

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

ВІСНИК

**НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХПІ"**

Серія: «Механіко-технологічні системи та комплекси»

№ 33(1255)2017

Збірник наукових праць

Видання засноване в 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2017

Вісник Національного технічного університету «ХПІ».Збірник наукових праць. Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х.: НТУ «ХПІ» – 2017р. – No33(1255) – 134 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ No5256 від 2 липня 2001 року

Мова статей – українська, російська, англійська.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого рішенням Атестаційної колегії МОН України щодо діяльності спеціалізованих вчених рад, від 15 грудня 2015р. Наказ № 1328 (додаток 8) від 21.12.2015р.

Координаційна рада:

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

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

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

Редакційна колегія серії:

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

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

Відповідальний секретар: Пензєв П. С., НТУ «ХПІ»;

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

У 2015 р. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*, Серія: «Механіко-технологічні системи та комплекси», включений у довідник періодичних видань бази даних **Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)**

Рекомендовано до друку вченою радою НТУ „ХПІ“

Протокол № 10 від «24» листопада 2017 р.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 544.2

А. Н. КОЛОСКОВА

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ ШВОВ МНОГОСЛОЙНЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ СТРУКТУР НА ПОЛИМЕРНОЙ ОСНОВЕ

Розглядається побудова моделей руйнування зварних швів багатошарових комбінованих структур, виготовлених на полімерній основі. Для оцінки міцності з'єднань побудована удосконалена механічна модель зварного з'єднання з використанням стрижневої моделі полімерної молекули. За результатами аналізу представлених моделей руйнування Т-подібного та напусного швів отримано у формалізованому вигляді умови міцності з урахуванням можливих технологічних недосконалостей при виготовленні з'єднань. Результати дослідження можуть бути використані для розрахунків міцності конструкцій на основі багатошарових комбінованих структур.

Ключові слова: багатошарові комбіновані структури, зварний шов, полімер, механічна модель.

Рассматривается построение моделей разрушения сварных швов многослойных комбинированных структур, изготовленных на полимерной основе. Для оценки прочности соединений построена усовершенствованная модель сварного соединения с использованием стержневой модели полимерной молекулы. По результатам анализа представленных моделей разрушения Т-образного и нахлесточного швов получены в формализованном виде условия прочности с учетом возможных технологических несовершенств при изготовлении соединений. Результаты исследования могут быть использованы для расчетов прочности конструкций на основе многослойных комбинированных структур.

Ключевые слова: многослойные комбинированные структуры, сварной шов, полимер, механическая модель.

The problems connected to strength analysis of multi-layer combined structures are investigated. The models of destruction of welded joints and strength condition for them are developed. The main result of the investigation is in development of the unified model of destruction of welded joint of polymeric materials. The represented unified model is based on mechanical model of polymer molecule. Using such approach the mechanical models of destruction of T-shaped and lap welded joints are built. It allows to describe the destruction processes and substantiate the significant decrease of their strength in comparison with the basic material. Mechanical models of destruction of T-shaped and lap welded joints of multi-layer combined structures based on polymers are improved by taking into account inter-molecular interaction as a mechanical system. Represented models application allows to estimate the strength conditions for constructions based on multi-layer combined structures in wide variety of manufacturing processes.

Keywords: multi-layer combined structures, welded joint, polymer, mechanical model.

Введение. Разработка современных конкурентоспособных на внешнем и внутреннем рынках конструкций невозможна без использования новых материалов, обладающих повышенным комплексом механических свойств. Полимерные пленки и комбинированные материалы на их основе представляют в этой связи особый интерес. Они используются во многих сферах человеческой деятельности. Современные требования к таким материалам определяют приоритетность обеспечения их надежной работы в течение длительного времени. Одной из важнейших становится проблема рационального проектирования сварного, как наиболее часто употребляемого, соединения таких материалов в зависимости от вида эксплуатационной нагрузки.

Зачастую конструктивное исполнение сварных соединений полимерных пленок и многослойных комбинированных структур (МКС) на их основе определяется условиями эксплуатации и регламентированными техническими требованиями. Проектирование и расчет таких соединений включают в себя этапы выбора применяемой технологии, рационального размещения сварного шва, а также задания его основных геометрических параметров. В большинстве реализованных на практике проектных расчетов различных видов сварных соединений используются общие методики расчета соединений и формулы, известные из теории металлов. В то же время наиболее часто применяемым сегодня методом определения прочности сварного соединения полимерных пленок является испытание образцов на разрушение под нагрузкой в лабораторных условиях с последующим контролем промышленных изделий [1], что не позволяет прогнозировать поведение

подобных конструкций при переменных внешних воздействиях. Таким образом, актуальной является проблема определения прочности полимеров и их соединений теоретическим путем.

Анализ литературных данных и постановка проблемы. В настоящее время все большей популярностью у производителей и потребителей пользуются пленочные полимерные материалы и МКС на их основе [2]. Соединения различных пленок имеют различную относительную прочность. Прочность разных видов соединений, выполняемых из одной и той же пленки, также может существенно различаться. Анализ литературных источников продемонстрировал отсутствие единого мнения касательно того, чем обусловлено указанное явление. К примеру, в работе [3] этот факт авторы объясняют изменением структуры материала при сварке. В работе [4] в качестве причины выбрано наличие механических повреждений околошовной зоны, однако известно, что при сварке нахлесточных и Т-образных соединений одним и тем же методом на одинаковых режимах из одной и той же пленки происходит одинаковое повреждение околошовной зоны и одинаковое изменение структуры материала шва, но в то же время нахлесточные соединения всегда имеют значительно большую прочность, чем Т-образные.

