замыканиями выходит за рамки настоящей работы и будет проведено в следующей статье.

Выводы.

1. Предложенный подход позволяет определить зависимости коэффициента расплавления электрода при дуговой сварке без коротких замыканий от тока и температуры капли электродного металла, учесть испарение с поверхности капли, подогрев электрода и теплообмен между электродом и окружающей средой посредством теплопроводности через покрытие электрода, конвекции и теплоизлучения с поверхности электрода.

2. Коэффициент расплавления электрода не является постоянной величиной и меняется в широких пределах в процессе плавления электрода и не может служить критерием процесса сварки. Исключением из этого правила является подводная сварка, при ней коэффициент расплавления электрода постоянен из-за постоянства температуры электрода.

3. Характер изменения коэффициента расплавления зависит от режима сварки, длительности непрерывного интервала сварки, среды, в которой осуществляется сварка, а также от положения электрода в пространстве.

4. Изменение коэффициента расплавления является причиной появления различий в характеристиках сварного шва в начале и в конце сварки, и это явление необходимо учитывать при дуговой сварке покрытыми электродами.

Список использованных источников

1. Теоретические основы сварки / В. В. Фролов, В. А. Винокуров, В. Н. Волченко [и др.]. – М.: Высшая школа, 1970. – 592 с.

2. Лесков Г. И. Электрическая сварочная дуга / Г. И. Лесков. – М.: Машиностроение, 1970. – 335 с.

3. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. акад. Б. Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1974. – 768 с.

4. К аналитическому определению коэффициента расплавления при дуговой сварке сталей / И. В. Пентегов, В. Н. Сидорец, О. И. Петриенко, А. М. Жерносеков // Вісник ЧДТУ. – 2012. – № 2. – С. 89-96.

5. ГОСТ 2246-70. Проволока стальная сварочная. Введ. 23.06.70. – М., 1970. – № 952. – 17 с.

6. Кононенко В. Я. Ручная и механизированная дуговая сварка и наплавка: справочник / В. Я. Кононенко. – К., 2009. – 456 с.

7. Гудремон Э. Специальные стали. Т. 1 / Э. Гудремон. – М.: Металлургия, 1966. – 736 с.

8. Пентегов И. В. Метод расчета падения напряжения по длине вылета электрода с учетом нелинейности теплофизических параметров / И. В. Пентегов, О. И. Петриенко // Автоматическая сварка. – 2002. – № 4. – С. 30-33.

9. Петров Г. Л. Теория сварочных процессов (с основами физической химии): учебник для ВУЗов / Г. Л. Петров, А. С. Тумарев. – М.: Высшая школа, 1977. – 392 с.

10. Физические величины: справочник / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский [и др.]; под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

11. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов / В. С. Чиркин. – М.: Физматгиз, 1959. – 356 с.

12. Бабат Г. И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение / Г. И. Бабат. – М.-Л.: Энергия, 1965. – 552 с.

13. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н. Б. Варгафтик. – М.: Наука, 1972. – 720 с.

14. Беляев Н. М. Основы теплопередачи / Н. М. Беляев. – К.: Выща школа, 1989. – 343 с.

15. Кирьянов Д. В. MathCAD 14 / Д. В. Кирьянов. – С.-Пб.: БХВ-Петербург, 2007. – 704 с.

16. Nakamura T., Hiraoka K. Wire Melting Behavior by Non-Steady Heat Conduction Numerical Analysis in Gas Metal Arc Welding // Quarterly of the Japan Welding Sosiety. – 2002. – Vol. 20. – № 1. – P. 53-62.

УДК 621.791.4

Г.К. Харченко, д-р техн. наук
М.М. Руденко, ст. викладач
М.О. Хоменко, канд. техн. наук
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

Ю.В. Фальченко, канд. техн. наук,
А.І. Устінов, д-р фіз.-мат. наук
Ін-т Електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України, м. Київ, Україна

ВИНИКНЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ НА ПОВЕРХНІ МЕТАЛЕВИХ ЗРАЗКІВ ПРИ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОМУ СИНТЕЗІ, ЩО САМОПОШИРЮЄТЬСЯ, В НАНОШАРУВАТИХ ФОЛЬГАХ

Отримано осцилограми електричного потенціалу в металевих зразках під час динамічного впливу на поверхні деталей, що контактують з багатошаровою фольгою, під час протікання у ній СВС реакції. Встановлено залежність характеру електричного потенціалу від складу та властивостей багатошарової фольги.

Ключові слова: багатошарові фольги, реакція високотемпературного синтезу, імпульс, електрична напруга.

Аналіз досліджень та публікацій. У роботах [1–3] показана перспективність застосування багатошарових фольг (БФ) як проміжного прошарку під час дифузійного зварювання композитів та інтерметалідів. Встановлено, що під час використання БФ має місце аномальне прискорення дифузійних процесів у приконтактних об’ємах зразків, що контактують [4]. Такий ефект прискорення масопереносу можливий при імпульсній деформації зони контакту [5]. Розрахункове оцінювання деформованого стану поверхневих шарів зразків, які контактують, під час проходження реакції високотемпературного синтезу, що саморозповсюджується (СВС) у багатошаровій фользі показала, що в поверхневих шарах (~20 мкм) з’являються напруження стиску, що різко переходять у напруження розтягу [6].

Мета статті. Метою цієї роботи було встановлення експериментальних фактів, що підтверджують динамічний вплив реакції СВС у БФ на поверхні, що контактують.

Виклад основного матеріалу. У роботах [7; 8] вивчена поява електричної напруги в металах, які імпульсно ударно навантажують за відсутності зовнішнього електричного поля. Появу електричної напруги в металах автори [7; 8] пояснюють утворенням та рухом дислокацій.

Під час проходження реакції СВС у БФ іде хвиля «горіння» зі швидкістю до 5 м/с і температурою на гребені хвилі до 1300 ºС. Відбувається імпульсне термічне розширення поверхневого шару зразка, виникають механічні напруги, які приводять до генерації та незворотного розмноження лінійних дефектів-дислокацій, які зумовлюють виникнення в зразку електричного потенціалу. Такий ефект повинен проявлятися як при пружному, так і при пластичному деформуванні матеріалу.

Схема експерименту наведена на рисунку 1. Модельний експеримент проводили на зразках Ст3 розміром 20х20х6 мм. Зразки контактували через проміжний шар БФ. Невеликий вантаж забезпечував стиск зразків, які попередньо нагрівали до температури на 100 … 150 °С нижче температури початку процесу СВС. Після проходження реакції СВС зразки пластично не деформувалися й вільно роз'єднувалися. Підпал фольг здійснювали на повітрі й у вакуумі за допомогою розпеченої спіралі. Застосовували БФ складу Ti/Al і Ni/Al, товщиною 20 … 100 мкм. Вимірювання електричної напруги проводили за допомогою цифрового осцилографа Tetronix TDS 220.

На рисунку 2 представлений характерний вид осцилограм імпульсу електричної напруги в зразках при СВС у фольгах Ni/Al товщиною 25, 33 і 64 мкм, а також осцилограма електричної напруги під час удару сталевої кульки вагою 20 г, що падає з висоти 10 см на зразки. У таблиці наведені характерні величини імпульсу напруги й часу його дії.

Осцилограма імпульсу електричної напруги в зразку під час падіння на нього сталевої кульки показує утворення в ньому пружної деформації. Аналогічна картина спостерігається в зразках при СВС у багатошарових фольгах, тобто СВС зумовлює появу пружних деформацій у зоні контакту поверхонь, між якими розміщалася багатошарова фольга.

Надані матеріали свідчать про те, що величина імпульсу електричної напруги знижується під час збільшення товщини БФ, а тривалість імпульсу зростає. Експерименти показали, що попередня термообробка (старіння) БФ і повна ізоляція зразків зумовлюють зниження величини імпульсу електричної напруги.

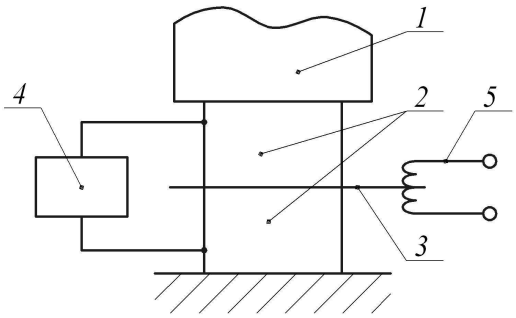
Таблиця 1

Результати вимірювань імпульсів напруги

№ фольги	δ, мкм	U, мВ	t, мс
–	удар шарика	130 … 150	0,3 … 0,5
337	15	70 … 80	10 … 15
344	33	60 … 70	20 … 30
340	64	30 … 40	150 … 170

Висновки. Встановлено, що зростання напруги для фольг Ni/Al значно вище, ніж для Ti/Al, що узгоджується з відомими даними про хід реакції СВС у цих БФ. Теплове виділення при СВС у фользі Ni/Al значно перевищує аналогічні показники для фольги Ti/Al.

Якщо НФ складається із двох частин із зазором між ними, то при СВС реакції спостерігається 2 піки електричного сигналу (при цьому візуально фіксується 2 спалахи «горіння»). На рисунку 3 представлена характерна осцилограма електричної напруги при наявності тріщини в НФ.



1 – вантаж; 2 – зразки Ст3; 3 – наношарувата фольга; 4 – осцилограф; 5 – пристрій для підпалу фольги

Рис. 1. Схема експерименту

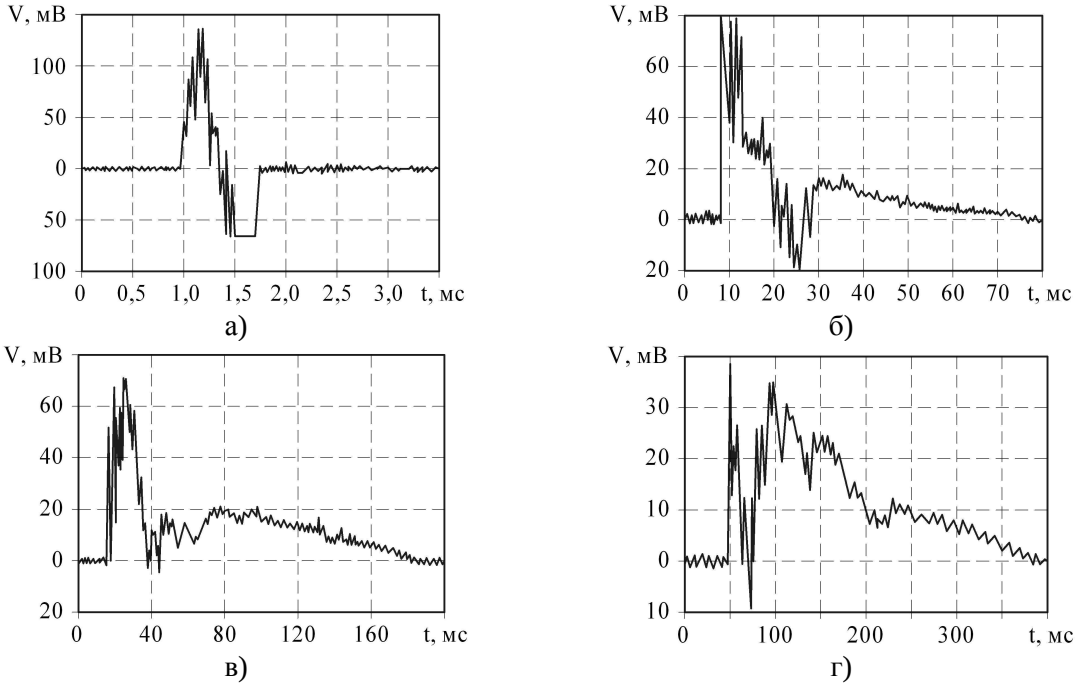


Рис. 2. Осцилограми електричної напруги при ударі кулькою по зразках (а), при СВС в наношарових фольгах Ni/Al товщиною 15 мкм (б), 33 мкм (в) та 64 мкм (г)

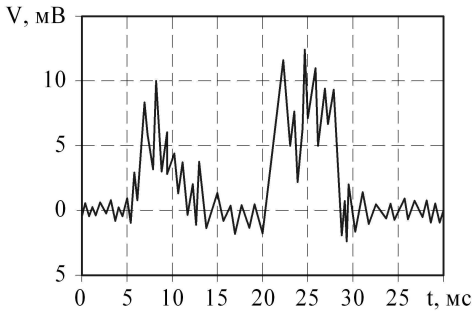


Рис. 3. Осцилограма імпульсу електричної напруги при СВС у фользі Ti/Al товщиною 20 мкм з тріщиною

Список використаних джерел

1. Многослойные фольги Ti/Al: способы получения, свойства и применение при сварке давлением / А. И. Устинов, Ю. В. Фальченко, Т. В. Мельниченко и др. // Современная электрометаллургия. – 2012. – №1. – С. 30-37.

2. Дифузійне зварювання сплаву TiAl / Г. К. Харченко, А. І. Устінов, Ю. В. Фальченко та ін. // Вісник ЧДТУ. Серія “Технічні науки”. – 2008. – № 36. – С. 94-99.

3. Диффузионная сварка микродисперсного композита АМг5 + 27% Al_2O_3 с применением нанослойной фольги Ni/Al / А. Я. Ищенко, Ю. В. Фальченко, А. И. Устинов и др. // Автоматическая сварка. – 2007. – № 7. – С. 5-9.

4. Дослідження дифузійних процесів у зварних з’єднаннях алюмініду титану (TiAl) / Г. К. Харченко, В. Ф. Мазанко, А. І. Устінов та ін. // Вісник ЧДТУ. Серія “Технічні науки”. – 2009. – №37. – С. 117-119.

5. Мазанко В. Ф. Диффузионные процессы в металлах под действием магнитных полей и импульсных деформаций / В. Ф. Мазанко, А. В. Покоев, В. М. Миронов и др. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 319 с.

6. Температурні напруження, що виникають під час миттєвого нагрівання контактуючих поверхонь / І. О. Прибитько, Л. В. Петрушинец, Г. К. Харченко та ін. // Вісник ЧДТУ. Серія “Технічні науки”. – 2011. – № 47. – С. 55-61.

7. Електричні явища при швидкісному деформуванні металів та сплавів / В.Ф. Мазанко, В.П. Бевз, С.П. Ворона та ін. // Вісник ЧДТУ. Серія технічні науки. – 2008. – №34. – С. 125-132.

8. Аномальный массоперенос и возникновение ЭДС в металлах при импульсном ударном нагружении / В. П. Бевз, В. Ф. Мазанко, О. В. Филатов и др. // Металлофизика и новейшие технологи. – 2006. – Т. 28 (специальный выпуск). – С. 271-277.

УДК 621.791.3

М.Г. Болотов, канд. техн. наук
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГЕОМЕТРИЧНИХ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОЖНИСТОГО КАТОДУ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ НАГРІВУ В УМОВАХ ЗВАРЮВАННЯ

Досліджено вплив геометричних параметрів порожнистого катоду на енергетичну ефективність під час зварювання в тліючому розряді.

Вступ. Можливість нагріву в тліючому розряді з порожнистим катодом була показана ще в 1879 році англійським ученим В. Круксом. У його пристрої тепловий ефект досягається шляхом гальмування на зразку, що піддається впливу, швидких електронів, які набувають свою швидкість у області катодного падіння потенціалів (зоні темного катодного простору), прилеглого до півсферичних сегментів катода.

Проте минуло більше сотні років, перш ніж виникла необхідність у використанні таких джерел теплоти, які могли б забезпечити температуру порядку 2000 °С.

До теперішнього часу тліючий розряд з порожнистим катодом активно використовується в різних фізичних експериментах, спектроскопії, в процесах хіміко-термічної обробки металів, газорозрядних електронно-променевих гарматах, електровакуумних приладах і т. д.

Дослідження, проведені в роботах [1; 2] показали можливість застосування тліючого розряду з порожнистим катодом і в умовах зварювання тиском.

Стабільність параметрів режиму, простота технічної реалізації, контролю й управління процесом нагріву, широкий діапазон регулювання технологічних параметрів, малі капітальні витрати роблять тліючий розряд з порожнистим катодом досить ефективним джерелом нагріву для дифузійного зварювання і паяння.

Результати експериментальних порівнянь ефективності різних джерел енергії для дифузійного зварювання, виконані в роботі [3] показують, що тліючий розряд з порожнистим катодом за своїми енергетичними показниками в 3-4 рази перевищує радіаційне (як найбільш поширене) джерело нагріву, в той же час дещо поступається нормальному тліючому розряду.

У зв’язку з цим виникають питання, пов'язані з пошуком способів підвищення енергетичних характеристик тліючого розряду з порожнистим катодом (ТРПК) в умовах зварювального нагріву.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження впливу геометричних характеристик порожнистого катода на ефективність нагріву в умовах зварювання.

Методи та результати. Результати досліджень, виконані в роботі [4], показують, що величина ефективного ККД нагріву в ТРПК визначається, в основному, умовою виходу електронів з катодної порожнини в результаті викривлення траєкторії їх руху, внаслідок дії двох електричних полів.

Для оцінки впливу такого механізму втрат на величину ефективного ККД у цій роботі були проведені досліди з конструктивною зміною схеми нагріву.

Здійснювався нагрів сталевого стрижня діаметром 0,008 м і довжиною 0,04 м, який знаходився у вільно підвішеному стані всередині катода діаметром 0,04 м, висотою 0,04 м. Струм розряду підтримувався постійним на рівні 0,075 А. Температурний стан контролювали ХА- термопарою.

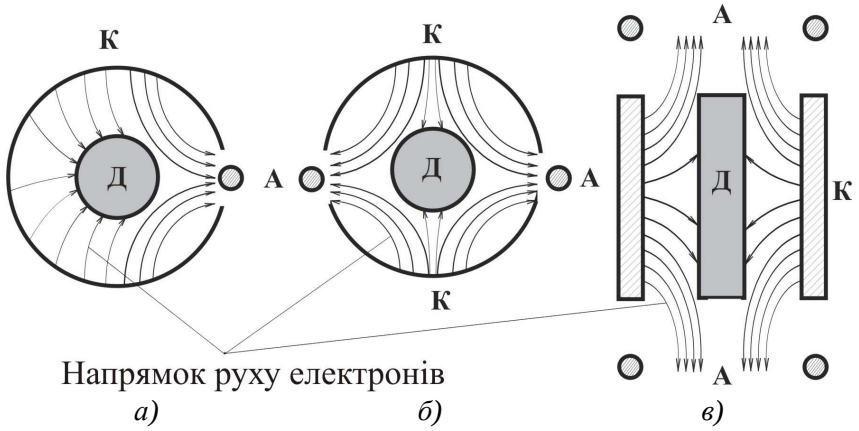


Рис. 1. Схема нагріву тліючим розрядом у порожнистому катоді: а) схема з одним каналом виходу електронів; б, в) схеми з двома каналами виходу електронів: А – анод; К – катод; Д – деталь

У першому випадку використовували порожнистий катод з прорізом уздовж утворюючої і розташуванням анода вздовж прорізу (рис. 1, *а*). В цьому випадку утворювався один канал виходу електронів, з викривленням траєкторії електронів у бік анода, перпендикулярно поверхні катода і деталі. Величина ефективного ККД для цієї схеми нагріву становила $\eta_0 = 0{,}35...0{,}37$.

У подальших дослідах використовували схеми нагріву з двома каналами виходу електронів. У одному з варіантів використовували порожнистий катод, що складається з двох неповних кільцевих сегментів (рис. 1, *б*), які знаходяться під одним і тим же потенціалом. У іншому варіанті використовували класичну схему, але з розташуванням додаткового анода поблизу другого відкритого торця катода (рис. 1, *в*).

Результати експериментів показали, що величина ефективного ККД у обох останніх варіантах становила $\eta_0 = 0{,}32...0{,}33$, що на 3...4 % нижче, ніж за наявності одного каналу втрат електронів.

З метою підвищення осциляції електронів усередині катодної порожнини, тобто для перешкоди їх відтоку на анод, вихідний отвір катодної порожнини був накритий сталевою діафрагмою з прорізом по центру для проникнення потоку іонів, бомбардуючих катод і можливості розміщення деталі всередині порожнини. Здійснювався нагрів тієї ж деталі. Величина струму становила 0,075 А. Діафрагма також знаходилася під катодним потенціалом. Схема нагріву представлена на рисунку 2.

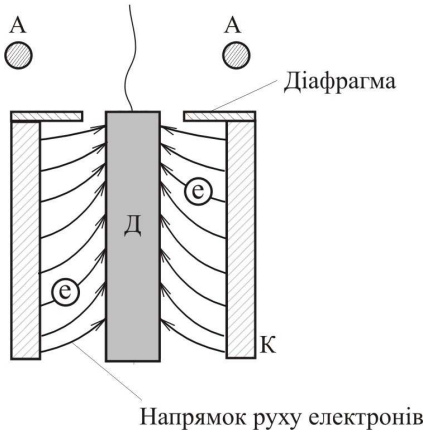


Рис. 2. Схема нагріву тліючим розрядом з накритим металевою діафрагмою порожнистим катодом: А – анод; К – катод; Д – деталь

Результати експериментів показали, що величина ефективного ККД за цією схемою не перевищує $\eta_0 = 0{,}35...0{,}37$, що відповідає попереднім результатам нагріву.

У роботі також розглядався вплив геометричних характеристик порожнистого катода на ефективність нагріву в ТРПК.

У зв'язку з тим, що циліндрична форма катода найбільш проста в реалізації і прийнятна для зварювального нагріву деталей циліндричної форми, тому всі дослідження проводили шляхом зміни апертури катодної порожнини та її висоти.

На першому етапі досліджувався вплив діаметра катодної порожнини, величина якої в наших дослідах змінювалася в межах від 0,02 м до 0,05 м. Висота катода при

цьому залишалася незмінною і становила 0,04 м. Здійснювався нагрів сталевого стрижня діаметром 0,008 м і довжиною 0,04 м.

Результати досліджень показують, що збільшення діаметра катодної порожнини від 0,02 м до 0,05 м, при постійному діаметрі деталі, призводило до зниження величини ефективного ККД нагріву з 0,49 до 0,3 відповідно.

У цьому випадку поряд з підвищенням відтоку електронів через відкритий торець порожнини може бути присутня й інша складова втрат, пов'язана з втратою енергії електронів за рахунок збільшення числа їх зіткнень з атомами та іонами газу під час збільшення відстані катод-деталь при більшому діаметрі катода (рис. 3).

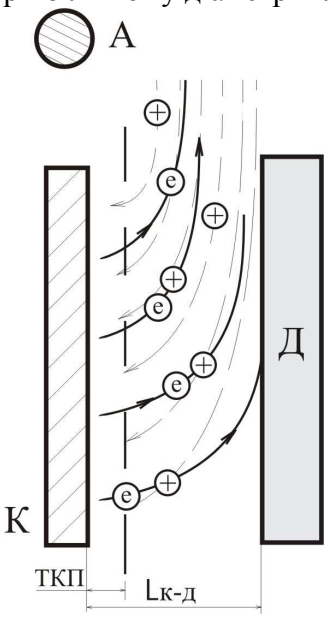


Рис. 3. Електричне поле тліючого розряду з порожнистим катодом:
е – напрямок руху електронів; + – напрямок руху іонів; ТКП – темний катодний простір;
$L_{к-д}$ – відстань катод – деталь; А – анод; К – катод; Д – деталь

Згідно з кінетичною теорією газів довжина вільного пробігу електронів в газі становить [5; 6]:

$$\lambda_e = 4\sqrt{2}\lambda_a , \quad (1)$$

де λа – довжина вільного пробігу атома, яка, згідно з тією ж теорії становить:

$$\lambda_a = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n}, \quad (2)$$

де, у свою чергу, $\sqrt{2}\pi d^2 n$ = Q – газокінетичний переріз атомів (молекул), який для аргону становить Q = $59\cdot 10^{-20}$ м^2, для азоту Q = $62\cdot 10^{-20}$ м^2; n – щільність атомів (молекул) газу, м$^{-3}$.

Вважаючи, що n = Р/кТ, де Р – тиск газу, Па; к – постійна Больцмана (к = $1{,}38\cdot 10^{-23}$); Т – температура газу, яка в нашому випадку становить Т ≈ 573…873 К, можна перетворити вираз (1) до вигляду:

$$\lambda_e \approx 4\sqrt{2}\,\frac{kT}{PQ}. \quad (3)$$

Розрахунки, виконані згідно з (3) для аргону, показали, що довжина вільного пробігу електронів при тиску газу 26…53 Па становить *λe = 0,004...0,002* м. Тобто, під час збільшення діаметра катода від 0,02 м до 0,05 м кількість зіткнень електронів зростає в 3...4 рази, що безумовно повинно відбитися на їх кінцевій швидкості і, відповідно, енергії зіткнення з поверхнею деталі.

Для проведення подальших досліджень були використані циліндричні порожнисті катоди діаметром 0,04 м заввишки 0,025 м, розташовані, як показано на схемі (рис. 4).

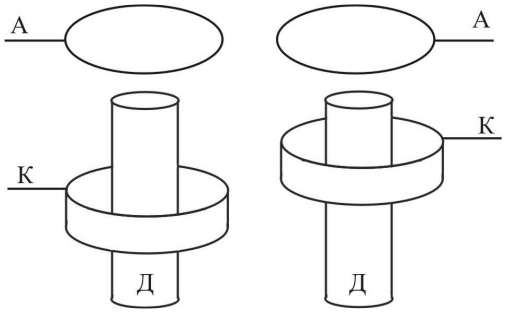


Рис. 4. Схема нагріву тліючим розрядом з порожнистим катодом довжиною 0,025 м: А – анод; К – катод; Д – деталь

Отримані результати покузують, що використання катода висотою 0,025 м, встановленого поблизу верхнього торця деталі, забезпечує ефективний ККД на рівні $\eta_0 = 0{,}29$, що на 3 % вище ніж його розташування по центру деталі ($\eta_0 = 0{,}26$). Це обумовлено тим, що в наших експериментах термопара розміщувалася саме в верхньому торці деталі, що неминуче призводило до зростання швидкості (скорочення часу) нагріву.

Використання катодів довжиною менше 0,02 м не є доцільним, оскільки емітовані з поверхні катода електрони не затримуватимуться всередині порожнини і відразу вирушають на анод. Ефект порожнистого катода буде слабшати і, відповідно, ефективність джерела нагріву падатиме.

Використання катодів великої довжини (в яких L>>D) також не рекомендується, оскільки при чималій довжині катодної трубки всі нерекомбіновані іони впадуть на бічну поверхню катода, розташовану поблизу до вхідного отвору. У зв'язку з цим емісія електронів, що беруть участь у нагріві деталей, виникатиме лише на вказаній поверхні. Це призведе до зниження величини ефективного ККД нагріву.

Також у роботі проводилися дослідження з циліндричним порожнистим катодом, виконаним із сталевої сітки діаметром 0,02 м, заввишки 0,04 м і розміром вічка 0,25 мм. Зовнішня поверхня сітки впритул прилягала до керамічної ізоляційної трубки, що перешкоджало осциляції заряджених часток в отвори сітки. Експеримент проводили на тій же деталі. Струм розряду підтримувався на рівні 0, 075 А.

Отримані результати показали, що ефективність нагріву з використанням сітчастого катода на 4...6 % нижче, ніж при нагріві в суцільному порожнистому катоді. Так величина ефективного ККД нагріву з використанням такого катода коливається в межах $\eta 0 = 0{,}29...0{,}33$. Це може бути пов’язано із зменшенням площі емітуючої поверхні порожнистого катода, і, відповідно, кількості електронів, що беруть участь в процесі нагріву.

Висновки. Встановлено, що однією з причин зниження ефективності нагріву в тліючому розряді з порожнистим катодом, поряд із відтоком електронів у напрямку до аноду, є втрата енергії електронів за рахунок збільшення числа їх зіткнень з атомами й іонами газу під час збільшення відстані катод-деталь.

Встановлено вплив геометричних характеристик катодної порожнини на величину ефективного ККД нагріву в тліючому розряді з порожнистим катодом.

Список використаних джерел

1. Болотов Г. П. Дослідження стійкості тліючого розряду з порожнистим катодом в умовах зварювання. / Г. П. Болотов, М. Г. Болотов // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – 2008. – № 36. – С. 100.

2. Болотов Г. П. Розрахункове визначення температури нагріву деталей при дифузійному зварюванні в тліючому розряді з порожнистим катодом. / Г. П. Болотов, М. Г. Болотов // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. –2009. – № 40. – С. 23-29.

3. Болотов Г. П. Порівняльна оцінка ефективності джерел енергії для дифузійного зварювання у вакуумі. / Г. П. Болотов, М. Г. Болотов // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – 2010. – № 42. – С. 144-147.

4. Болотов М. Г. Ефективність нагріву при зварюванні в тліючому розряді з порожнистим катодом. / М. Г. Болотов, Т. Р. Ганєєв // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. –2012. – № 55. –С. 126-131.

5. Смирнов Б. М. Физика слабоионизированного газа / Б. М. Смирнов. – М.: Наука, 1978. – 416 с.

6. Каганов И. Л. Ионные приборы / И. Л. Каганов. – М.: Энергия, 1972. – 525 с.

УДК 621.791.052

Л.Б. Шрон, канд. техн. наук
В.Б. Богуцкий, канд. техн. наук
Б.Л. Шрон
Б.В. Богуцкий
Севастопольский национальный технический университет, г. Севастополь, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВ И РАДИУСОВ ПЕРЕХОДА ШВА К ОСНОВНОМУ МЕТАЛЛУ В СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

В статье приведена методика исследования геометрических параметров зоны сопряжения стыкового шва с основным металлом и характер их распределения по фронту шва.

Постановка проблемы. Работоспособность сварных соединений в условиях усталостного и хрупкого разрушения в значительной степени зависит от локального повышения напряжений в зонах конструктивных и технологических концентраторов. Несмотря на то, что стыковые соединения обеспечивают меньшую концентрацию напряжений по сравнению с другими типами соединений, но и у них из-за концентрации напряжений наблюдается резкое снижение сопротивления усталости. Решающее значение при этом приобретает плавность сопряжения шва с основным металлом.

Анализ литературы. Экспериментальные данные большинства исследователей свидетельствуют о том, что основное влияние на концентрацию напряжений в стыковых швах и их сопротивление усталости оказывают угол перехода шва к основному металлу φ и радиус сопряжения r (рис. 1). В ряде работ решающим фактором, определяющим сопротивление усталости сварных соединений, считается угол перехода φ. При увеличении его от нуля (без усиления) до 60^0 сопротивление усталости стыковых соединений среднеуглеродистых сталей снижается в среднем в 2,5 раза.

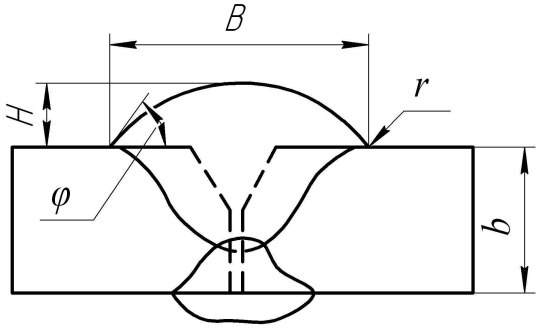


Рис. 1. Основные геометрические параметры усиления стыкового шва

Некоторые исследователи связывают сопротивление усталости стыковых сварных соединений с коэффициентом формы усиления γ, который при определенных условиях может характеризовать величину угла φ. Так, в работах Д.И. Навроцкого и Л.А. Мордвинцева установлено, что для стыковых сварных соединений низкоуглеродистой стали существует прямая зависимость между величиной φ и числом циклов до разрушения. В

тоже время, в этой работе отмечается значительное рассеяние результатов, что свидетельствует, по-видимому, об относительно слабой корреляции между φ и пределом выносливости сварных соединений.

Значительно сильнее выражена связь между сопротивлением усталости сварных соединений и радиусом перехода r, характеризующим плавность сопряжений усиления стыкового шва с основным металлом и оказывающим наибольшее влияние на уровень концентрации напряжений. В работах Н.Л. Зайцева и С.Ю. Гооге приведены результаты исследований усталостной прочности образцов в виде пластин с выступом, имитирующим усиление шва различной формы. Угол перехода φ варьировался в пределах 150…900, а радиус перехода ─ до 12,6 мм (в некоторых случаях r был настолько мал, что его приближенно считали равным нулю). Установлено, что влияние r уменьшается при уменьшении φ и становится пренебрежимо малым при φ = 100…150. Аналогично, влияние φ уменьшается при увеличении радиуса r и становится пренебрежимо малым при r = 6,4…9,5 мм.

Испытания образцов с выступами трапециедальной формы были проведены в работах И.С. Гузь и В.А. Кархина, где получено, что радиус перехода r сильнее влияет на усталостную прочность соединений, чем угол перехода φ, особенно при малых значениях r. Это согласуется с результатами работы А.Е. Асниса, в которой установлено сильное влияние r и φ на концентрацию напряжений в зоне перехода от усиления шва к основному металлу. При малой величине r коэффициент концентрации напряжений может достигать сравнительно большой величины: например при φ = 600 и r = 0,02 мм получено $\alpha\sigma$ = 3,5. Предел выносливости при таких параметрах шва снижается в 3…4 раза.

В настоящее время существует ряд зависимостей, предложенных различными исследователями применительно к расчету величины коэффициента концентрации напряжений в стыковых сварных соединениях [Макаров Н.И., Турмов А.П., Кархин В.А., Бельчук Г.А. и др.], однако значения коэффициентов концентрации напряжений по данным разных авторов существенно отличаются для одной и той же геометрии шва.

При расчётах прочности зачастую наряду с коэффициентами концентрации напряжений необходимо знать значения градиентов напряжений. Данные о градиентах напряжений для стыковых сварных соединений отсутствуют. Вообще говоря, диапазон изменения r и γ для реальных сварных соединений достаточно широк. возможный диапазон измерения r для низколегированных сталей составляет 0,02…10 мм. Технологический вариант сварки оказывает существенное влияние на формообразовании геометрии стыкового шва. Следовательно, выбирая оптимальный режим сварки можно в значительной степени повысить сопротивление усталости стыковых сварных соединений при переменных и динамических нагрузках.

Цель статьи – определение геометрических параметров зоны перехода шва к основному металлу, оказывающих существенное влияние на величину концентрацию напряжений в реальных сварных соединениях.

Изложение основного материала. Для определения геометрических параметров зоны перехода шва к основному металлу использовали метод гипсовых слепков. Для этого на сварных соединениях, полученных различными способами сварки на разных технологических режимах, тщательно очищали от окалины и шлака зону сопряжения шва с основным металлом, затем для предотвращения залипания смазывали машинным маслом. Подготовленную поверхность заливали гипсом, затвердевшие слепки длиной 80…200 мм отделяли от металла путем легких ударов по основному металлу. Такой способ получения слепка позволил сохранять «несмазанную» картину профиля сварного шва. Полученные слепки разрезались на плоские поперечные темплеты толщиной 2…3 мм (рис. 2). Количество срезов на каждом слепке составляло от 25 до

100. Для снижения погрешности при определении радиуса сопряжения шва с основным металлом темплеты, у которых иногда образовывались микроскопы, подвергали доводке на притирочных плитах.

Свободная поверхность шва имеет сложную форму и в этой связи возникает вопрос, что принимать за радиус сопряжения r и угол φ перехода шва к основному металлу. В настоящее время не существует единой методики для определения этих параметров. Для более обоснованного подхода к определению радиуса сопряжения и угла перехода выполнен эксперимент на фотоупругих моделях, который показал, что существенное снижение коэффициента концентрации напряжений α_σ наблюдается после того, когда высота шва становится сопоставимой с радиусом сопряжения r (рис. 2).

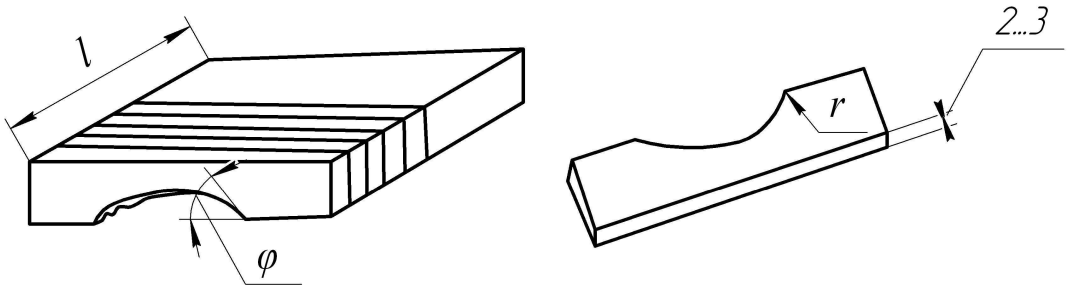


Рис. 2. Схема изготовления темплетов из гипсового слепка

Следовательно, для стыковых сварных соединений при определении α_σ величину угла перехода можно определять не по соотношению высоты и ширины усиления, а по касательной к поверхности шва на участке шва $t \approx r$ на участке, прилегающем к месту сопряжения. Определение радиуса сопряжения является более сложным вопросом, т. к. зона сопряжения шва основным металлом имеет неровности (рис. 3) на уровнях макро и микрорельефа. Можно определять радиус сопряжения как на уровне макрорельефа r_1, так и на уровне микрорельефа r_2.

Исследования на моделях показали, что если величины микро рельефностей меньше приблизительно $(0{,}1\ldots0{,}2)r_1$, то практически не обнаруживается их влияние на величину концентрации напряжений, исходя из этого для сварных соединений за радиус перехода r_α будем принимать максимальный радиус прилегающий вписанной окружности, определённый согласно СТ СЭВ 301-76. Величину φ определяем как угол между основным металлом и касательной к свободной поверхности шва на участке, где величина выступа $t \approx r$ (рис. 3).

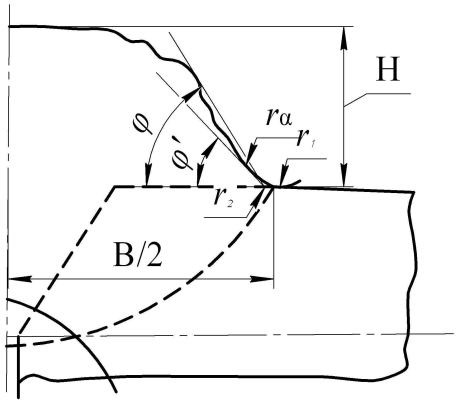


Рис. 3. Схема к определению угла перехода φ и радиуса сопряжения шва r с основным металлом

Радиус перехода r в гипсовых слепках замеряли на инструментальном микроскопе УИМ-21 с помощью специальной радиусной головки путём подбора радиуса вписанной прилегающей окружности в месте перехода условного шва к основному металлу.

Замеры производили с двух сторон темплета. Угол перехода определяли также на инструментальном микроскопе УИМ-21 с помощью угловой шкалы.

Исследователи распределение по длине шва радиусов и углов перехода для случаев двухсторонней сварки, сварке на керамической подставке БПК и сварке на стекловолокне. Значения радиусов и углов при каждом способе сварки колеблется в широких пределах. их опытные значения наносили на вероятностные бумаги, соответствующие различным законам распределения. Оказалось, что распределение величин радиусов и углов для каждого технологического варианта сварка наиболее хорошо описывающего логарифмически – нормальным законом (рис. 4). Видно, что средние значения радиусов (рис. 4, *а*) для случаев двухсторонней сварки и сварки на керамической подкладке близки для случаев между собой, а при сварке на стекловолокне средние и особенно металлу при сварке на керамической прокладке. О лучшей геометрии шва при сварке на стекловолокне свидетельствует также анализ распределения величин угла перехода (рис. 4, *б*) и меньшая высота усиления шва.

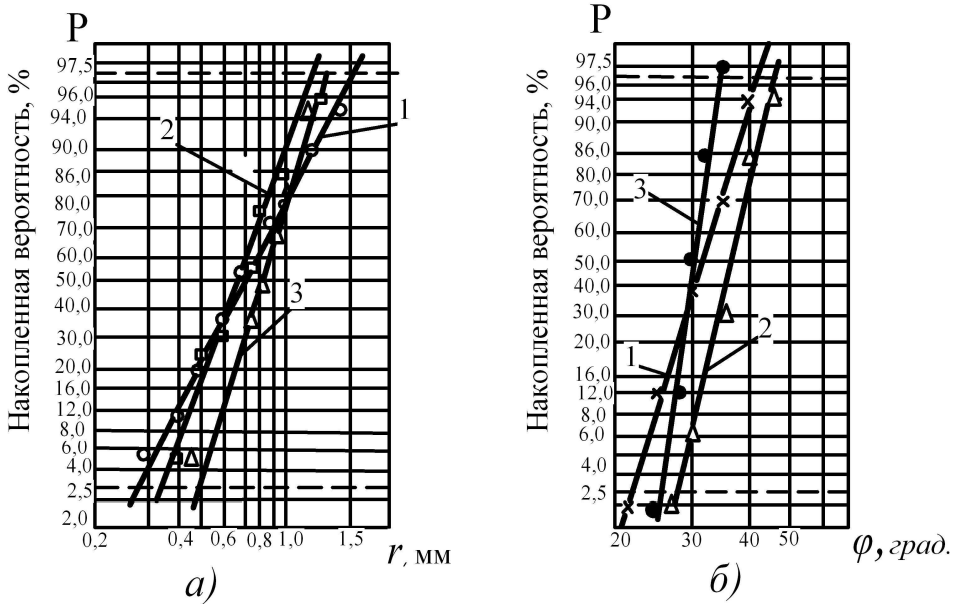


Рис. 4. Функции распределения радиусов r (а) и углов перехода φ (б): 1 – двусторонняя сварка; 2 – сварка на керамической подкладке; 3 – сварка на стеклоподложке

Выводы:

1. На основе статистической обработки большого массива измерений установлено, что распределение величин радиусов *r* и углов *φ* в месте перехода шва к основному металлу подчиняется логарифмически нормальному закону распределения.

2. Определены параметры распределения радиусов *r* и углов *φ* их медианные значения и среднеквадратичные отклонения при различных технологических вариантах сварки, что позволит более обосновано проводить прочностные расчеты.

Список использованных источников

1. Шрон Л. Б. Сопротивление усталости тавровых сварных соединений стали 15ХСНД при различной геометрии перехода шва к основному металлу / Л. Б. Шрон, В. Б. Богуцкий, Э. С. Гордеева // Збірник наукових праць Севастопольського військово-морського інституту. – 2008. – № 2 (15). – С. 47-50.

2. Шрон Л. Б. Методика исследования зон локальной концентрации напряжений в угловых швах сварных соединений / Л. Б. Шрон, В. Б. Богуцкий, А. С. Баталин // Збірник наукових праць Севастопольського військово-морського інституту. – 2007. – № 2 (12). – С. 16-20.

РОЗДІЛ V. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 681.5.015

В.В. Литвинов, д-р техн. наук
І.В. Хоменко, аспірант
Інститут проблем математичних машин і систем НАНУ, м. Київ, Україна

СИНТЕЗ ГРАФІЧНИХ ЗАВДАНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ ПАРАМЕТРИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

У статті запропоновано метод генерації графічних завдань для навчального процесу за допомогою параметричних моделей. Наведено та розглянуто приклади графічних завдань, отриманих указаним методом.

Ключові слова: *геометричне моделювання, генератор графічних завдань, параметричні моделі.*

В статье предложен метод генерации графических задач для учебного процесса с помощью параметрических моделей. Приведены и рассмотрены примеры графических задач, полученных указанным методом.

Ключевые слова: *геометрическое моделирование, генератор графических задач, параметрические модели.*

The paper proposes a method of generating image problems for the learning process using parametric models. Presented and discussed examples of image problems, received the specified method.

Key words: *geometric modeling, graphics generator, parametric models.*

Вступ. Створення графічних завдань із дисциплін, насичених комп'ютерною інженерною графікою – досить трудомістка та малоавтоматизована задача. Сучасні засоби комп'ютерного геометричного моделювання можуть бути корисними у розв'язанні цієї проблеми. Параметричні моделі допускають широкі діапазони зміни геометрії моделі при зміні лише декількох числових значень у таблиці параметрів.

Постановка проблеми. Невід'ємною частиною сучасного розвинутого електронного посібника з інженерних дисциплін є система генерації графічних завдань для контролю знань студентів. При чому ця система повинна бути інтелектуальною та інтерактивною одночасно. До виникнення систем штучного інтелекту процес навчання вважався прерогативою людини. Однак інтерактивна інтелектуальна система із можливістю діалогу на метамові предметної галузі (геометричні об'єкти) може автоматизувати цей процес.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Традиційні системи автоматизованого навчання у більшості випадків реалізують звичайну схему «Представлення навчального матеріалу – Контрольне питання – Співставлення із зразком». Такий стан негативно впливає на використання комп'ютерних систем під час навчального процесу. Рівень цих систем неможливо порівняти із рівнем проблемного експерта: предметні знання представлені пасивно та дуже спрощено [1]. Слід зазначити, що в інтелектуальних системах навчання участь людини виключається на етапі власне навчання, однак створення баз знань залишається функцією експерта або викладача.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Автори пропонують створити реальну генеруючу систему для створення великої бази графічних завдань із дисциплін, насичених інженерною графікою (на прикладі курсу «Нарисна геометрія, інженерна та комп'ютерна графіка»). Для створення графічних завдань використовується параметричний метод генерації завдань.

Мета статті. У статті аналізуються вимоги до графічних завдань в інтелектуальній системі для навчання та запропоновано метод для створення графічних завдань, які задовольняють цим вимогам. Також наведено застосування цього методу для конкретних інженерних дисциплін, зокрема курсу «Нарисна геометрія, інженерна та комп'ютерна графіка».

Актуальність. Генеруюча система графічних завдань, яка реалізує можливість створення бази графічних завдань із параметризованих об'єктів, може бути використана у методичних розробках та навчальному процесі для створення збірників завдань та комп'ютер-

них навчаючих систем для індивідуальної та самостійної роботи студентів, автоматизованої перевірки отриманих розв'язків та об'єктивного оцінювання знань студентів.

Класифікація методів генерації. Інтелектуальні системи та технології досить інтенсивно впроваджуються у процеси управління виробничими та організаційними структурами. Розвиваються процеси комп'ютеризації навчання у вищих та середніх навчальних закладах. Важливою складовою будь-якого машинного навчання є контроль знань. Процес створення завдань із дисциплін, насичених інженерною комп'ютерною графікою, досить трудомісткий, потребує високої кваліфікації розробника та досі слабоавтоматизований.

За ступенями автоматизації формування завдань можна виділити системи генерації чотирьох основних типів [2]:

1) системи із послідовною вибіркою завдань із бази готових завдань;

2) системи із вибіркою завдань із бази готових завдань за одним із критеріїв: довільний вибір наступного завдання; вибір завдання відповідної складності залежно від підготовленості студентів; вибір типу завдання залежно від індивідуальних особливостей студентів;

3) системи з автоматичним формуванням завдань та розв'язків до них;

4) системи з автоматичним формуванням завдань та розв'язків до них безпосередньо із навчального матеріалу курсу.

У системах першого та другого типів усі завдання готуються розробником заздалегідь та зберігаються у базі готових завдань. Крім того, як правило, усі еталони розв'язків також закладаються до системи автором. У системах першого типу однакові завдання отримують усі студенти. Системи другого рівня дозволяють кожному студенту отримати індивідуальне завдання. При довільній виборці завдань із бази необхідна значно більша кількість варіантів завдань порівняно із системами першого типу, але зменшується вірогідність передачі розв'язків від студента до студента.

Системам, заснованим на готових завданням, властиві такі недоліки:

– велика трудомісткість складання завдань;

– обмежена кількість варіантів завдань;

– необхідність періодично оновлювати перелік завдань;

– суб'єктивність у підборі еталонів розв'язків;

– можливість багаторазового отримання однакових завдань.

Системи третього типу дозволяють звільнити викладача від тиражування власних завдань та розв'язків до них. Однак у таких системах накладаються певні обмеження на тип та форму завдань.

Системи четвертого типу можна вважати ідеальними генераторами, адже вони дозволяють із матеріалу на природній мові отримувати різноманітні завдання. Одним із напрямів у цій сфері є моделювання синтезу інтелектуальних тестів засобами формальної продукційної системи [3]. Але такі генератори ще не вийшли на індустріальний рівень.

У цій роботі автори представляють розроблений інструментарій генерації графічних завдань для навчаючої системи, яка відноситься до систем генерації третього типу. Для створення завдань у представленому інструментарії використовується параметричний метод генерації графічних завдань.

Параметричний метод генерації завдань. При застосуванні цього методу генерації створені графічні завдання являють собою різні рівноцінні варіанти, отримані з параметризованого шаблону завдання, створеного викладачем. Під час параметризації завдань використовується поняття моделі завдання [4].

Розглядаючи метаматематику навчаючої системи, графічні завдання можна представити у вигляді сукупності тексту K та геометричних елементів $f_1(x_1, \dots x_m)$, $f_2(x_1, \dots x_m), \dots f_k(x_1, \dots x_m)$, де $(x_1, \dots x_m)$ – змінні параметри завдання.

У більшості дисциплін при створенні різних варіантів завдань тексти завдань, загальне розміщення геометричних елементів та розв'язування залишаються сталими, а $f_1, \dots f_k$ залежать від числових параметрів варіанта. Позначимо змінні параметри завдання $p_1, \dots p_n$, нехай r із них – незалежні. Тоді при фіксованому тексті завдання та геометричних елементах $f_1(p, x), \dots f_k(p, x)$ кожне значення являє собою екземпляр, який належить параметризованому сімейству завдань, заданому функцією $F_1(p_1 \dots p_n)$. Накладаючи обмеження на вектор p та вводячи залежності між $p_1 \dots p_n$ (назвемо ці умови U_p), отримуємо різні, але однотипні та рівноцінні завдання.

Відповідно до цієї моделі ставилась задача генерації сімейства завдань за параметризованим шаблоном, який містить K, $f_1(p, x), \dots f_k(p, x)$ та U_p.

Ключові проблеми цієї задачі:

1) виділення сімейства завдань за допомогою умов перебору варіантів, оцінка їх рівноцінності;

2) проблема перебудови геометричних моделей $f_1, \dots f_k$, отриманих при підстановці певного значення p;

3) проблема автоматизованого отримання розв'язку задачі за конкретною умовою.

Алгоритм генерації завдань. На основі представленої моделі задачі та параметричного методу генерації завдань, а також із необхідності створення інтерактивних завдань, у системі створюються шаблони інтерактивних завдань (матриці). Такі шаблони містять: текст завдання, структуровані геометричні елементи та обмеження U_p (умови перебору). Під структурованістю геометричних елементів розуміється визначення зв'язків між окремими геометричними елементами. Приклад такої матриці наведено на рисунку 1:

Завдання 1. Побудуйте переріз за зразком

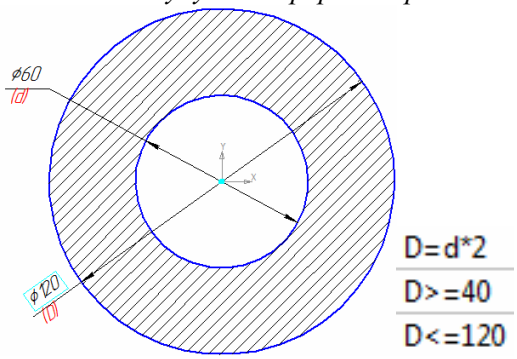
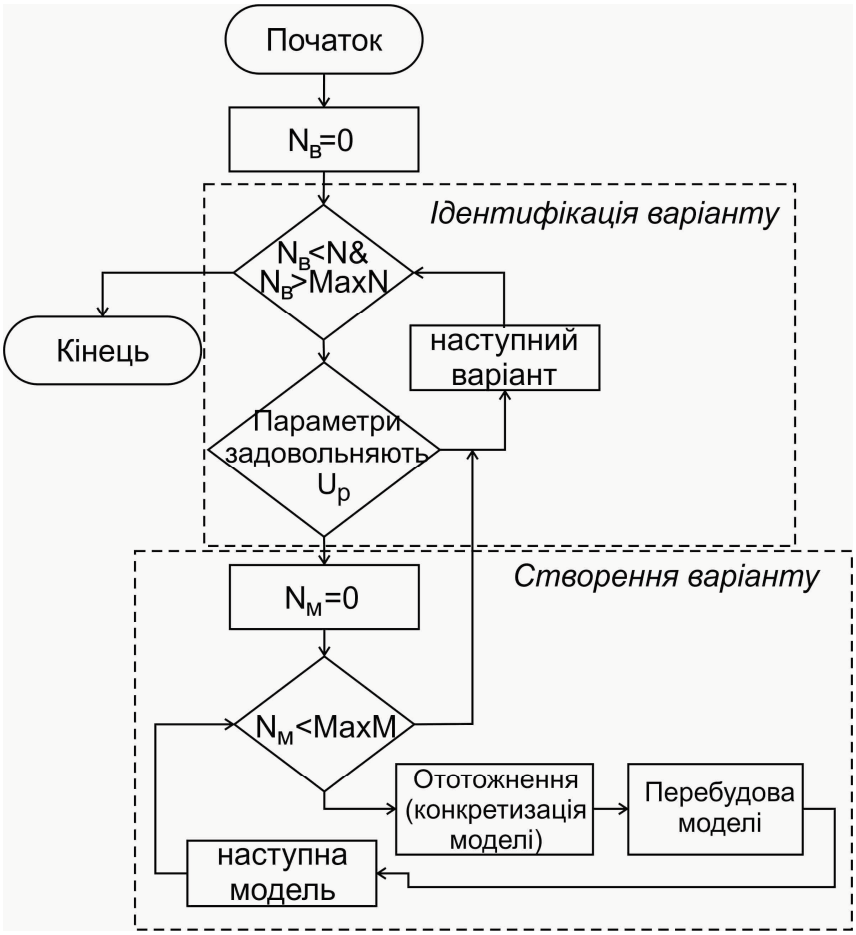


Рис. 1. Приклад шаблону інтерактивного графічного завдання (матриці)

Наступний після створення матриці крок алгоритму – вибір значення вектора p, який задовольняє обмеженням U_p (ідентифікація змінних). Далі виконується підстановка цього значення до геометричних елементів – ототожнення. Отримані при ототожненні геометричні елементи необхідно перебудувати (процес перебудови). Блок-схема алгоритму створення графічних завдань наведена на рисунку 2.

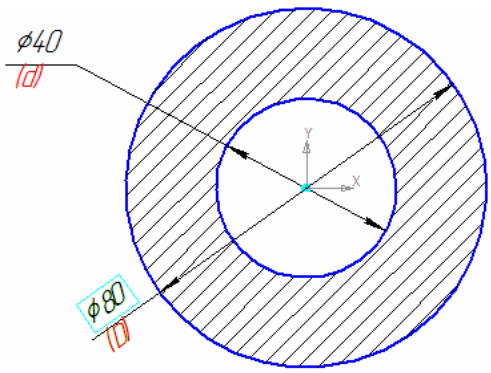


N_B – кількість створених варіантів, N – необхідна кількість варіантів, $MaxN$ – максимальна кількість варіантів, N_M – кількість конкретизованих моделей, $MaxM$ – кількість моделей у завданні

Рис. 2. Блок-схема алгоритму генерації графічних завдань

Основні процеси, які виконуються при генерації варіантів: ідентифікація, ототожнення, перебудова. Отримані два варіанти із матриці представлені на рисунку 3.