Сегодня в теории прочности и механики разрушения деформируемых твердых тел при расчетах широко используются экспериментальные данные [5, 6]. Теоретические методы физики твердого тела применяются в основном для расчета теоретического предела прочности и только для идеальных материалов —

© А. Н. Колоскова. 2017

материалов с упорядоченной атомной структурой [7]. В работе [8] разрушение соединения полимерных пленок и МКС описано на основании теории трещинообразования. В работе [9] представлен метод вычисления разрушающих напряжений (реальных пределов прочности), возникающих в области адгезионного контакта элементов МКС, основанный на модели многочастичных нелокальных потенциальных взаимодействий. Данные методы имеют хорошую сходимость теоретических и практических результатов, однако применимы только для отдельных (локальных) элементов слоистой структуры, что не позволяет на их основе перейти к определению геометрических параметров всего соединения в целом.

В работе [10] прочность сварных швов была определена на испытательной машине ИП-5158, в результате эксперимента был сделан вывод, что в результате низкой межслойной адгезии происходит отслаивание пленок в зоне сварного шва. Однако причины данного явления авторами описаны не были.

Таким образом, результаты исследований, представленные в современных публикациях по теме исследования, не дают возможности провести оценку прочности сварного соединения полимерных материалов. Для решения задачи прочности основной проблемой является построение такой модели соединения слоев материала, которая позволила бы оценить не только прочность материала, но и прочность всего сварного соединения в целом с учетом его геометрических характеристик, а также вида нагружения.

Цель работы и задачи исследования. Целью данной работы является повышение эксплуатационных свойств сварных соединений полимерных пленок и многослойных комбинированных структур на их основе.

Для достижения поставленной цели в представленном исследовании были решены следующие задачи:

1. Разработана обобщенная модель разрушения сварного соединения между полимерными слоями.
2. Разработана модель разрушения Т-образного и нахлесточного сварного соединения полимерных слоев.

Материалы исследования построения обобщенной модели разрушения сварного шва полимерных пленок и МКС на их основе. Для оценки прочности (целостности) сварного соединения полимерных пленок предлагается использовать традиционный критерий прочности в следующей формулировке: «прочность сохраняется при условии, что действующие напряжения не превышают своих предельно допустимых значений». В основе построения теоретического метода расчета лежит механическая линейная модель молекулы полимера, представленная автором в работе [11].

Соединение полимерных материалов сваркой происходит за счет перетекания (движения) элементов молекул (звеньев линейной модели) из одного материала в другой. В идеальном случае звенья всех молекул, участвующих в соединении будут располагаться строго по нормали к поверхности свариваемых материалов. Соединяемые материалы удерживаются вместе за счет силы упругости F_i , возникающей в стержне АВ (рис. 1, а). В рассматриваемой модели

узел А шарнирно закреплен и неподвижен вдоль оси х. Сила уравнивается силами межмолекулярных связей, равнодействующая которых P_i приложена в точке В. Величина силы трения, возникающая при этом в ползуне, будет прямо пропорциональна силе межмолекулярных связей в свариваемом материале. Величина P_i зависит от многих факторов, включая взаимное расположение и форму молекул, находящихся вблизи узла В, а также их количество. Определения ее количественного значения в современных литературных источниках отсутствуют.

Если к соединению приложена внешняя нагрузка Р, то расстояние между молекулами будет увеличиваться увеличивая при этом действие межмолекулярных связей, а следовательно значение равнодействующей P_i будет возрастать, увеличивая при этом напряжение, возникающее в звене АВ (значение силы F_i). В работе [12] автором экспериментальным путем было подтверждено, что прочность сварного шва оказывается более чем в сотню раз ниже прочности свариваемых полимерных материалов. Этот результат позволив при построении модели пренебречь деформациями в свариваемых материалах, приняв за основу факт, что разрушение происходит исключительно по зоне сварного шва. В таком случае элемент ВС не будет воспринимать составляющую внешней нагрузки и находиться в напряженном состоянии. При достижении силой P_i максимального критического значения происходит разрушение межмолекулярных связей и узел В выдергивается из слоя в зону сварного шва. Дальнейшее действие внешней силы Р будет восприниматься уже звеном ВС (рис. 1, б).

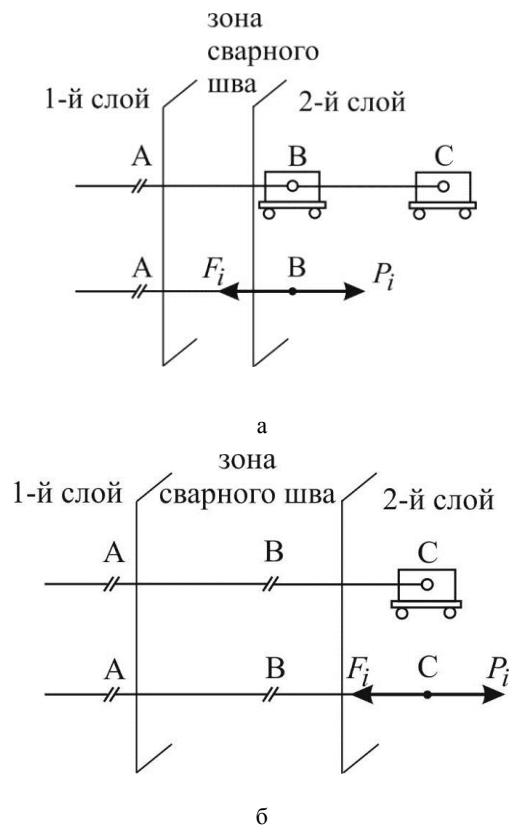


Рис. 1 – Механическая модель поведения молекулы полимерного материала в зоне сварного шва под действием внешней силы

Поскольку реальное сварное соединение состоит из множества соединительных полимерных молекул некоторым количеством n , уравнение равновесия для такой системы можно представить в следующем формальном виде

$$n F_i = n P_i.$$

Вследствие неидеальности условий получения сварного соединения в наличии в нем технологических дефектов, оно будет состоять не только из молекул, расположенных по нормали к поверхности, но также и расположенных под различными углами к ней (рис. 2).

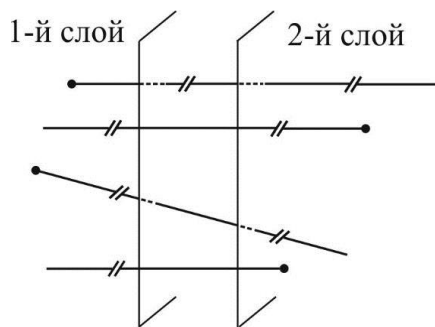


Рис. 2 – Механическая модель сварного соединения полимерных материалов с учетом наличия технологических несовершенств

Согласно положениям статики стержни, представляющие молекулы сварного соединения, начинают воспринимать приложенную нагрузку только после того, как в процессе растяжения шва займут положение по нормали к поверхности. Таким образом, количество звеньев механизма, одновременно воспринимающих нагрузку, будет постепенно возрастать, а прочность сварного соединения зависит в первую очередь от того, какое максимальное количество звеньев молекул могут одновременно воспринимать приложенную к сварному шву нагрузку.

С учетом вышеизложенного, условие прочности сварного шва с учетом технологических несовершенств его изготовления можно представить в следующем формализованном виде:

$$n P_i \leq [P], \quad (1)$$

где n – количество звеньев одновременно воспринимающих нагрузку; $[P]$ – значение предельно допустимого усилия.

Построение модели разрушения Т-образного сварного шва полимерных пленок и МКС на их основе. С учетом вышеизложенного, прочность Т-образного сварного шва зависит от количества звеньев, одновременно воспринимающих нагрузку в верхней плоскости. Это позволяет объяснить, к примеру тот факт, что даже при визуальном регистрируемом начале разрушения шва в нем одновременно возникает эффект упрочнения. Механическая модель данного явления представлена на рис. 3.

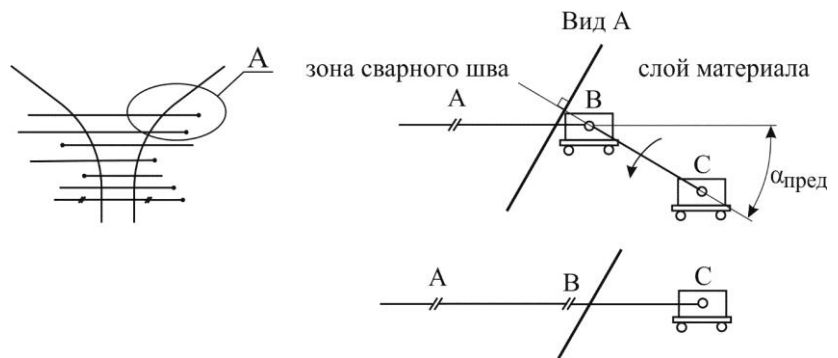


Рис. 3 – Механическая модель разрушения Т-образного шва под действием внешнего воздействия

До приложения разрывающего усилия в идеальном шве все молекулы расположены строго по нормали к поверхности слоев. Однако приложенная нагрузка не только увеличивает усилие, воспринимаемое звеньями механизма, но и разворачивает их на некоторый угол $\alpha_{пред}$, который определяется гибкостью молекул материала. При освобождении узла В и переходе его в зону сварного шва, звено ВС сместится в нижележащий молекулярный слой, увеличивая тем самым количество звеньев, одновременно воспринимающих нагрузку на следующем этапе разрушения, что и вызывает возникновение эффекта упрочнения сварного шва. Однако, общее количество звеньев, одновременно работающих на разрыв в Т-образном шве всегда будет меньше, чем при плоскостном отрыве, чем и объясняется его меньшая прочность. Описанным эффектом можно также объяснить и возникающую при разрыве Т-образных соединений неравномерность (скачкообразность) отрыва.