Завдання 1. Побудуйте переріз за зразком



Завдання 1. Побудуйте переріз за зразком

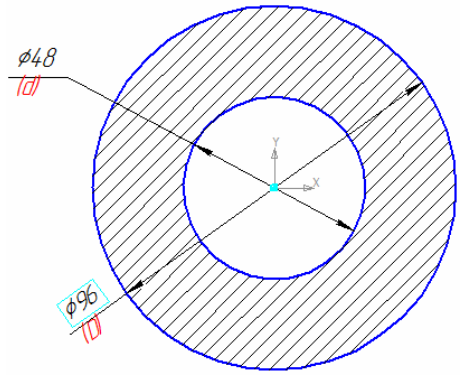
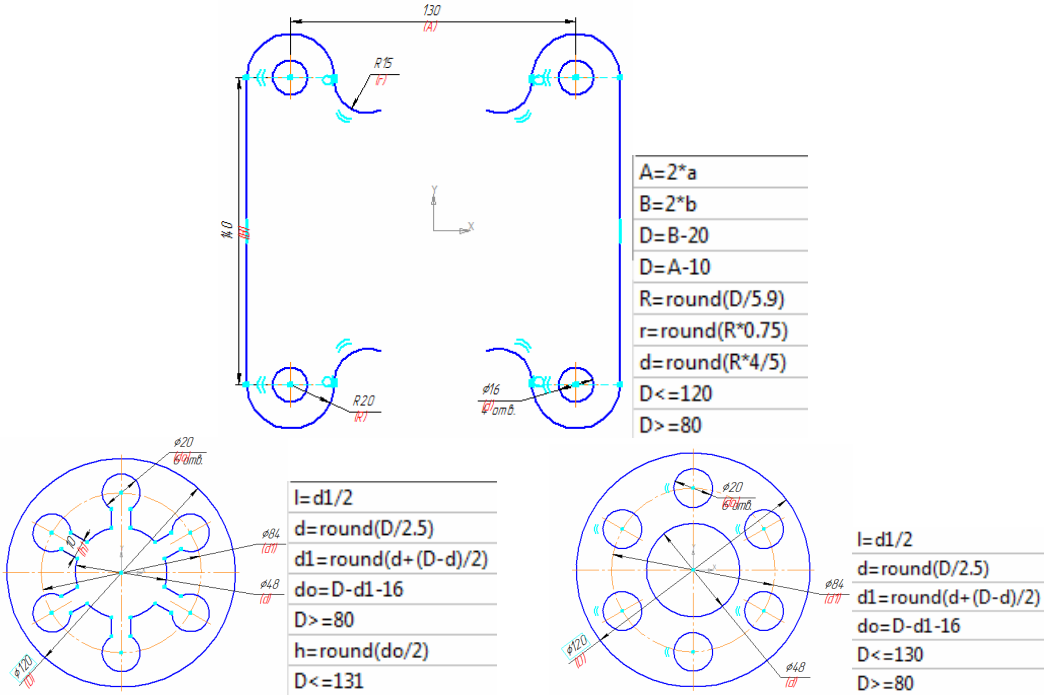


Рис. 3. Варіанти, отримані із матриці

Приклад генерації більш складного завдання наведено на рисунку 4.

Завдання. Виконайте креслення деталі «Шаблон»



Завдання. Виконайте креслення деталі «Шаблон» *Завдання. Виконайте креслення деталі «Шаблон»* *Завдання. Виконайте креслення деталі «Шаблон»*

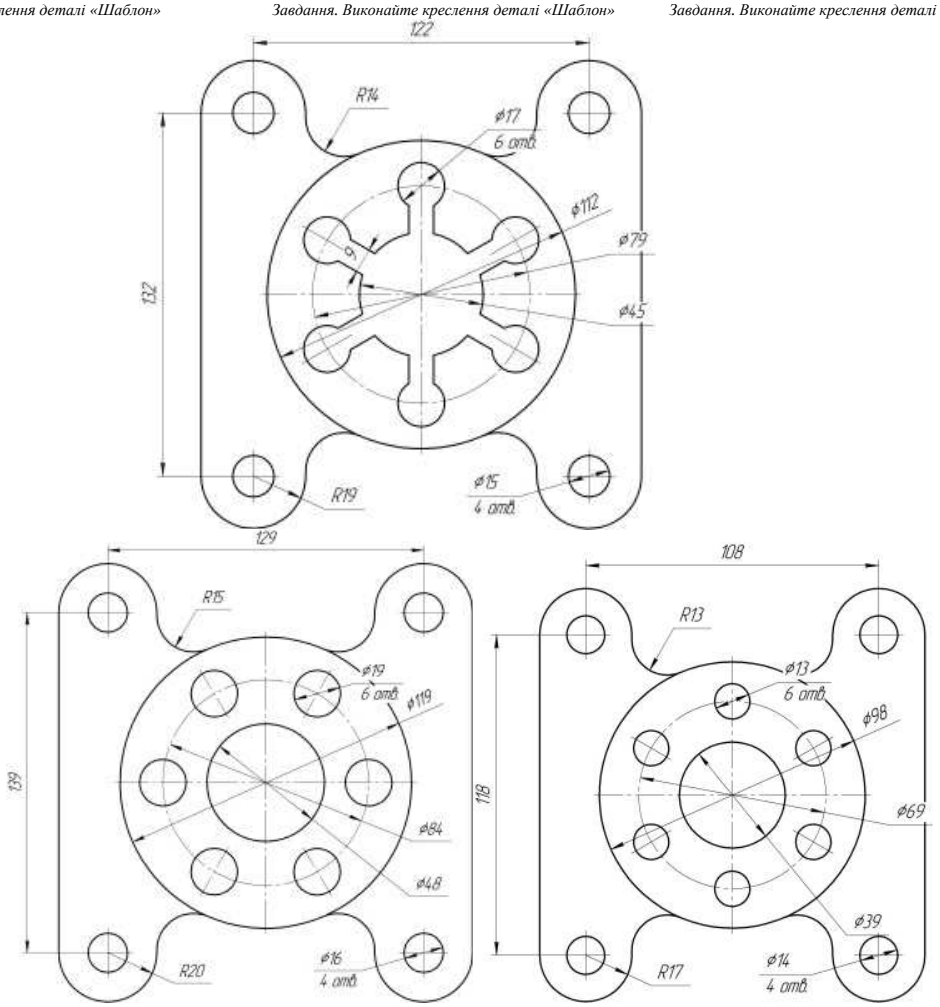


Рис. 4. Приклади матриць та складного завдання із декількох шаблонів

Таким чином, основними об'єктами у системі є графічні об'єкти, основними операціями – генерація (ідентифікація, ототожнення, перебудова) та перевірка (реалізація інтерактивності). Причому графічні об'єкти створюються у середовищі системи автоматизованого проектування (у нашому випадку це САПР КОМПАС-3D). Тобто, рівень викладання повністю залежить від кваліфікації викладача.

Під кваліфікацією викладача ми розуміємо:

1. Здібність параметризувати задачу, яка його цікавить, грамотно обмежити параметри для отримання з однієї сторони коректних завдань, а з іншої – достатньої кількості варіантів.

2. Здібність правильно акцентувати увагу студента на тему, що вивчається.

3. Володіння інформацією щодо рівня знань контингенту для коректування завдань.

Висновки та пропозиції. У цій статті представлено інструментарій методиста для створення завдань, насичених графічною інформацією. Отримані методом генерації завдання успішно використовуються для створення індивідуальних варіантів завдань із таких дисциплін, як «Нарисна геометрія, інженерна та комп'ютерна графіка», «Ріжучий інструмент», «Теорія машин і механізмів». Пропонується застосовувати цей генератор для створення баз графічних завдань для різних дисциплін інженерного напряму, а параметричний метод генерації завдань – для синтезу тримірних моделей.

Список використаних джерел

1. Журавлева Т. Э. Гибридный инструментарий интеллектуальных систем на основе расширенного логического программирования: дис. … канд. физ.-мат. наук / Т. Э. Журавлева. –М.: МАИ, 1993.

2. Крылова Т. В. Автоматизированные обучающие системы: технология подготовки учебного курса к компьютеризации / Т. В. Крылова, М. А. Казимирова. – М.: Высшая школа, 2004. – 63 с.

3. Сергушичева А. П. Моделирование синтеза интеллектуальных тестов средствами формальной продукционной системы / А. П. Сергушичева, А. Н. Швецов // Тезисы докладов X Международной конференции «Математика. Компьютер. Образование». – Пущино, 2003. – С. 66.

4. Башмаков А. И. Разработка компьютерных учебников и обучающих систем / А. И. Башмаков, И. А. Башмаков. – М.: Информационно-издательский дом «Филинъ», 2003.

УДК 681.518.3:338.24

В.І. Зацерковний, канд. техн. наук
Чернігівський державний інститут економіки і управління, м. Чернігів, Україна

ОЦІНЮВАННЯ МОЖЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ РЕГІОНАЛЬНОГО ІНФОРМАЦІЙНО-КОНСУЛЬТАЦІЙНОГО ЦЕНТРУ АПК

Розглянута можливість створення регіонального інформаційно-консультаційного центру для вирішення завдань, пов'язаних з формуванням і ефективним використанням його інформаційного ресурсу.

Рассмотрена возможность создания регионального информационно-консультационного центра для решения заданий, связанных с формированием и эффективным использованием его информационного ресурса.

The possibility of establishing regional information and consulting center for solving problems related to the formation and effective use of its information resource.

Постановка проблеми. Особливості сучасного сільського господарства (с/г) України (велика кількість власників землі, наявність товаровиробників різних форм власності, невеликі розміри господарств, застаріла і зношена техніка, її нестача, недостатнє фінансування) та інші проблеми не дозволяють конкретному товаровиробникові здійснювати наукові дослідження (з питань підвищення рентабельності виробництва, підвищення продуктивності тощо) за рахунок внутрішніх ресурсів, отримувати необхідну інформацію і впроваджувати науково-технічні розробки. Як наслідок, аграрії залишаються зі своїми проблемами один на один, а рентабельність виробництва істотно поступається передо-

вим країнам Заходу. Агропромисловий комплекс (АПК), як і будь-яка інша галузь не може продуктивно функціонувати і розвиватися за умов обмеженого інформаційного поля та недосконалості організації інформаційних процесів.

Затяжна криза і хаотичний розвиток ринкових відносин у АПК України обумовлюють необхідність формування відповідного інформаційного поля, в якому б спрощувалося вирішення глобальних і поточних завдань, що стоять перед аграріями. Зміни, що відбуваються в існуючих технологіях, на кредитних ринках, темпах зростання продуктивності, виробничих ресурсах і продукції, а також зміни в політиці уряду і законодавчих структурах обумовлюють важливість консультаційної допомоги для сільських товаровиробників.

Саме тому одним із найважливіших завдань розвитку АПК України є створення ефективної, гнучкої і сприйнятливої до нововведень соціально орієнтованої ринкової інформаційно-консультативної системи АПК.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню теоретичних і практичних питань державного регулювання інформаційного забезпечення с/г виробництва приділяли значну увагу багато провідних учених: Андрійчук В.Г., Галушко В.Т, Демяненко С.І., Дідковська Л.І., Кваша С.М., Мельник Л.Ю., Михасюк І.Р., Панасюк Б.Я., Пасхавер Б.Й., Саблук П.Т., Черевко Г.В. та інші. В їх дослідженнях підкреслена особлива роль інформаційно-консультаційної служби (ІКС) як одного з найефективніших механізмів державного впливу на АПК і підтримки сільгоспвиробників. Завдяки цим дослідженням значно прискорилися процеси з формування інфраструктури ІКС в АПК. Однак більшість з них виконана в умовах перехідної до ринку економіки, присвячена регіональним аспектам діяльності служби, розробці її окремих фрагментів і не охоплює проблеми цілісного формування та розвитку єдиної мережі ІКС на усіх рівнях управління АПК у принципово новій соціально-економічній ситуації. В той же час, створення в регіонах ІКС для сільгоспвиробників багато в чому стримується через відсутність організаційно-економічних розробок з формування системи інформаційно-консультаційного забезпечення АПК в умовах ринку, що постійно розвивається. Наявність невирішених завдань і нагальна потреба в їх вирішенні обумовлюють актуальність цієї роботи.

Постановка завдання. Метою роботи є оцінювання можливості створення регіонального інформаційно-консультаційного центру (ІКЦ) у Чернігівській області для вирішення завдань, пов’язаних з формуванням і ефективним використанням його інформаційного ресурсу, без чого в принципі неможливе ефективне управління АПК у сучасних умовах.

Виклад основного матеріалу дослідження. Інформаційне забезпечення є одним з найважливіших системних факторів сучасного розвитку АПК. Для покращання інформаційно-консультативного забезпечення АПК відповідно до Закону України «Про концепцію Національної програми інформатизації» [4] повинні створюватись консультаційні служби. Однак консультанти на місцях, навіть якщо вони і є, часто не мають достатньої підготовки й оперативного доступу до наукових інформаційних ресурсів, а систематична їх перепідготовка традиційними методами і технологіями вимагає суттєвих витрат і часу.

Важливість проблеми вдосконалення інформаційно-консультативного забезпечення (ІКЗ) агробізнесу України відома давно і певні заходи щодо її вирішення реалізуються, але є всі підстави стверджувати, що до завершення цього процесу ще далеко. Адже ще 17.11.1995 р. у Постанові Кабінету Міністрів України № 916 ставилось завдання: “З метою вдосконалення існуючої системи інформації з реформування цін, руху продукції, впливу різноманітних чинників на рівень виробництва і споживання продовольства створити при Міністерстві сільського господарства і продовольства створити Центр сільськогосподарської ринкової інформації” [1].

Процес інформатизації АПК України на якісному рівні зображений на рисунку 1.

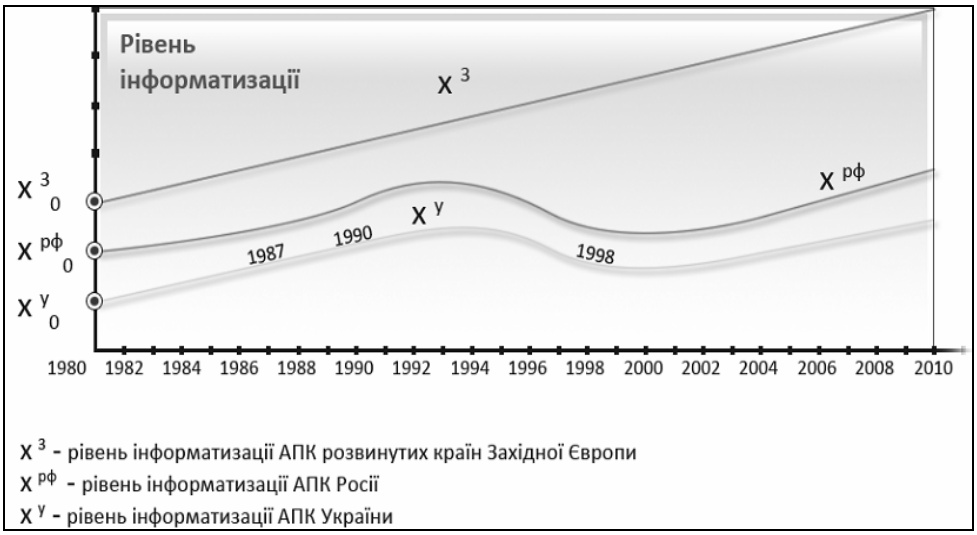


Рис. 1. Динаміка інформатизації АПК України і розвинених країн Західної Європи

Як видно з рисунка 1, з 1990 по 1994 рр. процес інформатизації в АПК України йшов за інерцією. Наступні роки реформування АПК України істотно змінили умови діяльності його структур, оскільки були створені передумови для структурних перетворень у нових економічних умовах формування ринкових відносин.

Позитивним стало зникнення обтяжливої і централізованої регламентації з організації і ведення виробництва, розвиток індивідуальних, підсобних і фермерських господарств, збільшення земельних площ присадибних господарств, колективних садів і городів тощо. Тому цей період можна охарактеризувати як стихійну самоорганізацію процесу інформатизації.

Включення стихійних механізмів регуляції процесу інформатизації в АПК дозволило декілька згладити гостроту сприйняття змін, пов'язаних з інформатизацією, але сам процес став більш тривалим і призвів до значних перевитрат ресурсів. Оскільки централізоване управління процесом інформатизації реально не може найближчим часом бути здійснене, єдиним ефективним шляхом залишається спрямована інформатизація. У цьому випадку саморозвиток процесу протікає в умовах дії системи обмежень і стимулів, які визначають границі існування процесу і бажаний напрямок його розвитку. Тим більше, що на сьогодні гостро стоїть проблема відновлення керованості АПК.

За результатами проведених опитувань серед керівників і спеціалістів підприємств різних форм власності Чернігівської області можна побачити їхнє ставлення до консультаційних послуг (рис. 2).

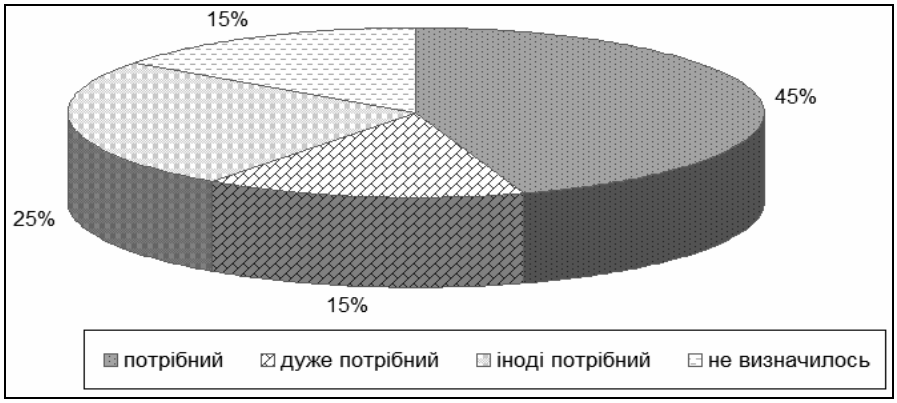


Рис. 2. Ставлення до інформаційно-консультативних послуг фахівців АПК Чернігівської області

ІКЦ як державного, так і кооперативного чи приватного характеру не можуть існувати самі по собі, вони повинні перебувати у постійному взаємозв'язку між собою для якнайкращого задоволення інформаційних потреб споживачів, конкуруючи між собою

під час вирішення практичних проблем, доповнюватимуть один одного під час дослідження фундаментальних проблем. При цьому взаємне погодження дій державного і приватного секторів дає змогу запобігати “дублюванню” [3] у проведенні консультацій, а також підвищувати рівень знань і спеціалізації.

При цьому передбачається чотири основних напрямки обміну інформації:

– розвиток ринкової інфраструктури, перед усім національної системи інформації про ринок, попит і пропозицію;

– створення і поширення мережі інформаційно-консультаційних служб і забезпечення їх необхідною інформацією;

– розвиток індустрії насінництва, підтримка організацій, що займаються насінництвом, удосконалення роботи з сортовипробування;

– організація оптових ринків сільськогосподарських продуктів.

Існуючий сьогодні підхід до управління проектами інформатизації АПК має низку недоліків [1]: відсутність єдиної концепції створення системи науково-інформаційного забезпечення АПК України, відсутність єдиних методів управління проектами інформатизації, недостатнє фінансування Національної програми інформатизації АПК, недостатнє матеріально-технічне забезпечення низової ланки інформаційної системи, автономність та різноплановість функціонування існуючих ІКЦ. У зв’язку з цим доцільно створити єдину методику, яка б дозволила виявити, як впливають географічні, структурні, функціональні особливості АПК окремих регіонів на управління проектами відкриття ІКЦ у цих регіонах. Крім того необхідно розробити проблемно-орієнтовані методи і моделі управління проектами створення регіональних ІКЦ у межах України, які б дозволили планувати та відслідковувати хід реалізації проектів у кожному регіоні, з урахуванням особливостей конкретних регіонів [2].

Схема створення ІКЗ АПК України представлена на рисунку 3.



Рис. 3. Схема створення системи ІКЗ АПК

Створення регіонального ІКЦ у будь-якому регіоні країни можна розглядати як проект, спрямований на формування такої сукупності ресурсів (людських, матеріальних, інформаційних), які б найефективнішим способом надавали інформаційно-консультаційні послуги необхідні саме цьому регіону.

Конфігурація проекту може бути описана таким чином:

$$S_r = \langle R, t, C, V, I, IS \rangle, \quad (1)$$

де S_r – кінцевий перелік інформаційно-консультаційних послуг; R – структура робіт проекту; t – час виконання проекту; C – вартість виконання; V – вимоги до виконавців; I – зовнішня інформація; IS – інформаційна система.

Кінцевим результатом проекту є формування такого переліку послуг, який би максимально відповідав потребам цього регіону, тобто невизначеність полягає в імовірності збігу якогось ідеально можливого найповнішого переліку послуг з переліком послуг ІКЦ у конкретному регіоні.

ІКЦ представляє собою сформовану сукупність ресурсів *V,I,IS*, яка дозволяє йому здійснювати діяльність щодо надання інформаційно-консультаційних послуг $S_r=f(V,I,IS)$.

Очікувана оцінка ефективності управління проектом створення ІКЦ буде дорівнювати різниці між ефективністю від надання інформаційно-консультаційних послуг, витратами на створення ІКЦ та витратами на формування послуг ІКЦ:

$$E = F - W_1 - W_2, \quad (2)$$

де E – наведена очікувана оцінка ефективності діяльності регіонального ІКЦ; F – наведений результат використання інформаційно-консультаційних послуг; W_1 – витрати на виконання робіт щодо створення ІКЦ; W_2 – витрати на формування центром інформаційно-консультаційних послуг.

Величина W_1 визначається ефективністю діяльності з управління проектом створення регіонального ІКЦ. Розраховується як сукупність вартостей виконання робіт проекту:

$$W_1 = \sum_{R_i \in R} C(R). \quad (3)$$

Величина W_2 представляє собою витрати на наповнення інформаційної бази ІКЦ, обробку зовнішньої інформації, генерацію кінцевого продукту та передачу його користувачу (собівартість інформаційно-консультаційної послуги):

$$W_2 = \sum_{S_{ri} \in S_r} C(S_{ri}). \quad (4)$$

Величина F відображує наведений результат, отриманий від використання інформаційно-консультаційних послуг с/г виробниками регіону:

$$F = \sum_{S_{ri}} F(S_{ri}). \quad (5)$$

Результат розраховується як сукупний ефект від використання переліку послуг ІКЦ, який складається з локальних результатів (підвищення прибутку, зменшення витрат тощо) кожного кінцевого користувача інформаційно-консультаційної послуги S_{ri}.

Таким чином:

$$E = \sum_{S_{ri} \in S_r} F(S_{ri}) - \sum_{R_i \in R} C(R_i) - \sum_{S_{ri} \in S_r} C(S_{ri}),$$

або

$$E = \sum_{S_{ri} \in S_r} \left[F(S_{ri}) - C(S_{ri})\right] - \sum_{R_i \in R} C(R_i). \quad (6)$$

Під ефективною діяльністю регіонального ІКЦ будемо розуміти діяльність, яка дозволяє надавати послуги S_{ri} таким чином, що $E > 0$.

Під ефективним управлінням проектом створення ІКЦ будемо розуміти діяльність, яка забезпечує формування ресурсів, необхідних для надання інформаційно-консультаційних послуг, з мінімальними витратами.

Таким чином, постає необхідність у визначенні оптимального змісту проекту, тобто множини робіт, які спрямовані на формування ресурсів ІКЦ, необхідних для його ефективної діяльності. Це, у свою чергу, вимагає визначення саме тих елементів S_{ri}, які дозволять максимізувати вираз (6).

На цьому етапі виникає проблема, пов’язана з невизначеністю проектів, які не мають аналогів, та реалізація яких вимагає врахування особливостей регіону реалізації проекту.

Не включення до переліку послуг S_{ri} послуги, що є необхідною з точки зору користувачів інформаційно-консультаційних послуг призведе до втрати ефективності діяльності регіонального ІКЦ. Одночасно включення "зайвої" послуги приведе до зростання величини W_1 без відшкодування цих витрат з боку величини F .

Необхідність включення послуги S_{ri} до переліку послуг регіонального ІКЦ S_r може бути охарактеризовано ймовірністю $p_{S_{ri}}$ відповідності цієї послуги оптимальному переліку послуг S_{ro}

У цьому випадку ефективність проектних рішень буде дорівнювати:

$$E(S_r) = \sum_{S_{ri} \in S_r} p_{S_{ri}} \left[F(S_{ri}) - C(S_{ri})\right] - \sum_{R_i \in R} C(R_i). \quad (7)$$

Правило формування переліку послуг S_r базується на порівнянні: якщо $E(S_r) > 0$, то формування S_r доцільно, в протилежному випадку – ні.

Цільова функція формування переліку інформаційно-консультаційних послуг регіонального ІКЦ буде виглядати таким чином:

$$\sum_{S_{ri} \in S_r} \left[F(S_{ri}) - C(S_{ri})\right] - \sum_{R_i \in R} C(R_i) \to \max, \quad (8)$$

при обмеженнях $S_r \subseteq S_{r0}$; $\sum_{R_i \in R} C(R_i) \le C_{ІКЦ}$; $\sum_{S_{ri} \in S_r} C(S_{ri}) \le C_д$,

де $C_{ІКЦ}$ – вартість проекту створення регіонального ІКЦ; $C_д$ – допустимі витрати на функціонування ІКЦ.

Для вирішення задачі визначення необхідності включення тієї чи іншої послуги до переліку конкретного регіонального ІКЦ пропонується використовувати метод експертних оцінок.

Висновки дослідження. Для ІКЗ АПК, створення умов для ефективного функціонування ринкових і фінансово-кредитних механізмів, прийняття оптимальних управлінських рішень, швидкого збору, обробки та поширення аграрних знань та інформації, підтримки міжгалузевих зв'язків та інтеграції АПК України у світову економічну систему доцільно включити:

– розробку перспективної структури інформаційно-аналітичної системи в межах національної інформаційної системи України аграрного сектору, яка включає складові районних, обласних управлінь с/г і продовольства, центрального апарату Міністерства аграрної політики та продовольства України і державних комітетів аграрного сектору, науково-дослідних установ, агросервісних формувань, системи підготовки кадрів, підприємств с/г, сфери надання інформаційних і консультаційних послуг, системи підтримки підприємницької діяльності та основні суспільні інститути аграрного сектору;

– удосконалити та автоматизувати системи соціально-економічного моніторингу розвитку с/г країни, її галузей і регіонів для інформаційної підтримки діяльності органів державного і громадського управління АПК;

– організувати електронний інформаційний контент АПК, сформувати та підтримувати бази даних на основі інтернет-доступу, систем підтримки та прийняття рішень, експертних систем, створити банк типових прикладних комп'ютерних програм, адаптованих для некваліфікованих користувачів, забезпечити допоміжними і розширеними освітніми програмами у системі післядипломної освіти;

– ввести у загальний інформаційний контент АПК інформаційної системи поширення знань та інформації, спрямованої до конкретних товаровиробників і надати їм допомогу в освоєнні досягнень науково-технічного прогресу, ефективному веденні гос-

подарської і маркетингової діяльності на ринкових засадах, складовими якої має бути система науково-технічної інформації, включаючи заклади освіти для забезпечення ефективної діяльності установ аграрної науки й освіти та наближена до с/г товаровиробників і жителів сільських місцевостей та система інформаційно-консультаційного обслуговування (с/г дорадництва);

– забезпечити ефективними інформаційними, комунікаційними та програмними засобами всі складові управління аграрним сектором на базі використання засобів телекомунікацій і системи Інтернет, розподілених баз даних, застосування економіко-математичного моделювання, математичних методів і використання сучасних геоінформаційних технологій [2].

Список використаних джерел

1. Баранюк І. А. Методи і моделі управління проектами інформатизації АПК: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.13.22 «Управління проектами та розвиток виробництва» / І. А. Баранюк. – К., 2004. – 19 с.

2. Бурачек В. Г. Основи геоінформаційних систем: монографія / В. Г. Бурачек, О. О. Железняк, В. І. Зацерковний; Нац. авіац. ун-т. – Ніжин: Аспект-Поліграф, 2011. – 512 с.

3. Колос Б. О. Управління державою третього тисячоліття або стратегія і тактика побудови української національної держави / Б. О. Колос. – Львів: Ініціатива, 2004. – 976 с.

4. Про концепцію Національної програми інформатизації: Закон України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=75%2F98-%E2%F0.

УДК 001.893.54

П.Л. Игнатенко, канд. техн. наук
Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе обосновано использование более простых алгоритмов обработки информации, так как во многих случаях достаточно уточнения модели средства измерения только в окрестностях данного значения измеряемой величины без определения модели во всем динамическом диапазоне.

Ключевые слова: *измерительное устройство, измерительный преобразователь, модель процесса, измеряемая величина.*

У роботі обґрунтовано використання простіших алгоритмів обробки інформації, оскільки у багатьох випадках досить уточнення моделі засобу вимірювання тільки в межах цього значення вимірюваної величини без визначення моделі в усьому динамічному діапазоні.

Ключові слова: *вимірювальний пристрій, вимірювальний перетворювач, модель процесу, вимірювальна величина.*

The use of more simple algorithms of treatment of information is in-process reasonable, because in many cases enough clarification of model of measuring mean is only in a neighborhood of this value of measuring without determination of model in all dynamic range.

Key words: *measuring device, measuring transformer, model of process, measuring.*

Введение. Отличительной особенностью систем автоматизации научных исследований является то, что их выходным продуктом является математическая модель исследуемого объекта.

Математическая модель строится на основе экспериментального определения входных воздействий и откликов. Нет необходимости доказывать, что адекватность полученной модели в значительной степени определяется точностью измерений величин, определяющих параметры модели.

Как правило, автоматизированная система научных исследований, особенно при активном эксперименте, содержит набор генераторов стимулирующих воздействий и набор измерительных преобразователей. При пассивном эксперименте необходимая информация получается только с помощью измерительных преобразователей [1].

Автоматизированные системы научных исследований содержат необходимые аппаратные и программные средства для переработки измерительной информации с целью получения математической модели. Наличие этих средств в значительной степени облегчает задачу повышения точности измерения, так как последняя может быть сведена к задаче уточнённого определения модели средства измерения и последующего измерения с помощью уточнённой модели.

Таким образом, весь аппарат экспериментального определения математической модели объекта, например корреляционный, регрессионный, дисперсионный анализ, может быть применен для повышения точности средств измерения путем определения их модели.

Постановка задания. В ряде случаев необходимо некоторое усложнение системы экспериментальных исследований путем добавления набора образцовых мер физических величин, подлежащих измерениям при проведении эксперимента, а также расширением программного обеспечения.

Однако эта избыточность всегда оправдана, так как затраты на создание более точного измерительного прибора превосходят те дополнительные аппаратные и программные затраты, которые необходимы для достижения одинаковой точности в составе системы, содержащей средства переработки информации и управления экспериментом.

Вместе с тем для целей повышения точности могут быть использованы более простые алгоритмы обработки информации, так как во многих случаях достаточно уточнения модели средства измерения только в окрестностях данного значения измеряемой величины без определения модели во всем динамическом диапазоне.

Методы и результаты. Рассмотрим основные алгоритмы повышения точности средств измерений, работающих в составе систем автоматизации эксперимента.

В общем случае на измерительное устройство поступает некоторое множество входных величин, содержащих измеряемые величины и неинформативные величины для данного вида измерений. Эти множества поступают на множества измерительных преобразователей, характеризуемых внутренними погрешностями, а также погрешностями, зависящими от внешних факторов [2]. Выходная информация представляет собой множество выходных величин. Такой процесс представлен на рисунке 1.

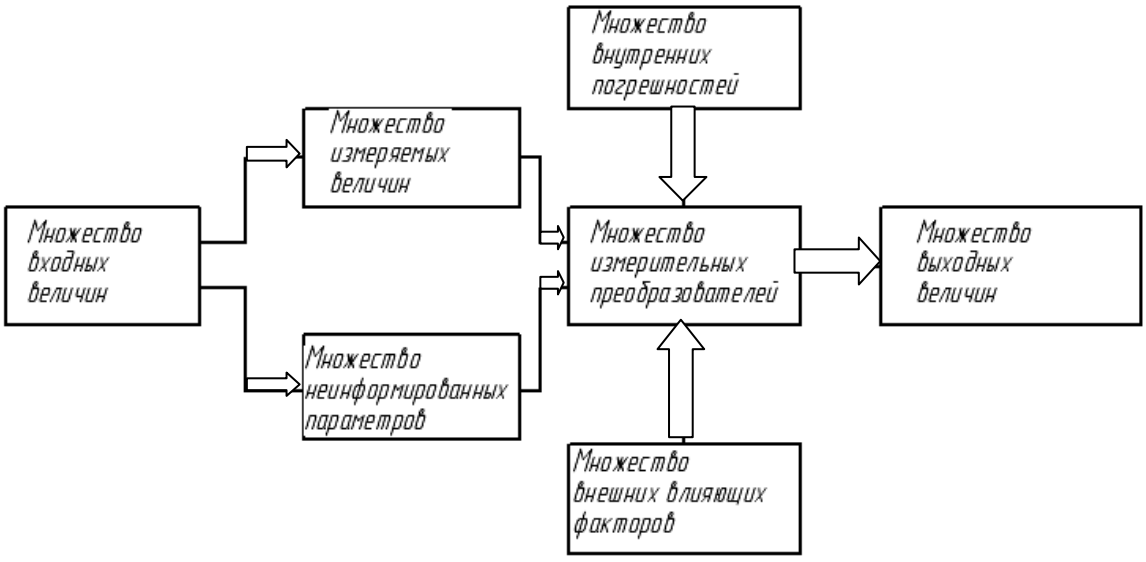


Рис. 1. Схематическая модель процесса измерительного преобразования

В отдельно взятом канале измерительное устройство описывается уравнением измерения

$$y = \varphi(x), \qquad (1)$$

в котором известными являются номинальная функция преобразования $\varphi_н$ и представленный результат измерения y_i, неизвестными – измеряемая величина x, а также погрешности, из-за которых функция преобразования отличается от номинальной [3; 4]. Не применяя дополнительных мер повышения точности, значение измеряемой величины определяют как значение номинальной обратной функции результата измерения

$$x_i = \varphi_н^{-1}(y_i), \tag{2}$$

вследствие чего x_i определяется с погрешностями.

Для получения уточненной модели измерительного устройства

$$y_{in} = \varphi_y(x) \tag{3}$$

необходимо провести эксперимент для задания дополнительных уравнений с целью составления полной системы уравнений и решение ее относительно измеряемой величины x.

Количество уравнений определяется числом неизвестных, а последние – видом априорной или апостериорной модели устройства.

При всем возможном разнообразии моделей и соответственно систем уравнений можно выделить два их класса: первый, в котором дополнительные уравнения создаются путем введения дополнительных известных, аналогичных измеряемой величине, и второй, в котором дополнительные уравнения создаются путем деформации известным образом функции преобразования измерительного устройства. Назовем их соответственно: система тест-аргумента и система тест-функции. Систему тест-аргумента можно записать в виде

$$\left.\begin{array}{l} y_0 = \varphi\left(x_0^*\right); \\ y_1 = \varphi(x_1); \\ \ldots\ldots\ldots\ldots; \\ y_n = (\varphi_n(x_n)), \end{array}\right\}, \tag{4}$$

а систему тест-функции в виде

$$\left.\begin{array}{l} y_0 = \varphi\left(x_0^*\right); \\ y_1 = \varphi_1\left(x_0^*\right); \\ \ldots\ldots\ldots\ldots; \\ y_n = \varphi_n\left(x_0^*\right), \end{array}\right\}, \tag{5}$$

где x_0^* – неизвестная измеряемая величина; x_i – известные значения аргумента; φ_i – функция преобразования, деформированная известным образом; y_i – результаты измерений.

Дополнительные уравнения могут быть получены сочетанием тестов, аналогичных аргументу, и деформирующих функцию преобразования.

Для моделей средств измерения, заданных в виде полиномов n-й степени

$$y_0 = a_0 + a_1 x + \ldots + a_n x^n, \tag{6}$$

алгоритмы задания тестов, определения коэффициентов полинома a_i и решение уравнения (6) относительно x полностью разработаны.

Выводы. Если в полиномиальной модели все $a_i \neq 0$, то применение только аддитивных тестов вида $A_j(x) = x + \theta_j$ или только мультипликативных вида $A_j(x) = k_j(x) \cdot x$ к системе уравнений вида $y_j = a_0 + a_1 \cdot A_j(x) + \ldots + a_n\left[A_j(x)\right]^n$ приводит к тождествам,

не позволяющим решить уравнение (6) относительно измеряемой величины x и, следовательно, повысить точность измерений. Однако, если в уравнении (6) некоторые $a_j = 0,\ j < n$, то отдельно примененные аддитивный и мультипликативный тесты приводят к повышению точности. В противном случае успеха достигают только совместным применением аддитивных и мультипликативных тестов.

Если в процессе измерения предоставляется возможность отключить измеряемую величину от входа измерительного устройства и вместо нее подать тестовую, то задача повышения точности сводится к классической задаче регрессионного анализа.

В процессе проведения эксперимента, особенно в реальном масштабе времени, важнейшее значение имеет скорость выполнения измерений, поэтому следует отдавать предпочтение алгоритмам повышения точности, требующих применения минимального числа тестов, а также наиболее простых вычислений.

В этом случае решается альтернативная задача определение модели средства измерения во всем динамическом диапазоне перед серией измерений или определения модели на небольшом участке в окрестностях измеряемой величины перед каждым измерением.

Для принятия решения нужна априорная информация о скорости протекания процессов в исследуемой модели, а также о нестабильности средства измерения.

Если компромиссным решением будет отдано предпочтение уточнению модели в узком диапазоне, то большие преимущества имеют итерационные алгоритмы повышения точности, так как приближенные значения корня уравнения всегда определяются по номинальной функции преобразования измерительного устройства

$$x_0 = \varphi_н^{-1}(y_0). \qquad (7)$$

Список использованных источников

1. Вайсбанд М. Д. Техника выполнения метрологических работ / М. Д. Вайсбанд, В. И. Проненко. – К.: Техніка, 1986. – 168 с.

2. Грановський В. А. Методы обработки экспериментальных данных при измерниях / В. А. Грановський. – Л.: Энергоатомизат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 288 с.

3. Зайдель А. Н. Ошибки измерения физических величин / А. Н. Зайдель. – Л.: Наука, 1974. – 108 с.

4. Новицкий П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. – 248 с.

УДК 535.343.2

А.А. Ковтун, канд. физ.-мат. наук
А.В. Рогоза, канд. физ.-мат. наук
Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

ПРИРОДА И СВОЙСТВА ДЫРОЧНЫХ ЦЕНТРОВ В КРИСТАЛЛАХ KCL ВЫСОКОЙ ЧИСТОТЫ

В статье представлены экспериментальные данные, подтверждающие предположение об очень малой силе осциллятора V_K– и V_F–центров в кристаллах KCl высокой чистоты, а также предлагается механизм образования V_3–центров.

У статті приведені експериментальні дані, що підтверджують припущення про дуже малу силу осцилятора V_K– і V_F–центрів у кристалах KCl високої чистоти, а також пропонується механізм утворення V_3–центрів.

Experimental date, confirming the hypothesis of a V_K oscillator very weak forse and V_F centers in high purity KCl crystals, are presented, as well as the mechanism of V_3 centers forming is proposed in the present article.

Вступление. Известно, что в результате облучения монокристаллов щелочно-галоидных солей рентгеновскими или γ – лучами при температуре жидкого азота образуются V_K центры. Впервые Кенциг и Вудраф [1; 2] методом электронного парамагнит-

ного резонанса (ЭПР) обнаружили спин-резонансное поглощение этих центров. Хорошее разрешение сверхтонкого расщепления линий ЭПР позволило провести детальный анализ электронной структуры V_K - центра. Установлено, что V_K – центр представляет собой молекулярный ион X_2^-, т. е. автолокализованную дырку, который ориентирован вдоль <110> напрвлений кристалла.

Позднее, методом двойного электронно-ядерного резонанса (ДЭЯР), позволяющим установить структуру дырочных центров, было показано, что V_K –центр действительно представляет собой автолокализованную дырку [3; 4].

Несмотря на то, что структура V_K –центров подробно исследована при помощи ЭПР и ДЭЯР, оптический спектр этих центров в чистых кристаллах еще не изучен. Поэтому нами были выращены в платиновом тигле методом Киропулоса кристаллы KCl высокой чистоты путем двойной перекристаллизации шихты в полностью химически обессоленной воде.

Методы и результаты. На рисунке 1 представлен спектр оптического поглощения чистого кристалла KCl после четырехчасового облучения рентгеновскими лучами при температуре жидкого азота. В спектре оптического поглощения нами обнаружена только электронная F – полоса поглощения (рис. 1).

В силу закона электронейтральности кристалла в последнем, кроме F-центров, возникают V_K –центры, оптическое поглощении которых в пределах точности прибора нами не замечено. Следовательно, ранее наблюдаемые дырочные полосы оптического поглощения в так называемых «чистых» кристаллах KCl [5-7] естественно связаны с дырками, локализованными около неконтролируемой примеси.

Действительно, при введении в чистые кристаллы KCl ионов Li^+, Na^+, Mn^{2+} нами наблюдались дырочные полосы (рис. 2).

Эти дырочные полосы оптического поглощения уже появлялись в кристалле при введении очень малых концентраций примеси (порядка 0,01 мол. % соответствующей хлористой соли в шихте).

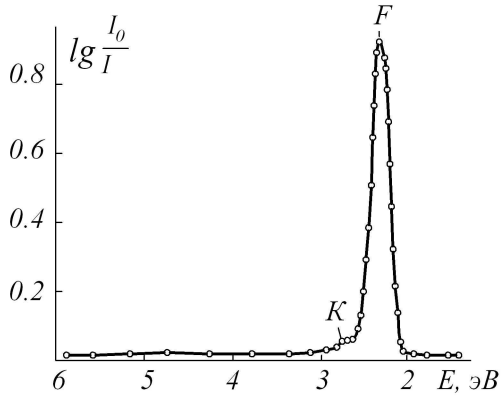


Рис. 1. Спектр оптического поглощения чистого кристалла KCl после 4-х часового облучения рентгеновскими лучами при температуре 77 К

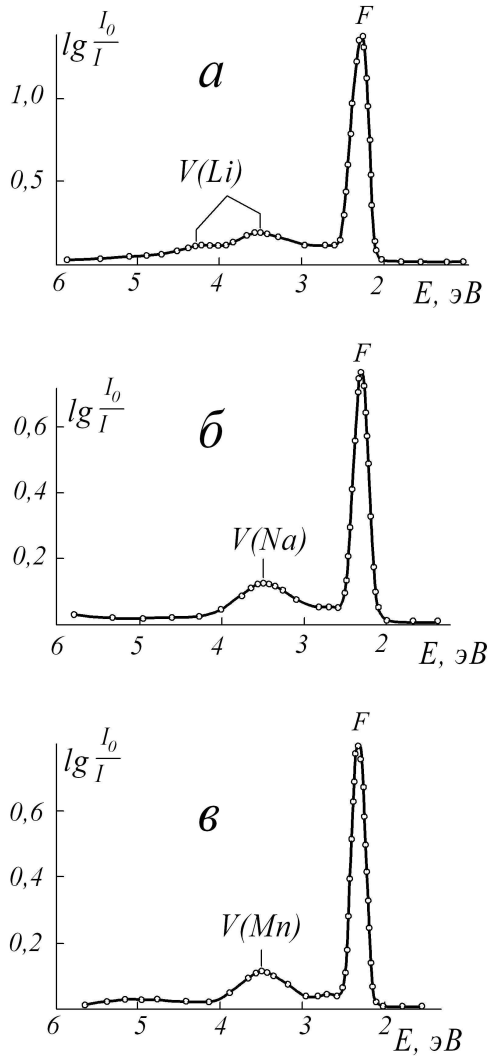


Рис. 2. Спектры оптического поглощения кристаллов KCl с примесью ионов Li^+ (а), Na^+ в, Mn^{2+}(в). Ионы примеси введены в кристалл путем добавления в шихту 1 мол. % соответствующей хлористой соли. Спектры сняты при температуре 77 К

Авторы работы [7] провели анализ ЭПР V_K –центров после облучения кристаллов KCl светом соответствующем длине волны λ = 365 нм и поляризованным в направлении <110> кристалла. Установлено, что большинство V_K –центров приняли в кристалле соответствующую ориентацию. Оптическими методами поглощение V_K –центров, а следовательно, и их дихроичные свойства, не замечено. Теоретический расчет, изложенный в работе [8], показывает, что максимум полосы поглощения V_K –центров в кристаллах KCL соответствует длине волны λ = 365 нм. Исходя из результатов эксперимента с кристаллами высокой чистоты, и принимая во внимание результаты исследования Делбека, Смаллера и Юстера [8], а также теоретический расчет [9], можно заключить, что сила осциллятора V_K –центров очень мала. Этот вывод подтверждает предположение авторов работ [6; 7].

Методом ЭПР установлено, что температура делокализации V_K –центров вчистых кристаллах KCL соответствует 130К [7; 9]. Эта температура была определена в нашей лаборатории оптическими методами [10].

На рисунке 3 (кривая а) представлен спектр оптического поглощения чистого кристалла KCL после облучения рентгеновскими лучами при температуре 77 К в течение двух часов.

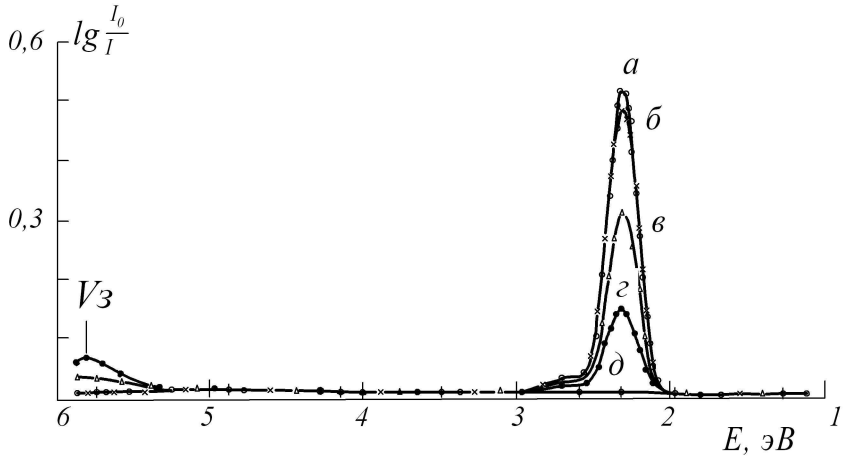


Рис. 3. Спектры оптического поглощения чистого кристалла KCl:
а – после облучения рентгенлучами в течение 2-х часов при температуре жидкого азота;
б, в, г, д – после нагревания соответственно до температур 183 К, 278 К, 353 К, 493 К.
Спектры измеряны при температуре 77 К

В результате нагревания этого кристалла до температуры 183К F- полоса частично (~ 8 %) термически обесцветилась (рис. 3, кривая *б*). Уменьшение концентрации F – центров сопровождалось пиком термолюминесценции (~ 130 К) (рис. 4).

Методом накопления F – центров методами [10] показано, что в результате рекомбинации электронов F – центров с дырками вследствие диффузии V_k –центров образуются изолированные галоидные вакансии.

Основная же доля дырок, освобождаемых термически из V_K –центров, локализуется на собственных дефектах решетки, представляющих собой более глубокие дырочные уровни захвата. Известно, что под действием квантов большой энергии (рентгеновские, γ – лучи) генерируются свободные галоидные и щелочные вакансии.

Следовательно, преимущественная часть V_k –центров локализуется на вакансиях щелочного металла, образуя при этом V_F –центры [10]. Отсюда ясно, что в результате облучения кристалла рентгеновскими или γ – лучами концентрация образовавшихся щелочных вакансий не меньше концентрации F-центров.

После нагревания кристалла до температуры близкой комнатной в спектре оптического поглощения (рис. 3, кривая *в*) наблюдается уменьшение интенсивности F-полосы, сопровождаемое люминесценцией (максимум люминесценции соответствует ~240 К (рис. 4).

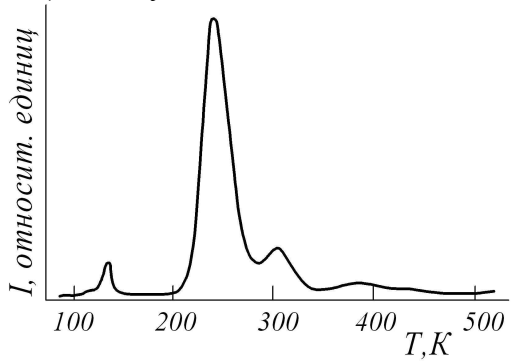


Рис. 4. Кривая термовысвечивания чистого кристалла KCl, рентгенизованного при температуре 77 К. Скорость нагрева образца 12 град./мин

В этом случае в кристалле проявляется ионно-электронный процесс, в результате которого исчезают изолированные свободные галоидные вакансии [10]. Это объясняется тем, что в рассматриваемом температурном интервале наблюдается диффузия V_K – центров, следствием которой является частичное уменьшение концентрации F-центров.

Отсутствие изолированных свободных галоидных вакансий в кристалле указывает на то, что в результате аннигиляции F- и V_F –центров образуются нейтральные пары, т. е. мы получили еще одно подтверждение того, что в состав V_F –центра входит щелочная вакансия. Оптическое поглощение V_F –центров, как и V_K –центров, в пределах точности прибора в измеряемом нами интервале частот, не обнаружено (рис. 3, кривая *б*). Вероятно, сила осциллятора V_F –центров тоже очень мала.

На рисунке 3 (кривая в) видно, что при нагревании кристалла KCl, облученного рентгеновскими лучами при температуре жидкого азота, до температуры 278 К в спектре оптического поглощения появляется V_3 – полоса (212 нм). Появление этой полосы, сопровождаемое пиком люминесценции (~ 240 К) на кривой термовысвечивания (рис. 4), указывает, как упоминалось ранее, на диффузию V_F –центров. Следовательно, дырочные V_3 – центры, возникающие в процессе диффузии V_F –центров, могут представлять собой продукт объединения V_F –центров или продукт захвата этих центров дефектами кристаллической решетки, например, щелочными и галоидными вакансиями. Если бы V_3 – центры представляли собой продукт объединения V_F –центров со щелочными и галоидными вакансиями, тогда V_3 –центры должны были быть парамагнитными, т. к. суммарный их спин в этом случае должен отличаться от нуля. Нами и другими исследователями [19] не удалось обнаружить сигнал ЭПР V_3 –центров, поэтому, вероятнее всего, что V_3 – центры возникают в результате парного объединения V_F –центров друг с другом.

Концентрация V_3 –центров продолжает возрастать при нагревании кристалла до 353 К (рис. 3, кривая *г*). На кривой термовысвечивания (рисунок 4) в температурном интервале 280-353 К наблюдается пик термолюминесценции, а в спектре поглощения (рис. 3, кривая *г*) уменьшение концентрации F- центров.

Понятно, что освободившиеся V_F –центры, диффундируя по кристаллу, частично исчезают в результате электронно-дырочной рекомбинации, а остальные, слипаясь, образуют V_3 –центры.

Исследования показывают, что параметры V_3 - полосы меняются с изменением температуры, т. е. сильно проявляется электрон-фононное взаимодействие центров, которым соответствует V_3 –полоса поглощения (рис. 5). Это указывает, что V_3 –полосу нужно связывать с оптическим поглощением молекулярных центров.

Кристалл термически полностью обесцвечивается, если его нагреть до температуры 493 К (рис. 3, кривая *д*).

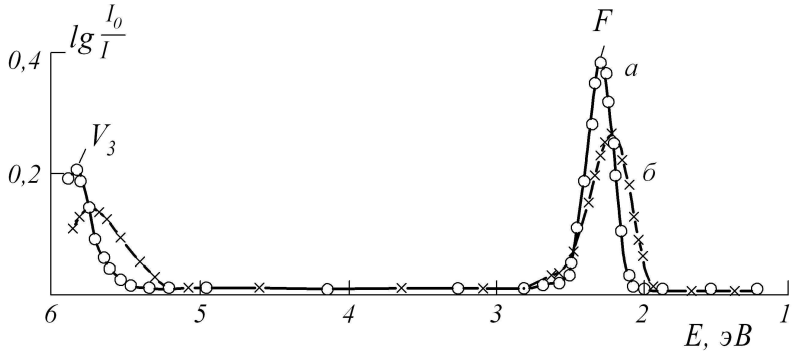


Рис. 5. Спектры оптического поглощения чистого кристалла KCl, облученного рентгеновским излучением при комнатной температуре: а –- измерен при 77 К, б – измерен при комнатной температуре

При указанной температуре могут иметь место параллельно различные механизмы рекомбинации электронов и дырок, локализованных на собственных дефектах решетки [11]. Можно предположить, что обесцвечивание кристалла происходит путем термической диссоциации V_3 –центров на V_F –центры, которые диффундируя по кристаллу, сближа-

ются с F- центрами или в результате диффузии V_3 –центров, вследствие чего и происходит электронно-дырочная рекомбинация. Термическое обесцвечивание может еще происходить путем термоионизации F- центров в результате которой осуществляется рекомбинация электронов с V_3 –центрами. Не исключена возможность третьего механизма электронно-дырочной рекомбинации, заключающегося в осуществлении обоих вышеупомянутых процессов.

Таим образом, под действием γ- излучения (Co^{60}) или рентгеновского излучения в кристаллах KCl происходят сложные ионно-электронные процессы, в результате которых образуются электронные и дырочные центры.

Список использованных источников

1. W. Känzig. Phys. Rev., 99,1890, 1955.
2. W. Känzig, O.T. Woodruff. Phys. Chem. Sol., 9, 70, 1958.
3. R. Gazzinelli, R.L. Mieher. Phys. Rev., 175,395,1968.
4. D.F. Daly, R.L. Mieher. Phys. Rev., 175, 412,1968.
5. D. Dutton, R. Maurer. Phys. Rev., 90, 126,1953.
6. T. Castner, W. Känzig. J. Chem. Sol., 3, 178, 1957.
7. C.J. Delbeeq, B. Smaller, P.H. Yuster. Phys. Rev., 111, 1235, 1958.
8. E.F. Gucker, Yelvetika Phys. Acta, 41,493,1968.
9. Пунг Л. А. Температурная стабильность автолокализованны хдырок в некоторых щелочногалоидных монокристаллах / Л. А. Пунг, Ю. Ю. Халдре // Известия АН СССР. Серия. Физика. – 1966. – № 30. – С.1446-1447.
10. Горбенко П. К. Природа и свойства дырочных центров кристаллов КСІ / П. К. Горбенко, А. А. Ковтун // ФТТ. – 1971. – Т. 13.
11. Адуев Б. П. Температурная зависимость радиационно-индуцированной проводимости кристаллов CsI при возбуждении пикосекундными пучками электронов / Б. П. Адуев, Э. Д. Алукер, В. Н. Швайко, В. М. Фомиченко // ФТТ. – 2001. – Т. 43, вып. 7. – С. 1185-1188.