С учетом вышеизложенного, условие прочности Т-образного сварного шва с учетом технологических несовершенств его изготовления можно представить неравенством (1)

Построение модели разрушения нахлесточного сварного шва полимерных пленок и МКС на их основе. Растягивающее усилие, приложенное к полимерным пленкам, соединенным внахлест, создает в сварном шве сдвиговые напряжения. Согласно положений теории чистого сдвига, происходит деформация полимерных слоев, что в конечном счете приводит к переориентации (сдвигу) молекул полимера (рис. 4).

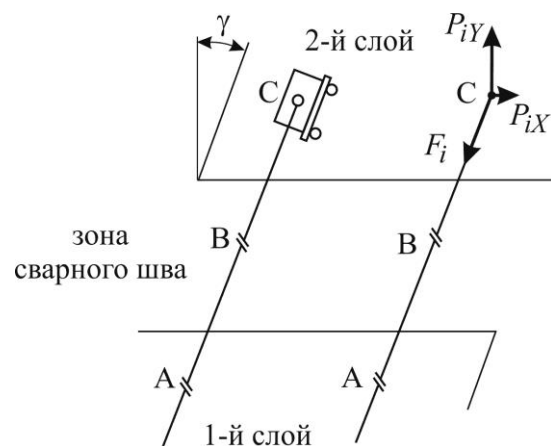


Рис. 4 – Механическая модель разрушения нахлесточного шва под действием внешнего воздействия

Для составления уравнений равновесия сила P_i может быть разложена по двум составляющим: P_{iX} , определяющей влияние сдвигового усилия, и P_{iY} , определяющей влияние межмолекулярных взаимосвязей. В такой постановке уравнения равновесия получают следующий формальный вид:

$$F_i \sin \gamma = P_{iX} \text{ и } F_i \cos \gamma = P_{iY},$$

где γ – угол, определяемый из закона Гука при сдвиге полимерного материала по следующей формуле:

$$\gamma = \tau / G,$$

где τ – касательное напряжение, возникающее при сдвиге; G – модуль упругости II рода (модуль сдвига) для материала.

В идеальном сварном шве, когда все молекулы расположены по нормали к поверхностям материалов, прочность такого шва будет определяться максимальным количеством звеньев, которые одновременно воспринимают нагрузку. Однако, поскольку каждая соединительная молекула внедряется в материал на разное количество звеньев, то при критических условиях нагрузки будет дополнительно проявляться эффект ползучести материала. В то же время, как показано выше, в реальном образце звенья молекул, образующие сварной шов, будут располагаться под разными углами. Следовательно, на начальном этапе нагрузка будет восприниматься звеньями, которые находятся под углом γ , их выдергивание приведет к ослаблению в них натяжения, и функция восприятия нагрузки перейдет на последующие, более короткие соединительные элементы, разворачивая их попутно на угол γ . Таким образом, будет также происходить упрочнение сварного шва.

С учетом вышеизложенного, условие прочности нахлесточного сварного шва с учетом технологических несовершенств его изготовления можно представить в следующем формализованном виде:

$$n \sqrt{P_{iX}^2 + P_{iY}^2} \leq [P].$$

Результаты исследования сварных швов полимерных пленок и МКС на их основе. Основным результатом представленного исследования является построение обобщенной модели разрушения сварного соединения полимерных материалов. В основу модели положена механическая модель молекулы полимера. Основываясь на предложенном подходе были построены механические модели разрушения Т-образного и нахлесточного сварных соединений, что позволило описать принцип их разрушения и обосновать существенное уменьшение их прочности по сравнению с основным материалом.

В качестве научной новизны впервые предложено для полимерных пленок и МКС на их основе определить прочность сварных соединений различной конструкции не экспериментальным, а теоретическим

путем, основываясь не на адгезии материалов, а на межмолекулярном взаимодействии, рассматривая его как механическую систему.

Обсуждение результатов исследования сварных швов полимерных пленок и МКС на их основе. Разработанные модели сварных швов полимерных пленок и МКС на их основе, а также предложенный механический подход к моделированию структуры и процессов разрушения шва под действием внешнего нагружения позволяют нам анализировать его поведение под нагрузкой, а также определять его прочность, как суммарную прочность молекул, как одновременно работающих в одном направлении стержневых механизмов.

Поведение предложенной модели полностью соответствует кривой «напряжение-деформация», полученной для полимера, находящегося в стеклообразном состоянии (рис. 5).

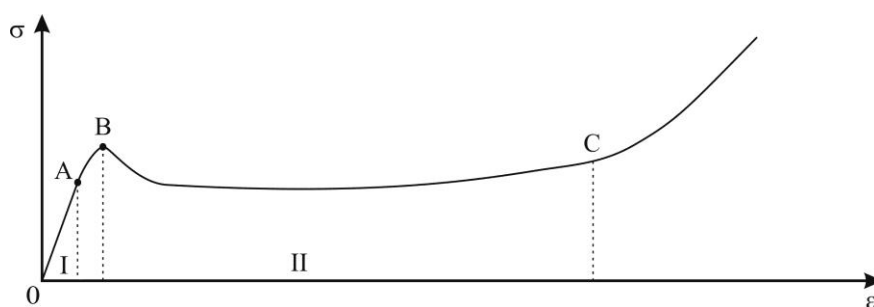


Рис. 5 – График зависимости «напряжение-деформация» для полимера в стеклообразном состоянии

Начальный участок OA кривой соответствует упругой деформации, обусловленной увеличением напряжения в работающем звене молекулы на начальном этапе нагружения. При дальнейшем росте напряжения (участок AB) закон Гука уже не выполняется, при этом происходит вырывание некоторого числа связей и формирование пакета из максимального количества одновременно работающих звеньев (точка B). Далее напряжение снижается. Для идеального полимерного материала это происходит лавинообразно и шов разрушается, для неидеального же разрушение произойдет постепенно в некоторой точке участка BC кривой.

В дальнейших исследованиях для решения задачи определения прочностных свойств сварных соединений полимерных пленок и МКС на их основе необходимым представляется, используя методы статистического анализа, определить количество соосно направленных молекул в сварном соединении, выполненном при различных температурных режимах и для различных материалов.

Выводы. Предложен механический подход к моделированию структуры и процессов разрушения сварных соединений полимерных пленок и МКС на их основе под действием внешнего нагружения. Построена обобщенная модель, сформированная на его основе, что позволяет анализировать прочность сварного шва, основываясь на рассмотрении одновременно работающих на растяжение молекул как соосных стержневых механизмов.

На базе предложенного подхода построены модели разрушения Т-образного и нахлесточного соединения МКС на основе полимерных пленок, что в дальнейшем позволит определять прочность таких со-

единений неразрушающими методами, рассматривая соединение как механическую систему и основываясь не на адгезии материалов, а на их межмолекулярном взаимодействии.

Список литературы:

1. Кауш, Г. Разрушение полимеров [Текст] / Г. Кауш. – М.: Мир, 1981. – 440 с.
2. Колоскова, А. Н. Классификатор многослойных комбинированных упаковочных материалов [Текст] / А. Н. Колоскова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи і комплекси. – 2017. – № 16 (1238). – С. 7–11.
3. Вакула, В. Л. Влияние фотостарения полиэтилена на его способность к образованию аутогезионной связи при сварке [Текст] / В. А. Вакула, Э. Б. Орлов // Высокомолекулярные соединения. – 1970. – № 12. – С. 2662–2668.
4. Гришин, Н. А. Исследование структуры и механических свойств пластмасс при сварке [Текст] / Н. А. Гришин, Л. Г. Казарян // Пластические массы. – 1969. – № 4. – С. 42.
5. Работнов, Ю. Н. Введение в механику разрушения [Текст] / Ю. Н. Работнов. – М.: Наука, 1987. – 80 с.
6. Котомин, С. В. Адгезионная прочность в многослойных полимерных пленках [Текст] / С. В. Котомин, К. П. Соллогуб // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2014. – Вып. 5. – С. 1–9.
7. Семин, М. И. Расчеты соединений элементов конструкций из полимерных материалов на прочность и долговечность [Текст]: монография / М. И. Семин. – М.: МАДИ, 2016. – 92 с.
8. Витковский, И. В. Теоретическое определение характеристик прочности многослойных материалов для устройств ядерной и термоядерной техники [Текст] / И. В. Витковский, А. Ю. Лешуков, С. Н. Ромашинов, В. С. Шоркин // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85, Вып. 12. – С. 62–68.
9. Hutchinson, J. W. Stresses and failure modes in thin films and multilayers [Text] / J. W. Hutchinson. – Technical University of Denmark, 1996. – 45 p.
10. Колбина, Е. Л. Особенности формирования сварных швов многослойных полимерных пленок [Текст] / Е. Л. Колбина, К. В. Флях, Д. С. Григорьев // Динамика систем, механизмов и машин. [Омский государственный технический университет](#). – 2016. – Т. 1, № 1. – С. 318–321.
11. Колоскова, А. Н. Моделирование полимерных слоев многослойных комбинированных упаковочных материалов [Текст] / А. Н. Колоскова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи і комплекси. – 2016. – № 4 (1176). – С. 16–20.
12. Колоскова, А. Н. Экспериментальное исследование Т-образного сварного соединения полимерных пленок [Текст] / А. Н. Колоскова // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – 2015. – Вып. 3 (83). – С. 65–68.

Bibliography (transliterated):