УДК 681.325

М.І. Козленко, канд. техн. наук
Приватний вищий навчальний заклад “Галицька академія”, м. Івано-Франківськ, Україна

ЯКІСТЬ ЦИФРОВОЇ ДЕМОДУЛЯЦІЇ ШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ З КЕРОВАНОЮ ЕНТРОПІЄЮ В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ТА КОМП’ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ

Проведено дослідження залежності відношення сигнал/завада на виході демодулятора від такого відношення на його вході при цифровому опрацюванні широкосмугових сигналів з керованою ентропією в розподілених комп’ютерних та телекомунікаційних системах. Отримано кількісні показники завадостійкості для сигналів з базою 17 дБ.

Ключові слова: *широкосмуговий сигнал, керована ентропія, комп’ютерна система.*

Проведено исследование зависимости отношения сигнал/помеха на выходе демодулятора от такого отношения на его входе при цифровой обработке широкополосных сигналов с управляемой энтропией в распределенных компьютерных и телекоммуникационных системах. Получены количественные показатели помехоустойчивости для сигналов с базой 17 дБ.

Ключевые слова: *широкополосный сигнал, управляемая энтропия, компьютерная система.*

Noise proof feature index of the variable entropy spread spectrum signals digital demodulation in form of dependences of the signal/noise ratio at the demodulators input and output has been obtained. Noise proof feature index has been obtained for 17 dB base signals.

Key words: *spread spectrum signal, variable entropy, computer system.*

Вступ. Одним з найгостріших питань надійного функціонування розподілених телекомунікаційних і комп’ютерних систем та мереж загального та спеціального призначення є стабільність та якість обміну даними. Як правило, завадозахищеність передачі даних у сучасних умовах забезпечується використанням широкосмугових сигналів [1; 2]. Традиційні методи формування широкосмугових сигналів мають низку недоліків, зокрема,

нерівномірність розподілу енергії сигналів за частотами [3], суттєва апаратна та алгоритмічна складність та інші, що не дозволяє повною мірою використати їх переваги. Отже, розроблення нових методів формування та опрацювання широкосмугових сигналів є актуальною науковою задачею.

Постановка проблеми в цілому. Необхідність у якісному та швидкому обміні даними у розподілених телекомунікаційних і комп'ютерних системах та мережах зумовлює практичне завдання по створенню простих, надійних та недорогих приймально-передавальних каналоутворюючих пристроїв. Результативне вирішення цього завдання можливе за умови успішного розв'язання наукових проблем створення та розвитку нових ефективних методів передавання та приймання інформації в таких системах, зокрема, способів формування та опрацювання широкосмугових сигналів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Започаткування розв'язання проблеми шляхом використання широкосмугових сигналів зі змінною (керованою) ентропією міститься у [4; 5]. Запропонований метод формування та опрацювання широкосмугових сигналів, що базується на використанні як носія широкосмугового шумоподібного випадкового сигналу з близьким до нормального розподілом амплітуд і рівномірною спектральною щільністю енергії, значення ентропії якого поставлені у відповідність до символів інформаційного повідомлення, що передається. На цей час проведено дослідження впливу завад, що діють у каналі, на такі сигнали [6]. Оцінена рівномірність розподілу енергії таких сигналів за частотами [3].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Раніше невирішеною частиною загальної проблеми є отримання кількісних показників завадостійкості методу, саме цьому і присвячена ця робота.

Формулювання цілей даної роботи. Отже, об'єктом дослідження є завадостійкість методу у вигляді залежності відношення сигнал/завада на виході демодулятора від такого відношення на його вході, а отримання кількісних показників і їх порівняння з класичними підходами основною метою роботи.

Викладення основного матеріалу досліджень. Одним з основних показників завадостійкості обміну даними, що знайшов поширення, є залежність відношення сигнал/завада за потужністю $S_{вих}/N_{вих}$ на виході демодулятора в точці ухвалення рішень (переддетекторіній точці [1]) від такого відношення на вході пристрою оброблення S/N [2] (усі потужності вважаються такими, що виділяються на опорі величиною 1 Ом).

Дослідження цього показника проведено для випадку опрацювання повідомлення у вигляді послідовності інформаційних символів, що змінюються (не повторюються), і яке представлене сигналом у вигляді прямокутних імпульсів з однаковими середніми часовим інтервалами одного та іншого стану двійкового інформаційного символу. Процес формування сигналу обрано таким чином, що одному стану двійкового інформаційного символу повідомлення відповідає сформований сигнал у вигляді реалізації випадкового процесу з характеристиками наближеними до фільтрованого "білого" шуму, а саме, з нормальним ймовірнісним розподілом амплітудних значень, рівномірною спектральною щільністю енергії, та певним сталим рівнем ентропії розподілу амплітудних значень. Іншому стану двійкового символу повідомлення відповідає пасивна пауза з нульовою ентропією. Як відношення сигнал/завада $S_{вих}/N_{вих}$ в точці прийняття рішень, для дискретних повідомлень, зручно використати величину (1), яка не представляє це відношення для одного $s_1(t)$ чи іншого $s_2(t)$ сигналів, що переносять двійкові стани інформаційного повідомлення, а показує характеристику різниці сигналів у цій точці [1]:

$$\frac{S_{вих}}{N_{вих}} = \frac{(a_1 - a_2)^2}{\sigma_0^{\,2}}, \qquad (1)$$

де a_1 – бажана сигнальна компонента для одного стану двійкового символу повідомлення на виході демодулятора;

a_2 – бажана сигнальна компонента для другого стану двійкового символу повідомлення на виході демодулятора;

σ_0 – середній квадратичний відхил (СКВ) завади на виході демодулятора.

Потужність сигналу в точці прийняття рішень є квадрат різниці бажаних сигнальних компонент, а потужність завади – квадрат її СКВ (вважається, що процес центрований). Для цього методу різницею значень сигнальних компонент є різниця значень ентропії H_1 суміші сигналу $s_1(t)$ з завадою $n(t)$ каналу та значення ентропії H_2 завади каналу ($s_2(t)$ – пасивна пауза). Потужність завади на виході є СКВ оцінки ентропії і визначається випадковою складовою похибки статистичного оцінювання ентропії [7].

Це дослідження проведено для розміру вибірки 100 відліків (база сигналів 17 дБ, швидкість 480 біт/с), оскільки відомо [8], що саме такий розмір вибірки є оптимальним для даного способу. Дослідження проведено шляхом моделювання в обчислювальному експерименті в середовищі MATLAB 6.5.

На рисунку 1 представлена залежність СКВ оцінок ентропії від розміру вибірки в межах до 4000 відліків. Величини s_{01} та s_{02} є оцінками СКВ оцінок ентропії при опрацюванні відповідно сигналів $s_1(t)$ та $s_2(t)$. На рисунку 2 така залежність більш детально подана в межах розмірів від 50 до 150. Величина s_0 на рисунку 2 є максимумом з поміж s_{01} та s_{02} і характеризує ефективне значення завади на виході демодулятора. Оцінки ентропії $\hat{H}_{r(t)}$ вхідного сигналу $r(t)$ обчислені за таким виразом:

$$\hat{H}_{r(t)} = \log_2 \sqrt{2\pi e s^2_{r(t)}}\,, \qquad (2)$$

де $s_{r(t)}$ – оцінка СКВ сигналу на вході демодулятора.

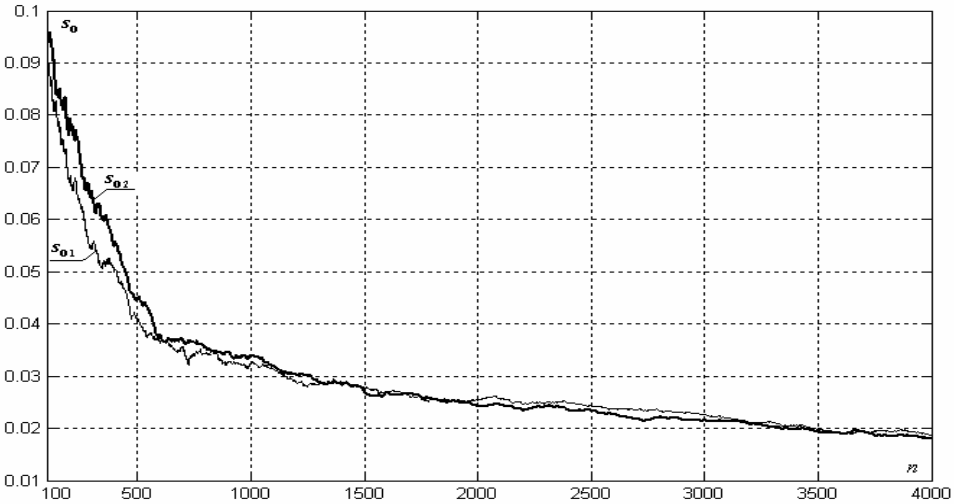


Рис. 1. Залежність s_{01} та s_{02} від розміру вибірки n

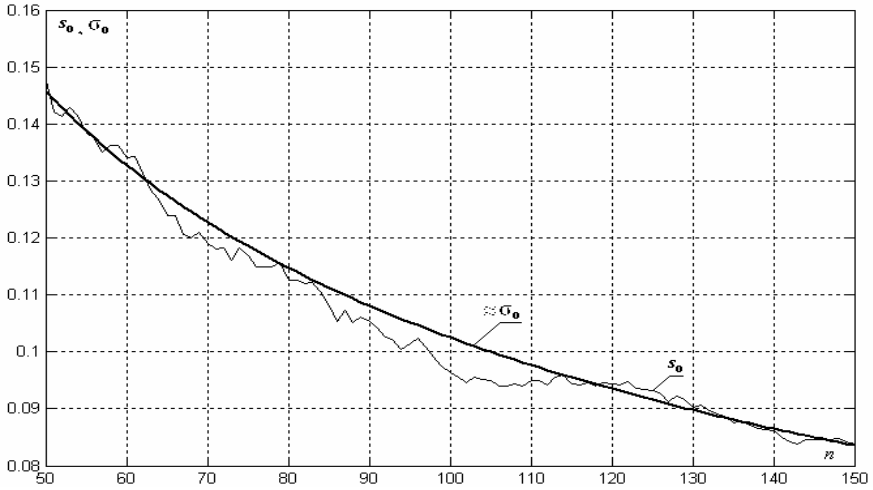


Рис. 2. СКВ завади на виході блоку оцінювання ентропії в межах розмірів 50-150 відліків

На рисунку 2 також показана залежність величини СКВ завади на виході демодулятора σ_0 від розміру вибірки, обчисленої за таким виразом [8]:

$$\sigma_0 \approx \frac{1{,}02}{\sqrt{n-1}}. \tag{3}$$

Можна побачити, що результати моделювання практично збігаються з отриманими аналітично. СКВ завади в точці прийняття рішень у таких умовах (означена кількість відліків на символьний інтервал) складає величину близько 0,1.

На основі проведених досліджень і отриманих даних побудовано графік завадостійкості в межах від –20 до +20 дБ вхідного відношення, який показано на рисунку 3. Для порівняння, також зображено криву завадостійкості оптимального когерентного опрацювання ортогональних сигналів (зокрема, це характерно для складового частотноманіпульованого FSK-FHSS широкосмугового сигналу зі стрибкоподібною зміною частоти). Ця крива отримана виходячи з наступного. Відношення сигнал/завада (1) за оптимального оброблення складає величину $2E_d/N_0$, де E_d – енергія різницевого сигналу на вході пристрою оброблення, яка визначається за допомогою виразу [1]:

$$E_d = \int_0^T \left(s_1(t) - s_2(t)\right)^2 dt. \tag{4}$$

Величина E_d для ортогональних сигналів складає величину $2E_b$ [1]. У свою чергу, зв'язок між величинами E_b/N_0 та S/N визначається згідно з виразом:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S}{N} \cdot \frac{W}{R}, \tag{5}$$

де S – середня потужність сигналу на вході демодулятора;

N – середня потужність завади на вході демодулятора;

W – ширина частотного спектра;

R – швидкість обміну даними.

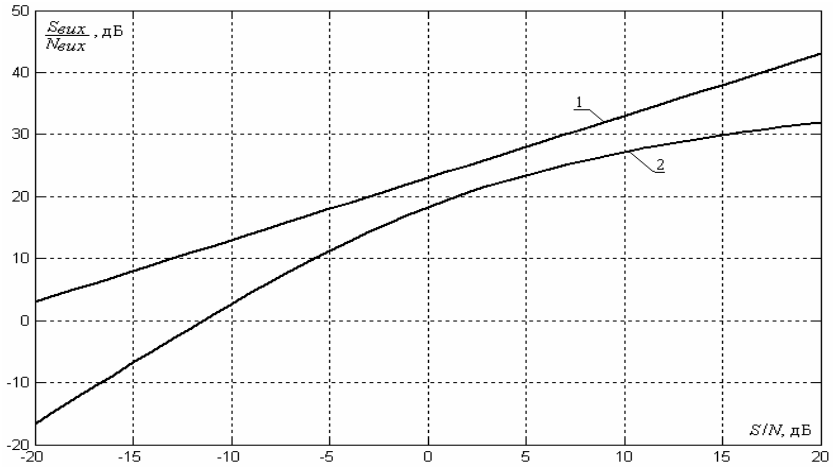


Рис. 3. Завадостійкість: 1 – оптимальне оброблення ортогональних сигналів, 2 – завадостійкість розробленого методу (W/R = 17 дБ)

Основні результати досліджень. Як можна побачити з рисунка 3, завадостійкість цього методу за відношеннями сигнал/завада наближається до завадостійкості оптимального кореляційного оброблення ортогональних сигналів. Зокрема, в діапазоні відношення S/N від 0 до 5 дБ, з різницею від ≈ 4,5 до 5 дБ.

Висновки. Завадостійкість методу обміну даними широкосмуговими сигналами з керованою ентропією є нижчою від теоретичної завадостійкості оптимального кореляційного опрацювання ортогональних сигналів, проте реалізація апаратної частини приймально-передавального обладнання є значно простішою.

Перспективи подальших досліджень. Основними напрямками подальшого дослідження є вдосконалення процедури оцінювання ентропії, з метою мінімізації помилки, пошук типів сигналів, які забезпечують вищу ефективність демодуляції, розробка ефективних способів демодуляції, реалізація способів синхронізації тощо.

Список використаних джерел

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: пер. с англ. / Бернард Скляр. – Изд. 2-е, испр. – М.: Вільямс, 2003. – 1004 с.

2. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Л. Е. Варакин. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.

3. Козленко М. І. Дослідження ефективності використання частотного ресурсу при формуванні широкосмугових сигналів / М. І. Козленко // Наукові вісті. – 2010. – № 1(17). – С. 32-37.

4. Пат. 81017 Україна, МПК(2006) H04B 1/69. Спосіб передавання та приймання інформації / С. І. Мельничук, М. І. Козленко (Україна). – заявка № а 2005 08893; заявл. 19.09.2005; опубл. 26.11.2007, Бюл. № 19.

5. Козленко М. І. Аналіз сучасного рівня розробки статистичних методів обміну даними на основі шумоподібних сигналів / М. І. Козленко, С. І. Мельничук // Наукові вісті Інституту менеджменту та економіки "Галицька академія". – 2006. – № 2(10). – С. 33-38.

6. Мельничук С. І. Дослідження статистичних характеристик випадкових сигналів провідникових та радіоканалів обміну даними розподілених систем контролю / С. І. Мельничук, М. І. Козленко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2005. – № 4. – Частина 1. – Том 2. – С. 62-65.

7. Козленко М. І. Склад похибки статистичного оцінювання ентропії при демодуляції сигналів у комп'ютерних системах / М. І. Козленко // Тези доповідей Третьої Міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія", м. Вінниця, 29-31 травня 2012 р. – Вінниця: ВНТУ, 2012. – С. 258-260.

8. Козленко М. І. Метод та засоби формування і оброблення широкосмугових сигналів зі змінною ентропією в розподілених комп'ютерних системах: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.13.05 / М. І. Козленко; Національний університет "Львівська політехніка". – Львів, 2008. – 20 с.

УДК 621.822.172

В.П. Маслов, канд. техн. наук
П.М. Кузьменко, аспірант
Чернігівський державний інститут економіки і управління, м. Чернігів, Україна

Є.В. Риндич, канд. техн. наук
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ТРИМІРНОГО РЕНДЕРИНГУ

Розглянуто основні алгоритми тримірного рендерингу. Виділено основні тенденції розвитку тримірного рендерингу.
Ключові слова: тримірний рендерінг, прискорення обчислень, адаптивний тримірний рендеринг.

Рассмотрено основные алгоритмы трёхмерного рендеринга. Выделены основные тенденции развития трехмерного рендеринга.
Ключевые слова: трёхмерный рендеринг, ускорение вычислений, адаптивный трехмерный рендеринг.

Consider the basic algorithms of three-dimensional rendering. The basic trends in the development of three-dimensional rendering.
Key words: three dimensional rendering, accelerated computing, adaptive, three-demensional rendering.

Постановка проблеми. Тримірний рендеринг, як процес отримання графічної моделі на основі відомої математичної моделі тримірної сцени, потребує значних апаратних і програмних ресурсів. Це пов'язано з необхідністю врахування багатьох оптичних ефектів під час побудови графічного зображення. Тому важливою проблемою є прискорення тримірного рендерингу й отримання графічної моделі максимально достовірної до вихідної математичної моделі тримірної сцени. Прискорення тримірного рендерингу повинно реалізовуватись за рахунок вибору оптимальних параметрів налаштування програмних засобів тримірного рендерингу залежно від кількості джерел світла, якості текстурних карт, положення камери спостереження, складності об'єктів тримірної сцени тощо.

Мета статті. Метою статті є виділення перспективних тенденцій розвитку алгоритмів прискорення тримірного рендерингу і визначення їх ефективності.

Виклад основного матеріалу. Після появи двох основних алгоритмів розрахунку глобального освітлення (тросування променів і алгоритму випромінюваності), з'явилась велика кількість гібридних алгоритмів (багатопрохідні, multipass алгоритми).

Суть багатопрохідних алгоритмів полягає в побудові гібридних методів, які поєднують у собі переваги алгоритму тросування променів і алгоритму випромінюваності.

У багатопрохідних алгоритмах розрахунок освітленості розділяється на незалежні етапи. Наприклад, метод випромінюваності використовується для розрахунку вторинного дифузного освітлення на першому проході, а тросування променів для розрахунку первинного дзеркального освітлення з урахуванням дифузного, розрахованого на першому проході. Це, в свою чергу, усуває головний недолік тросування променів низьку швидкість прорахунку дифузного освітлення.

Найбільш відомими багатопрохідними алгоритмами, які використовують переваги алгоритму тросування променів і випромінюваності, є: алгоритм Сілліона [6], трипрохідний Ширлі [5] та багатопрохідний прогресивний алгоритм Чена [4].

Найбільш відомими багатопрохідними алгоритмами, що суміщають пряме і зворотне тросування променів, є: алгоритм двонаправленого тросування променів [1], алгоритм Metropolis Light Transport [8] та фотонні карти [3].

Двонаправлене тросування променів (Bidirectional ray-tracing)

Алгоритм двонаправленого тросування променів використовує переваги зворотного (зі сторони камери) і прямого (зі сторони джерела світла) тросування променів при фіксованій максимальній глибині тросування. Під час роботи алгоритму випускаються тросуючі промені від джерела світла і від камери, які в подальшому з'єднуються різними шляхами (детермінують). У випадку перетину з'єднуючих променів з іншими об'єктами вклад всього шляху буде рівний нулю, інакше — не нуль [7].

Алгоритм Metropolis Light Transport

Алгоритм неявно користується ідеєю пошуку шляху, який дає найбільший внесок у результуюче зображення.

На першому кроці алгоритм шукає шлях від джерела до камери спостереження, відносно якої робиться тримірний рендеринг, що дає ненульовий вклад.

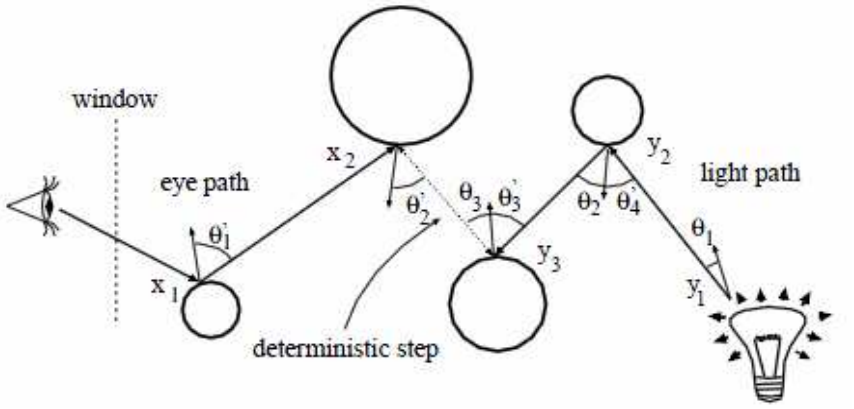


Рис. 1. Схема алгоритму Metropolis Light Transport

На другому етапі шлях модифікується генетичним алгоритмом, після чого оцінюється в порівнянні зі старим. Новий шлях зазвичай краще, ніж старий, якщо він здійснює більший внесок у зображення. Якщо старий шлях виявляється гірше ніж новий, то далі модифікації піддається новий шлях, інакше – знову старий [8].

Алгоритм фотонних карт

Алгоритм фотонних карт, крім тросування від джерела світла, включає в себе стадії побудови фотонної карти збору освітленості.

На першому етапі тросування від джерела світла випускаються фотони, які зазнають ряд перевідбиттів і заломлень, залишаючи частину своєї енергії на поверхнях об'єктів. Сукупність енергій фотонів на поверхнях об’єктів утворюють фотонну карту.

На наступному етапі енергія збирається у фотонних картах. Збір освітленості найчастіше проводиться по сфері по кожній окремій поверхні об’єкта. У кожній точці збору проглядається околиця цієї точки і підсумовується значення точок фотонів карти, що потрапили в цю околицю, результат нормується, що і буде результуючою освітленістю в точці.

Алгоритм фотонних карт має високу обчислювальну складність, яка виправдовується якістю синтезованих зображень. За допомогою цього алгоритму, зазвичай, проводять розрахунок каустики [7].

Алгоритм кеш випромінення

Метод прискорює обчислення інтеграла освітленості, низькочастотної складової. Низькочастотна частина освітленості характеризується відсутністю різких перепадів, вона добре піддається інтерполяції. Алгоритм поділяє вторинне освітлення на дві компоненти – низькочастотну (дифузну) і високочастотну, виконує інтерполяцію для низькочастотної частини по невеликому числу точок, високочастотна частина (з різкою зміною інтенсивності) розраховується в кожній точці. Точки, між якими відбувається інтерполяція, зберігаються в кеші.

Під час розрахунку низькочастотної компоненти спочатку шукаються найближчі точки в кеші; інакше відбувається розрахунок нової точки, яка розміщується в кеші. Низькочастотна компонента змінюється плавно, тому обчислюється в невеликому числі точок, а в решті – інтерполюється.

Високочастотна компонента зазвичай обумовлена різкими максимумами BRDF, тому вона може бути обчислена семплюванням за допомогою відносно невеликої кількості променів у максимумах BRDF (importance sampling).

Розрізняють кеш випромінювання в тривимірному просторі сцени (world space) і кеш в екранній площині (screen space). Реалізація кешу в екранній площині простіше та ефективніше, тому вторинне освітлення обчислюється цілком для пікселя. Інтерполяція також проводиться в просторі екрану. Однак кеш випромінювання в просторі екрана може бути використаний із зрозумілих причин тільки для первинно видимих поверхонь.

Як правило, кеш випромінювання обчислюється в реальному часі. Кожного разу під час обчислення вторинного дифузного освітлення робиться спроба вибірки з кешу. Якщо значення може бути вибрано так, що помилка менше допустимої величини, воно виходить як результат інтерполяції найближчих точок кеша.

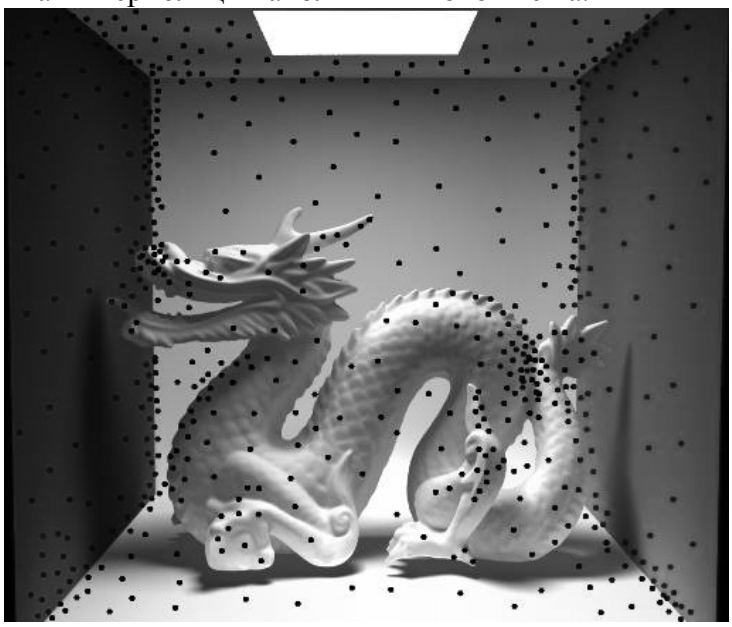


Рис. 2. Зображення, отримане з врахуванням вторинного освітлення, розрахованого в позначених точках

Якщо помилка більше допустимої величини, значення обчислюється за допомогою тросування променів в усіх напрямках (або фінального збору з фотонної карти) і отримана точка зберігається в кеші [2].

Алгоритм Lightcut

Алгоритм призначений для оптимізації розрахунку сцен з багатьма джерелами світла. Основна ідея полягає в побудові дерева з джерел світла (при цьому всі джерела розглядаються як безліч точкових джерел).

Джерело, що лежить у корені дерева, апроксимує всі джерела, що лежать у дереві глибше. Розрахунок освітлення починається з кореневого джерела, потім розглядаються його дочірні вершини-джерела і т. д. Як тільки внесок від нових дочірніх джерел у результуюче зображення стає малим, алгоритм зупиняється. Алгоритм можна адаптувати і для розрахунку вторинного освітлення, приймаючи відображення поверхні за нові джерела світла [9].

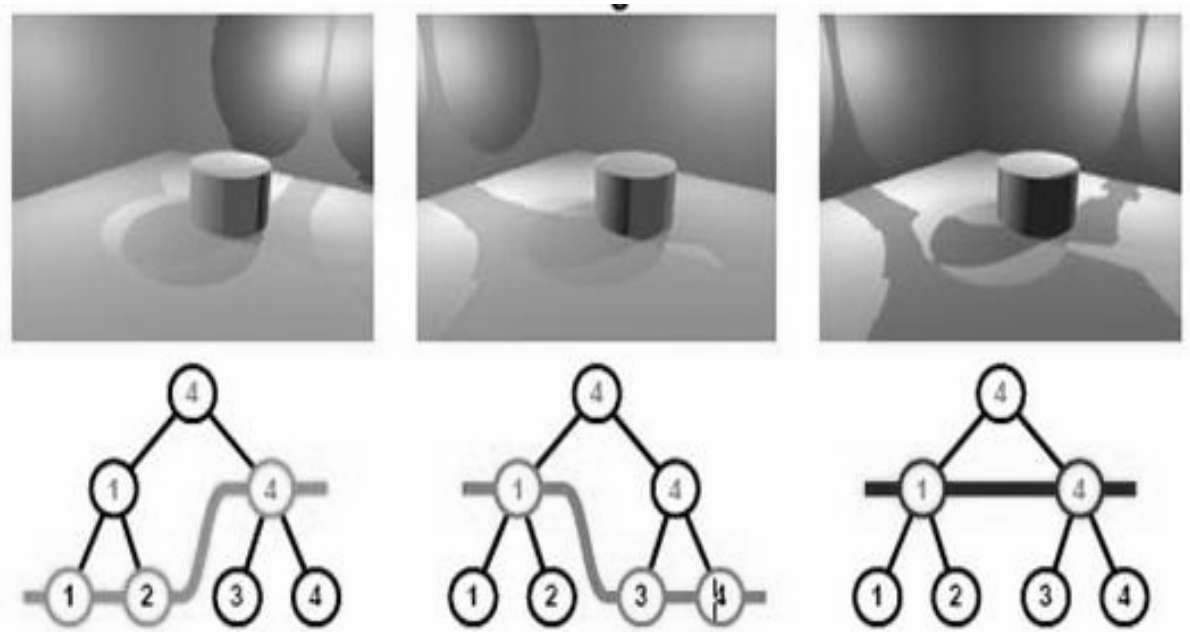


Рис. 3. Робота алгоритму Lightcut

Висновки і пропозиції. Існує багато алгоритмів, які дозволяють тими чи іншими методами оптимізувати і прискорити процес тримірного рендерингу. Серед них спеціальні прискорюючі структури, які служать для прискорення пошуку першого перетину променя з об'єктом, пакетне тросування.

Алгоритми рендерингу постійно адаптуються згідно з тенденцією розвитку апаратури, в тому числі і під багатопроцесорні системи та графічні процесори. Але, незважаючи на це, продуктивність обчислювальних систем недостатня, бо такими ж темпами зростає і складність математичних моделей тримірних сцен.

Таким чином, перспективною є методика, що могла б, аналізуючи конкретну математичну модель тримірної сцени і виходячи з її власних характеристик, робити відповідний вибір прискорюючих і налаштування існуючих алгоритмів тримірного рендерингу. Що значно прискорить процес тримірного рендерингу і значною мірою поліпшить якість вихідної графічної моделі.

Список використаних джерел

1. Chattopadhyay S. Bi-directional ray tracing / S. Chattopadhyay, A. Fujimoto // CG International '87 on Computer graphics. – 1987. – P. 335-38.

2. Gautron P. Practical Global Illumination With Irradiance Caching / P. Gautron // Synthesis lectures on computer graphics and animation. – 2009. – 4. № 1. – P. 1-148.

3. Jensen H. A practical guide to global illumination using ray tracing and photon mapping / H. Jensen// ACM SIGGRAPH 1999 Course Notes. – 1999. – P. 72.

4. Shenchang E. A Progressive Multi-Pass Method For Global Illumination / E. Shenchang, H. Rushmeier // Computer Graphics. – 1991. – 25. № 4. – P. 165-174.

5. Shirley P. A Ray Tracing Method for Illumination Calculation in Diffuse-Specular Scenes / P. Shirley // Proceedings on Graphics interface. – 1990. – P. 205-212.

6. Sillion F. A General Two-Pass method Integrating Specular and Diffuse Reflection / F. Sillion, C. Puech // Proceedings of SIGGRAPH89 In Computer Graphics. – 1989. – 23. № 3. – P. 335-344.

7. Szirmay-Kalos L. Photorealistic image synthesis using ray-bundles: PhD dissertation. Doc. of Sc.: 2000 / Szirmay-Kalos L´szl´a. – Hungarian Academy of Sciences, 2000. – P. 146.

8. Veach E. Metropolis Light Transport / E. Veach, L. Guibas // Proceedings of. SIGGRAPH97 In Computer Graphics. – 1997. – P. 65-76.

9. Walter B., Fernandez S. Lightcuts: a scalable approach to illumination / B. Walter, S. Fernandez // ACM Trans. Graph. – 2005. – 5. № 3. – P.1098-1107.

УДК 681.3.082.5

С.О. Нестеренко, канд. техн. наук, доцент
Чернігівський державний технологічний університет, м.Чернігів, Україна

ПОБУДОВА ПРОСТОРОВОЇ ЛІНІЇ ПЕРЕТИНУ ПОЛІГОНАЛЬНИХ СІТОК

Стаття містить аналітичний виклад головних кроків алгоритму побудови просторової ламаної лінії перетину двох полігональних сіток, заданих в уявленні Б. Баумгарта.

Постановка проблеми. Важливим розділом комп'ютерної графіки є комп'ютерне геометричне моделювання (CAGM – Computer-Aided Geometric Modeling), мета якого полягає в створенні моделей різних геометричних об'єктів – як двовимірних, так і тривимірних. Одним з найпоширеніших прийомів створення комп'ютерних моделей тривимірних об'єктів [1] є спосіб конструктивного геометричного моделювання суцільних тіл (CSM – Constructive Solid Modeling), в якому більш складні об'єкти утворюються з більш простих тривимірних примітивів (блоків, сфер, конусів, тороїдів тощо). Базовий метод такого роду конструювання полягає у виконанні над парами об'єктів теоретико-множинних (бульових) операцій [1] знаходження об'єднань, перетинів та різниці останніх.

Оскільки тривимірні об'єкти апроксимуються найчастіше полігональними сітками [2] (скорочено "полісітками") з пласких трикутних та чотирикутних граней, то конструювання тривимірних об'єктів за допомогою теретико-множинних операцій має підтримуватись адекватними операціями над згаданими полісітками. Коли пара сіток частково суміщається в просторі, то знаходження результату будь-якої бульової операції вимагатиме побудови просторової ламаної лінії перетину(ПЛЛП), яка є спільною для поверхонь обох полісіток (рис. 1). Об'єкт, який буде результатом об'єднання, перетину або різниці суцільних тіл, що моделюються полісітками, включатиме побудовану просторову лінію до своєї моделі як складову частину множини його ребер.

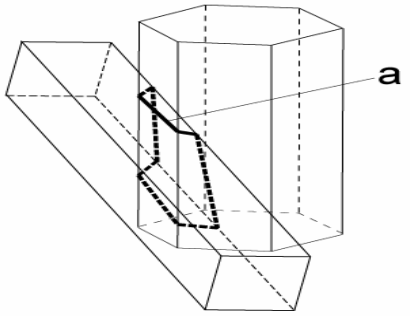


Рис. 1. Композиція двох полісіток: a – просторова лінія перетину полісіток

Побудова такої просторової лінії не є простим завданням з точки зору побудови коректного та швидкого алгоритму її вирішення. Ця стаття присвячена опису базових алгоритмічних кроків для побудови ПЛЛП з викладенням прийомів прискорення перебірних операцій, які зустрічаються в алгоритмі.

Мета статті. Мета роботи полягає в формулюванні математичних і алгоритмічних принципів вирішення складної задачі – побудови просторової ламаної лінії перетину двох полісіток.

Опис полісітки суцільного тіла

Довільна полісітка може бути описаною, як:

$$M = (V, E, F),$$

де V, E, F – множини вершин, ребер та граней відповідно.

Множина вершин визначається як

$$V = \{V_i(x_i, y_i, z_i) \mid i \in (1...n)\}, \quad (1)$$

де x,y,z – декартові координати вершини; i – номер вершини; n – кількість вершин.

Множина ребер визначається як

$$E = \{E_k(V_i, V_j) \mid (V_i, V_j) \in V, k \in (1...m), (i, j) \in (1...n)\}, \quad (2)$$

де m – кількість ребер полісітки.

Множина граней визначається як

$$F = \{F_i(\{E_p\}) \mid \{E_p\} \subset E, p \in (1...t_i)\}, \quad (3, a)$$

де t_i – кількість ребер, які є контуром i-ї грані.

Формула (3, *а*) визначає кожну грань як ланцюжок ребер, що зустрічаються при стандартному [3] обході грані за годинниковою стрілкою. Між тим, зустрічаються ситуації, де доводиться використовувати опис грані через множину її вершин у порядку обходу за годинниковою стрілкою:

$$F = \{F_i(\{V_p\}) \mid \{V_p\} \subset V, p \in (1...t_i)\}. \quad (3, б)$$

Наведений опис полісітки не віддзеркалює в повній мірі топологічну інформацію про неї. У зв'язку з цим до наведеного часто додають ще таблицю ребер у так званому «крилатому» уявленні Б. Баумгарта [3], яке пояснюється на рисунку 2. На рисунку показане ребро *a*, яке проходить від вершини *X* до вершини *Y*; номерами 1 та 2 позначені грані, які розташовані відповідно зліва та справа від ребра; ребра *b* та *d* являють собою відповідно ребро-попередник та ребро-послідовник ребра *a* при обході лівої грані 1 за годинниковою стрілкою; така ж роль ребер *e* та *c*, але при обході правої грані 2.

Таблиця 1

Формат таблиці ребер для «крилатого» уявлення (Баумгарта) полісітки

Ребро	Вершини		Грані		Обхід зліва		Обхід справа	
Ім'я	Початок	Кінець	Зліва	Справа	Перед	Після	Перед	Після
a	X	Y	1	2	b	d	e	c

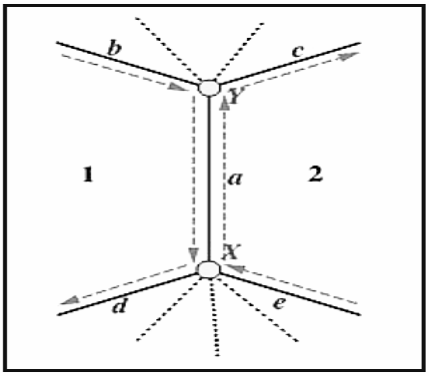


Рис. 2. Ребро полісітки в «крилатому» уявленні

Структури даних за виразами (1)-(3) та таблиця Баумгарта є достатніми для маніпулювання даними в границях цілей, які були визначені вище.

Визначення пар граней, які гарантовано не перетинаються. Перша проблема, з якою зустрічається розробник програмного застосування для побудови ПЛЛП, є прискорення виконання попарного перебору граней полісіток, що перетинаються на предмет визначення, чи вони дійсно перетинаються чи ні. Реальні полісітки нерідко складаються з великої кількості граней. Очевидно, що загальна кількість розрахунків тут буде пропорційна N*M, де N та M – це кількості граней обох полісіток.

Визначення факту перетину двох непаралельних граней, обмежених багатокутниками G_1 та G_2 полягає у виконанні такої послідовності дій:

1. Визначити просторову пряму L – лінію перетину площин граней. При цьому і площини граней, і шукана лінія розглядаються як безграничні.

2. Пошук точок перетину L з G_1 та G_2. Навіть коли для кожного полігона G_1 та G_2 пари таких точок $PG1_{1,2}$ та $PG2_{1,2}$ знайдені, фактичний перетин граней матиме місце лише тоді, коли відрізки ($PG1_1$ - $PG1_2$) та ($PG2_1$ -$PG2_2$) матимуть спільну частину, яка, власне, і є новим ребром $E_{G1\text{-}G2}$, спільним для G_1 та G_2. Очевидно, що визначення $E_{G1\text{-}G2}$ є предметом додаткового аналізу.

З вищевикладеного зрозуміло, що примітивний підхід, який може полягати у виконанні цих дій повним перебором усіх пар граней двох тривимірних об'єктів, тобто N*M разів, небажаний з точки зору трудомісткості такого алгоритму. Дії (1) та (2) треба виконувати лише для таких пар граней, котрі не відносяться до таких, які гарантовано не пересікаються.

У зв'язку з цим виглядає раціональним попередньо вдатися до швидкого аналізу взаємного розташування граней у просторі за допомогою так званих «оболонок» граней [1].

«Оболонкою» H грані назвемо габаритний прямокутний паралелепіпед, в який вписується грань. Він описується шісткою максимальних та мінімальних координат вершин грані $H = H(x_{min}, x_{max}, y_{min}, y_{max}, z_{min}, z_{max})$. Програмне використання оболонок потребує включення такої структури до опису кожної грані.

Швидка детекція пари граней, які гарантовано не перетинаються, у своїй основі має те, що їх оболонки теж не перетинаються. Але останній факт встановити значно легше, бо він зводиться до простого порівняння координат і не вимагає об'ємних обчислень за пунктами (1) і (2), описаними вище.

Основною структурою даних, яка має бути одержаною в результаті такого аналізу, є матриця перетинів:

$$M_c = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{11} & \dots & m_{1M} \\ m_{21} & m_{22} & \dots & m_{2M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_{N1} & m_{N2} & \dots & m_{NM} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Кожна компонента цієї матриці дорівнює

$$m_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ якщо оболонка грані } i \text{ перетинається з оболонкою грані } j; \\ 0 \text{ у противному випадку.} \end{cases}$$

Якщо оболонки в тривимірному просторі перетинаються, то перетинаються також їх проекції на координатні осі OX, OY, OZ. Якщо хоча б одна пара проекцій оболонок першого і другого об'єкта не перетинається хоча б уздовж однієї координатної осі, то і самі оболонки не перетинаються. Тому процес заповнення матриці (4) має проходити в три кроки, відповідно до кількості декартових координат (x, y та z) . На кожному кроці в матрицю M_c вносяться нулі для тих пар індексів оболонок, проекції котрих на вісь, яка аналізується, не мають спільних ділянок. Якщо для деякої пари (i,j) на попередніх кроках був одержаний нуль, то на поточному кроці оболонки з цими індексами перевіряти не треба, вони вже не будуть перетинатись гарантовано.

Вважаємо відомими масиви оболонок усіх граней першого та другого об'єктів, що перетинаються:

$$MH_1 = \{H_{1i} \mid i \in 1\dots N\};$$
$$MH_2 = \{H_{1j} \mid j \in 1\dots M\}.$$

Процес заповнення матриці M_c можна описати С-подібним псевдокодом:

```
for(i=1; i++; i<N) for(j=1; j++; j<M) m[i][j] = 1; // ініціалізація матриці Mc
// визначення неперетинань вздовж OX
for(i=1; i++; i<N) {
```

```
for(j=1; j++; j<M){
    if(m[i][j] = =1){  // раніше факт неперетину не був виявлений
        if (!((xmin2[j]<xmax1[i]) && (xmax2[j]>=xmin1[i]) | |
            ((xmin2[j]<xmin1[i]) && (xmax2[j]>=xmin1[i])))
            m[i][j] = 0; // пара [i][j] не перетинається }}}.
```

Потім ті ж самі дії повторюються для координат *y* та *z*. У результаті ми одержимо сильно проріджену матрицю M_c. Подальшому аналізові слід піддавати тільки ті пари граней, для яких $m_{ij} = 1$, що суттєво зменшує загальний обсяг роботи. При цьому слід зауважити, що факт не перетинання оболонок є гарантією не перетину самих граней, але зворотне твердження несправедливе. Остаточна відповідь на питання «чи дійсно перетинаються грані» дається на подальших кроках описуваного алгоритму.

Визначення загальної лінії двох граней.

Вважатимемо для конкретності, що розглядається пара непаралельних пласких граней F_1 та F_2, і для кожної з них обчислене рівняння площини:

$a_1*x + b_1*y + c_1* z + d_1 = 0$ – для грані F_1 та $a_2*x + b_2*y + c_2* z + d_2 = 0$ – для грані F_2. (5)

Знаходження просторової прямої зводиться [3] до визначення, по-перше, направляючого вектора прямої і, по-друге, точки, що належить цій прямій.

Направляючий вектор знаходиться [5] за формулою:

$$\overline{D} = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \end{vmatrix} = \bar{i}D_x + \bar{j}D_y + \bar{k}D_z. \qquad (6)$$

Опорну точку (x_0,y_0,z_0) прямої знаходять [5] як точку її перетину з якоюсь з координатних площин XOY, XOZ або YOZ. Для цього призначають нульове значення одній з трьох координат x_0,y_0,z_0, а дві інших заходять як рішення лінійної системи з двох рівнянь, як показано нижче. Правильне призначення початкової нульової координати вимагає попередньої перевірки положення вектора ***D*** на можливу паралельність координатним осям. Можливі варіанти згаданого положення наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Варіанти розташування вектора D відносно координатних осей

№	D_x	D_y	D_z	Призначити нульове значення	Знайти як рішення системи рівнянь
1	**0**	≠0	≠0	y_0 (або z_0)	x_0,z_0 (або y_0,z_0)
2	≠0	**0**	≠0	x_0 (або z_0)	y_0,z_0 (або x_0, y_0,)
3	≠0	≠0	**0**	x_0 (або y_0)	y_0,z_0 (або x_0,z_0)
4	**0**	**0**	≠0	z_0	x_0,y_0
5	**0**	≠0	**0**	y_0	x_0,z_0
6	≠0	**0**	**0**	x_0	y_0,z_0
7	≠0	≠0	≠0	Будь-який із варіантів 1-6	

Пояснимо вищезгадане на прикладі варіанта 6. Покладаємо $x_0 = 0$. Значення y_0 та z_0 знайдемо з системи рівнянь

$$a_1*x_0 + b_1*y_0 + c_1* z_0 + d_1 = 0;$$
$$a_2*x_0 + b_2*y_0 + c_2* z_0 + d_2 = 0.$$

Пропускаючи тривіальні алгебраїчні перетворення, одержуємо:

$$y_0 = \frac{c_1d_2 - c_2d_1}{b_1c_2 - b_2c_1}, \quad z_0 = \frac{b_2d_1 - b_1d_2}{b_1c_2 - b_2c_1}.$$

Таким чином буде визначена безкінечна пряма, яка достовірно проходить через точку $\boldsymbol{P_0}(x_0,y_0,z_0)$ в напрямку вектора $\boldsymbol{D}(D_x, D_y, D_z)$. Довільну точку $\boldsymbol{P}$ на цій прямій можна знайти, використовуючи скалярний параметр t:

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{P_0} + t\boldsymbol{D}. \qquad (7)$$

Пряма за рівнянням (7) є спільною прямою для двох безграничних непаралельних площин з рівняннями (5). Де на цій прямій розташоване ребро дійсного перетину полігональних граней F_1 та F_2 аналізується нижче.

Визначення загального ребра двох граней.

Раніше ми висловлювали лише дві, причому досить слабкі, умови можливого перетину граней: по-перше, оболонки граней перетинаються, і, по-друге, площини граней не паралельні. Незважаючи на те, що ці умови є необхідними для існування спільного для граней ребра, вони не є достатніми. З рис. 3 видно, що достатніми умовами є ще додаткові такі:

У1. Спільна лінія площин граней ($\boldsymbol{P_o}$, $\boldsymbol{D}$) дійсно перетинає полігони обох граней;

У2. У випадку виконання умови (У1) відрізки (x_{F1}—x_{F2})та (x_{F3}—x_{F4}) додатково мають спільну частину, тобто *ребро* ↔ (x_{F1}—x_{F2})∩(x_{F3}—x_{F4}).

Рис. 3, *а* показує випадок невиконання умови (У1), рис. 3, *б* ілюструє випадок виконання умови (У1), але не виконання умови (У2), а на рис. 3, *в* зображено випадок виконання обох умов, коли спільне ребро дійсно існує.

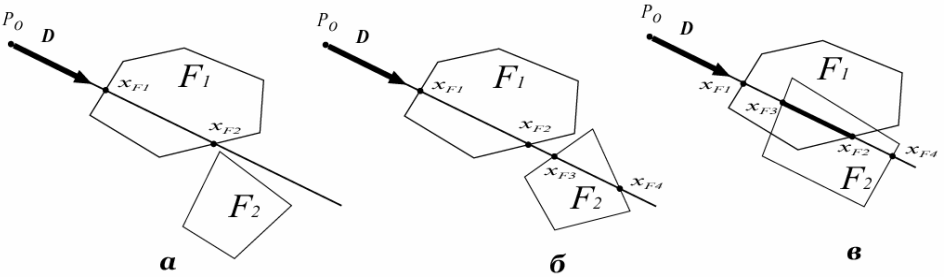


Рис. 3. Різні випадки розташування двох граней та спільної для них прямої: а, б – випадки, коли грані не мають спільного ребра; в – випадок, коли спільне ребро існує

Для визначення факторів, що забезпечують виконання умови (У1), нам знадобиться метод перерахунку координат вершин граней з «світової» системи координат (СК) *OXYZ* систему координат, пов'язану з гранню $P_oX_FY_FZ_F$ (рис. 4).

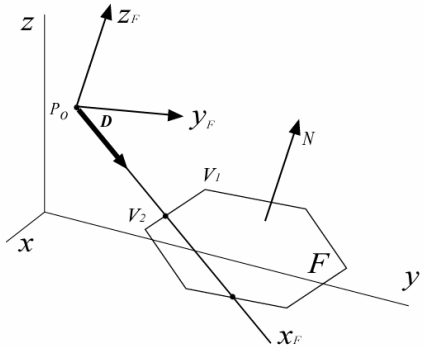


Рис. 4. Система координат грані PoXFYFZF

Цю систему коодинат визначимо так. Вісь P_0X_F спрямована від $\boldsymbol{P_0}$ вздовж направляючого вектора $\boldsymbol{D}$. Вісь P_0Z_F паралельна нормалі до грані F. Якщо описати базис СК грані як{$\boldsymbol{i_F;j_F;k_F}$}, то

$$\bar{i}_F = \frac{\bar{D}}{D}; \qquad \bar{k}_F = \frac{\bar{N}}{N}; \qquad \bar{j}_F = \bar{k}_F \times \bar{i}_F.$$

За цих умов СК грані є правою, як і світова СК OXYZ.

Перехід від світової СК до СК грані виконаємо за методикою [4], яка полягає у виконанні чотирьох кроків, у результаті яких СК OXYZ суміститься в просторі з СК $P_oX_FY_FZ_F$.

Крок 1. Суміщення початків координат, воно описується однорідною матрицею [5]:

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -P_{0x} & -P_{0y} & -P_{0z} & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Крок 2. Обертання базису світової СК {***i;j;k***}навкруги орту ***j*** з метою розташування ортів ***i*** та $\boldsymbol{i_F}$ в одній площині, перпендикулярній ортові ***k*** . Функції кута θ обертання

$$\cos\theta = \frac{i_{Fx}}{\sqrt{i_{Fx}^2 + i_{Fz}^2}}, \quad \sin\theta = \frac{i_{Fz}}{\sqrt{i_{Fx}^2 + i_{Fz}^2}}.$$

Матриця перетворення кроку 2 має вигляд

$$R_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

На кроці 2 знаходимо й обчислюємо скореговані орти $\boldsymbol{i_F}$ та $\boldsymbol{j_F}$, які знадобляться нижче (знак «штрих» означає «скорегований»):

$$\bar{i}'_F = \bar{i}_F R_1, \quad \bar{j}'_F = \bar{j}_F R_1.$$

Тут треба використовувати опис векторів в однорідних компонентах, з умовною четвертою компонентою, що дорівнює 1.

Крок 3. Обертання базису {***i;j;k***}навкруги орту ***k*** на кут α з метою суміщення ортів ***i*** та $\boldsymbol{i'_F}$. Функції кута обертання

$$\cos\alpha = i'_{Fx}, \quad \sin\alpha = i'_{Fy}.$$

Матриця перетворення кроку 3:

$$R_2 = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

На кроці 3 також обчислюємо $\bar{j}''_F = \bar{j}'_F R_2$.

Крок 4. Обертання базису {***i;j;k***}навкруги орту $\boldsymbol{i= i'_F}$ на кут β з метою суміщення ортів ***i*** та $\boldsymbol{i'_F}$. Функції кута обертання

$$\cos\beta = j''_{Fz}, \quad \sin\beta = j''_{Fy}.$$

Матриця перетворення кроку 4:

$$R_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta & 0 \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Загальна матриця переходу до СК грані

$$M = T_1 * R_1 * R_2 * R_3. \quad (9)$$

Тепер треба розрахувати для кожної вершини грані її координати (x_F, y_F, z_F) в СК грані. Зауважимо, що $z_F = 0$ та її обчислювати не треба.

Щоб швидко визначити ті ребра (припустимо без втрати загальності, що розглядається ребро V_1 -V_2) полігону грані, які перетинаються з віссю P_0X_F, використаємо критерій $y_{F1}*y_{F2}<0$, який практично означає, що кінці ребра знаходяться по різні боки осі P_0X_F. Якщо таких ребер у полігоні грані не визначено, то ми маємо випадок грані F_2 на рис. 3, *а*. Це означає, що дії із знаходження перетину поточної пари граней тут треба припиняти і переходити до розгляду наступної пари граней відповідно до процесу обходу ненульових компонент матриці (4).

Після знаходження такого ребра координати точки перетину ($x_{ПF}$, *0, 0*) знаходяться просто:

$$x_{ПF} = x_{F1} + (x_{F2} - x_{F1}) \cdot y_{F1} / (y_{F1} - y_{F2}).$$

Знаходження координат кінців реального ребра, спільного для граней F_1 та F_2 (випадок на рис. 3, *в*) виконується після визначення x_{Fi} (i=1…4) звичайним порівнянням координат, тому тут не описується внаслідок простоти.

Включення нових ребер до моделі полісітки.

Коли нове ребро визначене, його треба занести до таблиці 1, а його кінці мають бути записані до множини (1). Перша дія є предметом досить складного топологічного аналізу, обговорення якого виходить за межі цієї статті. Друге потребує зворотного перерахунку координат кінців ребра з СК грані до світової СК за рівнянням

$$V_i = V_{iF} \cdot M^{-1},$$

де M^{-1} – матриця, зворотна до (9).

Очевидно, що матриця (9) буде матрицею загального виду, тому задача знаходження зворотної до неї не може бути вирішена спрощеними методами. Під час програмування цієї дії доведеться використовувати відповідний алгоритм зі стандартних бібліотек алгоритмів лінійної алгебри, хоча це дещо збільшує часові витрати на виконання обчислень.

Висновки.

1. Побудова просторової ламаної лінії перетину двох полісіток може бути виконана за регулярним алгоритмом, основні кроки якого викладені в статті.
2. Алгоритм містить у собі ряд переборів, які можна дещо прискорити шляхом попереднього виконання швидких порівнянь опуклих оболонок граней та ребер з метою уникнути детальних обчислень для пар примітивів, які гарантовано не перетинаються.
3. Алгоритм використовує як складові частини функції векторної та лінійної алгебри, тому для його програмної реалізації потрібно забезпечити доступ до відповідних математичних бібліотек.

Список використаних джерел

1. Фоли Д. Основы интерактивной машинной графики: в 2-х книгах. Кн. 2 / Д. Фоли, вэн Дэм А. – М.: Мир, 1985. – 368 с.
2. Шикин Е. Компьютерная графика. Полигональные модели / Е. Шикин, А. Боресков. – М.: Диалог-МИФИ, 2000. – 464 с.
3. Никулин Е. А. Компьютерная геометрия и алгоритмы машинной графики / Е. А. Никулин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 560 с.
4. Роджерс Д. Математические основы машинной графики: пер. с англ. / Д. Роджерс, Д. Адамс. – М.: Машиностроение, 1980. – 240 с.
5. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семенляев. – М.: Наука, 1981.– 720 с.

УДК 629.075

А.Ю. Переварюха, канд. техн. наук
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ И ПРОБЛЕМЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ В МОДЕЛИРОВАНИИ УПРАВЛЯЕМЫХ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

На примере разработанной автором непрерывно-дискретной модели воспроизводства промысловых популяций рыб рассматриваются проблемы оценки влияния нелинейных эффектов, которые возникают в динамике моделей биологических процессов, на адекватность сущностной интерпретации результатов математического моделирования. Предложен метод формализации действия быстрых изменений в соответствии с наблюдаемыми физиологическими особенностями при смене этапов развития организмов. Описан сценарий воздействия неоптимально организованной эксплуатации биоресурсов на популяцию, имеющую неустойчивое стационарное состояние при низкой численности нерестового запаса.