1. Kaush, G. (1981). Razrushenie polimerov. Moscow: Mir, 440.
2. Koloskova, A. N. (2017). Klassifikator mnogoslownykh kombinirovannykh upakovochnykh materialov. Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Mekhaniko-tehnologichni systemy i komplekxy, 16 (1238), 7–11.
3. Vakula, V. L., Orlov, E. B. (1970). Vliyaniye fotostareniya polietilena na ego sposobnost' k obrazovaniyu autogezionnoy svyazi pri svarke. Vysokomolekulyarnye soedineniya, 12, 2662–2668.
4. Grishin, N. A., Kazaryan, L. G. (1969). Issledovanie struktury i mekhanicheskikh svoystv plastmass pri svarke. Plasticheskie massy, 4, 42.
5. Rabotnov, Yu. N. (1987). Vvedeniye v mekhaniku razrusheniya. Moscow: Nauka, 80.
6. Kotomin, S. V., Sollogub, K. P. (2014). Adgezionnaya prochnost' v mnogoslownykh polimernykh plenках. Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii, 5, 1–9.
7. Semin, M. I. (2016). Raschety soedineniy elementov konstruksiy iz polimernykh materialov na prochnost' i dolgovechnost'. Moscow: MADI, 92.
8. Vitkovskiy, I. V., Leshukov, A. Yu., Romashin, S. N., Shorkin, V. S. (2015). Teoreticheskoye opredeleniye harakteristik prochnosti mnogoslownykh materialov dlya ustroystv yadernoy i termoyadernoy tekhniki. Zhurnal tekhnicheskoy fiziki, 85 (12), 62–68.
9. Hutchinson, J. W. (1996). Stresses and failure modes in thin films and multilayers. Technical University of Denmark, 45.
10. Kolbina, E. L., Flyah, K. V., Grigor'ev, D. S. (2016). Osobennosti formirovaniya svarnykh shvov mnogoslownykh polimernykh plenok. Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. Omskiy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet, 1 (1), 318–321.
11. Koloskova, A. N. (2016). Modelirovaniye polimernykh sloev mnogoslownykh kombinirovannykh upakovochnykh materialov. Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Mekhaniko-tehnologichni systemy i komplekxy, 4 (1176), 16–20.
12. Koloskova, A. N. (2015). Eksperimental'noye issledovaniye T-obraznogo svarnogo soedineniya polimernykh plenok. Voprosy proektirovaniya i proizvodstva konstruksiy letatel'nykh apparatov, 3 (83), 65–68.

Поступила (received) 10.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Моделювання руйнування зварних швів багатослойних комбінованих структур на полімерній основі/ Колоскова Г. М. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 33(1255). – С. 3–8. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.

Моделирование разрушения сварных швов многослойных комбинированных структур на полимерной основе/ Колоскова А. Н. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 33(1255). – С.3–8. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.

Simulation of destruction of weld joints of multi-layer combined structures made on polymeric basis/ Koloskova G. //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 33 (1255). – P.3–8. – Bibliogr.:12. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Колоскова Ганна Миколаївна – кандидат технічних наук, Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «ХАІ», доцент кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем;

вул. Чкалова, 17, м. Харків, Україна 61070; e-mail: g.koloskova@khai.edu.

Колоскова Анна Николаевна – кандидат технических наук, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», доцент кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем; ул. Чкалова, 17, г. Харьков, Украина 61070; e-mail: g.koloskova@khai.edu.

Koloskova Ganna – candidate of technical science, associate professor, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”; Chkalova str., 17, Kharkov, Ukraine 61070; e-mail: g.koloskova@khai.edu.

УДК 62–278

С. В. САВЧЕНКО

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ДЕФЕКТОВ КАК ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Рассматривается математическое обеспечение построения моделей определения координат источников акустической эмиссии и алгоритмов поиска дефектов. Показано, что параметры сигналов акустической эмиссии связаны с локальными перестройками структуры материалов и процессами движения дислокаций. Предложены формулы локализации источников акустической эмиссии. Построения модели определения координат дефектов по источникам сигналов акустической эмиссии показывает, что вопросы зависимости параметров волн эмиссии от размеров дефектов, материалов, величины нагрузки и т.д. постоянно находятся в центре внимания.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, контроль сварных швов, баллистическая сталь, пьезодатчик, неразрушающий контроль, средство защиты.

Розглядається математичне забезпечення побудови моделей визначення координат джерел акустичної емісії і алгоритмів пошуку дефектів. Показано, що параметри сигналів акустичної емісії пов'язані з локальними перебудовами структури матеріалів і процесами руху дислокацій. Запропоновано формули локалізації джерел акустичної емісії. Побудови моделі визначення координат дефектів за джерелами сигналів акустичної емісії показує, що питання залежності параметрів хвиль емісії від розмірів дефектів, матеріалів, величини навантаження і т.д. постійно знаходяться в центрі уваги.

Ключові слова: акустична емісія, контроль зварних швів, балістична сталь, п'єзодатчик, неруйнівний контроль, засіб захисту.

The mathematical support for the construction of models for determining the coordinates of acoustic emission sources and defect search algorithms is considered. It is shown that the parameters of acoustic emission signals are associated with local rearrangements of the structure of materials and dislocation movement processes. Formulas for localization of sources of acoustic emission are proposed. The use of acoustic emission methods in non-destructive testing devices allows monitoring various shapes and sizes of metal structures. The application of acoustic emission methods for non-destructive testing of metal structures in most cases reduces to determining the location of the defect. According to the acoustic signal of the defect, which can be detected remotely, one can find the location of this defect by processing the difference in the arrival time of the wave.

Keywords: acoustic emission, control of welded seams, ballistic steel, piezoelectric sensor, non-destructive testing, protective equipment.

Введение. Акустическая эмиссия (АЭ) представляет собой явление генерации волн напряжений, вызванных внезапной перестройкой в структуре материала. Классическими источниками АЭ является процесс деформирования, связанный с ростом дефектов, например, трещины или зоны пластической деформации. Внезапное движение источника эмиссии вызывает возникновение волн напряжений, которые распространяются в структуре материала и достигают пьезоэлектрического преобразователя. По мере роста напряжений активизируются многие из имеющихся в материале объекта источников эмиссии. Электрические сигналы эмиссии, полученные в результате преобразования датчиком волн напряжений, усиливаются, регистрируются аппаратурой и подвергаются дальнейшей обработке и интерпретации.