Ключевые слова: моделирование биологических процессов, нелинейные эффекты.

На прикладі розробленої автором неперервно-дискретної моделі відтворення промислових популяцій риб розглядаються проблеми оцінки впливу нелінійних ефектів, які виникають у динаміці моделей біологічних процесів, на адекватність сутнісної інтерпретації результатів математичного моделювання. Запропоновано метод формалізації дії швидких змін відповідно до спостерігаємих фізіологічних особливостей при зміні етапів розвитку організмів. Описано сценарій впливу неоптимально організованої експлуатації біоресурсів на популяцію, яка має нестійкий стаціонарний стан при низькій чисельності нерестового запасу.

Ключові слова: моделювання біологічних процесів, нелінійні ефекти.

Article considers the problem of estimating the nonlinear effects that arise in dynamic models of biological processes and affect on the adequacy of the interpretation of the results of mathematical modeling based on analysis of the continuous-discrete model of the reproduction of commercial fish populations. A method of formalization activities of rapid changes that corresponds to the observed changes in the physiological characteristics for stages of development of organisms was proposed. We have described the scenario of the impact of not optimally exploitation of biological resources on a population that has an unstable stationary state with low abundance spawning stock.

Key words: *modeling of biological processes, the nonlinear effects.*

Постановка общей проблемы. Методы математического моделирования популяционных процессов развиваются с 20-х годов прошлого века и при существенном интересе исследователей к данной области накоплен определенный набор общедоступных подходов. Выделим большие группы «вольтерровских» моделей, формализующих взаимодействие конкурирующих популяций на основе системы ОДУ, направление трофодинамического подхода предназначено для описания переноса энергии по пищевым цепям. В ихтиологии и энтомологии развивались модели, ориентированные на определении механизмов саморегуляции численности при ограничивающем влиянии выделенных факторов среды. Автор статьи при подготовке критического обзора описал 11 известных моделей формирования пополнения популяций рыб и вспомнил героя пьесы Чехова, якобы знавшего много способов раздобыть деньги, но в последнем акте продавшего вишневый сад. При наличии арсенала моделей, носящих имена известных ученых (популяционным моделям уделили внимание выдающиеся советские математики А.Н. Колмогоров и В.И. Арнольд), практическая организация рационально использования биоресурсов на основе прогностического математического аппарата оценивается как труднореализуемая. В Украине и России бесконтрольное истребление биоресурсов, поставившее на грань вымирания осетровых и лососевых рыб, можно объяснить социальными катаклизмами, но коллапс рыбных запасов отмечался в странах со стабильной экономической ситуацией, развитым экологическим сознанием общества и действующей научно обоснованной системой регулирования промысла [1].

К причинам отсутствия универсально отработанной методики можно отнести то, что построение математического аппарата моделей вольтеровского типа изначально было слабо связано с данными наблюдений. Заимствованные из классической механики методы описания процессов в отсутствии строго формализованных законов оказались не столь эффективны в новой области применения. Вито Вольтерра искал популяционное применение предложенного им аппарата интегро-дифференциальных уравне-

ний для описания упругих деформаций. В отличие от технической физики экология формулируется на уровне качественных принципов, а не строгих законов.

В настоящей статье мы рассмотрим противоречивость свойств нелинейных дискретных динамических систем и теоретических представлений, лежащих в основе математической формализации в качестве одной из причин ограниченности возможности применения динамических моделей в экологии. Опишем сложно интерпретируемые свойства математического аппарата в рамках важного направления промысловой ихтиологии на примере простых дискретных отображений с явлением детерминированного хаоса, выводящего динамику траектории моделей за горизонт предсказуемости. Покажем, какие качественные результаты приносит новый стадийно-событийный метод описания изменений в характере смертности одного поколения.

Анализ последних исследований. Учетчиками промысла неоднократно отмечался нестабильный характер воспроизводства отлавливаемых популяций рыб, прежде всего мигрирующих для размножения в реки, и отсутствие строгой пропорциональной зависимости между нерестовым запасом и пополнением за год. Данные явления вызвали интерес, и возникла теория о различных факторах смертности в зависимости от плотности рыб на нерестилищах [2]. Канадский ихтиолог У. Е. Рикер, рассматривая вопрос о причинах уменьшения пополнения при возрастании нерестового стада, предложил теоретическую концепцию о существовании зависимости запаса и пополнения и её роли для долговременной эксплуатации популяции [3]. Рикер предложил формулу для вычисления численности пополнения $R=f(S)$:

$$f(S) = aS\exp(-bS), \quad (1)$$

где S – от английского «stock» величина нерестового запаса, b – коэффициент, отражающий величину, обратную количеству выметанной икры, при котором число выжившей молоди максимально, соответственно, имеет смысл только $b<<1$; a – параметр. График зависимости пополнения от численности производителей называется кривой пополнения и представляет собой для (1) куполообразную кривую с единственным нетривиальным пересечением с биссектрисой координатного угла $R = S$.

Очевидно, что при применении модели (1) возникает ряд сложностей, например, при увеличении количества отложенной икры выживаемость молоди будет стремиться к нулю, что противоречит наблюдениям над аквариумными популяциями. Пополнение уменьшается до некоторого $Q>0=const$. Модель Рикера при моделировании сообщества гидробионтов часто использовалась только до некоторого критического количества S_c, при превышении которого количество молоди однозначно устанавливалось Q.

При низких численностях производителей функция (1) предсказывает увеличение эффективности воспроизводства. При стремящемся к нулю количестве отложенной икры, выживаемость пополнения стремится к предельному значению выживаемости:

$$\frac{dR}{dS} = a\exp(-bS)(1-bS), \quad \lim_{S\to 0} a\exp(-bS)(1-bS) = a.$$

Подобное свойство не соответствует фундаментальным представлениям экологии о существовании нижней критической численности у популяций животных: принципу Олли (W. Allee), согласно которому существует оптимальный для воспроизводства диапазон численности репродуктивной части популяции. При уменьшении численности эффективность воспроизводства должна снижаться, так как уменьшается вероятность встречи особей разного пола в местах, пригодных для размножения.

Модель (1) обладает интересными свойствами, о которых не имел представления ее разработчик и потому не предложил для них адекватной биологической интерпретации.

Представим процесс изменения состояния популяции, определяемый зависимостью запас-пополнение в виде динамической системы, математического объекта, для которо-

го можно указать набор величин: динамических переменных, характеризующих состояние системы. Значения таких переменных в последующий момент времени рассчитываются из текущих значений по определенному правилу (называемому оператором эволюции). Динамическая система представляется тройкой $\langle M, T, \psi \rangle$, состоящей из фазового пространства *M*, времени *T*, оператора эволюции ψ. Причем для всех $x \in M$ *и* $t,s \in T$ выполняется условие: $\psi(\psi(x,t),s) = \psi(x, s+t)$.

Множество $\{\psi^{(t)}(x)\}_{t \in T}$ называют фазовой траекторией точки *x*. Графически эволюция динамической системы во времени представляется движением точек в фазовом пространстве. Важным понятием теории диссипативных динамических систем является аттрактор: подмножество фазового пространства $A \subseteq M$ инвариантное относительно эволюции в системе: $\psi^{(t)}(A)=A$ для всех $t \in T$ и такое, что существует окрестность *U* множества *A*, в которой для всех $y \in U$ выполняется:

$\lim_{t \to \infty} \psi^{(t)}(y) = A.$

Простые аттракторы – устойчивое состояние равновесия с неподвижной точкой x^*:

$\lim_{t \to \infty} \psi^{(t)}(y) = x^*,$

и устойчивый цикл, отвечающий режиму периодических автоколебаний. Множество точек, приводящих к некоторому аттрактору, называется его областью или бассейном притяжения – basin of attraction. Рассмотрим динамическую систему как полугруппу итераций $\{\psi^{(j)}\}_{j \geq 0}$, и пусть $R_o, R_1, R_2, \ldots$ – последовательность точек, описывающих эволюцию системы, определённых условием $R_{j+1}=\psi(R_j)$ при всех $j \geq 0$. Качественное поведение динамической системы с оператором эволюции в виде (1) зависит от параметра *a*, он является управляющим. До определённого значения *a*, не превышающего бифуркационное, система стремится к точечному аттрактору $R^*=\ln(a)/b$. Первый метаморфоз поведения системы происходит, когда производная, вычисленная в неподвижной точке, перестаёт удовлетворять критерию устойчивости. Для (1) это происходит при выполнении условия $a > \mathbf{e}^2$:

$$\psi`(R) = a\mathbf{e}^{-bR} - bRa\mathbf{e}^{-bR}, \psi`(R^*) = a\mathbf{e}^{-b\frac{\ln a}{b}} - b\frac{\ln a}{b}a\mathbf{e}^{-b\frac{\ln a}{b}} = \frac{a(1-\ln a)}{\mathbf{e}^{\ln a}} = 1 - \ln a.$$

$1 - \ln a = -1, \; a = \mathbf{e}^2.$

Теперь очевидно, что параметр *b* не влияет на топологические характеристики фазового портрета. Динамическая система стремится в устойчивое циклическое состояние с периодом 2: глобальный аттрактор, состоящий из двух периодических точек – последовательности ($R_{T1}, R_{T2}, R_{T1}, R_{T2}\ldots$), областью притяжение которого является всё фазовое пространство. Тот факт, что отображение Рикера имеет в этом диапазоне параметра цикл с периодом 2, говорит о том, что не стоит от построенного по эмпирическим данным графика ожидать характерной куполообразной кривой. Если далее увеличивать параметр *a*, будет происходить увеличение амплитуды колебаний, и по достижению следующего порогового значения $a > 12{,}51$, произойдёт бифуркация удвоения периода и установится цикл периода 4. При дальнейшем увеличении параметра *a* будет происходить каскад бифуркаций удвоения периода. При значении коэффициента $a > 14{,}8$ невозможно выделение устойчивых точек или замкнутого цикла – происходит детерминированный хаос, напоминающий стохастический процесс (на рис. 1 временная диаграмма), очень чувствительный к начальным условиям. Траектория притягивается к подмножеству фазового пространства, получившему из-за своих геометрических свойств название «странный аттрактор». Сценарием перехода к хаосу через бесконечный каскад удвоений, описанным на примере квадратичного отображения $x_{n+1} = \lambda x_n(1-x_n)$ Фейгенбаумом

[4], спектр нелинейных эффектов не ограничивается. В ограниченных диапазонах при $a > 14{,}8$ наблюдаются «окна периодичности», которые могут быть даже вложенными.

Для динамической системы на основе функции (1) характерна последовательность касательных бифуркаций с появлением устойчивых циклов нечетных периодов. Ли и Йорк в 1975 г. опубликовали знаменитую статью «Period three implies chaos», в которой показали, что если одномерное отображение $R_{j+1} = \psi(R_j)$ при некотором значении одного из параметров имеет цикл периода $p = 3$, то оно имеет и бесконечное множество циклов других периодов. Почти аналогичный результат получил ранее математик из Киева А. Шарковский в [5]: если одномерное отображение $f : I \to I$ имеет цикл периода n, то оно также имеет циклы со всевозможными периодами $\tilde{n}_i$, предшествующими числу n, среди целых чисел, выписанных в порядке Шарковского, который завершает число 3.

Появлению цикла 3 предшествует явление «перемежаемости» (рис. 2 временная диаграмма). Перемежаемостью называют режим чередования во времени почти регулярных колебаний (ламинарная фаза) с интервалами хаотического поведения (турбулентная фаза). Перед появлением циклических точек ветви графика третьей итерации функции $f^3(x)$ (рис. 3) образуют так называемые каналы, в строгой последовательности по которым траектория движется довольно долго, что соответствует ламинарной фазе перемежаемости. Выход точки траектории из канала определяет короткую турбулентную фазу – отчетливо видимый на графике «всплеск».

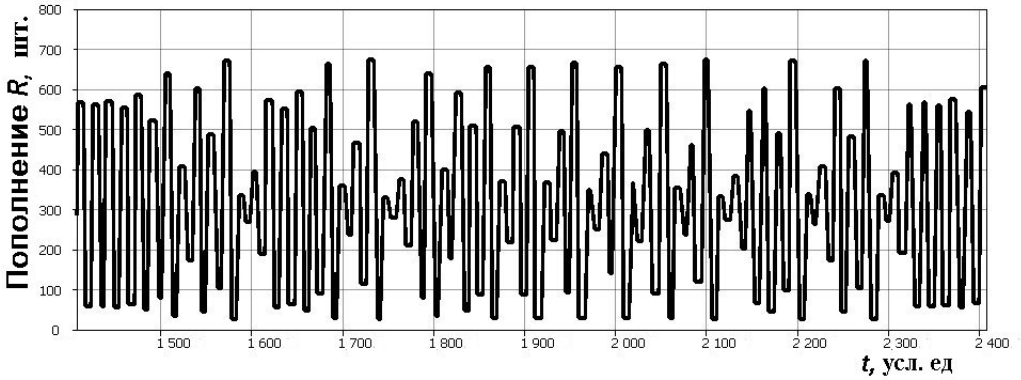


Рис. 1. Хаотизация в модели Рикера

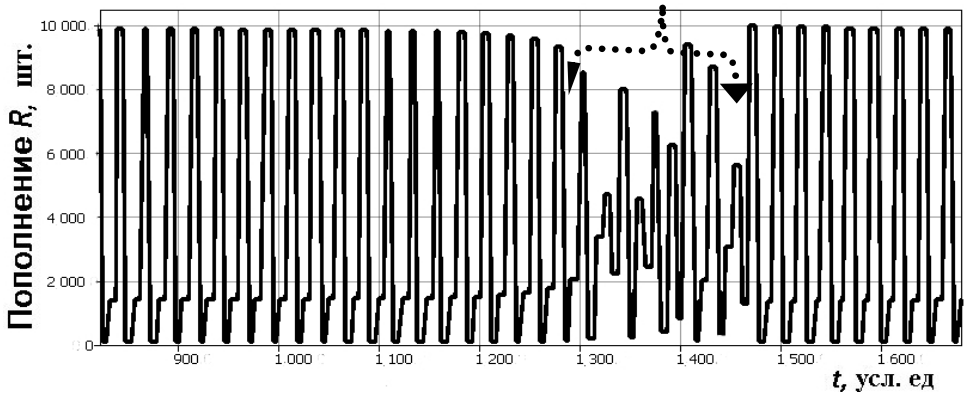


Рис. 2. Всплеск при перемежаемости с циклом p=3 в модели (1)

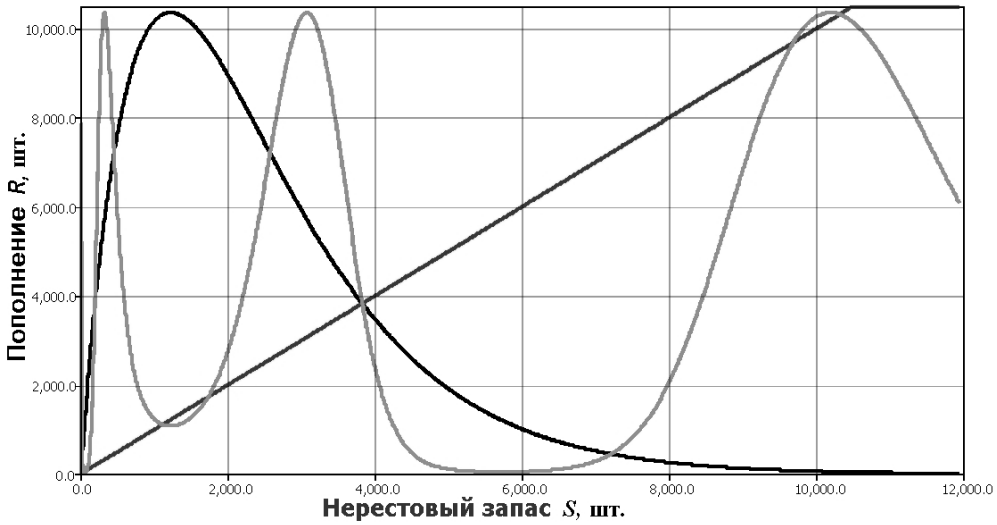


Рис. 3. $f^3(S)$ *функции* (1) в *момент цикла* $p = 3$

Часть решаемой проблемы. Появление хаоса интерпретировалось в биологическом контексте как следствие повышения репродуктивного потенциала популяции, для (1) это a, но для динамики подобных унимодальных отображений при росте a характерен целый коктейль резких изменений поведения, для которых нами не находится рационального толкования.

Для построения куполообразных кривых запас-пополнение были предложены довольно сложные преобразования исходных данных наблюдений. Исследователи проявили настойчивость, пытаясь отыскать то, чего нельзя обнаружить. Возникает естественный вопрос: имеют ли смысл методы построения кривой, если эмпирические данные о воспроизводстве не находящихся в стадии деградации популяций и для которых справедлива зависимость Рикера, будут представлены в виде сгущений точек на графике, а не ожидаемой кривой, как на рисунке 3. Изучение данных о деградирующих популяциях Нижней Волги позволило нам выявить особенности процесса формирования пополнения осетровых и приступить к их математическому описанию.

Цель работы. Общей целью всех проводимых автором с 2004 г. исследований является модельный анализ процессов в депрессивной экосистеме Каспия. Среди разнообразной информации, часто весьма недостоверной, привлекли внимание сведения о количестве молоди севрюги *Acipenser stellatus.* Численность пропущенных на нерест в Волгу производителей за период наблюдений изменялась существенно: от 230 тыс. экз. в 1979-81 гг. до 15 тыс. экз. в 2000 г. [6] при существовании искусственного воспроизводства.

Изложение основ разработки моделей. Наличие ограниченных пищевых ресурсов в неявном виде учитывалось известными моделями, но общим недостатком существующих моделей является не учет декомпенсационного фактора смертности. Не учитывался фактор изменения пищевых потребностей по мере развития молоди, которое происходит синхронно с началом сезонного уменьшения кормовой базы. Декомпенсационные факторы – увеличивающие смертность при уменьшении плотности особей снижают эффективность нереста, уменьшая количество икры реально вступившей в репродуктивный процесс при $S<<R^*$. Прямой учет такой зависимости становится очевидной необходимостью при моделировании динамики популяций, подвергающихся перелову. Целью разработки новой модели запас-пополнение стало создание гибкого математического аппарата для задачи согласования характера поведения имитационной модели динамики популяции со статистическими данными о популяциях (рис. 4, *а* – данные о молоди волжского осетра). Очевидно, что поведение модели зависит от математических особенностей выбранной функции воспроизводства. Как показано нами в [7], не-

унимодальная зависимость в воспроизводстве приводит к резким изменениям вне диапазона оптимальной численности нерестового стада.

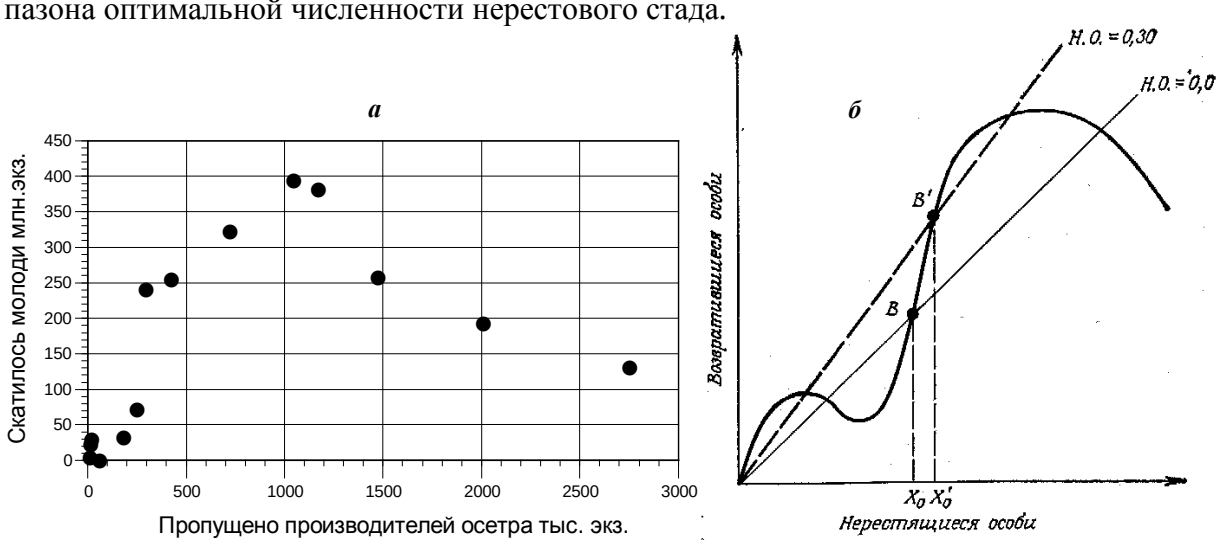


Рис. 4. Данные о молоди осетра и кривая нерки при действии промысла

Формализуем увеличение пищевых потребностей молоди. Будем исходить из того факта, что скорость роста находится в обратной зависимости от численности поколения, но не в обратно пропорциональной. Это согласуется с данными наблюдений биологов в частности, с результатами экспериментов над ростом камбал при различной их плотности. Согласно наблюдениям, при увеличении плотности возникает асимметричное распределение размерной структуры популяции в сторону преобладания особей с меньшими размерами. Описывать убыль численности поколения N на определённом интервале модельного времени $[0,T]$ будут следующие объединённые в систему дифференциальные уравнения (α, β, c – константы):

$$\begin{cases} \dfrac{dN}{dt} = -(\alpha w(t) N(t) + \theta(S)\beta) N(t) \\ \dfrac{dw}{dt} = \dfrac{g}{N^k(t) + \zeta}, \quad k < 1, \ \theta(S) = \dfrac{1}{1 - \exp(-cS)} \\ S = N(T), w(0) = w_0, \ N(0) = \lambda S, \end{cases} \tag{2}$$

где S – величина нерестового запаса; $w(t)$ – отражает уровень размерного развития поколения, влияющий на увеличение пищевых потребностей; g – параметр, учитывающий ограниченность количества доступных для молоди кормовых объектов. Убывающая функция $\Theta(S) \to 1$ отражает действие эффекта Олли (W. Allee), выражающегося в том, что при существенном снижении величины запаса S резко сокращается эффективность воспроизводства, что было установлено для популяций волжской севрюги и русского осетра; ζ – параметр, учитывающий ограничение темпов развития, не зависящее от численности; λ – средняя плодовитость особей; α – коэффициент компенсационной смертности; β – коэффициент декомпенсационной смертности; $t \in [0, T]$ интервал уязвимости; c – параметр, характеризующий степень действия эффекта Олли, который не проявляется, если численность взрослой популяции достаточно велика, однако существенный для современного состояния осетровых.

Графиком исследованной с применением численного решения в инструментальной среде моделирования системы уравнений (2) для вычисления численности выживших особей поколения к моменту времени T новой модели является унимодальная кривая с уменьшающимся наклоном ниспадающей правой ветви. Кривая имеет ненулевую гори-

зонтальную асимптоту, две нетривиальные точки пересечения с биссектрисой координатного угла $R = S$ и характеризуется незнакопостоянным дифференциальным инвариантом Шварца (рис. 5). Фазовое пространство в случае динамической системы на основе системы (2) разделяется на две области притяжения: Ω_1 и Ω_2. Границей между ними является неустойчивая особая точка первого пересечения кривой с биссектрисой координатного угла. Анализ устойчивости неподвижных точек динамической системы, реализованной в инструментальной среде моделирования, можно проводить с использованием свойства второй итерации $\psi^2(S)$. Необходимым и достаточным условием устойчивости неподвижной точки x^* одномерного отображения является неравенство второй итерации $\psi^2(x)>x$ при $x<x^*$ и $\psi^2(x)<x$ при $x>x^*$.

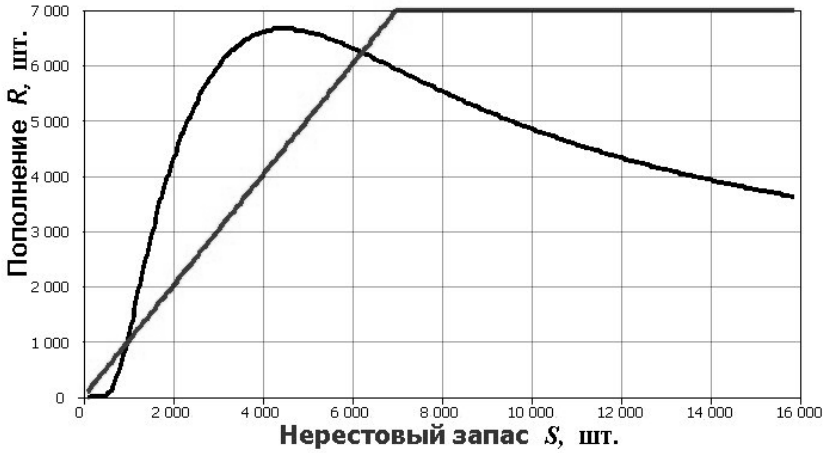


Рис. 5. Зависимость запас-пополнение, полученная из системы (2)

Модель (2) исследовалась с применением разработанной в Санкт-Петербурге инструментальной среды моделирования *AnyLogic* 5, предоставляющей выбор численных методов с изменяющимся шагом интегрирования для работы с системами ОДУ только первого порядка, записанными в форме Коши, и в том числе с дифференциальными уравнениями с отклоняющимся аргументом.

Поведение траектории динамической системы, с использованием в качестве оператора эволюции модели (2), качественно отличается от системы на основе формулы Рикера возможностью притяжения к двум аттракторам и, соответственно, наличием двух областей притяжения, границей между которыми служит репеллер – неустойчивая особая точка первого пересечения кривой с биссектрисой координатного угла. Траектории с начальными условиями, разделёнными репеллером, покидают его окрестность и приближаются к разным аттракторам. Один из аттракторов – точка с координатами (0,0) на плоскости $R \times S$. Если начальная численность популяции соответствует области притяжения этого аттрактора, произойдёт вымирание популяции. Данное свойство отражает наличие минимально допустимой численности.

Описание методов событийно-стадийного моделирования. Действие резких изменений в развитии на факторы смертности приводит к тому, что зависимость запаса и пополнения анадромных рыб перестаёт адекватно описываться унимодальной кривой. Наблюдается появления дополнительного второго максимума, как для канадской нерки на рисунке 4, *б*, где пунктиром отмечено изменение стационарного состояния при доли изъятия $H = 0{,}3$.

Два важнейших скачкообразных изменения в раннем онтогенезе анадромных рыб происходят при переходе на активное питание и при прекращении тактильного контакта с дном, после которого молодь мигрирует в потоке по направлению к морю. С учетом представлений о важных качественных изменениях, коэффициент α нельзя считать

ни постоянным, ни монотонно изменяющей значение функцией $\alpha_w(t) = \alpha w(t)$, и правая часть первого уравнения (2) уже не может рассматриваться как гладкая. Таким образом, гибридная модель должна содержать набор булевских функций $pred(t, s(t)) : \Re^1 \times \Re^n \to \{false, true\}$, определенных на решениях дифференциальных уравнений, выделяющие особые состояния, приводящие к смене поведения и набор правых частей (составляющих вектора $s(t)$), со свойствами, обеспечивающими существование и единственность решения ОДУ.

На основе формализма гибридного представления модельного времени уравнения системы (2) для описания убыли численности поколения N заменим уравнением с переменной структурой (изменяющейся правой частью) и отклоняющимся аргументом при переходе к третьей стадии развития:

$$\begin{cases} \dfrac{dN}{dt} = \begin{cases} -(\alpha w(t) N(t) + \theta(S)\beta\ ) N(t), & 0 < t \le \tau \\ -(\alpha_1 N(\tau) / w(\tau) + \beta\ ) N(t), & t > \tau, \quad w(t) < w_{k1} \\ -(\alpha_2 w(t) N(t)\ ) N(t - \varsigma)\ , & w_{k1} < w(t) < w_k \end{cases} , \\ \dfrac{dw}{dt} = \dfrac{g}{N^k(t) + \zeta} \end{cases} \quad (3)$$

где τ – длительность самого раннего этапа развития, характеризующегося тем, что питание происходит за счет желточного мешка. Продолжительность периода зависит от биологических особенностей конкретного вида; w_k – интерпретируется как уровень развития, достижение которого изменяет характер действия факторов смертности; ς – небольшое по сравнению с интервалом уязвимости $t \in [0, T]$ запаздывание.

Переход между стадиями – это событие, и модель вида (3) можно реализовать алгоритмически в виде набора правил, согласно которым алгоритм будет определять, какую систему ОДУ с непрерывными правыми частями следует интегрировать в данный момент времени, и как необходимо провести расчет начальных условий. В основе метода соединение составляющих дискретного и непрерывного времени.

Анализ разработанных моделей на основе (2). Рассмотрим сценарий того, как может произойти неожиданный коллапс промысловых запасов. Цели разумного промысла всегда состоят в достижении максимально возможного уровня эксплуатации (MSY по канадской терминологии) наибольшего среднего улова, который можно на протяжении длительного времени изымать из популяции. Определение MSY непростая задача с несколькими неизвестными, решаемая обычно по экспертным оценкам. Большинство экспертов мыслят в терминах линейной причинности, но сложные системы подчас обладают свойствами, вводящими в заблуждение наблюдателя. Часто оказывается, что долгосрочная реакция системы на воздействие оказывается прямо противоположной краткосрочной. Для такого характера реакции Дж. Форрестер предложил термин «антиинтуитивный», противоречащий «здравому смыслу» тип реакции на внешнее воздействие. Подобное непредвиденное поведение не раз приводило к провалу выбранной стратегии управления экосистемой. Проблема прогнозирования реакции природных систем на антропогенное вмешательство ещё очень долго будет оставаться трудноразрешимой. В 1975 был опубликован прогноз, согласно которому выпуск 90 млн. шт молоди осетровых позволит довести уловы до 30 тысяч тонн. Как итог рыбохозяйственной деятельности, с середины 1990-х гг. констатируется деградация популяций осетровых, приведшая с опозданием к необходимости запрета промысла. Требуемых масштабов выпуска молоди рыбоводным заводам в середине 1980-х гг. достичь удалось, а стабильного улова нет [8]. Массовый одноместный выпуск молоди рыбоводными заводами приводит к неестественной для среды ее концентрации, увеличивает внут-

ривидовую конкуренцию и зависимую от плотности смертность. Такой эффект, собственно, и прогнозируют нелинейные модели запас-пополнение.

Рассмотрим популяцию как непрерывно-дискретную динамическую систему с учётом постоянного промыслового изъятия взрослых особей. Пусть некоторая доля H нерестового запаса изымается промыслом, тогда начальные условия первого уравнения динамической системы с оператором эволюции в виде численного решения задачи Коши для (2) будут определяться следующим образом:

$$N_{i+1}\big|_{t=0} = \lambda(1-H)N_i\big|_{t=T},\ 0 \le H \le 1.$$

Тогда популяция может существовать неограниченно долгое время, не вымирая при условии, что не попадёт в область притяжения аттрактора $R^{(0)}$. В случае соблюдения условия стабилизация популяции, в которой происходит изъятие некоторого процентной доли особей, произойдёт в новой неподвижной точке $R^{**} = \psi((1-H)R^{**})$.

Особый интерес представляет случай, когда величина H совсем незначительно превосходит максимально допустимое промысловое изъятие. Величина вылова при изменении режима промысла увеличивается (определяющие допустимый улов эксперты могут преисполниться оптимизмом, а промысловики впасть в эйфорию), затем медленно падает (рис. 6), потом у наблюдателя создаётся иллюзия стабилизации запаса. В модельном эксперименте величина вылова через 9 лет вернулась к уровню, получаемому до увеличения доли промыслового изъятия, а от момента усиления промыслового давления до полного вымирания популяции прошло 57 лет.

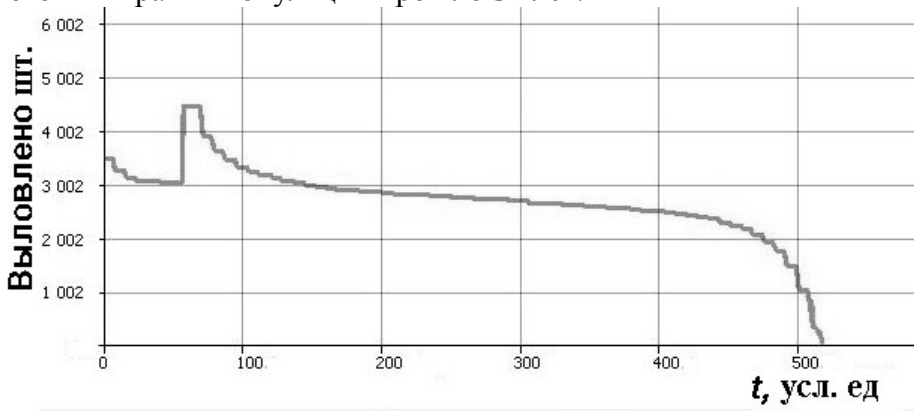


Рис. 6. Модельный эксперимент по исследованию сценария деградации

Подобная динамика наблюдалась после увеличения уловов каспийских осетровых в конце 1977 году. В 1986 г. специалистами института КаспНИРХ оптимистично прогнозировалось незначительное увеличение уловов севрюги и белуги [9]. Независимые экологи начали писать о деградации запасов в середине 90-х.

Максимальный устойчивый улов MSY можно получать неограниченно долгое время, когда популяция находится в состоянии, продуцирующем максимально эффективное воспроизводство: $(R_{n+1}-R_n)\to\max$. В таком случае промысел будет забирать весь излишний прирост численности. Количество выловленных особей составит $Y=\psi(R_{опт})-R_{опт}$. Задача оптимизации состоит в выборе такого коэффициента изъятия, который бы стабилизировал популяцию в состоянии $R_{опт}$.

$$\forall n\ R_n > R_{опт},\ \lim_{n\to\infty}(1-H)\psi^n(R_0) = R_{опт}.$$

В случае, если текущая численность популяции $R_n<R_{опт}$, то промысел должен быть запрещен до тех пор, пока популяция не достигнет оптимального для промысла состояния. Но такой уровень запаса можно определить только экспериментально по эмпирическим данным, а подобные эксперименты связаны с риском деградации популяции. Подобное «оптимизированное» состояние популяции будет неустойчиво, случайные измене-

ния численности или перелов могут подвести к границе, после которой устойчивым останется только тривиальное состояние равновесия. Специалисты по оптимизации должны помнить, что применение принципов оптимальности к управлению некоторой частью большой экосистемы осложняется трудностями фундаментального порядка, обусловленными существованием незамкнутых контуров действия обратных связей в гетерогенной структуре.

Причиной деградации запасов севрюги, сохранившей большую часть нерестилищ после зарегулирования Волги, стало превышение допустимого изъятия из нерестовой части популяции в конце 1970-х и первой половине 1980-х гг. и своевременное не прекращение промысла [10]. Подобная картина наблюдалась ранее с популяциями реки Кура, и с другим когда-то промысловым видом – осетром *Acipencer sturio*, промысел которого велся в реках атлантического побережья Европы, где сегодня он больше не встречается. Хорошо документирован коллапс без последующего восстановления промысловых запасов форели и сельди Великих Озёр в 1950-е гг.

Поучителен опыт регулирования промысла лососевых рыб в реках тихоокеанского побережья Британской Колумбии, так как там развивался аналогичный эксперименту рисунка 6 сценарий перелова и началась стадия резкого сокращения уловов нерки. На рисунке 7 график из статьи [11], где представлены уловы и промысловое усилие «effort», измеряемое в количестве траулеров. За счет гибкой системы регулирования число судов резко сократилось из-за потери экономической эффективности промысла.

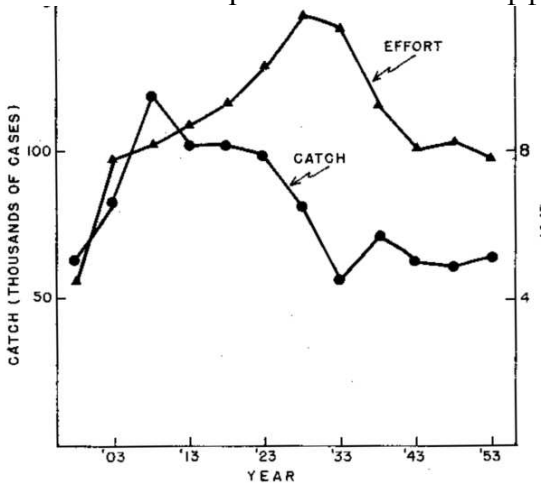


Рис. 7. Предотвращение деградации популяций лососевых в Канаде

Практические выводы. Наиболее безопасный способ регулирования промысла заключается не в том, что бы поддерживать постоянный процент изъятия, а в том, чтобы оставлять постоянное количество невыловленных особей. Но такой метод управления не согласуется с целями рыбной промышленности, так как не гарантирует ежегодных высоких уловов. Еще одна рекомендация может состоять в том, что для многовозрастных популяций с существенной дифференциацией численности поколений не использовать единую квоту изъятия H, а распределить изъятие по возрастным группам $H=H_1+H_2\ldots+H_n$.

Общие выводы. Краткий экскурс показывает, как нелинейные эффекты, возникающие в моделях биологических процессов, могут влиять на интерпретацию результатов моделирования при формировании управленческих решений. Критерии возникновения бесконечного каскада бифуркаций, как и причины существования сходимости отношения интервалов параметра между соседними бифуркациями к константе Фейгенбаума не имеют объяснения с точки зрения биологии, являясь универсальными характеристиками для класса отображений. Знаменитая статья Р. Мэя [12], положившая моду на применение хаоса в дискретных моделях биологии, появилась ранее, чем была дока-

зана теорема Д. Сингера о роли знака дифференциального инварианта Шварца. Изначально явление хаотизации связано с исследованием проблем турбулентности в гидродинамике. Для того, что бы перенести данную математическую методологию в биологическую предметную область, необходимо сделать допущение о бесконечной делимости единиц биомассы. Странный аттрактор, подобный бесконечно слоистой бабочке Лоренца, не может существовать на счетном множестве. Нереалистично для популяционной динамики выглядит значительная амплитуда хаотических колебаний, флуктуациям численности свойственны изменениям в ограниченном диапазоне.

Дополнительная сложность возникает из-за противоречивой трактовки бифуркационных параметров в различных моделях. В модели формирования пополнения Дж. Шепрада на критерий устойчивости стационарной точки влияют уже два параметра. Из свойств этой модели следует, что усиление действия лимитирующих факторов среды приводит к появлению циклических колебаний. В ряде работ с моделированием на основе (1) делался вывод, что промысел способствует демпфированию хаотических флуктуаций. Таким образом, очевидная простота моделей вида (1) несет в себе континуум противоречий и ограничений, в то время как явно сложная и громоздкая (2) обладает простым и объяснимым поведением.

В действительности модель (2) оказалась так проста, что потребовалось разработка моделей на основе непрерывно-дискретной структуры вида (3) для описания некоторых нелинейных явлений, действительно наблюдавшихся в динамике популяций рыб.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (Проект **12-01-31073** мол_а,).

Список использованных источников

1. Clark C. W. Mathematical Bioeconomics: The Optimal Management of Renewable Resources. – New York: Wiley-Interscience, 1990. – P. 6.

2. Neave F. Principles affecting the size of pink and chum salmon population in British Columbia // Journal of the fisheries research board of Canada. – 1953. Vol. 9. – № 9. – P. 450-491.

3. Ricker W. Stock and recruitment // Journal Fisheries research board of Canada. – 1954. – №.11. – С. 559-623.

4. Feigenbaum M. J. Universal behavior in nonlinear systems // Physica D. – 1983. Vol. 7. – № 1-3. – P. 16-39.

5. Шарковский А. Н. Сосуществование циклов у непрерывного преобразования прямой в себя / А. Н. Шарковский // Украинский математический журнал. – 1964. Т. 26. – № 1. – С. 61-71.

6. Довгопол Г. Ф. Оценка численности поколений севрюги *Acipenser stellatus* и основных факторов влияющих на структуру её популяции / Г. Ф. Довгопол, П. В. Вещев // Вопросы ихтиологии. – 1993. Т.33. – С. 93-99.

7. Переварюха А. Ю. Анализ опыта моделирования биоресурсов с точки зрения современной теории динамических систем / А. Ю. Переварюха // Экологические системы и приборы. – 2011. – № 11. – С. 17-21.

8. Вещев П. В. Эффективность естественного воспроизводства осетровых в низовьях Волги в современных условиях / П. В. Вещев, Г. И. Гутенева, Р. С. Муханова // Экология. – 2012. – № 2. – С. 123-128.

9. Динамика численности промысловых рыб. – М.: Наука, 1986. – С.189-199.

10. Гераскин П. П. Физиологические и популяционно-генетические исследования каспийских рыб / П. П. Гераскин, Г. Ф. Металлов, Ю. Н. Переварюха // Рыбное хозяйство. – 2007. – № 3. – С. 66-68.

11. Shepard M. P., Withler F. C. Spawning stock size and resultant production for Skeena sockeye // Journal Fisheries research board of Canada. – 1958. Vol. 15. – № 5. – P. 1007-1025.

12. May R. Biological population with nonoverlapping generation: stable points, stable cycles, and chaos // Science. – 1974. Vol. 186. – № 4164. – P. 62-67.

УДК 621.391

В.К. Чумак, канд. техн. наук
Національний технічний університет України "КПІ", м. Київ, Україна

С.В. Зайцев, канд. техн. наук
О.І. Вервейко, канд. техн. наук
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ MIMO ПІД ЧАС ДІЇ ШУМОВИХ ЗАВАД

У роботі запропонована математична модель системи MIMO *під час дії шумових завад та селективних завмирань. Отримані точні аналітичні вирази дозволяють розрахувати завадостійкість приймання сигналу в* MIMO-*системі при дії шумових завад та селективних завмирань.*

В работе предложена математическая модель системы MIMO при воздействии шумовых помех и селективных замираний. Полученные точные аналитические выражения позволяют рассчитать помехоустойчивость приема сигнала в MIMO-системе при воздействии шумовых помех и селективных замираний.

The paper presents a mathematical model of the system MIMO under the influence of noise interference and selective fading. The obtained exact analytical expressions allow to calculate the noise immunity of signal reception in MIMO system when exposed to noise interference and selective fading.

Вступ. Перспективні системи спеціального призначення радіозв'язку (ССПРЗ) повинні забезпечувати передачу інформації у складній радіоелектронній обстановці [1]. Цих цілей необхідно досягти в складних умовах багатопроменевого просторового каналу, в якому можливі глибокі завмирання (федінги) сигналів, а також при жорстких обмеженнях на частотну смугу і потужність передавальних пристроїв.

Одним з перспективних шляхів вирішення проблеми є використання систем зв'язку з рознесеними передавальними і приймальними антенами – системи MIMO (*multiple-input multiple-output*). Їх використання дозволяє проводити просторову і часову обробку сигналів, ефективніше використовувати випромінювану передавачем потужність і знижувати негативний вплив завад. Внаслідок цього пропускна спроможність MIMO-систем теоретично може бути збільшена пропорційно числу антенних елементів у порівнянні зі звичайними системами зв'язку, що використовують одноелементні антени (без збільшення повної випромінюваної потужності і смуги частот) [2].

Аналіз досліджень і публікацій. У роботах [3-4] розглядається застосування MIMO на фоні шуму Гауса, але не розглядаються питання дії на систему MIMO засобів радіоелектронного подавлення по постановці навмисних завад, які значно погіршують якість зв'язку.

Наявність у каналі навмисних завад не дозволяє при прийнятній складності реалізації відомих алгоритмів передачі дискретних повідомлень досягти тієї ж ефективності використання реальних каналів зв'язку, що й ідеального гаусівського каналу. Отже, задача підвищення ефективності ССПРЗ в умовах активної радіоелектронної боротьби є актуальною і має не тільки теоретичне, але і велике прикладне значення для забезпечення необхідного рівня бойової готовності військ за рахунок підвищення своєчасності, ймовірність і скритності бойового управління.

Формулювання цілей статті. *Метою* роботи є розробка математичної моделі системи MIMO в умовах шумових завад.

Виклад основного матеріалу статті. У загальному випадку відповідно до технології MIMO структура системи має в своєму складі M передавачів (передавальних антен) і N приймачів (приймальних антен) (рис. 1).

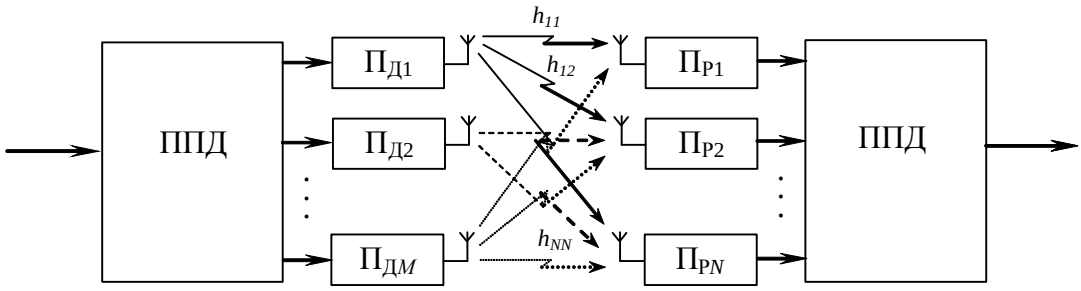


Рис. 1. Структура системи MIMO

Розглянемо MIMO систему $M \times N$, зображену на рисунку 1, де ППД – перетворювач потоку даних, $Пд_i$ – передавач i-ого каналу, $Пр_i$ – приймач i-ого каналу.

Високошвидкісний потік даних розбивається на M незалежних послідовностей з $1/M$ швидкості, які потім передаються одночасно з декількох антен, відповідно використовуючи тільки $1/M$ їх первинної смуги частот.

Перетворювач потоку даних на передавальному кінці лінії зв'язку перетворює послідовний потік у паралельний, а на приймальному – виконує зворотне перетворення.

Матрицю стовбців **A** сигналів передавального пристрою із M канальних передавачів та матрицю стовбців **X** приймального пристрою із N канальних приймачів можливо записати у вигляді:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} U_{t1} \\ U_{t2} \\ \dots \\ U_{tM} \end{bmatrix}, \qquad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} U_{r1} \\ U_{r2} \\ \dots \\ U_{rN} \end{bmatrix}.$$

Передаточна функція багатопроменевого каналу описується матрицею [5]:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{M1} & h_{M2} & \dots & h_{MN} \end{bmatrix},$$

де h_{ij} – передаточна функція між i-ою передавальною та j-ою приймальною антенами.

Значна частина каналів ССПРЗ характеризується багатопроменевим розповсюдженням сигналів. Імпульс, що приймається, є сумою окремих імпульсів, відбитих від достатньо великого числа розсіювачів (відбивачів), розташованих навколо користувача випадковим чином і що мають випадкову поверхню розсіяння. Тому сигнал може спотворюватися при розповсюдженні через багатопроменевий канал. Важливою характеристикою багатопроменевого середовища є часова дисперсія в каналі, оскільки перевідбиття мають різні затримки. Більш того, затримки багатопроменевих компонент змінюються в часі із-за руху користувача, що приводить також до частотної дисперсії в каналі.

Властивості багатопроменевого каналу можуть бути описані за допомогою комплексного коефіцієнта передачі h сигналів з передавальної антени в приймальну антену.

Амплітуди і фази коефіцієнта передачі h є випадковими величинами із-за інтерференції розсіяних сигналів. Якщо прямий сигнал істотно ослаблений, то фаза коефіцієнта h рівноімовірно розподілена в межах $[0,2\pi]$, а амплітуда підкоряється релеєвському розподілу. Розглянемо спочатку випадок однієї приймальної антени, тобто однопроме-

невий релеєвський канал. Якщо передається символ *A(t)* одиничної амплітуди, то прийнятий сигнал *x(t)* можна представити у вигляді

$$x(t)=\mu\sqrt{P_0}hA(t)+Z(t), \tag{1}$$

де μ – коефіцієнт, що визначає загасання і втрати в каналі зв'язку; P_0 – середня випромінювана потужність; $Z(t)=Z_{\text{ш}}(t)+Z_{\text{з}}(t)$ – сумарна завада; $Z_{\text{ш}}(t)$ – власний шум; $Z_{\text{з}}(t)$ – шумова завада.

Для цілей нашого вивчення коефіцієнт μ у виразі (1) можливо без обмеження спільності вважати рівним одиниці (μ =1).

З виразу (1) отримаємо, що миттєве значення відношення потужності сигналу $\boldsymbol{P}_{\text{с}}$ до сумарної потужності шуму $\boldsymbol{P}_{\text{ш}}$ і завади $\boldsymbol{P}_{\text{з}}$ – відношення сигнал/завада (ВСЗ):

$$Q^2=Q_0^2|h|^2, \tag{2}$$

де $Q_0^2=\dfrac{\text{P}_{\text{с}}}{\text{P}_{\text{ш}}+\text{P}_{\text{з}}}$ – середнє ВСЗ.

Амплітуда $|h|$ коефіцієнта передачі має релеєвський розподіл. Отже, випадкове ВСЗ Q^2 матиме експоненціальний розподіл вигляду [6]:

$$f\left(Q^2\right)=\frac{1}{Q_0^2}e^{\left(-\frac{Q^2}{Q_0^2}\right)}. \tag{3}$$

Знайдемо ймовірність $P_{\text{б}}$ бітової помилки, яка дорівнює відношенню середнього числа неправильно прийнятих біт до загального числа переданих біт. Оскільки ВСЗ Q^2 є випадковою величиною, тоді необхідно спочатку знайти ймовірність бітової помилки для всіх можливих значень ВСЗ Q^2 у виразі (3). Потім повинно бути виконане усереднювання цієї помилки, використовуючи функцію щільності ймовірності $f(Q^2)$ ВСЗ. Отже, щоб знайти бітову помилку під час передачі через релеєвський канал, необхідно обчислити інтеграл

$$P_{\text{б}}=\int_0^{\infty} f\left(Q^2\right)P_{\text{б}}\left(Q^2\right)dQ^2\ , \tag{4}$$

де $P_{\text{б}}(Q^2)$ – ймовірність бітової помилки в статичному каналі без завмирань при ВСЗ рівному Q^2.

Ймовірність $P_{\text{б}}(Q^2)$ при бінарній модуляції визначається інтегралом ймовірності Φ(x) і дорівнює [2]:

$$P_{\text{б}}\left(Q^2\right)=\frac{1}{2}\left[1-\Phi\left(\sqrt{2Q^2}\right)\right]\ , \qquad \Phi(x)=\frac{2}{\sqrt{2\pi}}\int_0^x e^{\left(-\frac{t^2}{2}\right)}dt\ . \tag{5}$$

Враховуючи розподіл (3) для ВСЗ, отримаємо, що

$$P_{\text{б}}=\int_0^{\infty}\frac{1}{Q_0^2}e^{\left(-\frac{Q^2}{Q_0^2}\right)}\frac{1}{2}\left[1-\Phi\left(\sqrt{2Q_0^2}\right)\right]dQ^2\ . \tag{6}$$

Цей інтеграл обчислюється. В результаті для ймовірності бітової помилки матимемо:

$$P_{\text{б}}=\frac{1}{2}\left(1-\sqrt{\frac{Q_0}{Q_0+1}}\right). \tag{7}$$

У разі чималого середнього ВСЗ (Q^2_0>>1) формула (7) спрощується і набуває вигляду:

$$P_б \approx \frac{1}{4Q_0} . \quad (8)$$

Таким чином, при великих ВСЗ ймовірність бітової помилки в релеєвському каналі обернено пропорційна середньому ВСЗ.

Припустимо, що прийом сигналу ведеться на N антен, тобто, що є N гілок рознесення. Тепер властивості просторового каналу визначаються вектором-стовпцем $\mathbf{H} = \left(h_1, h_2, \ldots h_N\right)^{\mathrm{T}}$ коефіцієнтів передачі, де $(.)^{\mathrm{T}}$ – знак транспонування.

Якщо передається сигнал $A(t)$, тоді вектор **X** прийнятих сигналів дорівнює:

$$\mathbf{X}(t) = \sqrt{P_0}\mathbf{H}A(t) + \mathbf{Z}(t) . \quad (9)$$

Тут **Z**(t) – вектор сумарних завад. Завади в різних антенах вважатимемо некорельованими між собою, тобто кореляційна матриця шуму $<\mathbf{ZZ}^H> = \sqrt{\mathrm{P}_3}\mathbf{I}$, де **I** – одинична матриця, $(.)^H$ – позначає ермітове сполучення.

Прийняті різними антенами сигнали підсумовуватимемо з ваговими коефіцієнтами, які об'єднаємо у ваговий вектор **W**. Тоді сумарний сигнал дорівнює:

$$y(t) = \mathbf{W}^H \mathbf{X}(t) = \mathbf{W}^H \sqrt{P_0}\mathbf{H}A(t) + \mathbf{W}^H \mathbf{Z}(t) . \quad (10)$$

Знайдемо вихідне ВСЗ. Неважко отримати з виразу (10), що

$$Q^2 = Q_0^2 \frac{\left(\mathbf{W}^H\mathbf{H}\right)\left(\mathbf{H}^H\mathbf{W}\right)}{\mathbf{W}^H\mathbf{W}} . \quad (11)$$

ВСЗ не залежить від нормування вагового вектора **W**. Нормуємо вектор **W** так, що $\mathbf{W}^H\mathbf{W}$=1. У результаті для ВСЗ матимемо:

$$Q^2 = Q_0^2 \left|\mathbf{W}^H\mathbf{H}\right|^2 . \quad (12)$$

ВСЗ залежить від вибору вагового вектора **W**. Щоб забезпечити максимум ВСЗ на виході, ваговий вектор повинен бути паралельним вектору **H** коефіцієнтів передачі для всіх приймальних антен, тобто **W**=α**H**, де α – довільне комплексне число, що не впливає на величину ВСЗ. Тому можливо прийняти α =1. Насправді, величина скалярного добутку ($\mathbf{W}^H\mathbf{H}$) векторів **W** і **H** буде найбільшою, коли ці вектори паралельні один одному. В цьому випадку забезпечується узгоджений (когерентний) прийом сигналів і максимальне ВСЗ буде дорівнювати:

$$Q^2 = Q_0^2\mathbf{H}^H\mathbf{H} = Q_0^2\sum_{j=1}^{N}\left|h_j\right|^2 . \quad (13)$$

Порівнюючи вирази (13) і (2) можна бачити, що при оптимальному ваговому підсумовуванню вихідне ВСЗ є сумою ВСЗ в кожній приймальній антені.

Якщо завмирання сигналів у всіх антенах є некорельованими між собою, то з формули (13) виходить, що ВСЗ Q^2 має хі-квадрат розподіл з 2N ступенями свободи вигляду:

$$f\left(Q^2\right) = \frac{1}{(N-1)!\,Q_0^{2N}} Q^{2N} e^{\left(-\frac{Q^2}{Q_0^2}\right)} . \quad (14)$$

На рисунку 2 показано хі-квадрат розподіл при різному числі N приймальних антен (N = 1, 2 і 4). Середнє значення ВСЗ дорівнює N. Тому зі зростанням N відповідні криві

зрушуються управо. Більш того, видно, що ймовірність глибоких завмирань сигналів (малих значень ВСЗ) значно зменшується.

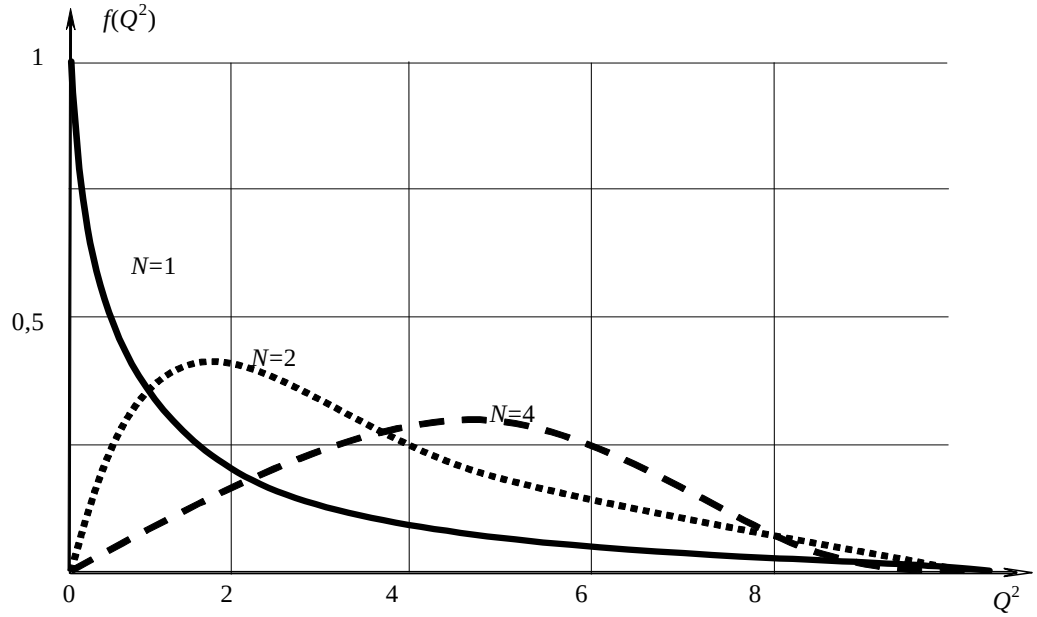


Рис. 2. Функція щільності ймовірності ВСЗ при різній кількості антен

Щоб знайти ймовірність $P_б$ бітової помилки необхідно функцію $f(Q^2)$ з виразу (14) підставити у формулу (4). У результаті матимемо, що

$$P_б = \int_0^\infty \frac{1}{(N-1)!Q_0^{2N}} Q^{2N} e^{\left(-\frac{Q^2}{Q_0^2}\right)} \frac{1}{2}\left[1-\Phi\left(\sqrt{2Q_0^2}\right)\right] dQ^2. \quad (15)$$

Після інтегрування, отримаємо вираз для бітової помилки в явному вигляді [7]:

$$P_б = \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{\frac{Q_0^2}{Q_0^2+1}}\left[1+\sum_{l=1}^{N-1}\frac{(2l-1)!!}{(2l)!!}\frac{1}{\left(Q_0^2+1\right)^l}\right], \quad (16)$$

де $(2l-1)!!=1\times3\times5\ldots\times(2l-1); (2l)!!=2\times4\times6\times\ldots(2l)$.

Розглянемо деякі окремі випадки.

а) Потужність сигналу прагне до нуля $\left(Q_0^2 \to 0\right)$. Ймовірність помилки прагне до $\frac{1}{2}\left(P_б \to \frac{1}{2}\right)$, оскільки є тільки власний шум.

б) Число приймальних антен дорівнює двом (N = 2). З (8) маємо, що ймовірність помилки дорівнює:

$$P_б = \frac{1}{2}\left[1-\sqrt{\frac{Q_0^2}{Q_0^2+1}}\left(1+\frac{1}{2\left(Q_0^2+1\right)}\right)\right]. \quad (17)$$

При великих ВСЗ (Q_0^2 >>1) маємо, що

$$P_б \approx \frac{3}{16\left(Q_0^2\right)^2}. \quad (18)$$

в) Число приймальних антен дорівнює чотирьом (N = 4). З (8) знаходимо ймовірність помилки у вигляді:

$$P_б = \frac{1}{2}\left[1 - \sqrt{\frac{Q_0^2}{Q_0^2+1}\left(1 + \frac{1}{2\left(Q_0^2+1\right)} + \frac{3}{8\left(Q_0^2+1\right)^2} + \frac{5}{16\left(Q_0^2+1\right)^3}\right)}\right]. \quad (19)$$

При великих ВСЗ (Q_0^2 >>1) маємо, що

$$P_б \approx 0{,}14\left(Q_0^2\right)^{-4}. \quad (20)$$

г) Число приймальних антен дорівнює восьми (N = 8). При великих ВСЗ (Q_0^2 >>1) маємо:

$$P_б \approx 0{,}1\left(Q_0^2\right)^{-8}. \quad (21)$$

Неважко бачити з приведених прикладів, що ймовірність помилки зменшується обернено пропорційно ВСЗ у ступені, рівному числу приймальних антен, тобто як $P_б \sim \left(Q_0^2\right)^{-N}$. Тому в логарифмічному масштабі крива ймовірність помилок має лінійну асимптотику при великих ВСЗ з кутом нахилу прямих, рівним (–N).

Криві ймовірності помилок залежно від ВСЗ для різного числа антен (N =1, 2, 4 і 8) представлені на рисунку 3.

Оцінимо ВСЗ, необхідне для забезпечення заданої ймовірності бітової помилки, наприклад, рівною 1 %. Результати оцінки показані в таблиці 1.

Таблиця 1

ВСЗ, необхідне для забезпечення заданої ймовірності бітової помилки

Число антен, N	Потрібне ВСЗ, дБ	Повний виграш у ВСЗ, дБ	Виграш у ВСЗ за рахунок підсилення, дБ	Виграш у ВСЗ за рахунок послаблення завмирань, дБ
N = 1	14	-	-	-
N = 2	5	9	3	6
N = 4	0	14	6	8
N = 8	-4	18	9	9

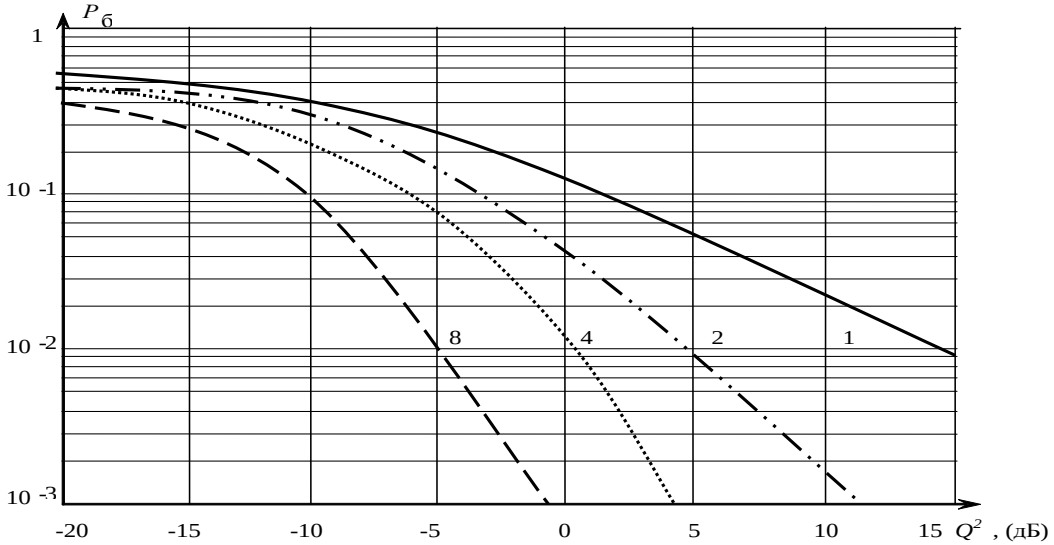


Рис. 3. Ймовірність бітової помилки залежно від ВСЗ для різної кількості приймальних антен (N = 1, 2, 4 та 8)

Видно, що зі зростанням числа антен необхідне ВСЗ значно зменшується, тобто має місце значний енергетичний виграш. Цей виграш забезпечується двома чинниками.

Перший – пов'язаний із збільшенням посилення сигналу, що приймається, за рахунок використання рознесеного прийому, яке росте пропорційно збільшенню числу антен. Другий – із зменшенням ймовірності глибоких завмирань сигналів при прийомі на множину антен, коли ймовірність одночасного завмирання сигналів у всіх антенах зменшується зі зростанням їх числа.

Висновки. У статті розроблена математична модель системи MIMO під час дії шумових завад та селективних завмирань.

Відмінність розробленої моделі від відомих, що визначає її новизну, полягає в тому, що вона базується на нових аналітичних співвідношеннях для розрахунку показників завадостійкості MIMO-систем, які враховують вплив шумових завад у каналі зв'язку. Отримані точні аналітичні вирази дозволяють розрахувати завадостійкість приймання сигналу в MIMO-системі під час дії шумових завад та селективних завмирань.

Розроблена модель дозволяє:

- провести кількісну оцінку негативного впливу певних видів завад на якість зв'язку, що визначається ймовірністю бітової помилки;
- отримати математичні співвідношення під час дії інших видів завад (полігармонійна та ретрансльована завади);
- визначити заходи, спрямовані на боротьбу з навмисними завадами;
- проводити імітаційне моделювання радіоліній з використанням MIMO в умовах дії навмисних завад та селективних завмирань.

Список використаних джерел

1. Слюсар В. Системы MIMO: принципы построения и обработка сигналов / В. Слюсар // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2005. – № 8. – С. 52-58.

2. Кувшинов О. В. Аналіз основних видів навмисних завад для військових систем рухомого зв'язку з ППРЧ / О. В. Кувшинов, В. К. Чумак, В. В. Ольшанський // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ". – 2008. – Вип. № 2. – С. 60-64.

3. Кравчук С. О. Напрямки вдосконалення технологій MIMO / С. О. Кравчук, Д. А. Міночкін, В. К. Чумак // Збірник наукових праць ВІКНУ імені Тараса Шевченка. – 2008. – Вип. № 15. – С. 153-159.

4. Alamouti S. Space-time block coding / S. Alamouti // IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Oct. 2008, vol. 16, p. 1451-1458.

5. Ермолаев В. Т. Уменьшение вероятности битовой ошибки при параллельной передаче информации в MIMO системе / В. Т. Ермолаев, Е. А. Маврычев, А. Г. Флаксман // Изв. вузов. Радиофизика. – 2003. – Т. 46. – № 3. – С. 251-260.

РОЗДІЛ VI. ЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.311

Р.А. Буйный, канд. техн. наук
И.В. Дихтярук, инженер
А.В. Красножон, канд. техн. наук
Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

УСТРАНЕНИЕ ЗОНЫ НЕЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ОСНОВНОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ 10 КВ ПРИ ПОМОЩИ ПРЕДОХРАНИТЕЛЯ-РАЗЪЕДИНИТЕЛЯ ПРВТ-10

Рассмотрена возможность использования предохранителя-разъединителя ПРВТ-10 в качестве секционирующего устройства линий напряжением 10 кВ. Описан метод проверки чувствительности основной защиты линий 10 кВ при изменении нагрузки сети. Предложено использовать ПРВТ-10 для резервирования основной защиты отдаленных участков распределительной сети 10 кВ и трансформаторов. Рассмотрены возможные варианты места установки ПРВТ-10, а также положительные и отрицательные стороны предложенных вариантов.

Розглянуто можливість використання запобіжника-роз'єднувача вихлопного типу ПРВТ-10 як секціонуючий пристрій ліній напругою 10 кВ. Описано метод перевірки чутливості основного захисту ліній 10 кВ при зміні навантаження в мережі. Запропоновано використовувати ПРВТ-10 для резервування основного захисту віддалених ділянок розподільної мережі 10 кВ та трансформаторів. Розглянуто можливі варіанти місць установки ПРВТ-10, а також позитивні та негативні сторони запропонованих варіантів.

The possibility of using fuse-switch-disconnector ПРВТ-10 in the capacity of the device of the sectionalization of the lines with the voltage of 10 kV has been considered. The method of testing of the sensitivity of the main protection of lines 10 kV when the network load is changing has been described. The using of ПРВТ-10 for backing of main protection of remote areas of the distribution networks with the voltage of 10 kV and transformers have been suggested. Possible options of the place of installation of ПРВТ-10, positive and negative sides of the proposed options have been considered.

Вступление. Секционирование как один из самых эффективных способов повышения надёжности распределительных сетей давно зарекомендовал в распределительных сетях. Секционирующие устройства позволяют довольно быстро и достаточно эффективно определить поврежденный участок и локализировать его, тем самым уменьшая ущербы от недоотпуска электрической энергии потребителям.

Электрическая сеть напряжением 10 кВ, как правило, состоит из взаимно резервирующих линий древовидной конфигурации с сечениями проводов, которое ступенчато уменьшается к концу линий. Учитывая то, что большинство из них было построено в 60-70 годах прошлого столетия и в данный момент уже полностью отработали свой ресурс, сети напряжением 10 кВ требуют значительных инвестиций для обеспечения надлежащего уровня надежности электроснабжения потребителей.

В условиях современного рынка одним из важнейших факторов является экономический, который очень часто ограничивает применение современных высокопроизводительных коммутационных аппаратов и секционирующих устройств, таким образом способствуя внедрению более простых устройств автоматики (автоматические отделители, разъединители, оснащенные простейшими устройствами РЗ и т. п.).

Основные материалы исследований. Одним из значительных недостатков существующих защит линий напряжением 10 кВ является наличие «мертвой зоны» как в новых, так и в уже существующих сетях. Действующие распределительные сети имеют значительную протяженность и очень сложную структуру. С момента сооружения нагрузка в распределительных сетях значительно изменилась и часто установленная в начале линии защита является малочувствительной к коротким замыканиям (КЗ) на удаленных участках линии.

Согласно требованиям, изложенным в [1], первая ступень защиты выполняется в виде токовой отсечки, а вторая в виде максимальной токовой защиты (МТЗ) с зависимой от тока характеристикой выдержки времени. Из электромеханических реле наиболее расп-

ространенным является индукционное реле типа РТ-85 с ограниченно-зависимой характеристикой времени срабатывания. Эти реле состоят из трех элементов: индукционного, электромагнитного мгновенного действия (токовая отсечка) и указательного. Схема максимальной токовой защиты (МТЗ) на реле типа РТ-85 показана на рисунке 1.

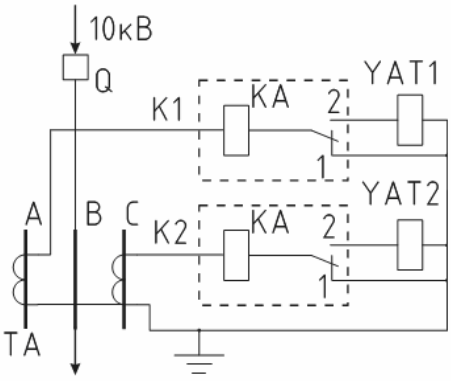


Рис. 1. Схема максимальной токовой защиты, выполненная на реле типа РТ-85: К.1, К.2 – реле тока типа РТ-85; Q – выключатель в линии 10 кВ; ТА – трансформатор тока

Решение выше изложенной проблемы может быть достигнуто разными способами, такими как установка дополнительных защит в линии, использование пунктов секционирования, изменение параметров уже существующих защит и т. п. Одним из вариантов решения вышеизложенной проблемы может быть использование секционирующих устройств, оснащенных простейшими видами защит. Одним из них является предохранитель-разъединитель ПРВТ-10 (рисунок 2). ПРВТ-10 предназначен для наружной установки на номинальное напряжение 10 кВ, номинальные токи от 5 до 50 А, для защиты силовых трансформаторов и распределительных сетей напряжением 10 кВ от коротких замыканий и перегрузок, включения и отключения участков сети с отключенной нагрузкой [2].



Рис. 2. Внешний вид предохранитель-разъединителя ПРВТ-10, установленного на опоре воздушной линии

Для решения проблемы нечувствительности защиты в сетях 10 кВ необходимо определить условие, при котором защита не будет реагировать на короткие замыкания. В сетях 10 кВ и ниже МТЗ является основным видом защиты от КЗ. При выборе тока срабатывания защиты исходят из условия возврата измерительного органа в начальное положение после его срабатывания при отключении внешнего КЗ. Для этого необходимо, чтобы ток возврата защиты был больше максимального возможного тока в линии после отключения внешнего КЗ. Ток срабатывания защиты определяется по формуле [3]:

$$I_{с.з} = \frac{k_{зап} \cdot k_{сз}}{k_в} \cdot I_{раб\max}, \quad (1)$$

где $k_{зап}$ – коэффициент запаса, который обеспечивает надежное срабатывание защиты, вследствие учета погрешности реле ($k_{зап}$ = 1,2);

$k_{сз}$ – коэффициент самозапуска нагрузки, отражающий увеличение рабочего максимального тока $I_{раб\max}$ за счет одновременного пуска всех тех электродвигателей, которые затормозились при снижении напряжения во время КЗ. Максимальное значение коэффициента самозапуска при значительной доле двигательной нагрузки определяется расчетным путем для конкретных условий, но обязательно при наиболее тяжелом условии пуска полностью заторможенных электродвигателей. Коэффициент самозапуска может принимать значения от 1 до 3 для различных условий [1].

$k_в$ – коэффициент возврата пусковых органов реле,

$I_{раб\max}$ – рабочий максимальный ток линии, А.

Для схемы сети 10 кВ максимальный рабочий ток с учетом перегрузки определяется по формуле:

$$I_{раб\max} = \frac{1{,}4 \cdot S_{\Sigma}}{\sqrt{3} \cdot U}, \quad (2)$$

где S_{Σ} – суммарная максимальная мощность, протекающая через головной выключатель, кВА;

U – номинальное напряжение сети, кВ.

Чувствительность защиты определяется коэффициентом чувствительности при КЗ в зоне ее действия:

$$K_{ч.} = \frac{I_k}{I_{с.з}}, \quad (3)$$

где I_k – минимальный ток КЗ в зоне действия защиты, А.

Для основной зоны защиты чувствительность обеспечивается при $K_{ч.}$ >1,5, а для резервной – $K_{ч.}$ >1,2. [1].

МТЗ не будет срабатывать при значениях тока короткого замыкания меньше тока срабатывания защиты, поскольку значение тока КЗ для замыканий в различных точках сети будет разным. Следовательно, для определения условия нечувствительности защиты будем использовать сопротивление линии до точки КЗ, при котором ток не будет превышать максимально допустимый.

Для расчета тока короткого замыкания схему замещения можно представить в виде эквивалентной ЭДС $E_{экв}$ и эквивалентного сопротивления до точки КЗ (рис. 3).

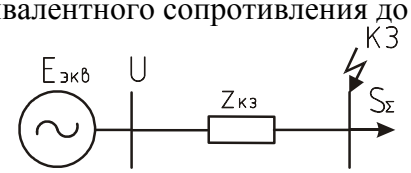


Рис. 3. Эквивалентная схема замещения для расчета токов КЗ

В таком случае ток трехфазного КЗ для участка сети можно определить по формуле:

$$I_{кз} = \frac{1{,}05 \cdot U}{\sqrt{3} \cdot z_{кз}}, \quad (4)$$

где $z_{кз}$ – эквивалентное сопротивление до точки КЗ, Ом;

U – номинальное напряжение сети, кВ.

Зная параметры защиты линии и, используя формулы (1), (2) и (4) и выполнив ряд преобразований, можно определить допустимое сопротивление присоединения:

$$z_{кз} = \frac{1{,}05 \cdot U}{\sqrt{3} \cdot \left(\frac{k_{зап} \cdot k_{сз}}{k_в} \cdot \frac{1{,}4 \cdot S_\Sigma}{\sqrt{3} \cdot U} \right)}. \quad (5)$$

Упростив выражение, получаем:

$$z_{кз} = \frac{0{,}75 \cdot k_в \cdot U^2}{k_{зап} \cdot k_{сз} \cdot S_\Sigma}. \quad (6)$$

Поскольку $k_{зап}, k_в, k_{сз}$ являются справочными величинами, то выражение $\frac{0{,}75 \cdot k_в}{k_{зап} \cdot k_{сз}}$ можно представить в виде некоторого коэффициента *K*. Следовательно формула (6) примет вид:

$$z_{кз} = \frac{K \cdot U^2}{S_\Sigma}. \quad (7)$$

В зависимости от параметров нагрузки защищаемой сети и конструктивного выполнения защиты значение коэффициента *K* может быть различным. Значение $k_в$ и $k_{зап}$ для защит, выполненных наиболее распространенных видах реле, приведены в таблице 1 [3].

Таблица 1

Значения $k_в$ и $k_{зап}$ для наиболее распространенных видов реле

Вид реле	$k_{зап}$	$k_в$
МП реле	1,1	0,96
РТВ	1,3	0,65
РТ-80, РТ-40	1,2	0,8
РТС-11,13	1,15	0,9

Используя приведенные выше данные, можно определить допустимое значение сопротивления, которое может быть присоединено к защите. Формула (7) показывает, что значение сопротивления обратно пропорционально суммарной мощности, которая протекает через головной выключатель линии. Полученную зависимость (рис. 4) можно условно разделить на три зоны.

Первая является наиболее неблагоприятным вариантом выполнения защиты. В таком случае при росте нагрузки защита будет работать некорректно, защищая только небольшую часть линии, приближенную к месту установки защиты, при этом не реагируя на повреждения на удаленных участках.

Вторая зона построена для наиболее распространенных видов защит. Для приведенных в таблице 1 параметров защит было построено зону наиболее вероятного нахождения кривой зависимости допустимого сопротивления до точки КЗ от присоединенной мощности. Зависимость показывает, что с ростом нагрузки S_Σ зона действия защиты уменьшается и, следовательно, увеличивается зона нечувствительности.

Для предотвращения подобной ситуации необходимо выполнять защиту линии таким образом, чтобы график зависимости был максимально приближенным к третьей зоне, и стремился перейти из второй в третью зону. Она характеризируется большим значением допустимого сопротивления и практически исключает возможность возникновения мертвой зоны.

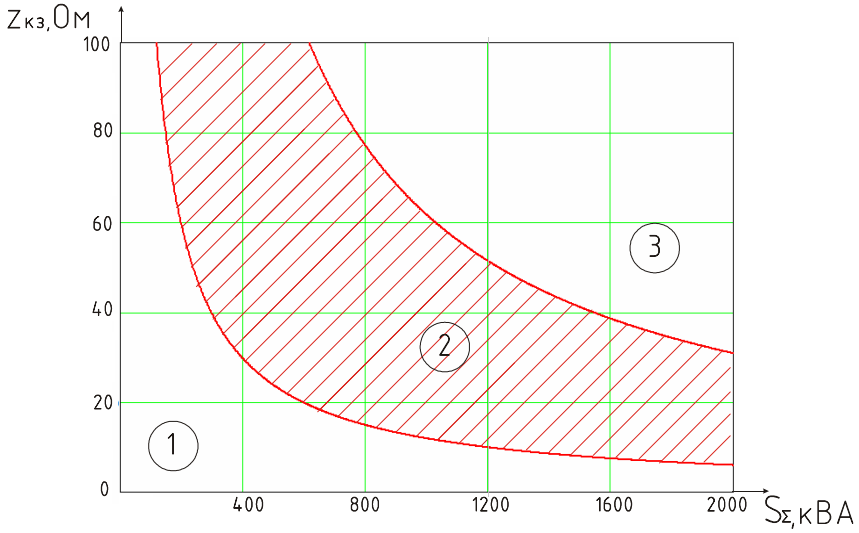


Рис. 4. Зависимость эквивалентного сопротивления до точки КЗ от суммарной максимальной мощности, протекающей через головной участок

При значении сопротивления короткого замыкания меньше допустимого, ток КЗ будет меньше тока срабатывания защиты, вследствие чего защита не будет чувствительной, что, как упоминалось выше, является актуальной проблемой в действующих распределительных сетях. Установка ПРВТ-10 дает возможность устранить зоны нечувствительности защиты. Рассмотрим возможность применения предохранителя-разъединителя ПРВТ-10 на примере сети, показанной на рисунке 5.

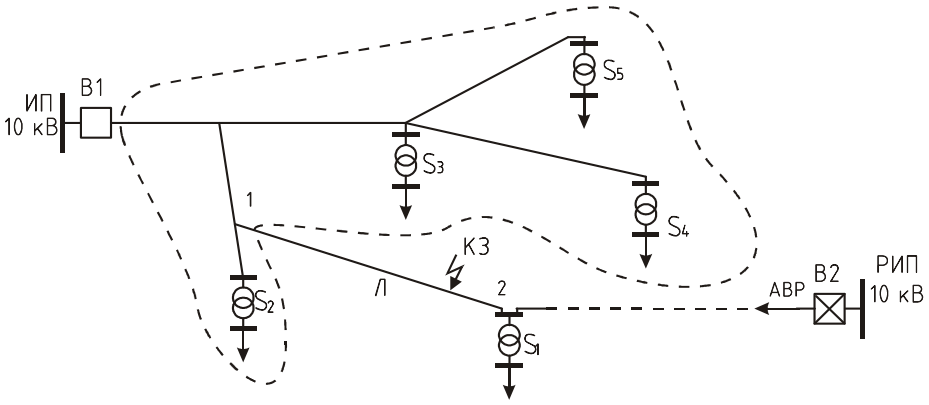


Рис. 5. Фрагмент электрической сети напряжением 10 кВ

Зону, выделенную пунктиром, представим в виде эквивалентного источника питания и эквивалентного сопротивления. После преобразования схема замещения для расчета токов КЗ будет иметь вид, представленный на рисунке 6.

Для различной конфигурации сети $z_{кз}$ может принимать разные значения.

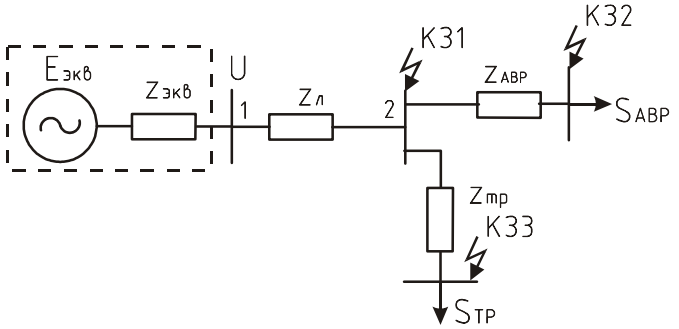


Рис. 6. Схема замещения фрагмента электрической сети напряжением 10 кВ для расчета тока КЗ

Защита будет нечувствительной, если хотя бы одно из следующих условий будет выполняться.

$$z_{кз} > \begin{cases} z_{экв} + z_{л} \\ z_{экв} + z_{л} + z_{АВР} \\ z_{экв} + z_{л} + z_{тр} \end{cases}. \quad (8)$$

При использовании ПРВТ-10 для секционирования или защиты трансформаторов возникает проблема согласования времятоковых характеристик обычных предохранителей с уставками ПРВТ-10 и головной защитой. При защите трансформаторов (точка 2 рис. 5) ПРВТ-10 одновременно совмещает функции предохранителя и разъединителя и не нуждается в дополнительных устройствах защиты. Но при установке в начале линии (точка 1) возникает проблема в согласовании защиты трансформатора и ПРВТ. Наиболее приемлемым вариантом в таком случае будет отказ от использования предохранителя перед трансформатором. Плавкая вставка ПРВТ-10 будет резервировать основную защиту линии на участке 1-2 (рис. 5) и выполнять функции линейного разъединителя. В таком случае необходимо выполнять дополнительную проверку чувствительности защиты ПРВТ-10 при КЗ за трансформатором. В большинстве случаев уставки ПРВТ-10 позволяют обеспечить надёжную защиту трансформатора и линии. Карта селективности такого выполнения защиты будет иметь вид, представленный на рисунке 7.

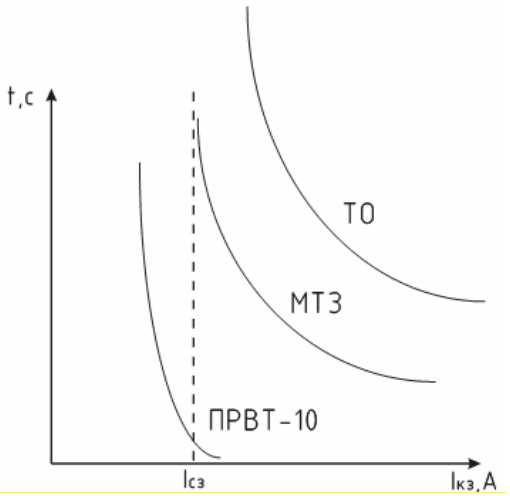


Рис. 7. Согласование времятоковых характеристик защиты линий напряжением 10 кВ с применением ПРВТ-10 в качестве защиты линии и трансформатора и резервирования основной защиты

Выводы. Постоянный рост потребляемых мощностей и дефицит средств, выделяемых на модернизацию действующих распределительных сетей, приводит к тому, что существующая релейная защита линий напряжением 10 кВ не обеспечивает необходимую чувствительность при КЗ на отдаленных участках линии.

Использование предохранителя-разъединителя ПРВТ-10 в качестве устройства секционирования позволяет обеспечить надежную защиту отдаленных участков линий 10 кВ, а так же обеспечить необходимую чувствительность основной защиты линии. В некоторых случаях, при установке ПРВТ-10 в начале линии, можно отказаться от предохранителей, установленных перед трансформатором, т. к. ПРВТ-10 будет полностью выполнять их функции.

Список использованных источников

1. Шабад М. А. Защита трансформаторов распределительных сетей / М. А. Шабад. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – 136 с.

2. СОУ-Н ЕЕ 20.262:2007. Застосування запобіжника-роз'єднувача ПРВТ-10 для реконструкції, модернізації та нового будівництва розподільчих електричних мереж напругою 10 кВ. Настанова.

3. Шабад М. А. Расчёты релейной защиты и автоматики распределительных сетей / М. А. Шабад. – Л.: Энергоатомиздат, 2003. – 350 с.

УДК 621.039.56

М.В. Лапа, канд. техн. наук
К.Н. Маловик, канд. техн. наук
Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности, г. Севастополь, Украина

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЭКСПЕРТНЫХ ЗНАНИЙ О РЕСУРСОСПОСОБНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС

В статье проведен системный анализ и классификация знаний экспертов, принимающих решения о продлении срока эксплуатации оборудования АЭС в области ресурсоспособности оборудования для оценки их компетентности и квалификации в данной предметной области. Разработана структурная модель знаний экспертов о ресурсоспособности оборудования с использованием понятия гомоморфизма.

Ключевые слова: *ресурсоспособность оборудования, экспертная оценка, гомоморфизм, инфологическая модель, оценка компетентности.*

Проведено системний аналіз та класифікацію знань експертів, що приймають рішення щодо продовження строку експлуатації обладнання АЕС у галузі ресурсоспроможності обладнання для оцінки їх кваліфікації та компетентності в цій предметній сфері. Розроблено структурну модель знань експертів про ресурсоспроможність обладнання з використанням поняття гомоморфізму.

Ключові слова: *ресурсоспроможність обладнання, експертна оцінка, гомоморфізм, інфологічна модель, оцінка компетентності.*

The analysis and classification of expert knowledges, accepting decision about the extension of exploitation term of nuclear power plant equipment for the estimation of their competence and qualification in this subject domain is conducted in the article. The structural model of expert knowledges is developed with the use of concept of homomorphism.

Key words: *resource of nuclear power plant equipment, expert knowledges, homomorphism, estimation of competence.*

Постановка проблемы. Комплексная характеристика «ресурсоспособность оборудования» **Y** является функцией частных характеристик (в т. ч. индикаторов состояния объекта) $X_1, X_2, X_3 ... X_n$. Определить эту функциональную связь вряд ли является возможным, возможно лишь определить характер изменения комплексной характеристики **Y** в зависимости от изменения некоторой частной характеристики $\mathbf{X_i}$; определить ее степень влияния на **Y** . Поэтому используются экспертные методы оценки ресурсных характеристик (РХ) элементов энергоблоков, основанные на нечетких математических моделях [1], инфологическое моделирование предметной области и метод выбора аргументов, влияющих на ОР оборудования, изложенный в [2].

Анализ исследований и публикаций. Достоверность экспертной оценки РХ (а как следствие – безопасность АЭС) зависит от компетентности экспертов в данной предметной области. В [3] рассмотрена оценка компетентности экспертов на основе нечеткого отношения преимущества. Существуют современные методы оценки конкурентоспособности персонала [4], учета компетентности экспертов при оценке объектов интеллектуальной собственности [5]. Однако на практике в атомной энергетике отсутствуют и не применяются методики учета компетентности экспертов, принимающих решение о продлении срока эксплуатации оборудования АЭС, что влияет на достоверность оценки. Поэтому необходим системный анализ и классификация знаний экспертов в области ресурсоспособности оборудования, разработка моделей, критериев оценки компетентности экспертов, привлекаемых к принятию решений о продлении срока эксплуатации оборудования АЭС.

Цель статьи – системный анализ и классификация знаний экспертов в области ресурсоспособности оборудования, разработка моделей, критериев оценки компетентнос-

ти экспертов, привлекаемых к принятию решений о продлении срока эксплуатации оборудования АЭС.

Классификация знаний экспертов о ресурсоспособности оборудования АЭС. Процессу разработки методик оценки ресурсных характеристик оборудования АЭС предшествует системный анализ экспертных знаний в данной предметной области. Рассмотрим те аспекты экспертных знаний [6], учет которых оказывает существенное влияние на разработку моделей и методов оценки ресурсных характеристик (РХ) оборудования АЭС и определяет степень компетентности эксперта именно в области оценки ресурсоспособности оборудования АЭС.

Критериями классификации, применяемыми в инженерии знаний согласно [6] являются концептуальный тип, функциональное назначение и экспрессивность. По функциональному назначению экспертные знания можно разделить на три вида.

Первый вид знаний – это декларативные знания. Например, знания о проектных характеристиках, дефектах, отказах оборудования, а также ограничения на параметры и характеристики (область определения, многозначность, временная зависимость, типичное значение для некоторого дефекта). Источником декларативных знаний являются статистические эксплуатационные данные отдела качества предприятия, данные Украинской базы данных надежности (УБДН), справочники, стандарты. Причем информация должна быть актуальной, релевантной, достоверной, полной.

Второй вид знаний – процедурные знания, позволяющие порождать новые знания на основе имеющихся. Большинство этих знаний выражается в виде причинно-следственных знаний типа «Если – то», либо в виде функциональных зависимостей, обеспечивающих нахождение значения параметра в результате использования некоторой формулы. Однако в области оценки ресурсных характеристик оборудования для комплексных ресурсных характеристик (например, остаточный ресурс (ОР) оборудования) функциональные зависимости $Y = \Psi(X_1, X_2, X_3, ...X_n)$ не установлены. В работах по созданию интеллектуальных систем предлагался подход извлечения процедурных знаний в виде экспертных правил типа «Если – то» путем интервьюирования экспертов [6]. Производительность такого процесса довольно низкая, поэтому функция приобретения процедурных экспертных знаний является одним из главных «узких мест» при разработке методов оценивания РХ оборудования АЭС и отсутствии на сегодняшний день методик оценки РХ, в частности, для уникального высоконадежного оборудования, для которого неприменимы вероятностные и статистические методы в связи с отсутствием отказов и дефектов.

Третий вид знаний эксперта связан с его умением выбирать наиболее перспективные пути поиска решений. Эти знания позволяют эксперту отбрасывать маловероятные, с его точки зрения, гипотезы и подключать к решению задачи наиболее релевантные знания. Они, в отличие от знаний первого и второго видов, являются метазнаниями и обеспечивают наиболее эффективное использование знаний первого и второго видов. Квалификация эксперта определяется наличием таких знаний.

По экспрессивности знания, на основе которых производится оценка РХ оборудования АЭС, можно классифицировать как поверхностные и глубинные. Поверхностные знания имеют форму простых эмпирических ассоциаций. Иногда достаточно приближенного заключения (например, без применения сложных диагностических методов для определения состояния материала оборудования), чтобы идентифицировать состояние экземпляра оборудования и определить необходимый ремонт. Такой подход обоснован для хорошо изученных аспектов предметной области.

Глубинные (каузальные) знания, существующие в виде различных моделей, категорий и абстракций, позволяют отразить взаимосвязь между исходными параметрами

(например, между эксплуатационными данными и остаточным ресурсом оборудования). Например, инфологическая модель (ИЛМ) предметной области (рис. 1), графовая модель состояний и переходов полумарковских процессов восстановления оборудования АЭС (рис. 2).

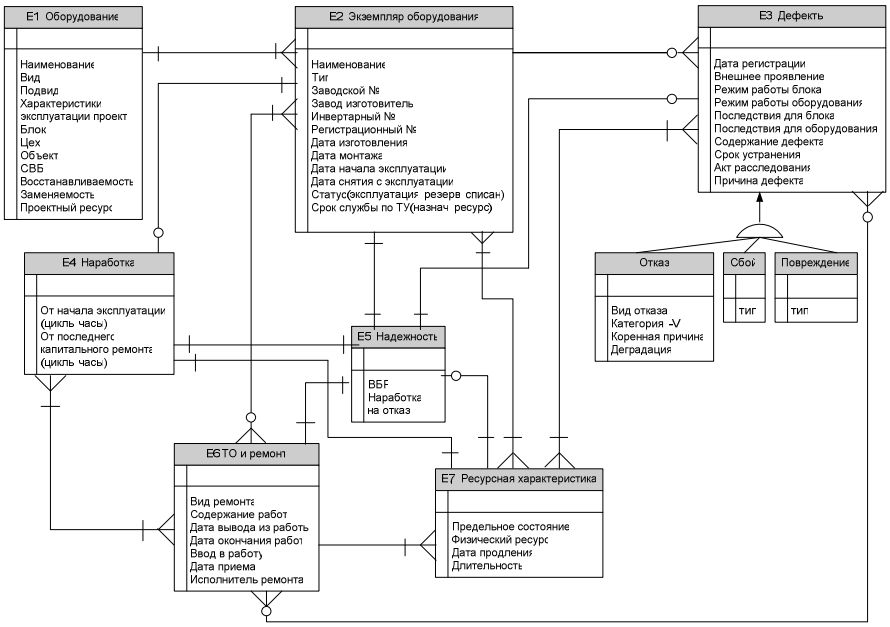
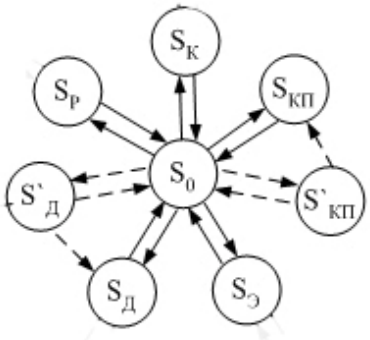


Рис.1. Инфологическая модель предметной области для оценивания ресурсных характеристик оборудования АЭС



S_O – начальное состояние объекта;
S_K – состояние после конструктивного отказа внезапного;
S_P – состояние после ресурсного отказа;
Sд – состояние после деградационного отказа выявленного;
S'д – состояние после деградационного отказа невыявленного;
Sкп – состояние после конструктивного отказа параметрического

Рис.2. Граф состояний и переходов полумарковских процессов восстановления оборудования АЭС

Уровень квалификации и компетентности экспертов, таким образом, определяется наличием не только адекватных, релевантных, актуальных, достоверных декларативных знаний в данной предметной области, но и наличием процедурных, управляющих, каузальных знаний.

Анализ используемых на сегодняшний день методик [7] показал, что для решения задачи оценивания и прогнозирования остаточного ресурса оборудования АЭС используются большей частью только декларативные знания, поэтому необходимо получение процедурных и каузальных знаний в виде адекватных моделей, категорий и абстракций, формализация процедурных знаний на основе декларативных знаний и разработка на их основе нормативных документов для оценивания РХ оборудования АЭС.

Структурная модель знаний экспертов о ресурсоспособности оборудования с использованием понятия гомоморфизма. С точки зрения структурно-функционального анализа поле знаний экспертов об объектах предметной области можно стратифициро-

вать, то есть рассматривать, на различных уровнях абстракции понятий. Страта – термин, который характеризует уровень описания или абстрагирования. Иерархическая структура объекта, соответствующая понятию страта, предполагает, что свойства реального сложного объекта описаны в форме некоторой совокупности, в которой отдельные описания приведены с различных точек зрения и упорядочены по уровню их значимости. Тоесть поле знаний представляет собой стратифицированную иерархическую систему. В структурной модели знаний экспертов об объектах предметной области каждый следующий уровень служит для восхождения на новую ступень обобщения и углубления знаний в предметной области. Таким образом, возможно наличие нескольких уровней понятийной структуры S_k. Представляется целесообразным связать их с уровнем конкурентных преимуществ экспертов [4] – компетентностью, профессиональным опытом. Естественно, что и стратегии принятия решений о продлении срока эксплуатации оборудования энергоблоков экспертами, то есть функциональные структуры S_f на различных уровнях будут существенно отличаться.

Если попытаться дать математическую интерпретацию уровней структурной модели знаний экспертов о ресурсоспособности оборудования $U = (U_1, U_2, U_3, ..., U_n)$, то наиболее прозрачным является понятие гомоморфизма — отображения некоторой системы E, сохраняющего основные операции и основные отношения этой системы. Пусть

$$E = \left(E_1, (o_i : i \in I), (r_j : j \in J)\right) \quad -$$

некоторая система с основными понятиями $o_i, i \in I$ и основными отношениями $r_j;\ j \in J$. Гомоморфизмом системы E в однотипную ей систему E':

$$E' = \left(E_1', (o_i' : i \in I), (r_j' : j \in J)\right),$$

называется отображение

$$\Phi : E \to E',$$

удовлетворяющее следующим двум условиям:

$$\Phi(o_i, (e_1, ... e_m)) = o_i'(\Phi(e_1), ... \Phi(e_m));$$

$$(e_1, ... e_m) \in r_j \to (\Phi(e_1), ... \Phi(e_m)) \in r_j'$$

для всех элементов $e_1, ... e_m$ из E и всех $i \in I, j \in J$.

Согласно введенным обозначениям уровни структурной модели знаний экспертов есть гомоморфизмы моделей (то есть понятий и отношений) предметной области

$$\Phi : M \Rightarrow M',$$

где $M = (A, R, S);\ M' = (A', R', S'),$ A' мета-понятия, или понятия более высокого уровня абстракции; $\mathbf{R}'$ – мета-отношения; $\mathbf{S}'$ – мета-стратегии принятия решений (о продлении ресурса оборудования АЭС). Так, для предметной области оценивания ресурсных характеристик оборудования понятиями являются сущности инфологической модели предметной области на рис. 1 (отказ, ресурсная характеристика, экземпляр оборудования) и др., отношениями – связи ИЛМ, стратегией – метод экспертного оценивания ресурсных характеристик [1].

Восходя по ступеням структурной модели, получаем систему гомоморфизмов. Уровни структурной модели знаний экспертов о ресурсоспособности оборудования $U = (U_1, U_2, U_3, ..., U_n)$, соответствуют уровню компетентности экспертов в данной предметной области.

Результат проведенного экспертного оценивания зависит от квалификации и компетентности эксперта, что в конце концов влияет на степень достоверности данного про-

гноза. Поэтому значение РХ, предлагаемое экспертом, нужно корректировать показателем компетентности эксперта [5; 8; 9], который можно определить из показателей творческой активности и научной квалификации (табл. 1).

Таблица 1

Значение показателей творческой активности и научной квалификации эксперта

Показатели	*Удельный вес показателей*
Творческая активность	
Публикации	0,15
Участие в симпозиумах, конференциях, семинарах (международных, республиканских, отраслевых) институтских)	0,15
Наличие изобретений (внедренных, авторских свидетельств, заявок)	0,1
Научная квалификация	
Ученая степень	0,08
Должность	0,07
Стаж работы	0,05
Показатели компетентности (высокая, средняя, низкая)	0,25
Оценка компетентности эксперта заместителем директора по научной работе	0,15

Значение экспертной оценки РХ, скорректированное показателем компетентности эксперта, можно представить в виде:

$$O_e = O_{ec} * a ,$$

где O_{ec} – значение экспертной оценки РХ;

а – показатель компетентности эксперта:

$$a = \sum_{i=1}^{8} a_i ,$$

где a_i - значение показателей творческой активности и квалификации (табл. 1).

В дальнейшем необходимо провести исследования, связанные с нормированием уровней компетентности экспертов.

Выводы. Системный анализ и классификация экспертных знаний о ресурсоспособности оборудования АЭС, используемых на сегодняшний день на АЭС методик показал, что для решения задачи оценивания и прогнозирования остаточного ресурса оборудования АЭС используются большей частью только декларативные знания, поэтому необходимо получение глубинных знаний в виде адекватных моделей, категорий и абстракций, формализация процедурных знаний на основе декларативных знаний и разработка на их основе нормативных документов для оценивания РХ оборудования АЭС.

Предложена математическая интерпретация уровней структурной модели знаний экспертов о ресурсоспособности оборудования АЭС в виде системы гомоморфизмов.

Оценку РХ, данную экспертом, необходимо корректировать показателем компетентности эксперта, который определяется показателями творческой активности и научной квалификации, а также наличием не только декларативных, но и процедурных, управляющих и каузальных знаний.

В дальнейшем необходимо провести исследования, связанные с нормированием уровней компетентности экспертов.

Список использованных источников

1. Маловик К. Н. Метод экспертной оценки ресурсных характеристик изделий / К. Н. Маловик // Нові технології. Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій та управління. – 2011. – № 3 (33). – С. 19-30.

2. Маловик К. Н. Інфологічне моделювання предметної області для оцінювання ресурсних характеристик обладнання АЕС / К. Н. Маловик // Відбір та обробка інформації. – 2012. – № 36 (112). – С. 110-115.

3. Василевич Л. Ф. Оцінка компетентності експертів на основі нечіткого відношення переваги / Л. Ф. Василевич, К. М. Маловік // Вісник інженерної академії України. – Вінниця, 2011. – № 2. – С. 67-72.

4. Лапа М. В. Конкурентоспроможність персоналу: навчально-методичний посібник / М. В. Лапа. – Чернігів: ЦППК працівників органів держ. влади, органів місцевого самоврядування, держ. підприємств, установ і організацій, 2009. – 46 с.

5. Ковальчук Т. Г. Особливості реалізації інтелектуальної власності в економіці України: дис. … канд. екон. наук: 08.01.01 / Т. Г. Ковальчук. – К., 2003. – 207 с.

6. Гаврилова Т. А. Базы знаний интеллектуальных систем / Т. А. Гаврилова, В. Ф. Хорошевский. – СПб.: Питер, 2000. – 384 с.

7. Маловик К. Н. Системное исследование ресурсных характеристик компонентов энергоблоков АЭС / К. Н. Маловик // Сборник научных трудов СНУЯЭиП. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2011. – № 4. – С. 40-51.

8. Мікульонок І. О. Основи інтелектуальної власності / І. О. Мікульонок. – К.: Політехніка НТУУ “КПІ “, 2005. – 230 с.

9. Лапа М. В. Основи інтелектуальної власності: навчальний посібник / М. В. Лапа. – Севастополь: СНУЯЕтаП, 2008. – 96 с.

УДК 620.197

Н.В. Мищенко, канд. техн. наук
Черниговский государственный институт экономики и управления, г. Чернигов, Украина

О.И. Сизая, д-р техн. наук
Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

А.Н. Мищенко, студент
Черниговский государственный институт экономики и управления, г. Чернигов, Украина

С.С. Зенченко, студент
Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОДДЕРЖАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И УРОВНЯ ЭЛЕКТРОЛИТА АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

Предложено систему поддержания температуры электролита для свинцово-кислотных аккумуляторных батарей в рекомендованных заводом-изготовителем пределах с целью уменьшения коррозии решёток пластин аккумуляторов.

Ключевые слова: *свинцово-кислотные аккумуляторные батареи; фотоэлектрические установки; температура электролита; коррозия.*

Запропоновано систему підтримання температури електроліту для свинцево-кислотних акумуляторних батарей у рекомендованих заводом-виробником межах з метою зменшення корозії решіток пластин акумуляторів.

Ключові слова: *свинцево-кислотні акумуляторні батареї; фотоелектричні установки; температура електроліту; корозія.*

The system of electrolyte temperature support for the lead-acid storage batteries in recommended manufacturer limits with the aim of corrosion reduction of the lattice plates of accumulators is suggested.

Key words: *lead-acid storage batteries, photoelectrical installations, electrolyte temperature, corrosion.*

Постановка проблемы. Постоянное увеличение стоимости электроэнергии заставляет искать пути оптимизации её потребления. Одним из направлений уменьшения затрат на электроэнергию может быть применение альтернативных источников энергии совместно с существующими энергосетями, а именно – применение фотоэлектрических установок. Существенное влияние на стоимость и надёжность работы автономных фотоэлектрических установок оказывают аккумуляторные батареи.

Анализ исследований и публикаций. Свинцово-кислотные аккумуляторные батареи на сегодняшний день остаются самыми надёжными, долговечными и не требую-

щими высоких эксплуатационных затрат химическими источниками тока. Они имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с другими источниками тока [1]:

- дешевизна и простота производства
- отработанная технология обслуживания;
- малый саморазряд.

К недостаткам свинцово-кислотных батарей можно отнести:

- большая трудоёмкость обслуживания;
- не допускается хранение в разряженном состоянии;
- допустимо ограниченное количество циклов полного разряда;
- кислотный электролит и свинец оказывают вредное влияние на окружающую среду;
- коррозия решёток пластин аккумуляторов.

Свинцово-кислотные аккумуляторные батареи с жидким электролитом нуждаются в обслуживании, что ограничивает их применение в автономных фотоэлектрических станциях, поэтому автоматизация процесса обслуживания – необходимое условие.

Важный параметр при эксплуатации аккумуляторных батарей с жидким электролитом – поддержание температуры и уровня электролита аккумуляторных батарей в заданных пределах. Чем выше температура электролита, тем сильнее корродируют решётки пластин аккумуляторных батарей. За год эксплуатации при температуре электролита +49 °С и напряжении заряда 14 В решётки аккумуляторных батарей полностью уничтожаются коррозией. При эксплуатации аккумуляторных батарей с температурой электролита +70 °С срок их службы сокращается до нескольких месяцев.

Цель работы. Цель данной работы – автоматизация обеспечения необходимого температурного режима и заданного уровня электролита при работе аккумуляторных батарей.

Изложение основного материала исследований. В результате проведенных исследований разработана схема (рис. 1) для поддержания рекомендованной заводом-изготовителем температуры электролита [2].

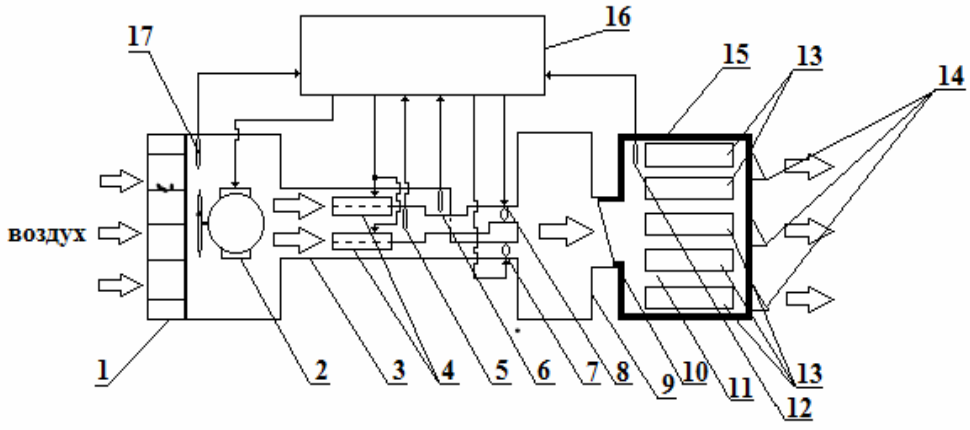


Рис. 1. Система поддержания температуры электролита в аккумуляторных батареях

Воздух из окружающей среды через воздухозаборник 1 при помощи вентилятора 2 направляется по воздуховоду 3 к термоэлектрическим модулям 4, которые работают по принципу термоэлектрического эффекта – если пропустить электрический ток через спай двух специально подобранных материалов, например, висмут, сурьма или индий, то один из них нагревается, другой охлаждается. На основании этого явления создан термоэлектрический модуль, у которого при пропускании тока одна сторона нагревается до температуры выше атмосферной, другая сторона охлаждается – ниже атмосферной. Таким образом, от термоэлектрического модуля с одной стороны отбирают тепло, а с другой стороны – холод [3].

После термоэлектрических модулей воздушный поток разделяется на горячий и холодный и направляется к заслонкам горячего воздуха 7 и холодного воздуха 8. Далее, в смесителе 9, холодный и горячий воздух смешиваются, температура воздуха в смесителе должна соответствовать оптимальной температуре электролита аккумуляторных батарей. Минуя обратный клапан 10, воздух попадает в отсек 11, в котором находятся аккумуляторные батареи 13. Когда температура воздуха в отсеке аккумуляторных батарей достигнет заданного значения, поступает соответствующий сигнал с датчика температуры 12 в микропроцессор 16. Излишки воздуха через обратные клапана 14 удаляются в атмосферу. Для того, чтобы температура в отсеке аккумуляторных батарей не изменялась длительное время – отсек аккумуляторных батарей имеет термоизоляцию 15.

Температура атмосферного воздуха измеряется при помощи датчика температуры 17, температура горячего воздуха измеряется при помощи датчика температуры 6, температура холодного воздуха измеряется при помощи датчика температуры 5. Сигналы со всех датчиков температуры направляются в микропроцессор, где анализируются и вырабатываются управляющие сигналы на заслонки горячего и холодного воздуха. В зависимости от угла открытия заслонок изменяется температура воздуха поступающего в отсек аккумуляторных батарей, поддерживая необходимый температурный режим электролита.

Другим важным параметром при эксплуатации свинцово-кислотных аккумуляторных батарей с жидким электролитом является поддержание уровня электролита в установленных пределах. При эксплуатации аккумуляторных батарей из электролита испаряется вода и, следовательно, увеличивается плотность электролита. Это способствует быстрому выводу аккумуляторной батареи из строя за счёт увеличения скорости коррозии решёток пластин аккумуляторов.

Также при снижении уровня электролита ниже нормы оголяются и начинают контактировать с воздухом положительные и отрицательные пластины аккумуляторов, что приводит к их сульфатации и, как следствие, уменьшению ёмкости, что также крайне нежелательно.

Уровень электролита можно поддерживать в установленных пределах, применив автоматическую систему, схема которой изображена на рисунке 2 [4].