Актуальность темы. Использование методов акустической эмиссии в устройствах неразрушающего контроля позволяет вести мониторинг разнообразных по форме и размерам металлических конструкций. Применение методов акустической эмиссии для неразрушающего контроля металлических конструкций в большинстве случаев сводится к определению места дефекта. По акустическому сигналу дефекта, который может быть обнаружен дистанционно можно найти расположение этого дефекта путем обработки разницы времени прихода волны.

Итак, источником акустико-эмиссионной энер-

гии служит поле упругих напряжений в материале. Без напряжений нет и эмиссии, поэтому АЭ контроль обычно проводится путем нагружения контролируемого объекта. Это может быть проверочный контроль перед запуском объекта, контроль изменений нагрузки во время работы объекта, испытания на усталость, ползучесть или комплексное нагружение. Очень часто конструкция нагружается произвольным способом. В этом случае использование АЭ контроля позволяет получать дополнительную ценную информацию о поведении конструкции под действием нагрузки. В других случаях эмиссия используется по причинам экономичности и безопасности. Для таких задач разрабатываются специальные процедуры нагружения и тестирования.

Акустическая эмиссия взаимосвязана с другими методами контроля. Так, акустическая эмиссия отличается от большинства методов неразрушающего контроля (МНК) в двух ключевых аспектах. Во-первых, источником сигнала служит сам материал, а не внешний источник, т.е. метод является пассивным (а не активным, как большинство других методов контроля). Во-вторых, в отличие от других методов АЭ обнаруживает движение дефекта, а не статическое неоднородности, связанные с наличием дефектов, т.е. АЭ обнаруживает развивающиеся, а потому наиболее опасные дефекты. Перечень основных отличий приведен в табл. 1.

© С. В. Савченко. 2017

Таблица 1 – Сравнение характеристик АЭ метода контроля с другими методами НК

Акустическая эмиссия	Другие МНК
Обнаруживает движение дефектов	Обнаруживают геометрическую форму дефектов
Требует нагружения	Не требуют нагружения
Каждое нагружение уникально	Контроль воспроизводим
Чувствителен к структуре материала	Менее чувствительны к материалу
Менее чувствительны к геометрии	Более чувствительны к геометрии
Требует меньших усилий при проведении контроля продукции/процессов	Требуют больших усилий при проведении контроля продукции/процессов
Требует доступ только в местах установки датчиков	Требуют доступ ко всей поверхности объекта
Контролирует конструкцию за один цикл нагружения	Постепенное сканирование участков конструкции
Основные проблемы: сильное влияние шума	Основные проблемы: сильное влияние геометрии

Акустическая эмиссия отличается от большинства методов неразрушающего контроля в трех ключевых аспектах:

- источником сигнала служит сам материал, а не внешний источник, т.е. метод является пассивным;

- в отличие от других методов акустическая эмиссия обнаруживает развивающиеся наиболее опасные дефекты;

- метод является дистанционным, т. к. не требует сканирования поверхности объекта для поиска локальных дефектов, а лишь правильного размещения датчиков на поверхности объекта для осуществления локализации источника акустического сигнала.

Анализ возникновения сигналов акустической эмиссии с точки зрения математической теории упругости позволяет сделать предположение о возможности модельного представления развития дефектов.

Параметры сигналов АЭ, связанных с локальными перестройками структуры материалов, взаимосвязаны с параметрами кинетики развития дефектов и разрушения материала. Одним из источников деформационных сигналов являются процессы движения дислокаций.

Частотный спектр сигналов акустической эмиссии простирается от области слышимых частот до десятков и сотен мегагерц. Известно, что пластические и прочностные свойства материала определяются наличием в нем дислокаций. В зависимости от направления обрыва атомной плоскости к дислокациям приписывают положительный и отрицательный знак. Их взаимодействие обуславливается упругими напряжениями, вызываемыми каждой дислокацией. Ускоренное движение и аннигиляция дислокаций вызывают акустические импульсы.

Как известно, среди МНК не существует ни одного такого метода, который мог бы решить проблему оценки целостности объекта оптимально с учетом таких основных факторов, как получение наиболее низкой себестоимости работ и достижение технической адекватности результатов контроля. Лучшим решением проблемы является применение комбинации различных методов НК. Благодаря тому, что АЭ резко отличается по своим возможностям от традиционных методов контроля, на практике оказывается очень полезным совмещать АЭ с другими методами.

Основное преимущество метода АЭ связано с возможностью проведения неразрушающего контроля всего объекта целиком за один цикл нагружения. Данный метод является дистанционным, он не требует

сканирования поверхности объекта для поиска локальных дефектов. Необходимо просто правильным образом расположить нужное число датчиков и использовать их для осуществления локализации источника волн напряжений. Возможности, связанные с дистанционным использованием метода, дают большие преимущества по сравнению с другими методами контроля, которые требуют, например, удаления изоляционных оболочек, освобождения контейнеров контроля от внутреннего содержания или сканирования больших поверхностей.