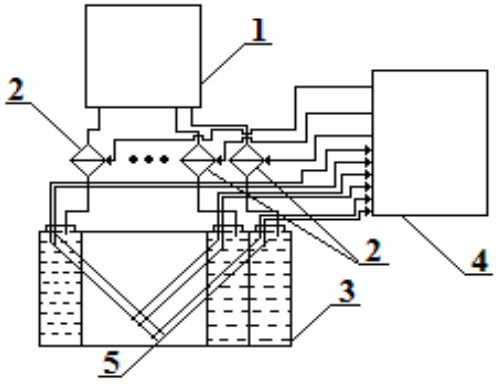


Рис. 2. Система поддержания уровня электролита в свинцово-кислотных аккумуляторных батареях

Система работает в следующем порядке: бак с дистиллированной водой 1 соединён через трубопроводы с запорными клапанами 2, которые в свою очередь соединены с аккумуляторной батареей 3. Запорные электромагнитные клапаны автоматически открываются при прохождении управляющего импульса, вырабатываемого контроллером 4, и закрываются – при отсутствии управляющего импульса. Контроллер получает соответствующие информационные сигналы от датчиков 5, которые контролируют уровень электролита в каждом аккумуляторе. Датчики вмонтированы в горловине аккумулятора, рядом с трубо-

проводом для подачи дистиллированной воды и конструктивно представляют собой две пластины, размещённые на разных уровнях. При максимальном уровне электролита в аккумуляторе обе пластины датчиков электрически, через электролит связаны и сигнал поступает в контроллер с обеих пластин. В контроллере сигнал обрабатывается и управляющий импульс отключается от запорного клапана, что приводит к его закрытию и, следовательно, прекращается поступление дистиллированной воды. При снижении уровня электролита сигнал поступает в контроллер только с одной пластины, что соответствует уровню электролита в пределах нормы, управляющий импульс с контроллера к запорному клапану не поступает. Если уровень электролита продолжает снижаться и обе пластины окажутся не покрытыми электролитом, то в контроллер не будут поступать сигналы. Контроллер выработает управляющий импульс на открытие запорного клапана, который будет открытым до тех пор, пока уровень электролита не повысится до максимального значения. При помощи такой системы автоматически поддерживается требуемый уровень электролита во всех аккумуляторах, что исключает технические обслуживания аккумуляторных батарей, связанные с поддержанием уровня электролита в пределах нормы.

Выводы. Применение разработанных схем для обеспечения температуры и уровня электролита в рекомендованных заводом-изготовителем пределах позволяет продлить срок эксплуатации аккумуляторных батарей за счет снижения коррозионного износа решёток пластин аккумуляторов.

Список использованных источников

1. Солнечная энергосистема. Расчёт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: Solarwind.net.ua
2. Міщенко М.В. Патент України на корисну модель № 60866.
3. Будкин А. «Кондишенленд» в Гагарине / А. Будкин, М. Колодочкин // За рулём. – 1999. – № 6. – С. 52,53.
4. Міщенко М.В. Патент України на корисну модель № 60865.

УДК 621.3.05

А.Л. Приступа, канд. техн. наук
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ БЕЗКОНТАКТНОЇ ПІДЗАРЯДКИ АКУМУЛЯТОРІВ ПОРТАТИВНИХ ПОБУТОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПРИСТРОЇВ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕСЛІВСЬКИХ ПРОЦЕСІВ

Приведені результати експериментальних досліджень теслівських процесів щодо бездротової передачі енергії для підзарядки акумуляторів портативних побутових електричних пристроїв. Показано, що відхилення результатів математичного моделювання від експериментальних не перевищує 5 % у робочому діапазоні. Виділено напрями подальших досліджень щодо створення ефективних систем безконтактної підзарядки акумуляторів портативних побутових електричних пристроїв.

Приведены результаты экспериментальных исследований тесловских процессов при беспроводной передаче энергии для подзарядки аккумуляторов портативных бытовых электрических устройств. Показано, что отклонение результатов математического моделирования от экспериментальных не превышает 5 % в рабочем диапазоне. Выделены направления дальнейших исследований для создания эффективных систем бесконтактной подзарядки аккумуляторов портативных бытовых электрических устройств.

The results of experimental researches of Tesla processes at wireless transmission of energy to recharge the batteries of portable electric devices. It is shown that the deviation of the results of mathematical modeling of the experimental does not exceed 5 % of the operating range. Identified areas for further research to establish effective contactless recharging the batteries of portable electric devices.

Для перевірки справедливості теорії теслівських процесів щодо бездротової передачі енергії, коли відстань, на яку здійснюється передача енергії, має один порядок з відстанню між передавальними антенами та можливості використання таких схем для підзарядки акумуляторів портативних побутових електричних пристроїв був проведений

ряд експериментів. Експериментальна установка для зняття відповідних характеристик наведена на рисунку 1. Детальний опис експериментальної установки представлено в [1; 2] але щодо дослідів по бездротовій передачі енергії для підзарядки акумуляторів портативних побутових електричних пристроїв, установка має такі особливості.

Як передавальні і приймальні антени використовувались стрічкові провідники. Використання стрічкових передавальних антен, на відміну від дротових, дозволяє збільшити часткові ємності між передавальними та приймальними антенами, а отже, і струм навантаження. Слід зазначити, що обмеженням на розміри приймальних антен будуть служити геометричні розміри портативних побутових електричних пристроїв, для яких здійснюється підзарядка акумуляторів за допомогою теслівських процесів.

В експерименті передавальні та приймальні антени були виготовлені з фольгованого стеклотекстоліту та додатково ізольовані шаром поліетилену. Надалі необхідно більшу увагу приділяти вибору оптимального матеріалу для ізоляції антен, щоб не допускати пробій під час наближення антен на неприпустимо малу відстань, або під час різкого збільшення напруги внаслідок резонансу. Крім того, використання як ізолюючих матеріалів діелектриків з високою відносною діелектричною проникністю дозволяє значно збільшити величину струму навантаження. Тому окремим важливим завданням під час розроблення пристроїв безконтактної підзарядки акумуляторів портативних побутових електричних пристроїв є знаходження оптимальної товщини ізоляції передавальних і приймальних антен, при якій можна буде одержати максимальний струм.

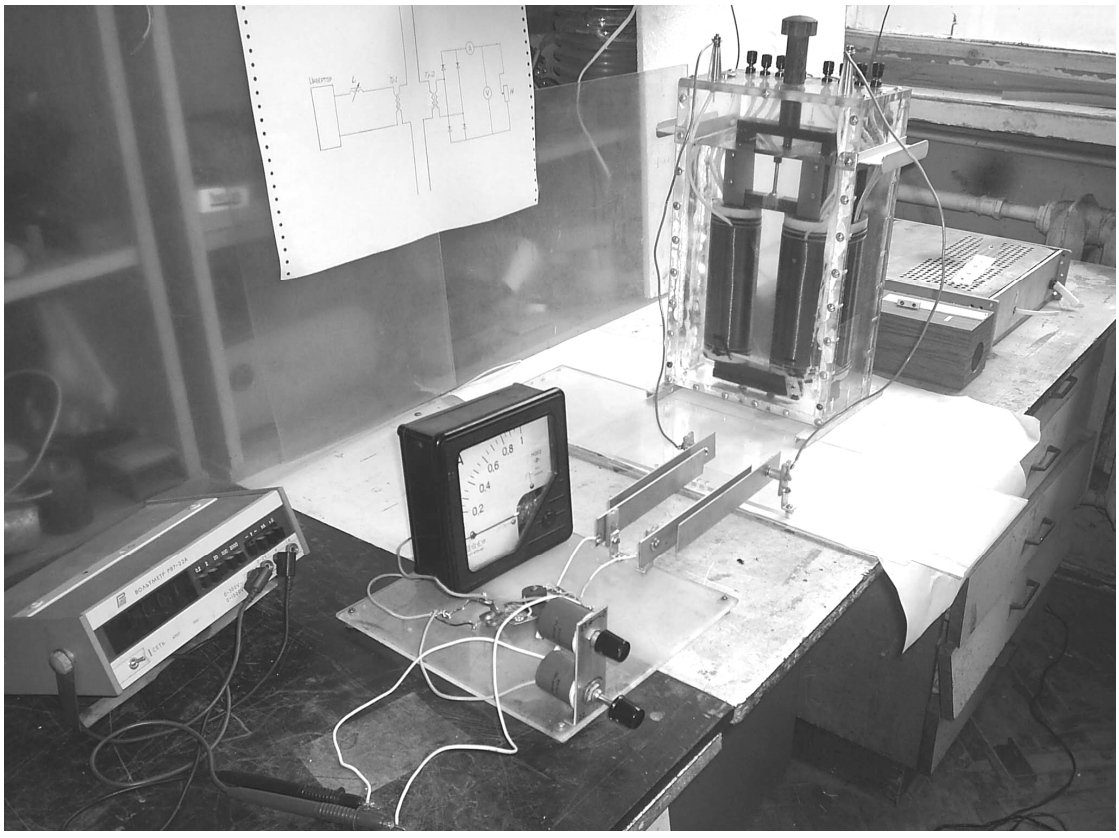
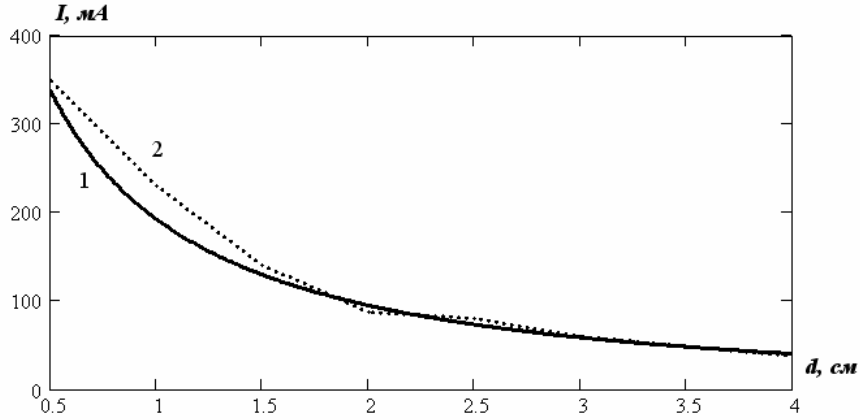


Рис. 1. Експериментальна установка для зняття характеристик теслівських процесів при безконтактній підзарядці акумуляторів портативних побутових електричних пристроїв

У ході експериментів були зняті залежності струму навантаження від відстані між передавальними й приймальними антенами, результати наведені на рисунку 2. Експериментальні характеристики були отримані для таких вихідних даних: напруга інвертора 150 В, величина резонансної індуктивності 250 мкГн, відстань між приймальними

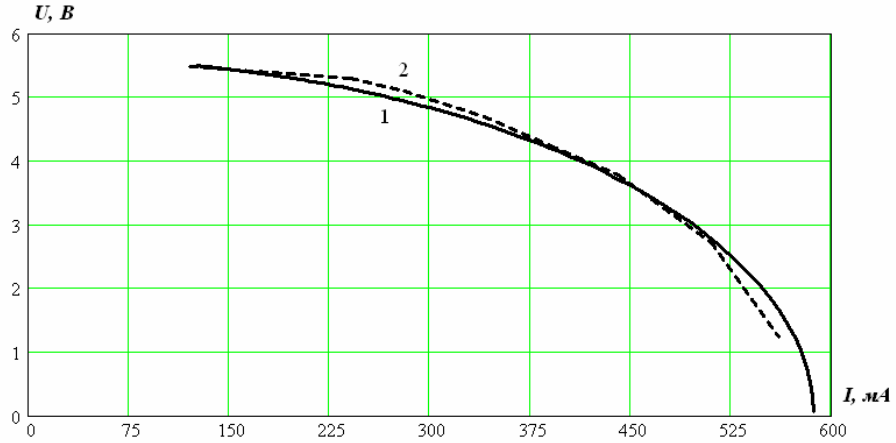
антенами 4,5 см, довжина передавальних (приймальних) антен 15 см, ширина антен 1 см, опір навантаження 22 Ом.



1 - теоретична крива струму; 2 - експериментальна крива струму
Рис. 2. Зміна струму навантаження від відстані між передавальними та приймальними антенами

З отриманої характеристики можна зробити висновок, що на відстанях до 1 см при даних початкових умовах можна передавати струм, достатній для ефективної підзарядки акумуляторів портативних електротехнічних пристроїв (наприклад, середній струм для підзарядки акумуляторів мобільних телефонів 350 мА). Для збільшення переданої потужності необхідно збільшувати напругу джерела, що не сильно відіб'ється на розмірах передавальної частини, однак при цьому необхідно особливу увагу приділяти ізоляції пристроїв, щоб запобігти виникненню пробою. Крім того, якщо використати як ізоляційний матеріал діелектрики з великою відносною діелектричною проникністю, то можна домогтися значного збільшення переданого в навантаження струму й без підвищення напруги джерела. На жаль, через відсутність різних діелектричних матеріалів такі експерименти не були поки здійснені, але навіть внесення в простір між передавальними й приймальними антенами пластини оргскла з ε = 5 призводило до збільшення переданої потужності, що свідчить про справедливість такого припущення. Тому створення матеріалів з високою відносною діелектричною проникністю й діелектричною міцністю дозволить значно збільшити ефективність безконтактної підзарядки акумуляторів портативних електротехнічних приладів за допомогою теслівських процесів.

Експериментально знята вольтамперна характеристика процесу безконтактної підзарядки акумуляторів представлена на рисунку 3.



1 - теоретична ВАХ; 2 - експериментальна крива
Рис. 3. Експериментальна ВАХ

При побудові вольтамперної характеристики досліджувалася ділянка ВАХ, що відповідає найпоширенішим режимним параметрам зарядки акумуляторів (струм 400 мА, напруга 4 В).

Експериментальна крива дає гарний збіг з теоретичною. Експериментальна вольтамперна характеристика процесу бездротової передачі енергії за допомогою теслівських процесів підходить для здійснення підзарядки акумуляторів. Збільшення (зменшення) переданої потужності при певній відстані між передавальними й приймальними антенами може бути досягнуто зміною резонансної індуктивності (рис. 4) або зміною параметрів джерела [3; 4].

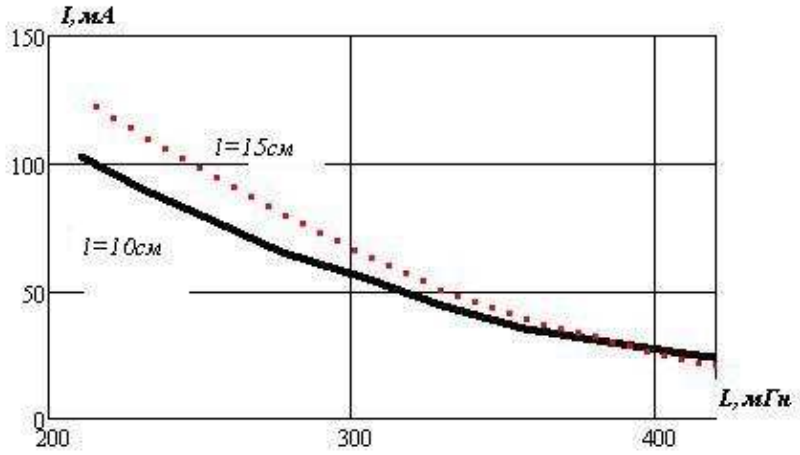


Рис. 4. Зміна струму навантаження від резонансної індуктивності

Під час підзарядки акумуляторів портативних електротехнічних приладів геометричні розміри приймальних антен мають велике значення. Тому важливо дослідити вплив геометричних розмірів антен на передану потужність. На рисунку 5 представлені експериментальні залежності зміни переданого струму від довжини антен.

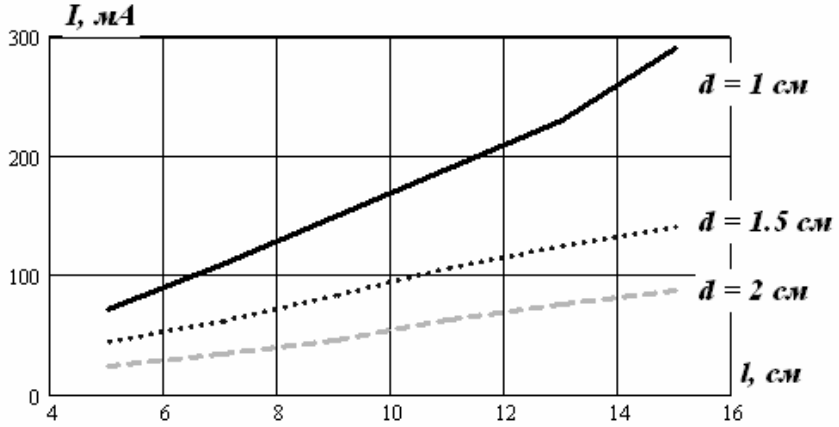


Рис. 5. Зміна струму навантаження від довжини антен

Максимальний розмір антен буде визначатися габаритами корпуса електротехнічного приладу. Для мініатюрних приладів довжина приймальних антен може виявитися недостатньою для ефективного процесу підзарядки акумулятора. Тому для збільшення переданої потужності необхідно використати один з перерахованих вище способів.

На закінчення експериментів, була здійснена підзарядка мобільного телефону Motorola без проводів за допомогою теслівських процесів (рис. 6). При підзарядці акумулятора відстань між антенами була 1 см, довжина приймальних антен – 10 см, зарядний струм 350 мА. Передача здійснювалася струмами зсуву при частоті 62 кГц і напрузі інвертора 150 В.



Рис. 6. Безконтактна підзарядка акумулятора мобільного телефону

Подальший розвиток теорії теслівських процесів для безконтактної підзарядки акумуляторів портативних електротехнічних приладів вимагає більш глибоких досліджень із залученням додаткових матеріально-технічних ресурсів.

Висновки

1. Експериментально показана можливість здійснення безконтактної підзарядки акумуляторів портативних побутових електричних пристроїв.

2. Експериментально підтверджено справедливість теоретичних положень теорії теслівських процесів щодо бездротової передачі енергії для безконтактної підзарядки акумуляторів портативних побутових електричних пристроїв. Розбіжність між експериментальними та теоретичними результатами в робочому діапазоні не перевищує 5 %.

3. Виділено напрями подальших досліджень щодо створення ефективних систем безконтактної підзарядки акумуляторів портативних побутових електричних пристроїв.

Список використаних джерел

1. Пентегов І. В. Експериментальна установка для дослідження теслівських процесів при безконтактній зарядці акумуляторів / І. В. Пентегов, А. Л. Приступа // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія “Технічяні науки”: наук. зб. – Чернігів: ЧДТУ, 2012. – № 1(55). – С. 233-239.

2. Пат. України на корисну модель. МПК A61N1/362, H04B10/10. Пристрій для безконтактної підзарядки акумуляторів імплантованих електростимуляторів / Пентегов І. В., Волков І. В., Приступа А. Л., Шейковський Д. О., Стемковський Є. П. – № 31659; заявл. 03.03.06; опубл. 25.04.08, Бюл. № 8. – 4 с.

3. Пентегов И. В. К расчету тесловских процессов при беспроводной передаче энергии / И. В. Пентегов, И. В. Волков, А. Л. Приступа // Електротехніка і електромеханіка. – 2007. – № 2. – С. 70-73.

4. Пентегов И. В. Применение тесловских процессов для бесконтактного заряда аккумуляторов бытовых электрических устройств / И. В. Пентегов, И. В. Волков, А. Л. Приступа // Технічна електродинаміка. Тем. вип. „Проблеми сучасної електротехніки”. – 2006. – Ч. 2. – С. 16-21.

РОЗДІЛ VII. ТЕХНОЛОГІЇ ЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА

УДК 621.6

А.Н. Шелковой, д-р техн. наук
А.Р. Рузметов, инженер
М.Е. Свидзинская, ведущий инженер
Д.В. Феденюк, инженер
Национальный технический институт «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина

ОПТИМИЗАЦИЯ МАРШРУТА ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РАБОЧЕГО В ХОДЕ ВЫПОЛНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ

В статье описана модель формирования траектории перемещения рабочего в ходе выполнения технологической операции. Описана методика ее реализации.

Ключевые слова: *технологический процесс, имитационная модель, траектория перемещения человека, нормирование.*

У статті описана модель формування траєкторії переміщення робітника в ході виконання технологічної операції. Описана методика її реалізації.

Ключові слова: *технологічний процес, імітаційна модель, траєкторія переміщення людини, нормування.*

In the article the model of forming of trajectory of moving of worker is described during implementation of technological operation. Methodology of her realization is described.

Key words: *technological process, simulation model, trajectory of moving of man, setting of norms.*

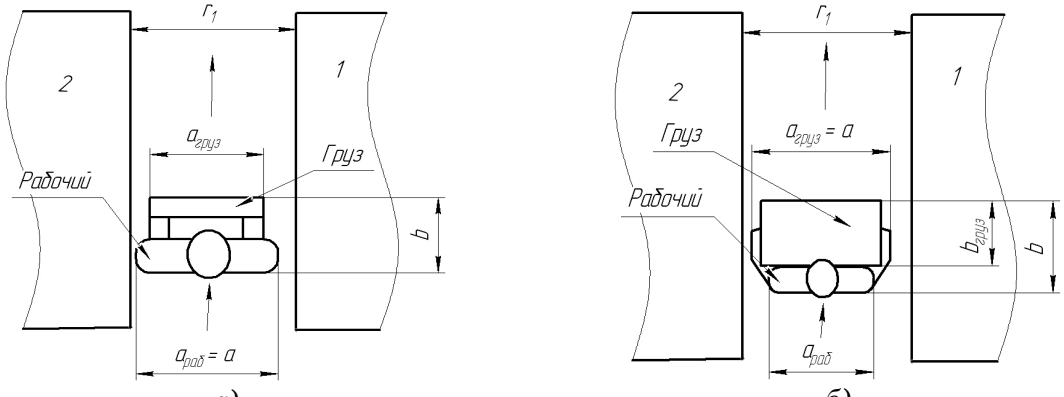
Анализ области исследования. При реализации технологического перехода значительная часть вспомогательного времени, времени организационного, технического обслуживания, особенно при многостаночном обслуживании, уходит на длинные пространственные перемещения с грузом и без него. В связи с этим, в качестве одного из основных критериев может выступать длина траектории перемещения (LTR). При этом, на вид траектории перемещения или, вообще, на возможность его реализации влияет перемещаемый габарит. Это может быть как габарит самого рабочего (антропометрические особенности), так и объединение габаритов рабочего и перемещаемого груза (технологической оснастки, деталей, тары и т. д.) Соответственно, перемещаемый груз может быть:

- Незначительный, когда $a_{груза} < a_{раб}$. В этом случае можно принять, что (рис. 1, *а*):

$$G = a_{раб} \le min(r_1) . \quad (1)$$

- Крупногабаритный $a_{груза} > a_{раб}$. В этом случае можно принять, что (рис. 1, *б*):

$$G = a_{раб} \cup (a_{груза} \times b_{груза}) = min(r_1) . \quad (2)$$



а) *б)*

Рис. 1. Положения человека в процессе транспортирования груза

- Длинномерный, когда $b_{груза} >> a_{раб}$, $G = a_{раб} \cup (a_{груза} \times b_{груза})$, но при этом соответствие между перемещаемым габаритом и минимально возможной пропускной спо-

собностью объектных массивов рабочего места (оборудование, стеллажи, производственная мебель и т. д.) имеет несколько более усложненную зависимость. В ней, в связи с ситуациями, проиллюстрированными на рис. 2, *а*, необходимо учесть как общие габаритные параметры (*G),* так и комплекс расстояний между преградами (1 и 2), т. е. с.

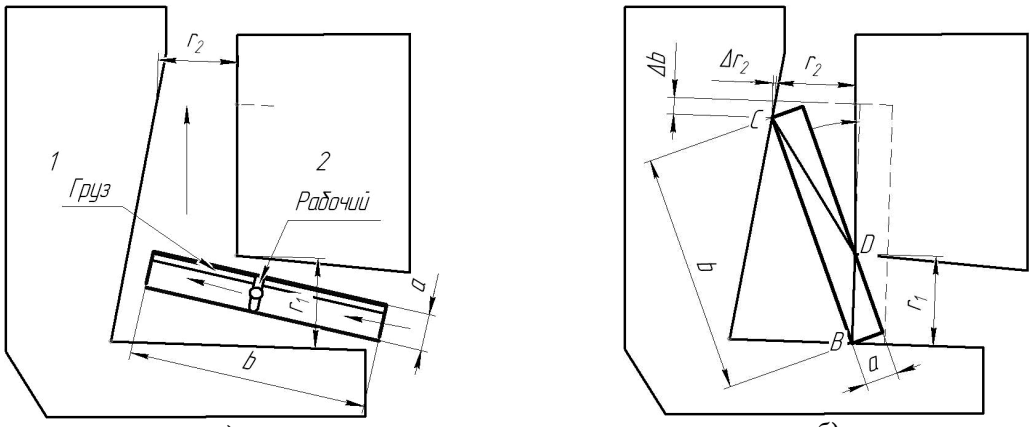
Раскрывая эту зависимость, нужно выявить некоторые геометрические закономерности характерные для подобных случаев, для чего более подробно рассмотрим схему продвижения габарита между преградами.

Постановка задачи исследования. В продвижении рабочего с грузом по пространственному коридору определяющей будет ситуация, изображенная на рис. 2, *б*, геометрический смысл которой заключен в соотношениях треугольника ΔBCD. Где сторона *BD* соответствует ширине коридора r_1, сторона *BC* – длине габарита b, а высота треугольника – ширине коридора r_2.

$$S = \frac{\min(r_2)}{2} \cdot \min(r_1) = \frac{b}{2} \cdot a\,. \tag{3}$$

Ширину коридора r_2 лучше учитывать в глубине, на длине равной *b*, потому как он может сужаться, что в радиусе поворота может привести к невозможности дальнейшего движения.

Первый критичный параметр r_1 обязательно должен быть больше *a*, т. е. $a \le min(r_1)$.



а) *б)*

Рис. 2. Модель пространственного перемещения человека

Т. к. $a \le min(r_1)$, то

$$\min(r_2) \ge \frac{b}{a \cdot \min(r_1)}; \tag{4}$$

Далее, следуя логике замещения меньшей величины:

$$\begin{cases} G \leftarrow \min(r_1) & \text{if } \min(r_1) \ge \min(r_2) \\ G \leftarrow \min(r_2) & \text{otherwise} \end{cases} \tag{5}$$

Для упрощения задачи поиска оптимального маршрута, на область поиска (на плане рабочего места) накладывается сетка, размер ячейки которой соответствует значению *G* (рис. 3, *а*).

Если множества ячеек, которые занимают объекты такого дискретного пространства расположены непосредственно, то они объединяются в единый массив ячеек – «склеиваются» (рис. 3, *б*), что позволяет сократить число объектов до минимально необходимого.

Математическая модель формирования маршрута перемещения человек в 2-х мерном пространстве.

Формализация элементов области решения. Множеством элементов, которые могут составить возможные маршруты является множество ячеек сети, которые не соответст-

вуют, специально помеченным, занятым областям. Как правило, это массивы, соответствующие прямым Брайзенхема [4] и фрагментам эквидистант.

Так как минимальным расстоянием до цели является прямая линия, то любое отклонение от неё снижает ценность выбранного маршрута. Если учитывать ещё и направление перемещения, то речь должна идти о целевом векторе: $\begin{pmatrix}\text{initial position (IP)}\\ \text{target position (TP)}\end{pmatrix}$. Наличие сквозных пересечений этим вектором эквидистант объектных массивов говорит о необходимости наличия отклонений в траектории перемещений (рис. 3, *в*).

Но, сама по себе, абсолютная величина максимального отклонения, далеко не во всех случаях, может быть достаточным критерием выбора лучшего маршрута, так как имеют место ситуации, когда области объектных массивов выходят за пределы проекций целевого вектора (рис. 3, *г*).

Поэтому, более целесообразным было бы ориентироваться на максимальную сумму длин сторон треугольника ($\Delta IT\,V_1TP$ или $\Delta IT\,V_2TP$), построенного на ячейках целевого вектора и максимального отклонения эквидистанты по выбранному, согласно критерия, направлению её обхода. На примере ситуации из рис. 3, *г*, для несложных контуров, очевиден выбор маршрута через ячейку V_1, а не V_2.

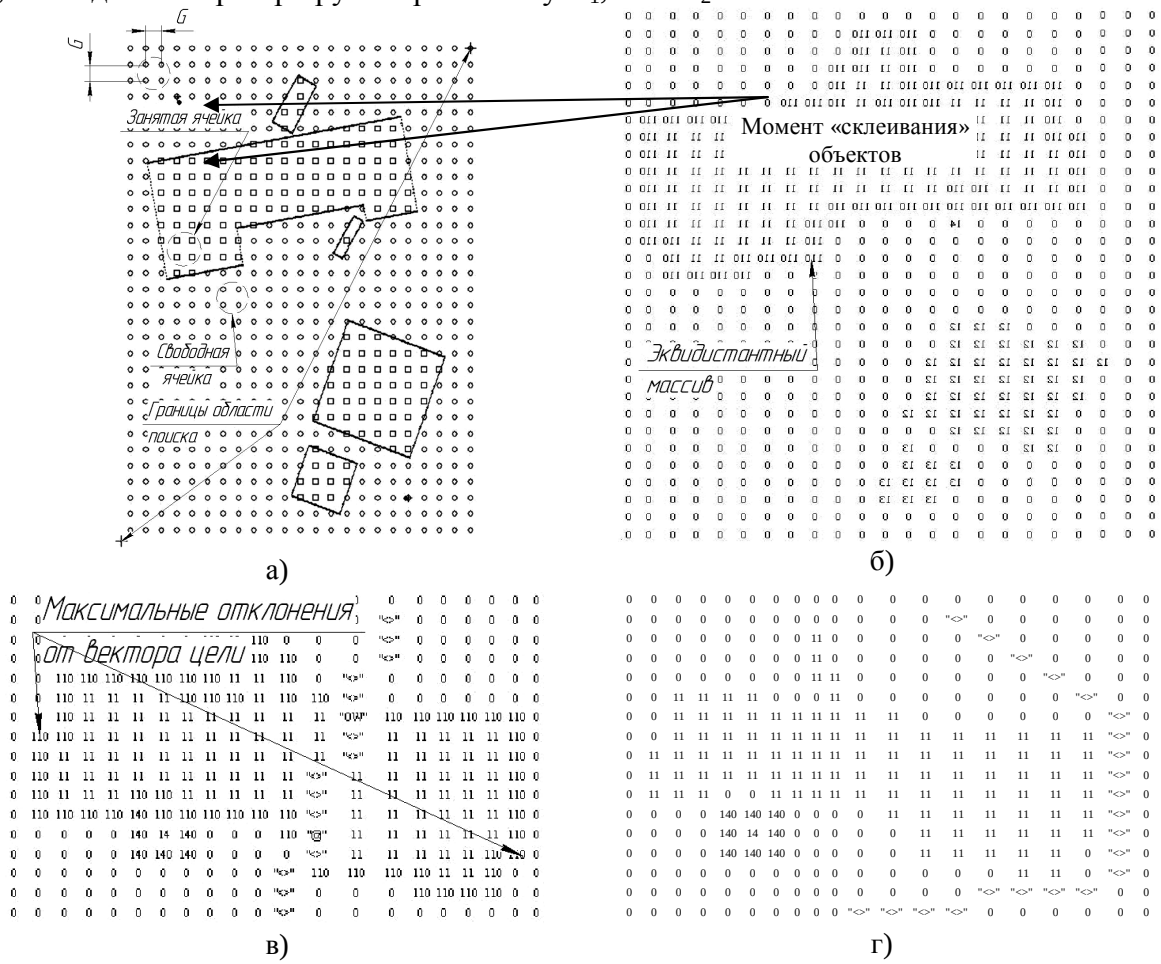
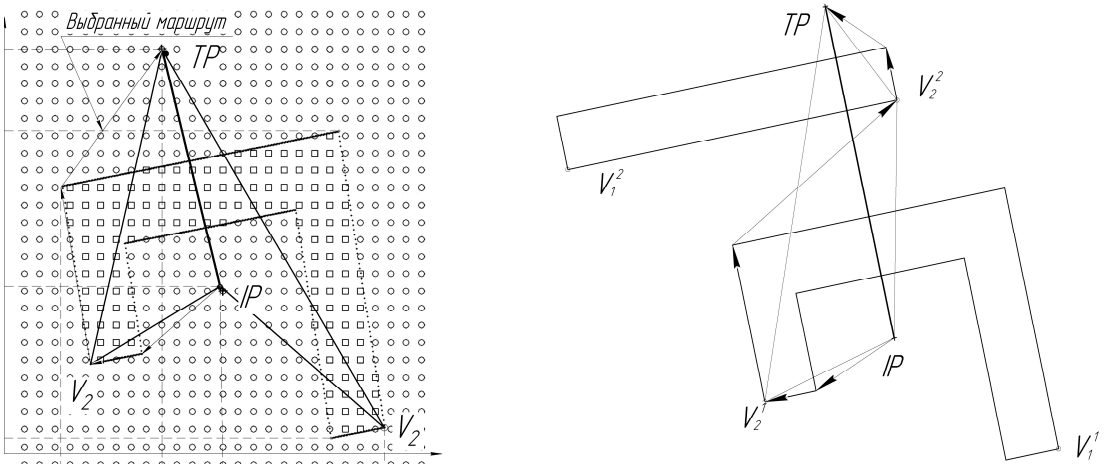


Рис. 3. Схема поля пространственного перемещения человека

В ситуациях, с числом контуров большим, чем 1, для определения приоритета того или иного варианта маршрута, предлагается использовать сумму расстояний между найденными, по выше указанному методу, ячейками эквидистант. Таким образом, если с одной стороны целевого вектора представлены большая по одному из контуров и ме-

ньшая по другому, то прямо противоположная ситуация с другой его стороны (рис. 4). При этом появляется возможность в противовес варианту маршрута 1: $\left(IP - V_2^1 - V_2^2 - TP\right)$, выбрать вариант 3: $\left(IP - V_1^1 - V_2^2 - TP\right)$.



а) б)

Рис. 4. Модели траекторий пространственного перемещения человека

Представление алгоритма оптимизации трассы перемещения человека. Использование данного метода требует постоянного пересмотра условий обхода контуров, так как однократное построение целевого вектора не может выдать всего набора препятствий, поэтому целевой вектор предлагается строить, как минимум, по достижении каждой выбранной ячейки.

Оперируемые объекты:

1. Матрица $MX\left(i = 0 \cdot\cdot \frac{|max Y - min Y|}{Gabaret};\ \ j = 0 \cdot\cdot \frac{|max X - min X|}{Gabaret}\right)$ дискретного пространства, включающая в себя обозначение занятых объектами областей (номерами, соответствующих их номеру в массиве объектов) и их дискретных эквидистант номерами: № объекта × 10.

2. Параметры целевого вектора $ZV = \begin{pmatrix} i_{IP} & j_{IP} \\ i_{TP} & j_{TP} \end{pmatrix}$, где *IP* и *TP* – индексы-обозначения начальной и целевой координат в дискретном пространстве соответственно

Средства:

1. Функция построения дискретной прямой (метод Брайзенхема) DLine(ZV,MX,0).
2. Функция определения координаты выхода из пересекаемой дискретной прямой области размещения объектов DLine(ZV,MX,1).
3. Функция обнаружения занятой области дискретной прямой DLine(ZV,MX,2).
4. Процедура P(MX,u) следования по дискретному контуру в определенном направлении (встроена в основную программу), u – идентификатор направления (u=0..1).
5. Определение суммы длин сторон треугольника Treg(MX,ZV,V), где $V=\left[\begin{pmatrix} V_1^{o1} \\ V_2^{o1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1^{o2} \\ V_2^{02} \end{pmatrix}\right]$, $\begin{pmatrix} V_1^{o1} \\ V_2^{o1} \end{pmatrix}$ – координаты ячейки, принадлежащей эквидистанте, o_1, o_2 – номер в списке объектов рабочего места.

Формат результата:

Линейный массив TR(i=0..n; j=0..1), где n – количество дискретных координат (i,j) построенной траектории.

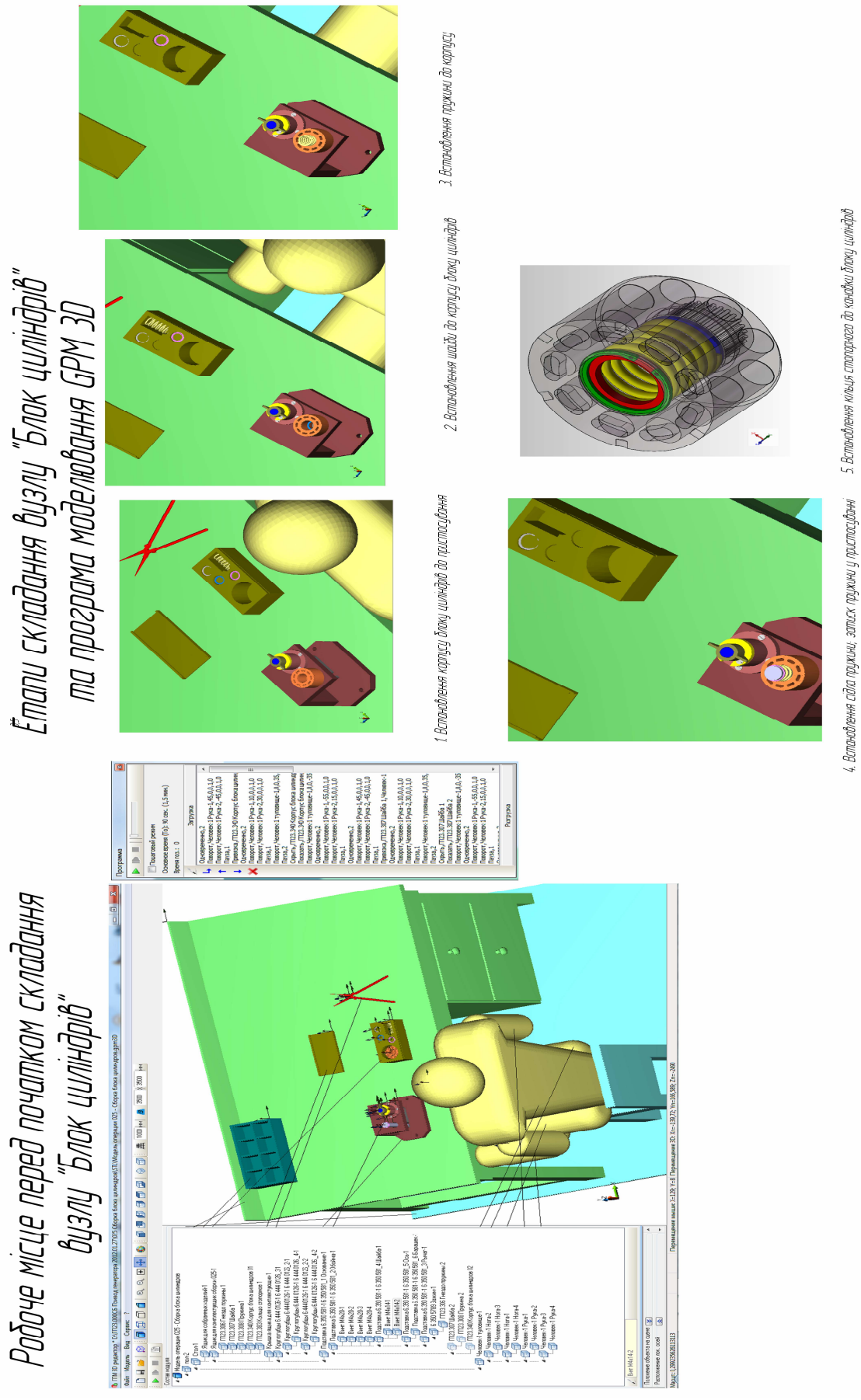


Рис. 5. Пример имитационного моделирование технологического процесса сборки узла «Блок цилиндров» в системе GPS 3D

Апробация метода в ряде условных рабочих сред.

Представленная выше модель реализована в виде программного комплекса имитационного 3D моделирования механосборочных систем “GPS 3D”.

Она позволяет:

– сформировать модель производственной систем различного уровня иерархии (от рабочего места до цеха);

– проанализировать основные параметры механосборочной системы: уровень загрузки, затраты энергии, материальные затраты;

– оценить эффективность эксплуатации производственной системы по параметрам производительности и себестоимости обработки;

– синтезировать различные организационные структуры производственной системы;

– нормировать технологические операции.

Выводы:

– как показал анализ производственного цикла, формирование траектории движения элементов модели реального объекта моделирования является наиболее сложным и трудоемким этапом ее подготовки;

– одним из путей решения этой проблемы является создание модели выбора оптимальной траектории движения объекта моделирования на основе учета опорных точек движения и габаритов движущегося объекта;

– сформирована модель точного определения минимальной траектории обхода массива объектов рабочего места (оборудования, производственной мебели, мест складирования и т. д.);

– в качестве реализации предложенного подхода разработана систем 3D моделирования механосборочного производства.

Список использованных источников

1. Шелковой А. Н. Конструкторско-технологическая подготовка обработки деталей типа «Кронштейн» на обрабатывающем центре VA 500 методами имитационного моделирования / А. Н. Шелковой, И. В. Ковалева // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут": збірка наукових праць. Тематичний випуск “Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ "ХПІ", 2011. – № 41. – С. 111-127.

2. Шелковой А. Н. Опыт инжиниринга высокоточной продукции / А. Н. Шелковой, В. А. Фадеев, Ю. Г. Гуцаленко // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. прац. Вип. 2. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2008. – С. 118-122.

УДК 331.45:621.791.75

Н.М. Денисова, канд. техн. наук
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ШЛЯХИ ЗНИЖЕННЯ ЗАБРУДНЕНОСТІ ПОВІТРЯ РОБОЧОЇ ЗОНИ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ДІЛЬНИЦЬ

На основі аналізу санітарно-гігієнічних умов праці зварників наведено комплекс сучасних рішень щодо зниження забрудненості повітря робочої зони, що полягає у використанні організаційно-технічних методів та засобів вентиляції.

Ключові слова: *забрудненість повітря робочої зони, зварювальні роботи, методи захисту працівників.*

На основании исследований санитарно-гигиенических условий труда приведен комплекс современных решений по снижению загрязненности воздуха рабочей зоны, который включает организационно-технические методы и средства общей и местной вентиляции.

Ключевые слова: *загрязненность воздуха рабочей зоны, сварочные работы, методы защиты работников.*

Based on the analysis of sanitary - hygienic conditions welders are complex modern solutions to reduce air pollution work area that is to use organizational - technical methods and means of ventilation.

Key words*: contamination of workplace air, welding, means to protect workers.*

Постановка проблеми. Одним із основних технологічних процесів у машинобудівній промисловості є електродугове зварювання та інші споріднені технології, що харак-

теризуються значною кількістю шкідливих та небезпечних виробничих факторів, що призводять до розвитку професійних захворювань робочих зварювальних професій. Незважаючи на існуючий досвід боротьби з цими небезпечними чинниками в комплексах працеохоронних заходів на підприємствах та наукових дослідженнях проблема повної локалізації шкідливих речовин на ділянках ручного дугового зварювання ще не вирішена та потребує комплексного рішення.

Аналіз досліджень та публікацій. Забрудненість повітря робочої зони при електродуговому процесі зварювання виникає внаслідок впливу на основний метал і матеріал електрода тепла дуги, плавлення та часткового випаровування. Пари матеріалів електрода і зварювальної ванни, що утворюються у високотемпературній зоні, виділяються в повітря навколишнього середовища, яке має більш низьку температуру, де, конденсуючись у тверді частини, утворюють у повітрі зважені дрібнодисперсні частини, які за рахунок аеродинамічних сил тривалий час можуть знаходитися в зваженому стані [1; 2]. Дисперсність частинок ЗА коливається в межах від тисячних часток до декількох мікрометрів. Основна кількість частинок має розмір менший ніж 1 мкм. Частинки ЗА можуть приймати форму агломератів з розміром 1…3 мкм, кластерів розміром 1..2 мкм, сферичну форму (діаметром 5…10 мкм), а більш дрібні частинки (розміром від сотих до десятих долей мкм) схильні до утворення ланцюжків [2].

Частки наведеної форми та розміру надзвичайно небезпечні, тому основна вага в професійній захворюваності робочих зварювальних професій складає патологія бронхолегеневого апарату – пневмоконіоз і хронічний бронхіт, що розвиваються у осіб до 40 років, зайнятих напівавтоматичним зварюванням сталей при середньому стажі роботи в професії 14,6 років [1].

З’ясовано, що під час зварювання кількість ЗА у зоні дихання зварника, що працює без місцевої вентиляції, складає в середньому 25 мг/м^3, а в закритих приміщеннях невеликого обсягу (цистерни, баки) може досягати 300 мг/м^3, що в 75 разів перевищує гранично допустимі концентрації (ГДК) шкідливих речовин у складі ЗА. Під час зварювальних робіт на заводах (металоконструкцій) у зоні дихання зварника (під маскою) концентрація ЗА в 6-12 разів перевищує ГДК, а оксидів марганцю – в 10-30 разів.

Кількість повітря, що видаляється при витраті електродів 1 кг/год становить не менш 5-7 тис. м^3/год, але у зв'язку з відсутністю ефективних місцевих відсмоктувачів та пилегазоуловлювачів це не забезпечує належних санітарних норм у робочій зоні. Використання ж засобів місцевого відсмоктування також не завжди ефективні при зварюванні вздовж швів.

Аналіз публікацій [1; 3; 4] показав, що навіть при працюючій вентиляції концентрація шкідливих речовин в атмосфері зварювальних цехів може набагато перевищувати ГДК.

Постановка мети та завдань дослідження. На основі аналізу стану забрудненості повітря зварювальних дільниць обрати комплекс заходів та засобів зниження концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони зварників.

Виклад основного матеріалу досліджень. У даний час у промисловості найбільш поширені механізована зварка у вуглекислому газі і ручна зварка штучними електродами. Також застосовується автоматична зварка під флюсом і у вуглекислому газі, порошковим дротом і в інертних газах. У ряді галузей промисловості використовується контактна зварка, в основному точкова і стикова. Зварка дрібних виробів проводиться на стаціонарних робочих місцях – на зварювальних столах, розміщених зазвичай у кабінетах. Виготовлення великогабаритних виробів та їх елементів виконується, як правило, на спеціальних стендах, кантувальниках, кондукторах. Електрозварювання супроводжується виділенням зварювального аерозолю (ЗА), що містить дрібнодисперсну тверду фазу і гази. Інтенсивність утворення ЗА визначається швидкістю плавлення електро-

дного матеріалу і залежить від зварювального струму та напруги дуги, від складу зварювальних матеріалів, основного металу і захисного середовища, а також від положення шва у просторі та техніки зварювання.

Механізм утворення зварювального аерозолю являє собою схему [2; 4]: випаровування - окиснення – конденсація, що доказано результатами рентгенівської та електронної дифрактометрії та свідчать про наявність в аерозолі оксиду Fe3O4, який має кристалічну структуру.

У процесі зварювання в ЗА можуть переходити елементи, що входять до складу зварювальних матеріалів (електродів, флюсів, дротів та ін.) й основного металу – залізо, марганець, кремній, кальцій, калій, магній, натрій, титан, алюміній, хром, нікель, фтор тощо. В результаті окиснення та конденсації цих елементів утворюються тверді частинки складного виду, як і було припущено, у формі оксидів. Проте дослідження структури та виду хімічних сполук (фазового складу) ЗА за допомогою сучасних фізичних методів (інфрачервоної спектроскопії, рентгенофазової та електронної дифрактометрії) дозволили встановити, що крім оксидів до складу ЗА входять також шпінелі, силікати, фториди та інші складні сполуки (наприклад, Fe_3O_4, Mn_3O_4, $MnFe_2O_4$, Fe_2SiO_4, Mn_2SiO_4, Cr_2O_3, FeO та ін.). Неоднорідність фазового складу частинок ЗА пов’язана з тим, що високотемпературна пара також має складний вид, а окремі її складові конденсуються при різній температурі. В першу чергу відбувається конденсація елементів або сполук, пара яких має більш низький тиск, а потім пара елементів з більш високим парціальним тиском. Наприклад, кремній присутній у високотемпературній парі у широкому (1500…3000 К) інтервалі температур у вигляді SiO. При цих температурах його пара характеризується більш високим парціальним тиском, ніж пара марганцю і заліза. Тому пара кремнію конденсується разом з низькотемпературними оксидами натрію та калію з утворенням силікатів. Центрами конденсації пари можуть бути іони елементів або дрібні бризки металу, які виносяться потоками газу із зони дуги. Таким механізмом утворення ЗА пояснюється неоднорідність будови їх частинок.

Дисперсність частинок ЗА коливається в межах від тисячних часток до декількох мікрометрів. Основна кількість частинок має розмір менший ніж 1 мкм. Частинки ЗА можуть приймати форму агломератів з розміром 1…3 мкм, кластерів розміром 1..2 мкм, сферичну форму (діаметром 5…10 мкм), а більш дрібні частинки (розміром від сотих до десятих долей мкм) схильні до утворення ланцюжків.

Інтенсивність утворення ЗА визначається швидкістю плавлення електродного матеріалу і залежить від зварювального струму та напруги дуги, від складу зварювальних матеріалів, основного металу і захисного середовища, а також від положення шва у просторі та техніки зварювання. Встановлено, що при зварюванні покритими електродами в ЗА переходить 1…3 % від маси електрода, а у випадку зварювання плавким електродом в захисних газах – 0,5…2,0 % від маси зварювального дроту. Хімічний склад ЗА на 80…90 % обумовлено складом зварювальних матеріалів.

Виходячи з вищевикладеного, можна зробити висновок, що вивчення факторів, які впливають на процес утворення ЗА (а саме, механізм утворення ЗА, закономірностей формування її хімічного і дисперсного складу, будови частинок, а також хімічних реакцій, які проходять при утворенні шкідливих газів), може бути використано під час розробки нових, досконалих у гігієнічному відношенні зварювальних матеріалів та технологій.

Рівні виділень і хімічний склад ЗА, які утворюються при зварюванні покритими електродами, визначаються рядом основних факторів: вмістом у шлаковому розплаві, що утворюється в результаті плавлення покриття на торці електрода, хімічних елементів чи сполук з високою пружністю пари, які здійснюють великий внесок в утворення аерозолів; характеристикою основності (кислотності) шлаку, від якої залежить інтенси-

вність випаровування окремих його складових; окислювальним потенціалом атмосфери дуги; діаметром електрода і режимом зварювання (сила зварювального струму та напруга дуги). Кількість та характеристика шкідливих речовин, що виділяються виконанні зварювальних робіт, наведено в таблиці 1 [5].

Джерело виділення шкідливих речовин при електрозварюванні – зварювальна дуга – має незначні розміри. Безпосередньо поблизу її концентрація шкідливих речовин дуже висока. Далі конвективний потік над зварювальною ванною і нагрітим металом (виробом) виносить ЗА в повітря приміщення; при цьому відбувається інтенсивне підмішування навколишнього повітря. У процесі видалення від джерела як по горизонталі, так і по вертикалі концентрація шкідливих речовин різко зменшується і на відстані відповідно 2 і 4 м наближається до загального фону забруднення повітря приміщення. Загальний фон у вентильованих цехах, як правило, не перевищує рівня ГДК. Але в зоні дихання зварювача, що виконує ручні операції, зміст шкідливих компонентів зварювального аерозолю значно (у 7-10 разів) перевершує як фон, так і ГДК.

У вітчизняній і зарубіжній практиці ручного дугового зварювання використовуються електроди з покриттями, які розподіляються на такі основні види: кислі, рутилові, целюлозні, основні (фтористо-кальцієві); а також змішані види покриття: рутилово-кислі (ільменітові), рутил-целюлозні, рутил-основні тощо. Результати досліджень рівнів виділень ЗА, виконаних у різних країнах, показують, що найбільші виділення аерозолю характерні для електродів з целюлозним покриттям. За ними йдуть електроди з покриттям основного типу [3; 4]. Електроди з кислим, рутиловим й ільменітовим покриттям за рівнем виділення ЗА розрізнюються між собою незначно, а порівняно з електродами з целюлозним та основним покриттям характеризуються значно меншим виділенням аерозолю.

Таблиця 1

Характеристика основних шкідливих речовин, що утворюються при ручному дуговому зварюванні

Показники	Зварювальний аерозоль	З'єднання марганцю	Оксиди хрому	Фтористий водень	Оксиди азоту	Оксиди вуглецю
1	2	3	4	5	6	7
ГДК, мг/м^3	-	0,2 (при концентрації:У ЗА до 20 %)	1,0	0,05	2,0	20,0
Клас небезпеки	-	2	2	1	2	4
Агрегатний стан (а – аерозоль, п – пари)	-	а	а	п	п	п
Спосіб зварки і марка зварювального матеріалу	Виділення забруднювача, г/кг зварювального матеріалу					
	Ручна дугова зварка сталей електродами					
УОНИ-13/55	18,6	0,97	-	0,93	-	-
УОНИ- 13/65	7,5	1,41	-	1,17	-	-
АНО-4	6,0	0,69	-	-	-	-
АНО-6	16,3	1,95	-	-	-	-
АНО-11	22,4	0,87	-	-	-	-
ЭА-606/11	11,0	0,68	0,6	0,4	1,3	1,4
МЗЗ-ІІІ	40	-	-	-	-	-
ЦТ-15	7,9	0,55	0,35	1,61	-	-
	Зварка стали з флюсами					
ОСП-45	0,09	0,03	-	0,2	0,006	-
ФЦ-2, ФЦ-6, ФЦ-7	0,09	0,01	-	0,05	0,005	-
ФЦ-11, ФЦ-12	0,09	0,05	-	0,02	-	-
АН-22	0,12	0,01	-	0,02	-	-

Продовж. табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
АН-26, АН-30, АН-42	0,08	0,05	-	0,03	-	-
АН-60, АН-64	0,09	0,02	-	-	-	-
АН-348А	0,1	0,03	-	0,2	0,006	-
АНК-30	0,26	0,12	-	0,018	-	-
	Дріт					
ЭП-245	12,4	0,54	-	0,36		-
ПП-106, ПП-108	12	0,7	-	-	0,8	-
СВ-08Г2С	9,7	0,5	0,02	-		14
СВ-Х19Н9Ф2С3	7	0,42	0,03	-	-	14
СВ-10Х20Н7СТ	8	0,45	0,03	-	-	-
СВ-16Х16Н25М6	15	2	1	-	-	
ЭП-245	12,4	0,61	-	-	-	3,2
СВ-О8ХГН2МТ	6,5	-	0,03	-	0,8	11
Д-20	10,9	0,09	-	-	-	-
АМЦ	22,1	0,62	-	-	2,45	-
АМГ-6Т	50	0,25		-	0,33	-

У подальших дослідженнях процесів утворення ЗА і для пошуку нових шляхів зниження їх токсичності необхідно більш докладно вивчити дисперсність частинок ЗА, їх процентне розподілення за розмірами та будову. Це дасть можливість виділити найбільш респірабельні (проникаючі в органи дихання) фракції ЗА, встановити фактори, які впливають на розмір та будову частинок і запропонувати нові ефективні способи зниження токсичності аерозолів за рахунок регулювання їх дисперсності, що в кінцевому результаті дозволить розробити нові зварювальні матеріали з поліпшеними гігієнічними характеристиками.

Заходи по оздоровленню умов праці зварників, що застосовувались у попередні роки, не дали помітних позитивних результатів. Проблема створення здорових і безпечних умов праці зварників залишається актуальною. Для її вирішення необхідно скористатися більш радикальним підходом, а саме, як показує світовий і вітчизняний досвід, – поєднанням технологічних та санітарно-технічних заходів щодо усунення шкідливої дії ЗА, а також застосуванням засобів індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД) зварників. Перший напрямок – технологічний: полягає у зниженні рівня виділення ЗА в повітря шляхом удосконалення процесу зварювання, виборі технології і способу зварювання, виду і марки зварювального матеріалу, захисного газу та режиму зварювання. Другий напрямок – санітарно-технічний: полягає в локалізації і нейтралізації ЗА шляхом застосування сучасних ефективних засобів місцевої вентиляції. Третій напрямок – застосування ЗІЗОД нового покоління, що дозволяють захищати органи дихання зварників у різних виробничих умовах. Залежно від умов праці, а також від вимог до якості зварного з'єднання необхідно користуватися комплексом цих заходів, або окремими з них.

Також цікавим та корисним є впровадження на виробництвах нової інформаційно-розрахункової системи гігієнічних характеристик зварювальних електродів «Гігієна зварювання» [4], що дозволяє прогнозувати ступінь забрудненості повітря та виконувати вибір зварювальних електродів з кращими гігієнічними а також надавати рекомендації щодо вибору виду вентиляції та засобів індивідуального захисту, що розроблено групою вчених Національного науково-дослідного інституту промислової безпеки та охорони праці та Інституту електрозварювання імені Е.О. Патона НАН України.

Висновки. На основі проведеного аналізу розроблено комплексне рішення щодо зниження забрудненості повітря робочої зони зварників, що полягає у використанні колективних методів захисту (систем загальної та місцевої вентиляції), індивідуальних

засобів (органів дихання – респіратори), організаційних рішень (використання інформаційних систем) та технологічних заходів (зниження виділень у джерелі шляхом використання електродів з меншою кількістю виділень).

Список використаних джерел

1. Лубянова И. П. Характер и структура производственно обусловленых заболеваний у сварщиков/ И. П. Лубянова // Довкілля та здоров'я. – 1999. – № 3. – С. 51-57.

2. Левченко О. Г. Гігієна праці та виробнича санітарія у зварювальному виробництві: навчальний посібник / О. Г. Левченко. – К.: Основа, 2004. – С. 96-98.

3. Гримитлин М. И. Улучшение состояния воздушной среды в сборочно-сварочных цехах // М. И. Гримитлин, С. Ю. Кгондрашов, И. С. Алексеева и др. // Охрана труда в условиях интенсификации производства. – Л., 1987. – С. 40-67.

4. Лук'яненко А. О. Нормалізація концентрації шкідливих речовин на робочих місцях ручного дугового зварювання: автореф. дис. на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук: спец. 05.26.01 «Охорона праці» / А. О. Лук'яненко. – К., 2012. – 20 с.

5. Режим доступу: http://www.c-o-k.com.ua/content/view/845/.

УДК 004.942:528.8:631.15

І.В. Бальченко, аспірант
В.В. Казимир, д-р техн. наук
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна
В.П. Клименко, д-р фіз.-мат. наук
Інститут проблем математичних машин та систем НАНУ, м. Київ, Україна

СУЧАСНІ МЕТОДИ УПРАВЛІННЯ СТАНОМ АГРАРНОЇ ЕКОСИСТЕМИ

Проведено аналіз сучасних методів та технологій, що застосовуються при вирішенні завдань ефективного управління аграрною екосистемою. Виокремлено завдання управління аграрною екосистемою, що потребують нагального вирішення, та можливі шляхи їх розв'язання.

Ключові слова: *геоінформаційні технології, дистанційне зондування, аграрна екосистема.*

Проведен анализ современных методов и технологий, которые применяются при решении задач эффективного управления аграрной экосистемой. Выделены задачи управления аграрной экосистемой, нуждающиеся в срочном разрешении, и возможные пути их решения.

Ключевые слова: геоинформационные технологии, дистанционное зондирование, аграрная экосистема.

The analysis of modern methods and technologies which are applied at the solution of problems of effective management by an agrarian ecosystem is carried out. Needing urgent decision problems of management by an agrarian ecosystem and possible ways of their solution are allocated.

Key words: geoinformation technology, remote sensing, agrarian ecosystem*.*

Постановка проблеми. Аграрна екосистема (АЕС) – екологічна система, що об'єднує ділянку території (природний ландшафт), частково або докорінно перетворена людиною, в якій потоки речовини й енергії свідомо спрямовуються в бік максимізації отримання і подальшого відчуження біомаси [1]. Велика територія АЕС може мати складний розчленований рельєф та дуже розмаїтий ґрунтовий покрив, що розрізняється за потужністю гумусового горизонту, механічним і хімічним складом, зволоженням, прогріванню, мірою розвитку ерозійних процесів, випаром й іншим умовами, що впливають на агротехніку і біологічні процеси, які визначають родючість ґрунтів і врожайність сільськогосподарських (с/г) культур. Відсутність достовірної інформації про стан полів не дозволяє прийняти правильне рішення про основну культуру, що буде вирощуватись, та аграрну технологію, що буде застосовуватись для її обробки.

На сучасному етапі розвитку АЕС на перший план виступає проблема оптимізації землекористування, охорони земельних ресурсів та підвищення ефективності ведення с/г виробництва. Тому управління АЕС пов'язане з комплексом агрономічних, меліоративних, економічних та організаційних засобів, всі ланки якого (сівозміни, обробіток

ґрунту, добрива, зрошення, боротьба з шкідниками та інше), спрямовані на раціональне використання землі, матеріально-технічних ресурсів, через отримання стабільних високих урожаїв с/г культур та підвищення родючості ґрунтів [2].

Значну роль у вирішенні цієї проблеми відіграють спеціалізовані геоінформаційні системи (ГІС), що враховують як просторову прив'язку, так і спеціальні відомості про поля. Аналізу існуючих ГІС та перспектив їх використання з метою обробки мінливої просторової та атрибутивної інформації про стан АЕС присвячена ця стаття.

Аналіз досліджень і публікацій. Спеціалізовані ГІС для с/г вже давно необхідний компонент системи комплексного управління господарством. Так, оцінка стану рослинності в контексті систем підтримки ухвалення рішень для проблем стійкого розвитку і економічної безпеки визначена пріоритетним завданням міжнародної «системи систем» GEOSS [3]. Світовий досвід показує, що зйомки з космосу не лише підвищують точність, однорідність, об'єктивність і частоту спостережень, але і дозволяють істотно удосконалити методи оперативного контролю над станом посівів і прогнозування урожаю. У багатьох країнах світу (Канаді, США, країнах ЄС, Індії, Японії, Китаї та ін.) інформаційно-маркетингові служби базуються на даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Наприклад, ГІС MARS (Monitoring Agriculture with Remote Sensing) [4], що обслуговує країни Європейського співтовариства, дозволяє визначати площі посівів і врожайність с/г культур, починаючи з рівня країни до окремих ферм. Результати аналізу використовуються для оптимізації управління с/г виробництвом, зокрема, для контролю над обсягами виробництва в рамках державних програм підтримки с/г виробників.

Що стосується завдань оптимізації с/г виробництва, таких як оптимізація структури посівних площ, визначення оптимального розподілу добрив, складання технологічних карт, то вони вирішуються в сторону отримання максимального економічного ефекту та відтворення гумусового запасу ґрунту [2; 5], незважаючи на існуючий стан ґрунтів та можливі інші види деградації ґрунтів. При цьому можливо отримати базу карт ґрунтів як світового так і регіонального масштабу, але орієнтовану на застосування в певній пропрієтарній ГІС, та невеликої розподільчої здатності – до 1 км/піксел, що не дозволяє оперативно реагувати на зміни в якості ґрунтів АЕС невеликої території, наприклад, HWSD (Harmonized World Soil Database) для ГІС ARC/INFO [6].

Мета статті. Проаналізувати існуючі моделі, методи та ГІС-технології моніторингу характеристик АЕС та ефективного управління її станом.

Виклад основного матеріалу. Для ефективного управління станом АЕС необхідно вирішення багатьох складних задач, серед яких планування розміщення та моніторинг стану с/г культур та площ посівів, короткостроковий та довгостроковий прогноз врожайності с/г культур, підвищення родючості орних угідь та недопущення деградації ґрунтів, підвищення врожайності оброблюваних культур і якості продукції.

Методи моніторингу стану с/г культур. Рослини володіють унікальним спектром поглинання, що визначається наявністю різних пігментів, вмістом води і фізичною структурою листя [7]. Спектр змінюється з часом залежно від фази розвитку, біологічного вигляду, стану довкілля і стану рослини. Тому спектр поглинання принципово може бути використаний для завдань оцінки стану рослинності.

1. Емпіричні залежності між спектральними характеристиками та біохімічними параметрами.

На рівні рослинного покриву ідентифікація хімічних складових рослин представляється складним завданням, оскільки віддзеркалення сильно залежить від розмірів, орієнтації листя, щільності рослинності і характеристик середовища, таких як тип ґрунту і кут падіння променів сонця [7]. Незважаючи на це, деякі біохімічні властивості рослин можуть бути відновлені за спектром відбиття рослинного покриву. Відомі успішні за-

стосування спектра відбиття для ідентифікації виду рослин, моніторингу вмісту води і характеристик добрив у ґрунті, завдань фенології рослин, оцінки площі листяного покриття (leaf area index, LAI), оцінки біомаси [8].

2. Спектральні (вегетаційні) індекси.

Для подолання недоліків попереднього методу застосовуються індекси (vegetation indices, VI) – відношення або різниця інтенсивності в двох і більш спектральних діапазонах. Найбільш відомий так званий нормалізований вегетаційний індекс (NDVI), головною перевагою якого є легкість обчислень, бо не потрібно ніяких додаткових даних, окрім, власне, даних ДЗЗ та параметрів зйомки. Однак ефективність методів на основі індексів також залежить від стану довкілля. Для підвищення ефективності оцінки стану рослинного покриву розроблені індекси, стійкі до певного класу джерел шуму: ґрунту, атмосфери, розрідженої рослинності і т. п. [9]. Для підвищення точності прогнозу також може бути застосоване сумарне значення індексів за сезон.

Методи прогнозування врожайності. Врожайність тісно пов'язана з агрокліматичними, ґрунтовими та агротехнічними факторами, тому і методи її прогнозування ґрунтуються на накопиченні інформації від різних ресурсів – агрометереологічних, ґрунтових, статистичних даних та даних ДЗЗ.

1. Статистичні методи на основі оцінок поточного стану.

Одним з простих методів є використання лінійної регресії для моделювання залежності врожайності від спектра поглинання рослинного покриву. Максимуми поглинання хлорофілу лежать у червоній і синій областях спектрау, поверхня листя відбиває в ближньому інфрачервоному діапазоні; такі дані можуть бути використані для оцінки активності фотосинтезу рослин і, отже, врожайності.

Так, в Україні розробляється система моніторингу стану с/г культур і прогнозування врожайності на основі супутникових даних [9] у рамках програми «Аерокосмічні і наземні спостереження на користь стійкого розвитку і безпеки» (GEO-UA), яку слід розглядати як український сегмент глобальної «системи систем» GEOSS. На сьогодні реалізована ГІС оцінки площі полів озимих культур, заснована на припущенні про наявність достатньої кількості хлорофілу в культурах у період припинення зростання для ідентифікації на фоні ґрунту та інших рослин. Отримана таким методом карта полів під озимими культурами надалі використана для короткострокового прогнозування врожайності із застосуванням лінійного регресійного аналізу.

Недолік методу пов'язаний з сильною залежністю яскравості в досліджуваних спектральних діапазонах від параметрів середовища, зокрема атмосфери, кута падіння світла, типу ґрунту. Частково для подолання цих недоліків можуть використовуватись методи автокорекції зображень, що вбудовані в більшості сучасних ГІС.

2. Динамічні методи на основі моделей росту.

Динамічні моделі зростання використовуються для дослідження процесу засвоєння вуглецю і приросту біомаси. Як правило, моделюється зростання рослин під впливом метеорологічних параметрів, характеристик ґрунту і складу добрив, що вносяться; типовими вхідними даними є температура, кількість опадів, сонячної радіації, кількість і тип добрив, щільність насаджень, параметри іригації та обробки, тип, глибина верхнього шару, вміст гумусу в ґрунті.

Найбільш перспективними з точки зору адаптованості є методи на основі калібрування моделей зростання за даними ДЗЗ. Процес інтеграції даних ДЗЗ у механістичні моделі зростання складається з двох етапів – оцінки параметрів рослинності (як правило, LAI) за даними ДЗЗ і налаштування моделі на основі отриманих параметрів. Більшість моделей можуть бути застосовані лише до одного виду рослин. Так, у роботі [10] отри-

маний LAI використаний для калібрування моделі CERES-Wheat для прогнозування врожайності пшениці.

Переваги моделей зростання – фізична обґрунтованість та менші вимоги до об'ємів калібрувальних даних порівнюючи зі статистичними моделями. Серед недоліків – складність охоплення різносторонності продукційного процесу, особливо при побудові універсальних моделей.

3. Статистичні методи на основі оцінки фізичних факторів навколишнього середовища.

У таких методах використовують припущення про існування простої залежності між характеристиками довкілля і врожайністю. Для виявлення такої залежності були застосовані методи лінійного і нелінійного регресійного аналізу, нейронні мережі; досліджені залежності врожайності від складу ґрунту (кислотність, вміст органічних речовин, фосфору, кальцію, магнію, калію), характеристик ґрунту (текстура, тип, глибина верхнього шару), метеорологічних параметрів (опади, температура, сонячна радіація).

Методи цього класу рідко застосовувались на практиці внаслідок великої трудомісткості необхідних наземних замірів та складності досліджуваних залежностей. Як подолання таких недоліків розроблена методика прогнозу врожайності озимих культур [11] на основі математичної моделі, побудованої методом групового обліку аргументів та даних ДЗЗ.

Технології створення карти полів та планування розміщення с/г угідь і культур. С/г виробники потребують довгострокового прогнозування врожаю ще до посівної компанії, щоб максимально ефективно розмістити с/г угіддя та культури залежно від характеристик ґрунтів. Для цього застосовуються дані історії полів. Карта полів – це база просторових даних, що, як правило, складається із загальних даних про с/г угіддя і його основних характеристик (площа, переважаючі схили місцевості та ін.); даних про сівозміну (тип сівозміни, культура, попередник, сорт, репродукція, норма висіву та ін.); даних фітосанітарного моніторингу, що відображають відомості про засміченість поля бур'янами, наявність хвороб і шкідників рослин; дані агрохімічного обстеження, що відображають відомості про вміст у ґрунті живильних речовин і мікроелементів з прив'язкою до року обстеження.

У Росії подібна ГІС розроблена для Краснодарського Краю [12]. Впроваджена в 2011 році система дозволяє отримувати інформацію: про с/г землі, виведені з с/г обігу, введені в обіг в поточному році і за заданий період спостережень, включаючи кордони, площі, стан; аналітичну інформацію з різними степенями агрегації.

Головне завдання, яке вирішується при складанні карт полів, це сформувати робочі ділянки с/г угідь так, щоб вони мали однорідний ґрунтовий склад. Так, у розробленій ГІС «Панорама АГРО» [13] на основі агрохімічних карт, отриманих шляхом безпосередніх проб ґрунтів, готуються пропозиції по перепланування кордонів полів, для формування структури посівних площ, де в межах одного поля склад живильних речовин максимально однорідний.

На практиці це завдання практично не вирішуване, оскільки:

1)отримання геофізичних характеристик с\г угідь шляхом безпосередніх проб ґрунтів є завданням занадто трудомістким та економічно не обґрунтованим;

2)доводиться переходити до дуже малих розмірів робочих ділянок, що приводить до труднощів по їх обробці: неефективно використовується широкозахватне устаткування, збільшуються витрати на експлуатацію важкої техніки та збільшується її дія на ґрунт.

Для подолання першого недоліку можна використовувати технології ДЗЗ: багатоканальну аерофотозйомку чи космозйомку сучасною апаратурою з високою розподільчою здатністю. На сьогодні є можливість отримання безкоштовних багатоспектральних знімків з космічних супутників, у тому числі в інфрачервоному діапазоні. А також

розроблені методики складання електронних ґрунтових карт за матеріалам багатоспектральної космічної зйомки, наприклад [14].

Що стосується другого недоліку, то можливо групувати ділянки полів в агроландшафтні зони за спільними характеристиками з врахуванням критеріїв майбутньої сівозміни та засобів підвищення її врожайності. Як зазначається в [15], таке агроекологічне районування с/г угідь дозволить оптимізувати видову структуру посівних площ, перейти до адаптивного внутрішньогосподарського землеустрою, тобто економічно виправданого, але більше диференційованого використання в кожному регіоні, районі, господарстві і навіть сівозміні, в ґрунтово-кліматичних, макро- і мікроумовах, з урахуванням адаптивного потенціалу культивованих видів і сортів рослин. При цьому важливо кожну с\г культуру розмістити в найбільш сприятливих для її обробітку ґрунтово-кліматичних і погодних умовах, приділивши особливу увагу значному підвищенню ґрунтозахисних і ґрунтопокращувальних функцій видової структури посівних площ, а також забезпеченню зростання врожайності.

Тому однофакторний аналіз варто замінити на багатофакторний із застосовуванням знань, що виражаються у вигляді функцій переваги і висновків з минулого досвіду, що накопичуються у вигляді історії полів. Таким чином, задача оптимального розміщення полів може бути змодельована із застосуванням математичного апарату лінійного програмування з формалізацією багатьох критеріїв оптимальності, таких як збільшення врожайності культур та отримання максимального економічного прибутку для с/г виробника, зменшення кількості добрив, що вносяться, та інших засобів для боротьби зі шкідниками, з метою зменшення негативного впливу на агроландшафт та уникнення деградаційних процесів ґрунтів. Застосування теорії ігрових методів може бути перспективним у вирішенні такого завдання.

Застосування ГІС-технологій в управління станом АЕС. Для забезпечення аналізу, прогнозу та оптимізації діяльності с/г підприємств ГІС має бути комплексною та включати такі цифрові карти, як карти вмісту мінеральних речовин у ґрунті, типів і характеристик ґрунтів, карти схилу з цифровою моделлю рельєфу і експозицій схилів, погодних, кліматичних та гідрологічних умов. Важливою інформацією є цифрові карти таких чинників, як врожайність та тип посівів, тип механічної та хімічної обробки ґрунтів, просторовий розподіл захворювань культур та динаміка розповсюдження шкідників [2].

У технологічному аспекті ГІС є засобом збору, збереження, аналізу, візуалізації просторово-часових даних та пов’язаної з ними інформації про ГІС-об’єкти [16]. Саме ГІС-технологія, що дозволяє дати детальний опис будови поверхні оцінюваної території, особливостей ґрунтового покриву і використання земель, створює реальні передумови для адекватного відображення просторової варіації чинників ерозійних та інших процесів, що протікають в агроландшафтних системах.

1. Збір даних.

Серед існуючих джерел даних для ГІС відомі картографічні джерела, дані ДЗЗ та фотографічні дані, дані польових вишукувань та різноманітних кадастрів, Інтернет, дані гідрометеорологічних досліджень та статистичні дані [17].

Так, дані ДЗЗ принципово можуть бути використані для побудови цифрової моделі рельєфу за допомогою стереопари, а також для створення карт типів і характеристик ґрунтів, рослинності та інших об’єктів, застосовуючи методи дешифрування зображень.

Дані польових досліджень можуть бути застосовані для перевірки отриманих дешифрованих даних та для фіксування меж с/г угідь за допомогою об’їзду територій з використанням GPS-устаткування [2].

Важливим джерелом атрибутивних даних для ГІС є бази статистичних матеріалів врожайності за попередні роки, а також довідкова література та дані лабораторних дос-

ліджень у вигляді еталонів кривих спектральної відбивної здатності різних об'єктів місцевості у широкому діапазоні довжин хвиль.

2. Аналіз даних.

Інтеграція даних ДЗЗ у ГІС може спричинити помилки. Тому варто провести попередню обробку – скорегувати й поліпшити супутникові зображення за допомогою геометричної корекції, радіометричного калібрування знімків, відновлення пропущених пікселів, контрастування та фільтрації. Надалі, для отримання необхідної інформації зі знімків, проводиться тематична обробка космічних знімків – процес дешифрування або розпізнавання об'єктів і явищ на космічних знімках [18].

Спеціальні ГІС, орієнтовані на роботу з даними ДЗЗ (ERDAS, Intergraph та ін.), мають засоби попередньої обробки та дешифрування даних ДЗЗ. Однак не можуть бути застосовані для вирішення завдань типізації ґрунтового покриву, і не мають програмних засобів для реалізації поставленого завдання.

Тому варто використовувати більш універсальні та потужні за своїми можливостями інструментальні ГІС, що відрізняються наявністю внутрішньої мови та підтримкою розробника вбудованими засобами програмування, і дозволяють через стандартні середовища розробки додатків отримати доступ до програмного коду ГІС для побудови власних додатків [17]. Найбільш відомими представниками інструментального пропрієтарного програмного забезпечення (ПЗ) є ENVI, MapInfo, ARC/INFO. Серед відкритого ПЗ можна виокремити Qantum GIS, Integrated Land and Water Information System (ILWIS) та інші системи, переважно створені колективами наукових інститутів.

3. Візуалізація даних.

Візуальна обробка заснована на використанні розвинених систем комп'ютерної графіки і відповідно може базуватись на растровій, векторній та тривимірній моделях [2]. З точки зору вирішення завдань класифікації об'єктів, растрова інформація може бути ефективною тільки як джерело вхідних даних ДЗЗ. У подальшому після виконання процедури дешифрації об'єктів варто використовувати векторну модель і представляти групи об'єктів, наприклад межі ґрунтів, у вигляді полігональних об'єктів.

Що стосується візуалізації динаміки просторових процесів АЕС, наприклад деградації ґрунтів, ГІС дає змогу реалізувати ретроспективне відновлення динаміки просторових процесів у вигляді динамічних рядів карт з певною частотою дискретизації [16].

4. Збереження даних.

Існує два підходи до організації просторових даних у ГІС – пошаровий та об'єктно-орієнтований. І відповідно три моделі організації даних – геореляційна, об'єктно-орієнтована та об'єктно-реляційна моделі.

Переваги пошарової організації збереження даних у вигляді геореляційної моделі полягають у тому, що однорідна просторова й атрибутивна інформація про певну територію зберігається в окремих таблицях реляційної БД і подається у вигляді тематичних шарів, що є інтуїтивно зрозумілими, і нагадують принципи використання прозорих кальок-накладок при роботі з просторовими даними. Однак основним недоліком такої організації є обмеженість представлення складних відносин даних та обмежене подання реального світу.

Об'єктно-орієнтовані та об'єктно-реляційні моделі (як об'єктне розширення реляційної моделі з підтримкою складних типів даних), що ґрунтуються на принципах класифікації та кодування об'єктів, є менш універсальними в частині графічного опису зображень, але усувають усі проблеми в частині об'єднання тематичної та картографічної інформації [17]. Крім того, об'єктно-орієнтовані моделі є більш перспективними, оскільки в практику все більше впроваджуються технології об'єктно-орієнтованого програмування та об'єктних СУБД.

З іншого боку, зважаючи на те, що сучасна ГІС, як правило, є динамічною системою, виникає потреба коректної організації інформації в часовому інтервалі. У завданні управління станом АЕС важливим є відносний, а не абсолютний час спостереження, тобто послідовність, в якій виникають явища [2]. У цьому випадку необхідний результат може бути досягнутий впорядкуванням даних, а не фіксацією абсолютного часу [17]. Крім того, необхідна така просторова організація даних, яка передбачала можливість різної розрізненості (кроку дискретизації в часі), – ієрархічна система часової розрізненості.

Висновки. Існуючі методи ухвалення рішень і математичні моделі АЕС мають вузькоспеціалізований характер і не повною мірою забезпечують якісне управління їх станом. Вони орієнтовані на вирішення завдань, пов'язаних з отриманням досить високої біопродуктивності окремих монокультур при певних погодних умовах і конкретних значеннях параметрів родючості ґрунту. При моделюванні не враховується необхідність систематичного досягнення високої біопродуктивності, рентабельності виробництва всіх культур сівозміни за будь-яких погодних умов, а також можливість зниження рівня родючості ґрунту.

У зв'язку з вищезгаданим має місце актуальне завдання розробки методів та засобів вдосконалення управління станом АЕС в умовах апріорної невизначеності абіотичних факторів у вигляді багатошарової ГІС, що включає:

− строго структуровані дані про фактичний стан земель;
− алгоритми аналізу придатності земель під основні типи землекористування;
− технології оптимізації розміщення с/г угідь та посівів окремих культур;
− моделі довгострокового прогнозування врожайності с/г культур.

Список використаних джерел

1. Сонько С. П. Агроекосистема як екологічна ніша людини / С. П. Сонько // Збірник наукових праць Уманського ДАУ. Ч.1. Агрономія. Випуск 71. – Умань, 2009. – С.188-199.

2. Морозов В. В. Моделювання і прогнозування для проектів геоінформаційних систем / В. В. Морозов, С. Я. Плоткін, М. Г. Поляков. – Херсон: Вид-во ХДУ, 2007. – 328 с.

3. GEOSS 10-Year Implementation Plan: Reference Document // ESA Publication Division Ed. by Bruce Battrick. – 2005. – 209 p.

4. MARS web viewer [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: http://www.marsop.info. – Назва з екрану.

5. Тарарико Ю. А. Формирование устойчивых агроэкосистем: теория и практика: монография / Ю. А. Тарарико. – К.: Аграрная наука, 2005. – 508 с.

6. IIASA – Harmonized World Soil Database. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/.

7. Токарева О. С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли: учебное пособие / О. С. Токарева. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 148 с.

8. Aparicio N., Villegas D., Araus J. L. Relationship between growth traits and spectral vegetation indices in durum wheat // Crop science 42. – 2002. – 1547-1555 p.

9. Куссуль Н. Оценка состояния растительности и прогнозирование урожайности озимых культур Украины по спутниковым данным / Н. Куссуль, Н. Ильин, С. Скакун, А. Лавренюк // International Book Series "Information Science and Computing". – 2008. – С. 103-109.

10. Dente, L., Satalino, G., Mattia, F. Assimilation of leaf area index derived from ASAR and MERIS data into CERES-Wheat model to map wheat yield // Remote Sensing of Environment 112. – 2008. – 1395-1407 p.

11. Федякина Т. Е. Прогнозирование урожайности озимой пшеницы на основе данных космического зондирования земли / Т. Е. Федякина // Наукові праці Полтавської державної аграрної академії. Серія: Економічні науки. Випуск 2. Том 3. – 2011. – С. 216-222.

12. Кононов В. М. Опыт создания регионального геоинформационного ресурса мониторинга земель сельскохозяйственного назначения Краснодарского края / В. М. Кононов // Геоматика. – 2011. – № 2. – С. 62-68.

13. Королев А. А. Технологии ГИС в управлении земледелием / А. А. Королев // Геоматика. – 2011. – № 2. – С. 80-84.

14. Трускавецкий С. Р. Методика составления электронных почвенных карт по материалам многоспектральной космической съемки / С. Р. Трускавецкий, Т. Ю. Бындыч, М. Н. Гичка // Аэрокосмические методы. – 2008. – № 3. – С. 38-42.

15. Аграрные новости – оптимизация видовой структуры посевных площадей [Электронный ресурс] // Аграрный край. – 2012. – № 6. – Режим доступа: http://www.agrkraj.ru/novosti/optimizatsiya-strukturyi.html.

16. Журкин И. Г. Геоинформационные системы / И. Г. Журкин, С. В. Шайтура. – М.: КУДИЦ-ПРЕСС, 2009. – 272 с.

17. Бурачек В. Г. Основи геоінформаційних систем: монографія / В. Г. Бурачек, О. О. Железняк, В. І. Зацерковний. – Ніжин: Аспект-Поліграф, 2011. – 512 с.

18. Бурачек В. Г. Геоінформаційний аналіз просторових даних: монографія / В. Г. Бурачек, О. О. Железняк, В. І. Зацерковний. – Ніжин: Аспект-Поліграф, 2011. – 440 с.

УДК 004.2

О.О. Кряжич, аспірант
Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

В.Д. Захматов, д-р техн. наук
Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

ВІДПОВІДНІСТЬ МОДЕЛІ ППР ІМПУЛЬСНОЇ ВИБУХОПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ ПОТРЕБАМ ПІДПРИЄМСТВА

У статті проводиться дослідження вимог відповідності інформаційної моделі ППР у сфері імпульсної вибухопожежної безпеки потребам хімічного підприємства. Досліджені зміни цільової функції та вимоги, які висуваються до інформаційної моделі за змін ситуації на виробництві. Запропоновані алгоритми аналізу змін та розвитку ситуацій та їх математичне обґрунтування.

Ключові слова: *імпульсний засіб, модель, параметр, інформованість, відношення, фактор, система.*

Критическое состояние основных производственных фондов химических предприятий представляет угрозу возникновения техногенных катастроф. С целью предупреждения аварий, своевременной локализации и ликвидации пожаров и взрывов, было предложено внедрение новой импульсной техники многоплановой защиты. Применение данной техники вызывает необходимость создания новых моделей для поддержки принятия решений (ППР). В статье проводится исследование требований соответствия информационной модели ППР в сфере импульсной взрывопожарной безопасности потребностям химического предприятия.

Ключевые слова: *модель, импульсные системы, защита, адекватность, функция, информация.*

The critical condition of the basic production assets of the chemical enterprises threat of occurrence of technogenic accidents is. For the purpose of the prevention of failures introduction of new pulse technics of multiplane protection is offered. It also promotes timely localisation and liquidation of fires and explosions. Application of the given technics causes of creation of new models of Decision Support Systems (DSS). It completely as a result of use of pulse technics of multiplane protection is excluded. In article research of requirements of conformity of information model DSS in sphere of pulse safety from fires and explosions to requirements of the chemical enterprise is spent.

Key words: *model, pulse systems, adequacy, function, information.*

Постановка проблеми. Одним з головних забруднювачів довкілля виступає хімічна промисловість. За інформацією МНС України, зараз функціонує 1810 об’єктів, на яких зберігається або використовується у виробничій діяльності понад 283 тис. тонн сильнодіючих отруйних речовин. Всього у зонах можливого хімічного зараження від цих об'єктів мешкає близько 22 млн. чол. При цьому майже всі хімічні підприємства мають застаріле обладнання, порушують межі санітарно-захисних зон, мають дуже неефективні очисні споруди. За останніми даними, знос основних виробничих фондів хімічних підприємств України становить майже 70,9 %.

Зазначені аспекти стану хімічних підприємств в Україні приводять до розуміння нагальної потреби в модернізації системи вибухопожежного захисту підприємства, щоб привести її у відповідність до реальних потреб об’єкта управління. У зв’язку з цим висуваються і нові вимоги до інформаційної моделі забезпечення безпеки підприємства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження особливостей та потреб організаційних систем проводяться М.З. Згуровським, Н.Д. Панкратовою [1], включаючи аналіз потреб підприємств конкретної галузі або сфери діяльності. Інформаційне моделювання широко розроблене і представлене в багатьох роботах, але інформаційне моделювання у сфері дослідження ризиків та залежності виробничих цілей підприємства щодо завдання забезпечення техногенної безпеки останнім часом розглядалися у роботах В.А. Косс [2], О.М. Серебровського [3], А.Б. Качинського [4]. Слід зазначити, що останній автор детально досліджує саме системний підхід при моделюванні забезпечення безпеки сладних систем, зокрема і небезпечних об'єктів, з дослідженням їх вимог до забезпечення цільової функції системи забезпечення безпеки.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Проте, незважаючи на накопичений досвід, в аспекті визначення відповідності інформаційної моделі потребам підприємства існує ще багато проблемних питань, а у ракурсі інформаційного моделювання імпульсного вибухопожежного захисту взагалі досліджень не проводилося. Також є малодослідженими питання щодо трансформації цільової функції підприємства під час вирішення проблем запобігання кризовій ситуації, взаємодії штатної та кризової системи управління за умов зміни ситуації на об'єкті, вирішення задачі визначення такої структури системи забезпечення імпульсної вибухопожежної безпеки, за якої аварійна ситуація не вийде за межі промислового об'єкта.

Мета статті. Метою статті є дослідження відповідності інформаційної моделі підтримки прийняття рішень (ППР) імпульсної вибухопожежної безпеки потребам хімічного підприємства.

Виклад основного матеріалу. Необхідність підвищення вибухопожежної безпеки хімічних підприємств, у тому числі і шляхом впровадження нових підходів при побудові систем підтримки прийняття рішень, викликано рядом причин:

- підвищується частота аварійних станів та складність їх наслідків як підсумок зносу і старіння основних засобів;
- системи вибухопожежної безпеки існуючих хімічних підприємств не розраховані на той рівень зносу об'єктів, який зафіксований;
- існуючі засоби вибухопожежної безпеки не розраховані на одночасну ліквідацію пожежі на хімічному підприємстві та локалізацію викидів чи розливів небезпечної речовини;
- прийняття рішень на місці аварії призводить до необґрунтованих витрат засобів та сил, ураження особового складу та персоналу підприємства.

Тож. у зазначених умовах важливим завданням виступає забезпечення потенційно небезпечних об'єктів новою відносно недорогою, легкою в монтуванні та обслуговуванні й одночасно ефективною технікою та технологією вибухопожежної безпеки. Як варіант таких техніки та технології пропонується використання нових імпульсних засобів багатопланового захисту, які можуть діяти одночасно проти пожежі, вибуху та викиду чи розливу небезпечної речовини. Пропоновані імпульсні засоби багатопланового захисту значно підвищують ефективність гасіння та скорочують час реагування на подію [5].

Впровадження нової імпульсної техніки вибухопожежного захисту вимагає створення нової інформаційної моделі системи підтримки прийняття рішень з забезпечення безпеки підприємства.

Для системи імпульсного багатопланового захисту на хімічному підприємстві процедури системи управління будуть однотипними за формальним визначенням, але різні за структурною реалізацією. Кожен підрозділ підприємства буде з врахуванням особливостей свого технологічного процесу формулювати свій вектор-функцію на базі власного визначення цілей та стратегій дій. У випадку системної невизначеності, ситуацію

слід представити у вигляді визначених факторів, які можна навести у формальному вигляді для застосування у моделі. При цьому сприятливою умовою є незалежність впливу факторів, умов та обмежень, що досліджуються [1]:

$$f_{1i1} = f_{11i1}(x_1) + f_{12i1}(€_2) + f_{13i1}(\alpha_1), i_1 = \overline{1,m_1},$$
$$f_{2i2} = f_{21i2}(€_1) + f_{22i2}(x_2) + f_{23i2}(\alpha_2), i_2 = \overline{1,m_2}, \quad (1)$$

де f_{1i1} – цільова функція першого підрозділу; f_{2i2} – цільова функція другого підрозділу; f з індексами 11-13 та 21-23 – складові функцій; x – вектор зміни складових функцій; i – компонента мети; α – вектор характеристики ситуації, що відбувається; m – загальна кількість факторів, що описують ситуацію.

Тобто, для першої функції складові описують i_1 компоненту мети як функцію від вектора x_1, який змінюється в окремому підрозділі хімічного підприємства; другим компонентом є прогнозована функція вектора дії іншого підрозділу того ж підприємства, третя компонента описує ситуацію, яка залежить від вектора α, який кількісно характеризує ситуацію. Аналогічний опис і для іншої наведеної функції.

Слід також відзначити роль одного підрозділу відносно інших, враховуючи невизначеність, неповноту та недостовірність інформації про дії інших підрозділів. Але для умов вибухопожежної ситуації цілі всіх підрозділів взаємозалежні й описуються мультиплікативними функціями:

$$[1 + f_{1i1}(x_1; €_2; \alpha_1)] = [1 + f_{11i1}(x_1)]^{\gamma 11i1} \cdot [1 + f_{12i1}(€_2)]^{\gamma 12i1} \cdot [1 + f_{13i1}(\alpha^1)]^{\gamma 13i1}; i = \overline{1,m},$$
$$f_{1i1}(x_1; €_2; \alpha_1) = \{[1 + f_{11i1}(x_1)]^{\gamma 11i1} \cdot [1 + f_{12i1}(€_2)]^{\gamma 12i1} \cdot [1 + f_{13i1}(\alpha^1)]^{\gamma 13i1} - 1\}; i_1 = \overline{1,m_1}, \quad (2)$$

де $x, €$ – аргументи, що позначають вирішення непов'язаних задач; γ – параметри події, що відбувається.

Маючи на увазі, що за своїм фізичним розумінням функції (f), аргументи ($x, €$) і парметри (γ) входять у співвідношення (2), задовольняють умови:

$$f_{1i1}(x_1; €_2; \alpha_1) \geq 0;\ f_{11i1}(x_1) \geq 0; x_1 = (x_{1j1} \mid x_{1j1} \geq 0;\ j_1 = \overline{1,n_{1j1}}),$$
$$€_2 = (x_{2j2} \mid €_{2j2} \geq 0;\ j_2 = \overline{1,n_{2j2}}); \alpha_1 = (\alpha_{1k1} \mid x_{1r1} \geq 0; k_1 = \overline{1,k_{01}}),$$
$$\gamma_{11} = (\gamma_{11i1} \mid \gamma_{11i1} \geq 0; i_1 = \overline{1,m_1}); \gamma_{12} = (\gamma_{12i1} \mid \gamma_{12i1} \geq 0; i_1 = \overline{1,m_1}),$$
$$\gamma_{13} = (\gamma_{13i1} \mid \gamma_{13i1} \geq 0; i_1 = \overline{1,m_1}); \gamma_{11i1} \in \gamma_{11}; \gamma_{12i1} \in \gamma_{12}; \gamma_{13i1} \in \gamma_{13}, \quad (3)$$

де $f_{1i1}(x_1; €_2; \alpha_1)$ – функція, що описує узагальнені параметри безпеки виробничої системи в цілому; $€_2$ – аргумент, що позначає вирішення задачі, важливої для першого і другого підрозділу; $\gamma_{11,13}$ – параметри найбільш значущих для підрозділів регламентованих подій, що відбуваються, то вираз (2) можна представити в адитивній формі за алгоритмом [1]:

$$f_{1i1}(x_1; €_2; \alpha_1) = \exp\{\gamma_{11i1} In[1 + f_{11i1}(x_1)] + \gamma_{12i1} In[1 + f_{12i1}(€_2)] + \gamma_{13i1} In[1 + f_{13i1}(\alpha_1)]\} - 1. \quad (4)$$

У цьому випадку адитивність функції виробничої системи означає, що безпека виробничої системи залежить від забезпечення безпеки її окремих підрозділів, вирішення задач, які стоять перед кожним підрозділом з забезпечення вибухопожежної безпеки та підтримки параметрів подій, що визначаються регламентом об'єкта.

Тобто, будь-які мультиплікативні функції можна привести до адитивного представлення і розкрити системну невизначеність, яка є основною проблемою існуючих моделей, що примушує на перших етапах ліквідації аварійної ситуації застосовувати типові моделі, далекі від існуючої ситуації з неузгодженням у часі.

З огляду на те, що хімічне підприємство, як складна система (мікросередовище – МіС), функціонує відповідно до завдань макросередовища (МаС), здійснює взаємодію

із середовищем та забезпечує умови стійкості підприємства, що визначені в проектній документації, показник відповідності поточного стану підприємства системним вимогам можна сформулювати як здатність функціонувати за призначенням (виконувати функціональні завдання від макросередовища):

$$F_{MiC}=F_1+ F_2 +...+F_i+...+F_n \,, \quad (5)$$

де F_{MiC} – цільова функція підприємства (мікросистеми); $F_{1,2...i...n}$ – перелік типових завдань, які здатне реалізувати хімічне підприємство, як відкрита система й об'єкт управління, за призначенням.

Кожний з наведених показників є системним аспектом хімічного підприємства по відношенню до цільової функції об'єкта. Саме на цей показник націлений вектор дії імпульсної вибухопожежної системи.

Хімічне підприємство, як складна система, є сукупністю структурно упорядкованих ресурсів, пов'язаних єдиною метою, балансується інформацією про єдиний регламент функціонування у формі рішень персоналу.

Мета існування хімічного підприємства формулюється органом управління, яке утворює цей об'єкт для реалізації певної частини своїх функцій та завдань. Метасистема формулює цільову функцію своїх об'єктів. Для її адаптації до позиції хімічного підприємства відносно забезпечення імпульсної вибухопожежної безпеки треба переформулювати цільову функцію хімічного підприємства [2] з огляду на системні обмеження щодо зазначеного виду безпеки функціонування конкретного підприємства, визначити нові функції об'єкта, перелік його завдань з безпеки, які реалізуються за типовими проектними технологіями, що для системи вибухопожежної безпеки хімічного підприємства можна представити у вигляді алгоритму (рис.1).

Трансформація цільової функції з забезпечення імпульсної вибухопожежної безпеки проходить три етапи і завершується в процедурах доведення рішення керівництва підприємства до конкретних виконавців:

– команди, сигнали щодо підготовки до використання ресурсів;

– команди, сигнали щодо підготовки до використання середовища;

– команди, сигнали щодо виконання регламенту та повноважень.

Три етапи на шляху трансформації цільової функції обумовлюють потрійну природу циклічних процесів управління складною системою хімічного підприємства, у тому числі – і доводять необхідність потрійного контуру управління імпульсною системою вибухопожежного захисту підприємства (автоматичного, автоматизованого і ситуаційного).

Для визначення відповідності моделі відносно конкретного моменту часу з виконання виробничого завдання з визначеним рівнем ризику, а також з врахуванням ресурсу припустимого ризику, що забезпечували б можливість переходу від нештатного режиму до штатного з недопущенням розвитку катастрофічних явищ, можна використати підхід аналізу складних технічних систем [1].

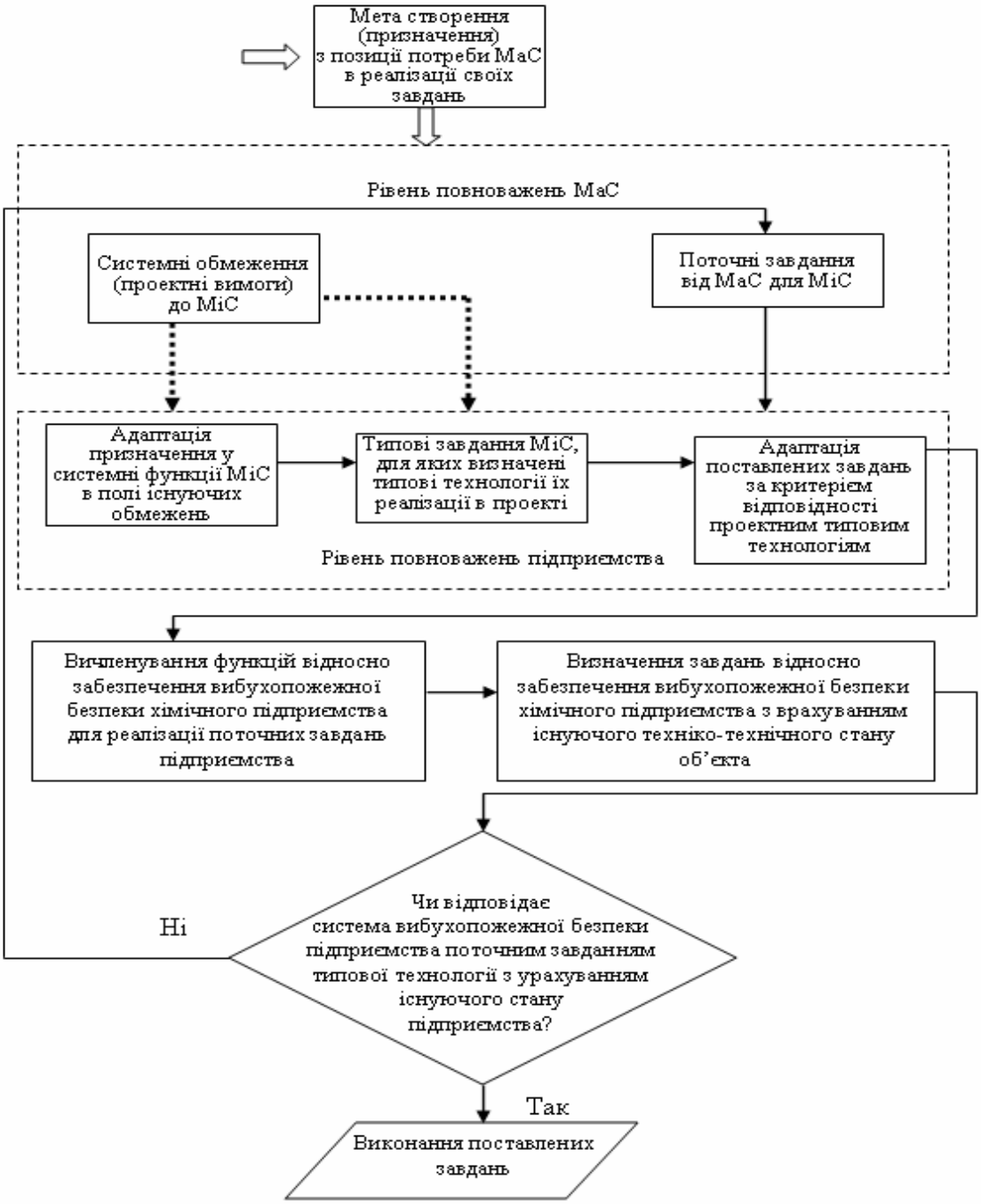


Рис. 1. Блок-схема алгоритму трансформації цільової функції в процедурах управління вибухопожежною системою МіС

Функціонування системи характеризується описом ситуацій, які показують стан складної системи S_1, S_2,…, S_n ...., де кожен стан S_n заданий конкретними показниками процесів функціонування системи (Y_n, X_n, U_n), впливом зовнішнього середовища та факторів ризику Ξ_k:

$$S_n = \{(Yn \in Y) \wedge (Xn \in X) \wedge (Un \in U) \wedge (\Xi n \in \Xi)\}, \quad (6)$$

де значення показника в момент часу $T_n \in T^{\pm}$ визначають відношення:

$$
\begin{aligned}
&Y_s = Y[T_s];\ X_s = X[T_s];\ U_s = U[T_s];\ \Xi_s = \Xi[T_s];\\
&T_s = \{t_s \mid t_s > t_{s-1}\};\ T_s \in T^{\pm};\ T^{\pm} = \{t \mid t^- \le t \le t^+\};\\
&Y = (Y_i \mid i = \overline{1,m});\ X = (X_j \mid j = \overline{1,n});\\
&U = (U_q \mid q = \overline{1,Q});\ \Xi = (\Xi_p \mid p = \overline{1,P});
\end{aligned}
\tag{7}
$$

де Y – множина зовнішніх параметрів Y_i, яка утримує всі показники якісного функціонування системи, у тому числі ті, які характеризують безпечне функціонування; X – множина внутрішніх параметрів X_j, до складу якої входять конструктивні, технологічні та інші показники, включаючи ті, які дозволяють визначити стан зносу основних виробничих фондів; U – множина керуючих параметрів U_q; Ξ – множина параметрів впливу зовнішнього середовища Ξ_p та факторів ризику; $Y[T_s], X[T_s], U[T_s], \Xi[T_s]$ – множина значень відповідних параметрів в момент часу T_s; $T^{\pm}$ – заданий або прогнозований період функціонування активного об'єкта.

Хімічне підприємство, як складна система, має керований режим функціонування $\tilde{\tilde{R}}_{tr}^{+}$, який обумовлений U_{tr} системи управління безпекою, які протягом періоду $\breve{T}_{tr}^{\pm}$ призводить до переходу нештатного режиму R_{os} до штатного режиму R_{sd}. Тобто режим $\breve{R}_{tr}^{+}$ характеризується функціоналом:

$$
\breve{R}_{tr}^{+} : R_{os} \xrightarrow{U_{tr}} R_{sd}, \tag{8}
$$

який визначає процес переходу режиму за межами регламенту до режиму, обумовленого регламентом, під впливом системи управління за конкретною моделлю.

Визначення відповідності інформаційної моделі умовам надання повної, своєчасної та достовірної інформації є результатом обраної стратегії управління. Під час формалізації і рішення задач у процесі управління велике значення мають якісні характеристики використовуваної інформації.

У моделі трансформації інформації в процедурах управління вибухопожежною безпекою хімічного підприємства (рис. 1) наведена технологія поступового переходу від інформаційної невизначеності завдання щодо вибухопожежної безпеки підприємства до повної визначеності команд і сигналів на його реалізацію, і зворотна трансформація від маси неупорядкованих даних моніторингу до повного аналізу вибухопожежного стану системи і її можливостей. Модель показує природну потребу системи управління в перевірці інформації на різних рівнях її трансформації щодо її несуперечності та повноти, адже неузгодженість програм і планів, суперечність законів та нормативних актів ведуть до зростання ентропії інформації управління.

Повноту інформації можна охарактеризувати показником повноти інформованості I_q:

$$
I_q = \frac{Q - Q^-}{Q^+ - Q^-}, \tag{9}
$$

де Q^+, Q^- – відповідно максимально доцільний та мінімально припустимий обсяг інформації, необхідний для прийняття рішень у визначених умовах; Q – обсяг інформації, яку має особа, що приймає рішення (ОПР) в наявній ситуації.

Величини, що характеризують повноту інформованості, можна представити на дереві подій [4] для аварії на хімічному підприємстві (рис. 2).

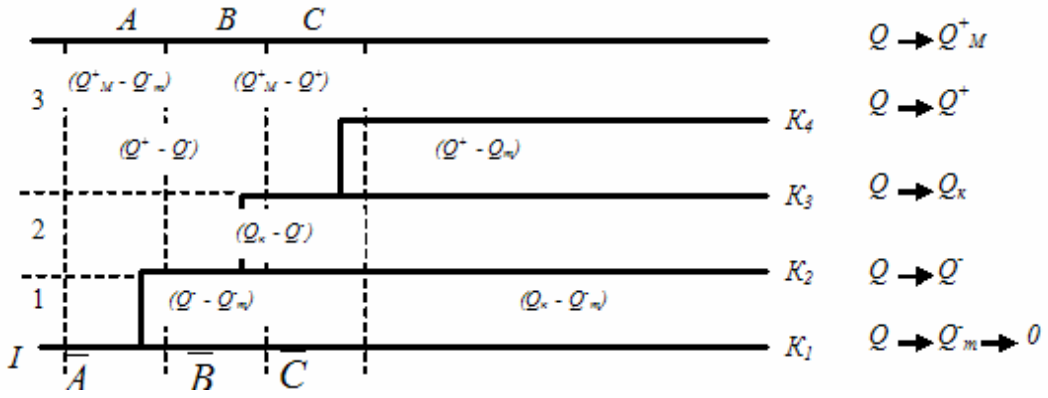


Рис. 2. Повнота інформованості ОПР в розрізі подій для аварії на хімічному підприємстві

На рисунку 2 застосовані наступні визначення: I – вихідна подія; *A*, *B*, *C* – спрацьовування систем безпеки; $\overline{A}$, $\overline{B}$, $\overline{C}$ – відмови систем безпеки; K_1, K_2, K_3, K_4 – кінцеві події; $Q = Q^-_m$ – рівень повної відсутності інформації про чинники з заданої множини ситуацій; $Q = Q^-$ – рівень мінімально припустимого обсягу інформації для прийняття рішень у визначених умовах; $Q = Q^+$ – рівень максимально доцільного обсягу інформації для прийняття рішення у визначених умовах; $Q = Q^+_m$ – рівень максимально повної інформації про чинники з заданої множини ситуацій; $Q = Q_к$ – рівень, який відповідає *k*-ситуації заданої множини.

Також на рисунку 2 виділені ділянки:

– ділянка 1 відповідає рівню недостатньої повноти інформованості (критичні умови переходу аварії в катастрофу);

– ділянка 2 визначає область раціональної повноти інформованості ОПР (перехід від умов, визначених регламентом, до нерегламентованих умов);

– ділянка 3 відповідає області надмірної повноти інформованості ОПР (робота в умовах, визначених регламентом).

Таким чином, міра невизначеності інформації управління за своєю суттю і є показником неповноти інформації у ОПР для визначення ситуації та прийняття відповідних до ситуації рішень. Основний критерій оцінки стану об’єкта управління за обраною моделлю оцінки ситуації визначається як здатність об’єкта управління функціонувати за призначенням без виникнення аварійних ситуацій.

Своєчасність інформованості можна аналогічно дослідити на дереві подій.

Повнота та своєчасність інформації є необхідними умовами, але ще одна умова – несуперечність інформації. Суперечність може бути виявленою шляхом порівнянь ідентичних ознак у записах про різні види інформації, що належать до одного імені.

Одна з задач інформаційної моделі хімічного підприємства – гармонійно поєднати технології кризового моніторингу та кризового управління з процедурами управління ресурсами, інфраструктурою, регламентом, загальним моніторингом об’єкта. Технології підтримки прийняття рішень у зазначеній ситуації, як правило, спираються на експертні системи, системи прийняття колективних рішень та будуються переважно на апараті нечіткої логіки в умовах невизначеності. Експертні методи доповнюються математичними моделями.

Проблема полягає в тому, що на практиці у технологіях управління макросистемою ще й досі не став очевидним наслідковий зв’язок між своєчасним застосуванням технології кризового управління до ситуації на об’єкті і намаганням уникнути кризи шляхом застосування технології штатного управління. Саме своєчасність визначення кризової ситуації, що значно відрізняється від штатної ситуації і не може бути виправленою методами тільки штатного управління, є загальною проблемою технології управління для багатьох хімічних підприємств і потребує дослідження для подальшого застосування результатів у проектах з забезпечення підтримки прийняття рішень.

З погляду на весь цикл можливих ситуацій на об'єкті, технологія ситуаційного управління повинна не відокремлюватись від штатної системи управління, а створювати цілісну систему, яка підтримує органи управління в штатних ситуаціях, у питаннях упередження кризи, переходу від штатного до кризового управління і в кризовому управлінні тощо.

Надзвичайна подія на хімічному підприємстві, як правило, має розвиток у вигляді процесів різної природи, більшість з яких підпадає під дію теорії самоорганізованої критичності, коли одне явище залежить від значного числа незалежних випадкових подій [4]. Такий підхід доцільно застосовувати для аналізу моделі у тих випадках, коли відомі різноманітні фактори ризику, що можуть призвести до тієї чи іншої надзвичайної ситуації. У випадку з хімічним підприємством ці фактори можна визначити з великою достовірністю завдяки ПЛАСу або паспорту об'єкта.

Трирівнева побудова системи імпульсного вибухопожежного захисту дозволяє отримати переваги часу в порівнянні з традиційними засобами пожежогасіння, щоб здійснити перебір факторів та провести ситуаційну оцінку можливого розвитку подій за допомогою експертних методів в ситуаційно-кризовому центрі підприємства.

Висновки і пропозиції. У статті визначено комплекс відповідності інформаційної моделі ППР імпульсної вибухопожежної безпеки потребам об'єкта управління – хімічного підприємства.

Зазначені аспекти стану хімічних підприємств в Україні приводять до розуміння нагальної потреби в модернізації системи вибухопожежного захисту підприємства, щоб привести її у відповідність до реальних потреб об'єкта управління. При цьому інформаційна модель підтримки прийняття рішень у системі імпульсного вибухопожежного захисту хімічних підприємств повинна відбивати умови різних видів: невизначеність ситуації, невизначеність впливу окремих факторів на розвиток ситуації та невизначеність стану засобів протиаварійного захисту на підприємстві або у його підрозділах і використовувати наряду з формалізованими неформалізовані процедури.

З проведених досліджень щодо відповідності інформаційної моделі ППР імпульсної вибухопожежної безпеки підприємства системним потребам підприємства можна зазначити, що взаємодія визначених аспектів функціонування підприємства повинна реалізувати його призначення без переходу до кризового режиму функціонування, що забезпечується застосуванням імпульсних засобів вибухопожежного захисту. Суть взаємодії полягає в тому, що ресурси, регламент та рішення персоналу у сфері імпульсного вибухопожежного захисту виступають балансуючим фактором. При цьому цільова функція в аспекті вибухопожежного захисту лишається незмінною протягом циклу функціонування підприємства – безаварійне функціонування або швидке повернення нештатної ситуації до штатного режиму за допомогою імпульсних засобів вибухопожежного захисту. Досягнення цього критерію доводить відповідність моделі управління системним потребам об'єкта управління.

При зміні ситуації на об'єкті управління часто виникають фактори, які не можуть бути одразу ж з'ясованими та зрозумілими як причинно-наслідковий зв'язок подій. Це є випадком повної відсутності формалізованих знань. Відповідність моделі при зміні ситуації можна визначати за допомогою експертних систем за умов своєчасної, повної та достовірної інформації, що складає основу реалізації інтуїтивної функції ППР. Методи обробки такої інформації потребують спеціального інструментарію та наукових методів досліджень.

Список використаних джерел

1. Згуровський М. З. Системний аналіз. Проблеми, методологія застосування / М. З. Згуровський, Н. Д. Панкратова. – К.: Наукова думка, 2011. – 728 с.

2. Косс В. А. Умови відповідності моделі управління системним потребам об'єкта управління / В. А. Косс // Математичні машини і системи. – 2007. – № 1. – С. 12-18.

3. Серебровский А. Н. Об одном методе вероятностного анализа безопасности потенциально опасных объектов / А. Н. Серебровский // Математические машины и системы. – 2002. – № 1. – С. 41-48.

4. Качинський А. Б. Засади системного аналізу безпеки складних систем / А. Б. Качинський. – К.: ДП «НВЦ «Євроатлантикінформ», 2006. – 336 с.

5. Захматов В. Д. Личное оружие пожарного для тушения пожаров в лесу, небоскребах и зонах катастроф / В. Д. Захматов, Н. В. Щербак // Пожарная безопасность в строительстве. – 2011. – № 3. – С. 58-65.

УДК 331.452

Т.М. Таірова, канд. хім. наук
Національний науково-дослідний інститут промислової безпеки та охорони праці, м. Київ, Україна

СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО АНАЛІЗУ СТАНУ БЕЗПЕКИ ПРАЦІ В УКРАЇНІ

Досліджено динаміку змін показників стану безпеки праці на підприємствах Україні. Встановлено прямолінійний зв'язок між смертельним травматизмом та показником небезпечності машин. Запропоновано новий методологічний підхід до прогнозування рівня смертельного травматизму, що відбувається під час роботи на несправному обладнанні.

***Ключові слова**: показник стану безпеки праці, смертельний травматизм, прогнозування.*

Исследовано динамику изменений показателей состояния безопасности труда на предприятиях Украины. Установлено прямолинейную зависимость между смертельным травматизмом и показателем опасности машин. Предложено новый методологический подход к прогнозированию уровня смертельного травматизма, который происходит при работе на неисправном оборудовании.

***Ключевые слова**: показатель состояния безопасности труда, смертельний травматизм, прогнозирование.*

Investigated the dynamics of changes in the values of the safety in enterprises of Ukraine. Established linear relationship between fatal injuries and indications of danger machines. Proposed a new methodological approach to predicting the level of fatalities that occur on the defective equipment.

***Key words**: values of the safety, fatal injury, prediction.*

Постановка проблеми. Підвищена увага до проблем безпеки праці в світі пов'язана з тим, що кожен рік, незважаючи на заходи, що вживаються, у різних країнах зростає рівень виробничого травматизму, у тому числі зі смертельними наслідками. Причому це стосується і тих країн, де безпеці праці приділяється підвищена увага.

В Україні створення безпечних і нешкідливих умов праці є важливою проблемою, оскільки до цього часу на підприємствах використовується обладнання, що не відповідає нормативним актам з охорони та вичерпало передбачений ресурс, в окремих галузях економіки використовуються застарілі технологій виробництва. Високий рівень тяжкого та смертельного травмування працівників на обладнанні, що не відповідає вимогам нормативних актів з охорони праці, спостерігається у вугільній промисловості, будівництві, сільському господарстві та машинобудуванні. Саме тому на сучасному трансформаційному етапі розвитку економіки України виникає необхідність розробки нових, нестандартних підходів до створення умов праці, максимально сприятливих для людини.

Аналіз досліджень і публікацій. Різні аспекти поліпшення умов й охорони праці досліджували у своїх працях О.І. Амоша, Г.Г. Гогіташвілі, В.С. Джигирей, В.Ц. Жидецький, А.М. Кутиркін, Л.П. Керб, Л.М. Логачова, Н.Д. Лук'янченко, О.В. Мартякова, І.М. Миценко, О.Ф. Новикова, К.Н. Ткачук, С.П.Ткачук, Г.М.Черкасова, Л.В. Шаульська, В.Г. Шульга та інші. Так, А. Кутиркін та Н. Лук'янченко розглядали проблеми економіки охорони праці [1], Л. Калачева і О. Амоша досліджували умови праці в аспекті ефективності виробництва [2; 3], а Г.Г. Гогіташвілі – в аспекті розроблення і наукового обґрунтування системи управління охороною праці на рівні підприємства [4]. Однак у науковій літературі недостатньо вивченими залишаються питання системного підходу до аналізу та прогнозування стану безпеки праці в Україні, що і обумовило вибір мети дослідження та її цільову спрямованість.

Мета статті. Метою роботи є системне дослідження показників безпеки праці в Україні за 2006…2011 рр., визначення їх зв'язку зі смертельним травматизмом на виробництві та розробка підходів до прогнозування виробничого травматизму.

Виклад основного матеріалу. Аналіз впливу показників безпеки праці на підприємствах України, а саме показників небезпечності машин, механізмів, устаткування, транспортних засобів (далі – машин), технологічних процесів та будівель і споруд, на рівень виробничого смертельного травматизму за період 2006...2011 роки проводили шляхом застосування статистичних та математичних методів. Для досліджень були використані матеріали спеціального розслідування нещасних випадків на виробництві з тяжким та смертельним наслідком та звіти щодо стану умов та безпеки праці на підприємствах, в установах, організаціях України за формою №1-УБ, надані обласними державними адміністраціями, органами виконавчої влади й об'єднаннями за досліджуваний період. Показники небезпечності машин, механізмів, устаткування, транспортних засобів, технологічних процес та будівель і споруд (K)обчислювали за формулою:

$$K = M_1 / Z_m , \quad (1)$$

де M_1 – кількість одиниць обладнання, яке не відповідає вимогам нормативних актів про охорону праці; Z_m – загальна кількість одиниць обладнання.

Показники небезпечності технологічних процесів та будівель і споруд обчислювали аналогічно.

Проведені раніше дослідження показали, що рівень травматизму в Україні має стійку тенденцію до зниження. При цьому одним із факторів, який суттєво впливає на таку ситуацію, є зниження кількості працюючих [5]. Іншим фактором, який впливає на рівень виробничого травматизму, є безпека праці на виробництві, а саме використання машин механізмів, устаткування транспортних засобів, обладнання (далі машини), технологічних процесів, будівель та споруд, що не відповідають нормативним актам з охорони праці [6].

Під час вивчення стану безпеки праці на підприємствах України було встановлено, що за період з 2006 по 2011 рік абсолютний показник кількості машин, що не відповідали нормативним актам з охорони праці, знизилась на 30,0 %, але показник небезпечності машин знизився лише на 22,0 %. В цей же період знизилась кількість машин, що вичерпали передбачений паспортом ресурс на 7,7 %, але зріс показник їх небезпечності на 0,6 %. За досліджуваний період відмічалось суттєве зниження загальної кількості виробничих технологічних процесів на 57,0 % та процесів, що не відповідають нормативним актам з охорони праці на 93,3 %. Динаміка показників небезпечності машин, механізмів, устаткування, транспортних засобів, технологічних процесів та будівель і споруд за період з 2006 по 2011 роки наведено на рисунку 1.



Рис 1. Динаміка змін питомої ваги показників стану безпеки праці

Побудовані графіки характеризують зміну показників, що визначають стан безпеки праці в Україні у часі. Однак ламані криві мають злами, за якими не чітко простежується тенденція змін.

З метою визначення загальної тенденції змін показників стану безпеки праці був використаний спосіб вирівнювання рядів динаміки шляхом побудови ковзної середньої. Ковзні середні визначаємо за трирічним періодом. Використання цього методу передбачає укрупнення періодів. Завдяки усередненню фактичних даних за узагальнювальний період індивідуальні коливання досліджуваних показників погашаються.

Ковзні середні повніше описують закономірність змін показників безпеки праці, а загальна тенденція розвитку набуває вигляду плавних ліній (теоретичні рівні). Для більш точного відображення зміни у часі досліджуваних показників безпеки праці була побудована діаграма та вибрані математичні рівняння для кожного досліджуваного показника (рис. 2).

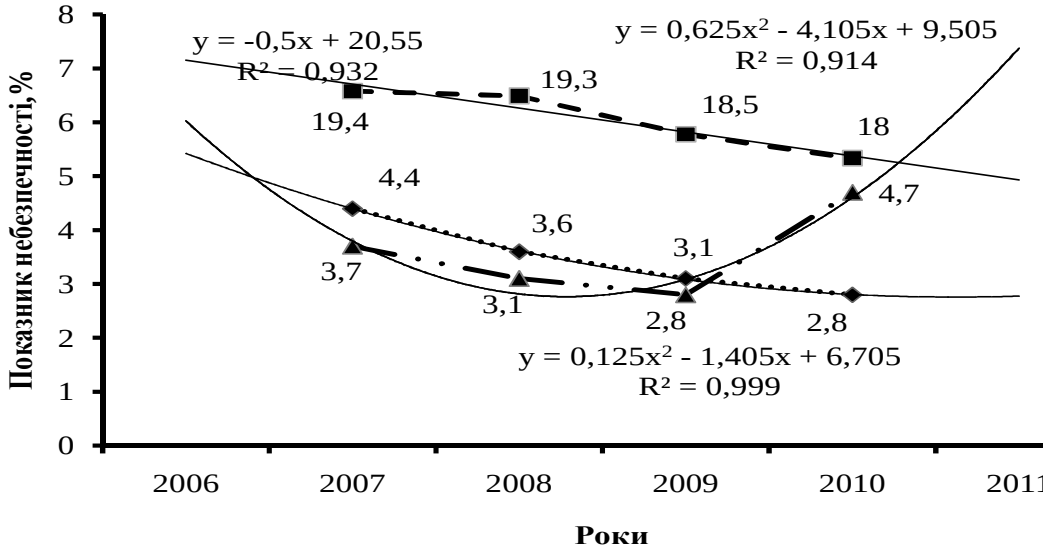


Рис. 2. Тенденції змін показників безпеки праці

Ряд динаміки, що відображає загальну тенденцію змін показника небезпечності машин, що вичерпали передбачений паспортом, вирівняний за рівнянням прямої лінії

$$\tilde{y}_t = a_0 + a_1 t\,, \qquad (2)$$

де $\tilde{y}_t$ − вирівняні (теоретичні) рівні ряду динаміки;

t −порядкові номери періодів часу;

параметри рівняння: a_0 – початок відліку, дорівнює 20,55, a_1 – коефіцієнт регресії або пропорційності, який показує середнє щорічне зниження показника небезпечності машин, що вичерпали передбачений паспортом ресурс, становить (– 0,5).

Щоб оцінити ступінь наближення лінійного тренду до фактичних даних динамічного ряду, визначимо фактичне квадратичне відхилення і коефіцієнт варіації. Для цього обчислимо відхилення фактичного значення показника небезпечності машин, що вичерпали передбачений паспортом, від вирівняного значення $(y - \tilde{y}_t)$, їхні квадрати $(y - \tilde{y}_t)^2$ та їхню суму $\Sigma(y - \tilde{y}_t)^2$.

Залишкове середнє квадратичне відхилення становить:

$$\sigma_{зал} = \sqrt{\frac{\Sigma(y - \tilde{y}_t)}{6}} = \sqrt{\frac{8{,}33}{6}} = 1{,}18\,. \quad (3)$$

Коефіцієнт варіації визначаємо за формулою:

$$\upsilon = \frac{\sigma}{\overline{x}} \cdot 100\% = \frac{1.18}{18.8} \cdot 100\% = 6{,}28\,\%. \quad (4)$$

Коливання фактичних значень показників небезпечності машин, що вичерпали передбачений паспортом ресурс, навколо прямої ліній у середньому становить 1,18 або 6,28 %. Низьке значення коефіцієнта варіації вказує на те, що рівняння прямої лінії досить точно відображує тенденцію зміни показників небезпечності машин, що вичерпали передбачений паспортом ресурс, у часі, адже чим менше значення коефіцієнта варіації, тим більша стабільність прогнозної ситуації і, відповідно, менший ступінь ризику.

Ряди динаміки, що відображають загальну тенденцію зміни показників небезпечності машин (4) та процесів (5), що не відповідають нормативним актам з охорони праці, були вирівнянні за рівнянням параболи другого порядку, яке характеризується трьома параметрами та має такий вигляд:

$$\tilde{y} = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 = 0{,}125t^2 - 1{,}405t + 6{,}705\,, \quad (5)$$

$$y = 0{,}625t^2 - 4{,}105t + 9{,}505\,, \quad (6)$$

де $\tilde{y}$ – вирівняні значення рівнів ряду динаміки;

t – час, тобто порядкові номери періодів часу;

a_0 – початок відліку;

a_1 – коефіцієнт регресії;

a_2 – коефіцієнт середнього щорічного прискорення (уповільнення) змін рівня динаміки.

Щоб оцінити ступінь наближення параболічного тренду (5) до фактичних показників динамічного ряду, обчислюємо як і в попередньому випадку, залишкове середнє квадратичне відхилення і коефіцієнт варіації.

Залишкове середнє квадратичне відхилення становить:

$$\sigma_{зал} = \sqrt{\frac{\Sigma(y - \tilde{y}_t)}{6}} = \sqrt{\frac{27{,}04}{6}} = 2{,}12\,. \quad (7)$$

Коефіцієнт варіації визначаємо за формулою:

$$\upsilon = \frac{\sigma}{\overline{x}} \cdot 100\% = \frac{2{,}12}{3{,}6} \cdot 100\% = 58{,}8\%\,. \quad (8)$$

Аналогічні показники обчислимо для параболічного тренду (6). Залишкове середнє квадратичне відхилення становить:

$$\sigma_{зал} = \sqrt{\frac{\Sigma(y - \tilde{y}_t)}{6}} = \sqrt{\frac{92{,}16}{6}} = 3{,}9\,. \quad (9)$$

Коефіцієнт варіації визначаємо за формулою:

$$\upsilon = \frac{\sigma}{\overline{x}} \cdot 100\% = \frac{3{,}9}{4{,}6} \cdot 100\% = 84.7\%\,. \quad (10)$$

Відомо, що коефіцієнт варіації на практиці використовується не тільки для порівняльної оцінки варіації, а й для характеристики однорідності сукупності. Якщо цей показник не перевищує 0,333, або 33,3%, варіація ознаки вважається слабкою, а якщо більше 0,333 – сильною. У таких випадках коефіцієнт варіації дорівнює 58,8 % та 84,7 %,

характеризує сильну варіацію, тобто статистичні сукупності, що вивчались, а саме показники небезпечності машин, що не відповідають нормативним актам з охорони праці, та технічних будівель, що за технічним станом не відповідають будівельним нормам та правилам, вважаються неоднорідними, а середні величини - нетиповими, тому їх не можна використовувати як узагальнюючий показник сукупності.

Для з'ясування форми, параметрів рівняння та тісноти зв'язку між двома ознаками – смертельним виробничим травматизмом, що стався на несправному обладнанні та показником, що характеризує стан безпеки праці, проведено кореляційно регресійний аналіз. Для встановлення математичного рівняння побудовано графік кореляційної залежності (кореляційне поле) між кількістю загиблих при роботі на несправному обладнанні (y – результативна ознака) та показником небезпечності, що вичерпали передбачений паспортом ресурс (x – факторна ознака).

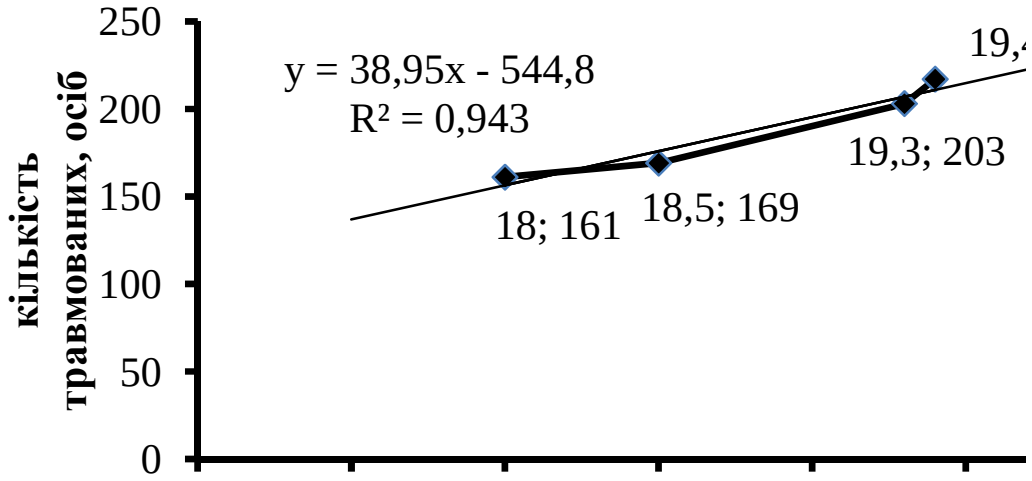


Рис. 3. Кореляційне поле залежності смертельного травматизму від показника небезпечності машин, що вичерпали передбачений паспортом ресурс

Як показує графік, зв'язок між двома ознаками близький до прямолінійного та виражається рівнянням прямої лінії (11)

$$\tilde{y}_x = a + bx. \tag{11}$$

Підставивши значення a та b в рівняння, отримуємо рівняння (10), в якому коефіцієнт регресії b = 38,95 показує, що зі зростанням показника небезпечності машин, що вичерпали передбачений паспортом ресурс на 1 %, кількість загиблих та тяжко травмованих, які працювали на несправному обладнанні зростає на 39 осіб.

$$\tilde{y}_X = 38{,}95x - 544{,}8. \tag{12}$$

Визначимо тісноту зв'язку між досліджуваними ознаками (смертельним травматизмом, що стався на несправному обладнанні та показником небезпечності машин, що вичерпали передбачений паспортом ресурс) шляхом обчислення коефіцієнта кореляції за формулою

$$r = \frac{\overline{xy} - \overline{x}\,\overline{y}}{\sigma_x \cdot \sigma_y}. \tag{13}$$

Залишкове квадратичне відхилення σ_x, σ_y визначаємо за формулою

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{\sum x^2}{n} - \overline{(x)}} = \sqrt{\frac{1415{,}12}{4} - 353{,}78} = 0{,}616,$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum y^2}{n} - \overline{(y)}} = \sqrt{\frac{142780}{4} - 187{,}5} = 23{,}2 .$$

Підставивши значення конкретні значення в рівняння (12) обчислимо коефіцієнт регресії

$$r = \frac{3538{,}05 - 187{,}5}{0{,}616 \cdot 23{,}2} = 0{,}912 .$$

Коефіцієнт кореляції показує, що між смертельним травматизмом, що стався на несправному обладнанні, та показником небезпечності машин, що вичерпали передбачений паспортом ресурс, спостерігається тісний зв'язок. Коефіцієнт детермінації ($R^2 = 0{,}942$) $R = 0{,}970$, показує, що 97,0 % загального варіювання смертельного травматизму, що стався на несправному обладнанні, зумовлено відмінностями в значеннях показника небезпечності машин, що вичерпали передбачений паспортом ресурс, а решта 3,0 % іншими факторами, які в цьому випадку не були враховані.

Висновки

1. Встановлено, що між смертельним травматизмом працівників на виробництві та показником небезпеки машин, що вичерпали передбачений паспортом ресурс, спостерігається тісний зв’язок.

2. Наявність кореляційних зв’язків у вигляді функцій надає можливість всебічного аналізу взаємного впливу машин, що вичерпали передбачений паспортом ресурс на смертельний травматизм працівників на виробництві.

3. Результати досліджень дають можливість використання запропонованих функціональних зв’язків для здійснення прогнозування очікуваного рівня смертельного травматизму з метою розроблення та впровадження технічних і організаційних заходів щодо поліпшення безпеки праці.

Перспектива подальших досліджень вбачається у вивченні комплексного впливу факторів умов та безпеки праці на рівень виробничого травматизму для закладення основ для розробки заходів щодо його запобігання.

Список використаних джерел

1. Кутиркін А. М. Економіка охорони праці / А. М. Кутиркін, Н. Д. Лук’янченко. – Донецьк: ІЕП НАН України, 1997. – С. 65.

2. Калачева Л. Л. Условия труда: Методологические вопросы комплексного исследования / Л. Л. Калачева. – Новосибирск: Наука, 1978. – 288 с.

3. Амоша А. И. Условия труда и эффективность производства (социально-экономические проблемы гармонизации и методы оптимизации) / А. И. Амоша. – К.: Наукова думка, 1997. – 184 с.

4. Гогиташвили Г. Г. Системы управления охраной труда / Г. Г. Гогиташвили. – Л.: Афиша, 2002. –320 с.

5. Єсипенко А. С. Особливості взаємозв'язку між чисельністю працюючих та виробничим травматизмом / А. С. Єсипенко, Н. В. Романенко // Проблеми охорони праці в Україні: зб. наук. праць. Вип. 14. – К.:ННДІОП, 2007. – С. 28-35.

6. Есипенко А. С. Дослідження динаміки змін і тенденцій стану умов та безпеки праці в Україні / А. С. Есипенко, Т. Н. Таірова // Проблеми охорони праці в Україні. Вип. 21. – К.: ННДІПБОП, 2011. – С. 111-118.

УДК 334.716

Т. І. Ткаченко, аспірант
Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, м. Черкаси, Україна

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ СТАТИСТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ВИРОБНИЧОГО ПРОЦЕСУ НА ХАРЧОВИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

Запропоновано методику, яка дозволяє здійснювати статистичні регулювання виробничого процесу на харчових підприємствах, що, в свою чергу, надасть можливість підвищити його стійкість, ефективність та результативність зокрема.

***Ключові слова**: харчова промисловість, статистичне регулювання якості, виробничий процес, споживач, випробування, продукція, контроль якості.*

Предложена методика, которая позволяет осуществлять статистические регулирования производственного процесса на пищевых предприятиях, что, в свою очередь, позволит повысить его устойчивость, эффективность и результативность.

***Ключевые слова**: пищевая промышленность, статистическая регуляция качества, производственный процесс, потребитель, испытание, продукция, контроль качества.*

The technique, which allows for statistical control of the production process for food companies, which in turn will provide an opportunity to improve its stability, efficiency and effectiveness.

***Key words**: food industry, statistical adjusting of quality, productive process, consumer, test, products, control of quality.*

Постановка проблеми. У сучасних ринкових умовах стабільна та успішна діяльність підприємства визначається рядом чинників, основним з яких є здатність задоволення потреб споживача високоякісною та безпечною продукцією. Раціональне використання всього виробничого потенціалу, що об'єднує світовий досвід, дозволяє зберегти і зміцнити ринкові позиції, спираючись в основному на власні ресурси. Розробка методичних основ аналізу, створення та вдосконалення контролю якості на харчових підприємствах є найважливішим чинником підвищення їхньої ефективності та конкурентоспроможності, що, в свою чергу, надає можливість виготовлення та реалізації продукції високого рівня якості.

Аналіз досліджень і публікацій. Окремими проблемами, які пов'язані з контролем якості продукції займалися як закордонні, так і вітчизняні науковці, такі як: Тито Конті, В. Шухарт, Е. Демінг, Р. Каплан, Д. Нортон, Ю. Н. Адлег, А. М. Азоров, Б. В. Бойцов, В. Г. Версан, К. Т. Джурбаєв, А. С. Зенкін, В. І. Круглов, А. Д. Некіфоров, В. В. Окропилов, І. Н. Панін, М. З. Світкін, Г. І. Хімічева, В. К. Федюкін, Р. В. Бичовський, В. В. Кофман, П. Г. Столярчук, Н. А. Кусакін, С. Д. Мельнийчук та інші.

Мета статті. Метою роботи є розробка методики статистичного регулювання параметрів якості виробничого процесу на харчових підприємствах.

Виклад основного матеріалу. Незважаючи на прогрес в науці, враховуючи сучасні харчові технології, індустріалізацію, збільшення потокового виробництва, урбанізацію, що, в свою чергу, призводить до складних харчових ланцюжків, забруднення навколишнього середовища та значного підвищення ризику псування харчових продуктів на стадії виробництва. В цих умовах підвищується відповідальність виробників за якість та безпечність продукції, що випускається. Одним із шляхів розв'язання цієї проблеми є створення та впровадження методики статистичного регулювання параметрів якості виробничого процесу на харчових підприємствах. Адаптивність підсистеми безпеки дає можливість враховувати вплив сучасних факторів зовнішнього середовища та гнучко реагувати на терміни вхідного контролю. Враховуючи вимоги НАССР, які ґрунтуються на управлінні безпечністю продуктів харчування через аналіз та контроль за біологічними, хімічними і фізичними забрудненнями, починаючи з виробництва сировини, його закупівлі й обробки, закінчуючи виробництвом, продажем та споживанням кінцевого продукту [2; 4]. Ця система є інтегрованою системою контролю харчової безпеки, впровадження якої дає впевненість споживачам в безпеці виробництва та, в свою чергу, дозволяє неухильно виконувати

вимоги законодавства у сфері безпеки продуктів харчування та продемонструвати ефективне управління безпекою харчових продуктів у відповідній документації.

Основні методи та інструменти системи забезпечення безпечності продуктів харчування включають: статистичні методи приймального контролю, аналіз Парето, діаграма Ісикаві, контрольні карти Шухарта, гістограми тощо. Запропоновані елементи системи НАССР не враховують гнучкості системи до впливу швидкозмінних факторів зовнішнього середовища. Існує необхідність розробити відповідну методику статистичного регулювання параметрів якості виробничого процесу на харчових підприємствах, яка б враховувала функції вірогідності зупинки виробничого процесу задля визначення розміру вибірки, яка безпосередньо повинна залежать від нормативних значень допуску та незміщеної оцінки загального вибіркового стандартного відхилення.

Важливим елементом у методиці є відстеження та втілення в продукції тих вимог споживачів, які можливо віднести до розряду непізнаних очікувань, тобто, які призводять до появи у продукції таких властивостей, сама можливість наявності яких ще не відома споживачеві, але до сприяння яких вони вже внутрішньо готові та із задоволенням скористувалися б такою продукцією на випадок появи її у ринковому середовищі.

Ресурси, які має організація, завжди є обмеженими. Існує необхідність використовувати на харчових підприємствах оптимізаційні матриці з метою зосередження зусиль підприємства на тих дільницях діяльності, які здатні призвести до найбільшої віддачі в ринкових умовах, які склалися на відповідний проміжок часу. Ідентифіковані вимоги споживачів, перш ніж стати вхідним матеріалом для оптимізації технічних характеристик проекту продукції, підвернені пріоритетності у споживачів цільового сектору ринкового середовища, що і надає можливість виявити серед них найбільш важливі для втілення в продукції, виходячи з підвищення задоволеності потреб споживачів [1; 3].

Постачання пріоритетними вимогами споживачів за допомогою кореляційних матриць ставляться у відповідність структурованій сукупності технічних характеристик продукції. Оригінальний алгоритм обробки, який з'являється в ринкових умовах, призводить до появи сукупності цільових значень для розгляду характеристик проекту, також враховуючи пріоритетні умови. Така властивість методу надає можливість підприємству не лише підготувати оптимальне технічне завдання на проектування та розробку технологічного процесу виготовлення продукції, але і найкращим чином розподілити виділені для розв'язання критичні точки контролю якості в системі, для перевірки на відповідність нормативній документації.

У роботі запропонована підсистема безпеки продуктів харчування на підприємстві, яка сфокусована на запобіганні недопустимих ризиків та органічно доповнює існуючі процедури технологічного контролю на харчових підприємствах. Перевагою підсистеми є її застосування протягом усього ланцюга живлення від сільськогосподарського виробника до кінцевого споживача на основі наукових даних щодо ризику для здоров'я людини. Під час впровадження підсистеми здійснюється багатопрофільний підхід. Підсистема безпеки продуктів харчування є досить рентабельною внаслідок того, що підприємство повинно направляти ресурси в критичні сфери виробництва, тим самим, зменшуючи ризик виробництва та продажу небезпечного продукту. Вона приносить значну корисність підприємству, допомагає при проведенні інспекційного контролю, а також сприяє міжнародній торгівлі, підвищенню впевненості в безпеці харчових продуктів.

У практичному досвіді провідних фахівців з контролю якістю виробничих систем широко використовуються статистичні методи, які ґрунтуються на взаємопов'язаному комплексі способів відстеження параметрів якості, що включать статистичні регулювання, статистичний приймальний контроль, статистичний аналіз, статистичну оцінку якості зокрема.

Автором приведені результати наукових досліджень статистичної стійкості виробничого процесу на харчових підприємствах та запропоновані шляхи впровадження реальних методів, що дозволяють забезпечити стабільність виробництва та усунути причини виникнення браку. Традиційний підхід, оснований на розподілі процесів виробництва та контролю, не дозволяє здійснювати управління якістю та призводить до великих об'ємів бракованої продукції [1; 2; 4]. Запропонована методика припускає управління процесами на базі даних, отриманих безперервно при моніторингу харчового виробництва. Це, в свою чергу, дає можливість внести зміни до технологічного процесу, до того як виникне ймовірність виготовлення бракованої продукції.

За результатами проведених наукових досліджень та промислової апробації була розроблена методика, яка дозволяє впровадити у харчове виробництво методи статистичного управління параметрами якості при технологічному виробництві продукції та методи оцінки статистичної стійкості процесу виробництва.

Методика статистичного регулювання параметрів якості виробничого процесу включає такі складові, як:

1. Відлагодження виробничого процесу з метою переведення його в статистично керований стан.

2. Оцінка виробничого процесу на постійність технологічного розсіювання відповідно до умов критерію Бартлета:

$$X^2 < X^2_{(m-1);(1-\alpha)}. \quad (1)$$

$$X^2 = \frac{3m(n-1)^2}{3mn-2m+1}\cdot\left(m\cdot \ln\overline{S_n^2} - \sum_{i=1}^{m}\ln S_{in}^2\right).$$

3. Оцінка виробничого процесу на постійність рівня налагодження відповідно з F - критерієм.

$$F > F_{(m-1);|m(n-1)|;(1-\alpha)}. \quad (2)$$

$$F = \frac{n|m(n-1)|}{(n-1)(m-1)}\cdot\frac{\left(\sum_{i=1}^{m}\overline{X}_{in}^2 - m\overline{X}_m^2\right)}{\sum_{i=1}^{m}S_{in}^2}. \quad (3)$$

4. Розв'язок щодо підналагодження процесів залежно від результатів оцінки, а також повторна оцінка за критеріями Бартлета та Фішера.

5. Вибір критичного значення частки бракованої продукції $q_{кр}$ та величини рівня значущості $a_н$.

6. Визначення незміщеної оцінки загального вибіркового стандартного відхилення.

$$\widehat{S}_{mn} = \sqrt{\frac{n\sum_{i=1}^{n}\left[\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}x_{ij} - \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}x_{ij}\right)\right]^2}{a_{mn}(mn-1)} + \frac{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\left(x_{ij} - \frac{1}{n}\sum x_{ij}\right)^2}{a_{mn}(mn-1)}}. \quad (4)$$

7. Визначення розміру вибірки n шляхом аналізу функції вірогідності зупинки процесу щодо налаштування $P_{ост} = f(n)$ при $\widehat{S}_m = const$.

$$P_{зуп} = 1 - \Phi\left[\sqrt{n}\left(\frac{T_B - X}{\widehat{S}_{mn}}\right) - 2Z_{1-q_{кр}} - \frac{Z_{1-a_н}}{\sqrt{n}}\right] \text{ при } x > T_{ср}. \quad (5)$$

$$P_{зуп} = \Phi\left[\sqrt{n}\left(\frac{T_н - X}{\widehat{S}_{mn}}\right) + 2Z_{1-q_{кр}} + \frac{Z_{1-a_н}}{\sqrt{n}}\right] \text{ при } x \le T_{ср}.$$

8. Визначення контрольних меж статистичного регулювання виробничого процесу виготовлення продукції:

$$T_{max} = T_B - Z_{1-q_{кр}} \cdot \widehat{S}_{mn}. \quad (6)$$

$$T_{min} = T_н + Z_{1-q_{кр}} \cdot \widehat{S}_{mn}. \quad (7)$$

9. Побудова контрольної карти середніх значень з метою відстеження сигналу зупинки процесу щодо налагодження $\overline{X}_{in} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} X_{ij}$ при заданих параметричних значеннях.

10. Моніторинг стійкості процесу на основі параметрів розсіювання та відхилення рівня налаштування шляхом побудови процесних карт $C_p = f(m)$ та $C_н = f(m)$.

Кінцеву продукцію можливо перевіряти за допомогою порівняльного випробування з ідентичною продукцією інших підприємств-аналогів, що, в свою чергу, надасть прозору інформацію, яка допоможе споживачам зробити більш раціональний вибір серед різноманіття існуючих продуктів. Інформація щодо порівняльного випробування може бути основана як на технічних оціночних засобах, які виконані в лабораторіях, так і на суб'єктивних оціночних засобах, які складені відповідно до вже існуючих методів пред'явлення значного порівняння характеристик продукту. Так як загальноприйнято, що виробник гарантує відповідність всіх зразків продукції своєї марки встановленому мінімальному стандарту якості та безпечності, то споживчі організації можуть враховувати результати випробувань вибірки будь-якого продукту, відібраного для порівняльної перевірки.

Висновки. Розроблена методика дозволяє здійснювати статистичні регулювання виробничого процесу на харчових підприємствах, що, в свою чергу, надасть можливість підвищити його стійкість, ефективність та результативність зокрема. Виявлена доцільність використання функції вірогідності зупинки виробничого процесу для визначення розміру вибірки, яка безпосередньо залежить від нормативних значень допуску та незміщеної оцінки загального вибіркового стандартного відхилення. Розроблена методика дозволяє оцінити виробничий процес на харчових підприємствах щодо постійності технологічного розсіювання та рівня налаштування, визначення незміщеної оцінки загального вибіркового стандартного відхилення, розмірів вибірки, контрольних параметричних меж статистичного регулювання зокрема.

Список використаних джерел

1. Єфіменко Н. А. Методичні підходи впровадження процесного управління системою якості на підприємстві / Н. А. Єфіменко, Т. М. Портянко, М. О. Білан // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія "Технічні науки". – Чернігів, 2010. – № 42. – С. 260-264.

2. Згуровский М. З. Интегрированные системы оптимального управления и проектирования / М. З. Згуровский. – К.: Вища школа, 2007. – 351 с.

3. Калита П. Я. Качество и управление. Ч.I Общие вопросы качества и обеспечения качества / П. Я. Калита. – К.: УАК, МЦ «ПРИРОСТ», 2002. – 229 с.

4. Кісь С. Я. Просторова графоаналітична модель комплексного менеджменту якістю функціонування організаційних утворень / С. Кісь, В. Петренко // Міжнародний бізнес та менеджмент: проблеми та перспективи в умовах глобалізації: Міжнар. наук.-практ. конф. 22-24 жовт., 2008 р.: тези доповідей. – Тернопіль: Вид-во ТНЕУ, 2008. – С. 254-256.

ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ НАУКОВИХ СТАТЕЙ ДО "ВІСНИКА ЧЕРНІГІВСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ. СЕРІЯ "ТЕХНІЧНІ НАУКИ"

Вимоги щодо підготовки рукописів статей для публікації у "Віснику Чернігівського державного технологічного університету" (далі Вісник ЧДТУ) (внесено до Переліку наукових фахових видань ВАК України, затвердженого постановою Президії ВАК України від 10 березня 2010 р. № 1-05/2, бюлетень ВАК України № 4, 2010), розроблені з урахуванням постанови Президії ВАК від 15.01.2003 р. № 7-05/1.

Шановні дописувачі!

Спочатку просимо надіслати Вашу статтю, оформлену за наведеними нижче вимогами, для попереднього розгляду редакційною колегією "Вісника Чернігівського державного технологічного університету. Серія "Технічні науки". Після отримання позитивного відгуку прохання сплатити вартість статті і надсилати весь пакет документів до науково-дослідної частини ЧДТУ.

1. Для публікації статті у "Віснику Чернігівського державного технологічного університету. Серія "Технічні науки" до науково-дослідної частини ЧДТУ необхідно в обов'язковому порядку подати:

– зовнішню (підписану не працівниками ЧДТУ) рецензію на статтю за підписом доктора наук;
– довідку про авторів, заповнену за наведеним бланком (Додаток А);
– роздрукований текст статті, оформленої за зразком (Додаток Б);
– реферат трьома мовами (українською, російською, англійською) (Додаток В);
– електронний варіант статті;
– квитанцію про сплату вартості публікації наукової статті (Додаток Г).

2. Вимоги до наукової статті. Наукова стаття повинна відповідати тематичному спрямуванню збірника і бути завізована власноручно на першій сторінці підписом автора.

Статтю можна подавати однією з трьох мов: українською, російською, англійською.

Обсяг статті повинен бути таким: мінімум – 5 повних сторінок, максимум – 10 сторінок (остання сторінка має бути заповнена не менш ніж на 3/4).

Стаття подається як у роздрукованому вигляді, так і в електронному варіанті на оптичному диску CD (DVD) або надсилається електронною поштою на адресу: ndchbm@mail.ru. Текст статті набирається з використанням комп'ютерних текстових редакторів Word for Windows 97/2000/XP.

3. Структура статті. До друку у "Віснику Чернігівського державного технологічного університету. Серія "Технічні науки" приймаються лише наукові статті, які мають такі необхідні елементи: УДК; Автори; Назва наукової або освітньої установи, де працюють автори; Назва статті; Анотація; Постановка проблеми; Аналіз останніх досліджень і публікацій; Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми; Мета статті; Виклад основного матеріалу; Висновки і пропозиції; Список використаних джерел.

4. Параметри сторінки повинні бути такими:

Формат А4 (210 мм×297 мм).

Поля: верхнє, нижнє та бокові – 25 мм.

Відступ від верхнього та нижнього колонтитула – 25 мм.

Верхній і нижній колонтитули, а також номери сторінок не вводити. Текст повинен бути вирівняний по ширині аркуша.

5. Вимоги до анотації. В анотації має бути чітко сформульована головна ідея статті та коротко обґрунтована її актуальність (обсяг до 8-10 рядків). У статті подаються анотації трьома мовами: українською, російською, англійською.

КАТЕГОРИЧНО ЗАБОРОНЯЄТЬСЯ У СТАТТІ ВИКОРИСТАННЯ АВТОМАТИЧНОЇ РОЗСТАНОВКИ ПЕРЕНОСІВ ТА АВТОМАТИЧНИХ СПИСКІВ. УСІ СПИСКИ ПРОСТАВЛЯЮТЬСЯ У РУЧНОМУ РЕЖИМІ!

6. Вимоги до оформлення структурних елементів статті.

6.1. *УДК* – шрифт Times New Roman (кегель 12), курсив, вирівнювання по лівому краю без абзацу.

Автори – ***ініціали та прізвище*** кожного автора починати з нового рядка (шрифт Times New Roman (кегель 12), розміщення по лівому краю, без абзацного відступу, напівжирний), ***науковий ступінь або посада, якщо немає ступеня*** (шрифт Times New Roman (кегель 12), звичайний). Скорочення наукових ступенів подавати згідно з ДСТУ 3582-97 “Скорочення слів в українській мові у бібліографічному описі. Загальні правила та вимоги”.

Назва організації – місце(я) роботи автора(-ів) (вирівнювання по лівому краю без абзацного відступу, шрифт Times New Roman (кегель 10)). Після назви організації через кому вказуються місто та країна розміщення організації.

Назва статті – шрифт Times New Roman (кегель 12). Подається прописними напівжирними літерами, вирівнювання по центру без абзацу.

Анотація – шрифт Times New Roman (кегель 9), курсив, вирівнювання по ширині, абзацний відступ 0,63 см, одинарний інтервал.

Ключові слова – шрифт Times New Roman (кегель 9), вирівнювання по ширині, абзацний відступ 0,63 см, одинарний інтервал.

Основний текст – текст статті з заголовками (вирівнювання по ширині, абзац – 0,63 см, шрифт Times New Roman (кегель 12), одинарний інтервал) (Додаток Б).

Розділи статті (Постановка проблеми; Аналіз останніх досліджень і публікацій; Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми; Мета статті; Виклад основного матеріалу; Висновки і пропозиції) зазначаються таким шрифтом: Times New Roman, кегель 12, напівжирний, звичайний. Після назви розділу статті ставиться крапка і продовжується текст самої статті.

6.2. Інтервали між елементами статті такі:

– УДК – автори – 1;
– автори – назва організації – 1
– назва організації – назва статті – 2;
– назва статті – анотація – 1;
– анотація – ключові слова – 1;
– ключові слова – основний текст – 1;
– основний текст – назва таблиці (верхній край рисунка, схеми, діаграми) – 1;
– назва таблиці – її верхній край (нижній край рисунка, діаграми – їхні назви) – 1;
– нижній край таблиці (назва рисунка, діаграми, схеми) – основний текст – 1;
– основний текст – список використаних джерел – 1;
– список використаних джерел – перелік джерел – 1.

7. Цитати, таблиці, статистичні дані, цифрові показники, що підвищують рівень аналітичних матеріалів, подаються з посиланням на джерела. Таблиці мають бути пронумеровані й мати заголовок. Відповідальність за наведені показники несе автор.

Рисунки і таблиці необхідно подавати в статті безпосередньо після тексту, де вони згадані вперше, або на наступній сторінці.

7.1. Ілюстрації (рисунки та чорно-білі фотографії)

Під час виконання рисунків рекомендується використання Microsoft Visio 2007 (2003). За умови використання закладеної графіки Microsoft Word рисунки повинні бути згрупованими. Шрифт рисунків Times New Roman, кегель 12, курсив.

Рисунки позначають словом "Рис." і нумерують послідовно в межах статті. Пояснювальні підписи, номер рисунка, його назву розміщують послідовно під ілюстрацією.

Наприклад:

1. *Рис. 1. Робоча характеристика екструдера*
2. *1 - теоретична ВАХ; 2 - експериментальна крива*

Рис. 3. Експериментальна ВАХ

7.2. Таблиці

Цифровий матеріал, що наводиться в статті, як правило, повинен оформлятися у вигляді таблиць.

Розмір тексту таблиць – кегель 12. Усі таблиці повинні мати заголовки. Нумераційний заголовок таблиць (кегель 12) вирівнюють по правому краю таблиці, тематичний заголовок таблиці (по центру, кегель 12, курсив).

Наприклад:

Таблиця 1

Граничні значення режимів різання

№ досл.	$V_к$, м/с	$V_{дет}=V_к/60$	t, мм	$Q_{гр}$, мм^2/с	a_z, мкм	$a_{z\ max}$	$n/n_{різ}$
1	20	333	0.033	11	5,32	10.17	10/6
2	40	667	0,033	13	3.04	5.83	11/7
3	60	1000	0,028	18	2.01	3.78	15/10
4	80	1333	0,026	26	1.64	3.07	19/12
5	90	1500	0,025	38	1.59	2.84	25/16

Якщо таблиця не вміщується на одній сторінці, всі її колонки нумерують, а над перенесеною частиною таблиці справа надписують: "Продовж. табл. 1".

7.3. Формули

Використовуючи формули, необхідно дотримуватися певних правил.

Великі, довгі та громіздкі формули, які мають у складі знаки суми, добутку, диференціювання, інтегрування, розміщують на окремих рядках. Це стосується також і всіх нумерованих формул. Для економії місця кілька коротких однотипних формул, відокремлених від тексту, можна подати в одному рядку, а не одну під одною. Невеликі і нескладні формули, що не мають самостійного значення, вписують усередині рядків тексту.

Стиль формул: хімічні формули набирають прямим шрифтом. Формули, на які є посилання, нумерують арабськими цифрами в круглих дужках праворуч. Обов'язково подають розшифровку літерних позначень величин у формулах. Для набору позначень фізичних величин використовують редактор формул Microsoft Equation для WINDOWS: 1) змінні, латинські літери – курсив, Times New Roman; 2) функції, цифри, українські літери – курсив, Times New Roman; 3) матриці, вектори – курсив, Times New Roman; 4) грецькі літери, символи – курсив, Symbol; 5) розміри: звичайний 11 пт, великий індекс 7 пт, малий індекс 6 пт, великий символ 14 пт, малий символ 11 пт.

Номер формули проставляється справа в кінці рядка в круглих дужках, не виходячи за поле. Формули необхідно вирівнювати по лівому краю сторінки. Між ними та текстом витримується інтервал в один рядок.

Наприклад:

Пропонується зношення круга визначати пропорційним кількості зрізів більших граничного значення $(a_z)_{max}$:

$$Q_a(a_z) = C_1 \cdot a_z^{k_1} \cdot F(a_z) + C_2 \cdot a_z^{k_2} (1 - F(a_z)), \quad (1)$$

де k_1<1, k_2>1 – показники ступенів при товщині зрізу.

$F(a_z)$, $(1–F(a_z))$ – значення інтегральної функції розподілення розрахункової товщини зрізів, котрі визначають частку товщини зрізів, менших та більших вказаного граничного значення a_z. Інтегральна функція розподілу ймовірностей товщини стружок була знайдена за моделлю процесу шліфуваня в роботі [7].

8. Список використаних джерел необхідно складати за ДСТУ ГОСТ 7.1:2006 “Система стандартів з інформації, бібліотечної та видавничої справи. Бібліографічний запис. Бібліографічний опис. Загальні вимоги та правила складання” (ГОСТ 7.1–2003, IDT).

Заголовок “Список використаних джерел” слід розміщувати посередині рядка, шрифт Times New Roman, кегель 12, напівжирний, а список джерел – 11 кегель.

НЕ ДОЗВОЛЯЄТЬСЯ У СПИСКУ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ЗАЗНАЧАТИ ЛИШЕ АДРЕСУ САЙТІВ, ВОНИ ПОВИННІ БУТИ ОФОРМЛЕНІ ЗГІДНО З ГОСТом.

9. Оплата публікації. Опублікування наукових статей у “Віснику Чернігівського державного технологічного університету. Серія “Технічні науки” є платним. Вартість публікації 1 сторінки наукової статті становить **30 грн** (прохання обов’язково уточнювати вартість публікації). Оплата підтверджується квитанцією, зразок якої наведений у Додатку Г.

10. Контактна інформація.

Матеріали необхідно надсилати на адресу: 14027, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95, корп. 1, к. 242 (науково-дослідна частина). Всі документи, що містять підписи та печатки, повинні бути відсканованими.

Контактні особи: Подимова Людмила Анатоліївна.

Робочий тел.: 0462-34244.

E-mail: ndchbm@mail.ru.

Відповідальність за матеріали, наведені у статті, несе автор. Неправильно оформлені автором стаття та супровідні документи, що не відповідають зазначеним вимогам, розглядатися не будуть.

Додаток А

Бланк для оформлення
довідки про автора

ДОВІДКА ПРО АВТОРІВ

Прізвище		
Ім’я		
По батькові		
Науковий ступінь		
Вчене звання		
Почесне звання		
Місце роботи		
Посада		
Назва статті		
Обсяг статті		
Поштова адреса		
Контактна інформація	роб. тел.	
	дом. тел.	
	моб. тел.	
	e-mail	
Дата і підпис автора		

Додаток Б

Приклад оформлення статті

УДК 621.3.05

О.В. Будьонний, канд. техн. наук
М.А. Прокопець, магістрант
Є.Ю. Коваленко, магістрант
НТУУ «КПІ», м. Київ, Україна

БЕЗКОНТАКТНА ЗАРЯДКА АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ

Пропонується використання безконтактного заряду акумуляторних батарей на основі теорії теслівських процесів для передачі енергії без дротів на невеликі відстані. Розрахунок енергетичних параметрів схеми передачі енергії проводився методом часткових ємностей між передавальними та приймальними антенами з урахуванням крайових ефектів. Проведено аналіз залежності струму та напруги навантаження від таких факторів: зміщення розташування пристрою, який заряджається, відносно центру блоку підзарядки; відстані між передавальними та приймальними антенами; значення індуктивності в навантаженні; робочої частоти.

Ключові слова: *безконтактна зарядка, батареї, процеси, енергія.*

Предлагается использование бесконтактного заряда аккумуляторных батарей на основе теории тесловских процессов для передачи энергии без проводов на небольшие расстояния. Расчет энергетических параметров схемы передачи энергии проводился методом частичных емкостей между передаточными и приемными антеннами с учетом краевых эффектов. Проведен анализ зависимости тока и напряжения нагрузки от таких факторов: смещение расположения устройства, которое заряжается, относительно центра блока подзарядки; расстояния между передающими и приемными антеннами; значение индуктивности в нагрузке; рабочей частоты.

Ключевые слова: *бесконтактная зарядка, батареи, процессы, энергия.*

The use of noncontact charge of storage batteries is offered on the basis of theory of Tesla processes for the transmission of energy without wires on small distances. The calculation of power parameters of chart of transmission of energy was conducted the method of partial capacities between transmission and receiving aerials taking into account edge effects. The analysis of dependence of current and tension of loading is conducted from such factors: displacement of location of device, what recharging, in relation to the center of subcharging block; distances are between transmission and receiving aerials; a value of inductance is in loading; working frequency.

Key words: *noncontact charge, batteries, processes, energy.*

Постановка проблеми. …
Аналіз останніх досліджень і публікацій. …
Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. …
Мета статті. Головною метою цієї роботи є …
Виклад основного матеріалу. …
Висновки і пропозиції. …

Список використаних джерел

1. Режим доступу: http://www.guardian.co.uk/technology/2006/nov/02/news.egovernment.
2. Ландау Л. Д. Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц // Теоретическая физика. Том 8. – М.: Наука, 1982. – 622 с.
3. Пентегов И. В. О возможности беспроводной передачи энергии с помощью тесловских процессов / И. В. Пентегов, А. Л. Приступа // Техническая электродинамика. – 2005. – № 3. – С. 11-15.
4. ….
5. ….

Додаток В

Приклад оформлення реферату до статті

УДК 621.3.05

Будьонний О.В., Прокопець М.А., Коваленко Є.Ю. БЕЗКОНТАКТНА ЗАРЯДКА АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ

Пропонується використання безконтактного заряду акумуляторних батарей на основі теорії теслівських процесів для передачі енергії без дротів на невеликі відстані. Розрахунок енергетичних параметрів схеми передачі енергії проводився методом часткових ємностей між передатними та приймальними антенами з урахуванням крайових ефектів. Проведено аналіз залежності струму та напруги навантаження від таких факторів: зміщення розташування пристрою, який заряджається, відносно центру блоку підзарядки; відстані між передавальними та приймальними антенами; значення індуктивності в навантаженні; робочої частоти.

Ключові слова: *безконтактна зарядка, батареї, процеси, енергія.*

УДК 621.3.05

Буденный А.В., Прокопец М.А., Коваленко Е.Ю. БЕСКОНТАКТНАЯ ЗАРЯДКА АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

Предлагается использование бесконтактного заряда аккумуляторных батарей на основе теории тесловских процессов для передачи энергии без проводов на небольшие расстояния. Расчет энергетических параметров схемы передачи энергии проводился методом частичных емкостей между передаточными и приемными антеннами с учетом краевых эффектов. Проведен анализ зависимости тока и напряжения нагрузки от таких факторов: смещение расположения устройства, которое заряжается, относительно центра блока подзарядки; расстояния между передаточными и приемными антеннами; значение индуктивности в нагрузке; рабочей частоты.

Ключевые слова: *бесконтактная зарядка, батареи, процессы, энергия.*

UDC 621.3.05

Budenny A.V., Prokopets M.A., Kovalenko E.U. NONCONTACT CHARGING OF STORAGE BATTERIES

The use of noncontact charge of storage batteries is offered on the basis of theory of Tesla processes for the transmission of energy without wires on small distances. The calculation of power parameters of chart of transmission of energy was conducted the method of partial capacities between transmission and receiving aerials taking into account edge effects. The analysis of dependence of current and tension of loading is conducted from such factors: displacement of location of device, what recharging, in relation to the center of subcharging block; distances are between transmission and receiving aerials; a value of inductance is in loading; working frequency.

Key words: *noncontact charge, batteries, processes, energy.*

Додаток Г

Бланк квитанції для оплати публікації

Заява на переказ готівки

Дт **1002** Ідентифікаційний код

Кт 31250273210037 05460798

Одержувач платежу Чернігівський державний технологічний університет

Дата здійснення операції _____

Дата валютування _____

Код установи банку

853592

Найменування установи банку ГУДК. Укр. в Чернігівській області

Прізвище, ім'я, по-батькові платника _____

_____

Адреса платника _____

Призначення платежу за видання у збірнику

25010200

Сума

Загальна сума _____

(словами)

Підпис платника _____

Касир

Квитанція

Дт **1002** Ідентифікаційний код

Кт 31250273210037 05460798

Одержувач платежу Чернігівський державний технологічний університет

Дата здійснення операції _____

Дата валютування _____

Код установи банку

853592

Найменування установи банку ГУДК. Укр. в Чернігівській області

Прізвище, ім'я, по-батькові платника _____

_____

Адреса платника _____

Призначення платежу за видання у збірнику

25010200

Сума

Загальна сума _____

(словами)

Підпис платника _____

Касир

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК

ЧЕРНІГІВСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

СЕРІЯ «ТЕХНІЧНІ НАУКИ»

НАУКОВИЙ ЗБІРНИК

№ 3 (59)

Головний редактор	В.В. Казимир
Відповідальний за випуск	О.І. Пилипенко
Літературний редактор	Л.М. Сила
Коректор	О.С. Смєлова
Комп'ютерна верстка і макетування	В.М. Олефіренко
	Т.В. Коваленко

Підписано до друку 19.10.2012 р. Формат 60х84/8. Друк різограф.
Гарнітура Times New Roman. Умов. друк. арк. – 28,48. Обл.-вид. арк. – 14,74.
Тираж 300 пр. Замовлення № 106/12.

Редакційно-видавничий відділ Чернігівського державного технологічного університету
14027, Україна, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95.
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців,
виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції
Серія ДК № 840 від 04.03.2002 р.