При тестировании продукции метод АЭ используется для проверки и контроля сварных соединений, термически сжатых бандажей. Метод также используется во время операций, связанных с формообразованием, таких как уплотнение или при прессовании. В целом АЭ контроль может применяться во всех случаях, когда имеют место процессы нагружения, приводящие к постоянному деформированию материалов. В основном при тестировании конструкций АЭ используется для контроля сосудов давления [1], хранилищ труб и трубопроводов, авиационных и космических аппаратов [2], электрических заводов, мостов, железнодорожных цистерн и вагонов, грузовых транспортных средств, а также многих других типов объектов. АЭ контроль производится и на новом, и на бывшем в эксплуатации оборудовании. Он включает обнаружение трещин, сварных дефектов и др.

Процедуры, связанные с использованием АЭ метода, были опубликованы Американским обществом инженеров механиков (American Society Mechanical Engineering – ASME), Американским обществом контроля и материалов (American Society for Testing and Materials – ASTM) и другими организациями. Успешные результаты конструкционного тестирования можно наблюдать в тех случаях, когда возможности и достоинства метода АЭ правильно используются в конкретном тексте исследований и когда применяются корректные технические решения и специализированное оборудование АЭ [3].

Акустико-эмиссионная аппаратура является чрезвычайно чувствительной к любым видам структурных перемещений в широком частотном диапазоне работы (обычно от 20 до 1200 кГц). Оборудование способно регистрировать не только рост трещин или развитие пластической АЭ метода контроля: контроль процесса сварки, износа и соприкосновения оборудования при автоматической механической обработке, потерь смазки на объектах, связанных с вращением

[4]; контроль износа и потерь смазки на объектах, связанных с вращением и трением компонент [5]; детектирование потерянных частей и частиц оборудования [6]; обнаружение и контроль течей, кавитации и потоков жидкости в объектах [6, 7]; контроль химических реакторов, включающий контроль коррозионных процессов, жидко– твердого перехода, фазовых превращений [8–10].

Когда процессы типа ударов, трения, течей и другие возникают на фоне контроля развития трещин и коррозии, они становятся источниками нежелательных шумов. Поэтому было предложено множество различных технических решений с целью снижения и избавления от этих шумовых помех. Следует заметить, что шумы являются основной преградой на пути широкого использования АЭ в качестве метода контроля. Важной задачей является их исследование и по возможности устранение с целью повышения чувствительности метода.

В последние годы ведущие лаборатории добились значительных успехов при решении проблем количественной оценки величины прироста трещины, ее ориентации и временных характеристик сигналов АЭ для случаев простейшей геометрии объектов [11, 12]. Для этих целей используются высокочувствительные датчики и производится анализ лишь начальной части сигнала, которая записывается со всеми необходимыми подробностями с помощью высокоточной аппаратуры. Сегодня можно ожидать, что полученные научные результаты принесут свои плоды также и в прикладных областях использования метода АЭ.

Математическая модель обнаружения дефектов основывается на существовании однозначной зависимости между напряжениями в среде и смещениями при наличии развивающегося дефекта:

$$U(r, t) = f\left(\frac{1}{\sqrt{r}}, t, \Delta t, p, l, \Delta l\right), \quad (1)$$

где $U(r, t)$ – смещение точек среды, r – расстояние от датчика до источника сигнала, t – время зарождения сигнала, Δt – время принятия сигнала датчиком акустической эмиссии, p – скачок напряжений на границе субмикротрещин, l – размер дефекта, Δl – приращение размера дефекта в процессе развития.

Анализ экспериментального и теоретического материала обнаружил ряд трудностей и ограничений в использовании предлагаемой модели:

- интенсивность сигналов акустической эмиссии в динамическом развитии дефектов различна;
- сигналы акустической эмиссии обладают большим диапазоном изменения характерных параметров;
- значения параметров сигналов акустической эмиссии при внутренней перестройке структуры материала и его дефектности носят стохастический характер с различными законами распределения вероятностей.

Важным информативным параметром сигнала служит степень локализации источника сигнала. Степень локализации дефекта определяется измерением

координат источника акустической эмиссии. В основу метода определения координат положено измерение разности времени прихода импульсов акустической эмиссии к нескольким разнесенным в пространстве точечным акустическим датчикам, регистрирующим акты акустической эмиссии. Датчики в своем расположении могут образовывать сетку, опоясывающую всю конструкцию.

Для определения координат дефектов, т. е. локализации источников акустической эмиссии датчики устанавливаются в определенной конфигурации, которая образует так называемую антенную решетку. По взаимному расположению различают зональную, линейную, плоскостную и объемную схемы локализации.

Зональная локация подразумевает такую расстановку датчиков, при которой сигнал из любой точки контроля доходит хотя бы до одного датчика. Она применяется при проведении испытаний, когда не требуется определение места расположения источников акустической эмиссии.

При линейной схеме сигнал из любой точки контроля воспринимается минимум двумя датчиками. Плоскостные схемы размещения датчиков требуют выполнения регистрации сигналов минимум тремя датчиками, объемные – четырьмя.

Алгоритмы расчета координат дефекта основаны на определении разности времени прихода фронта акустической волны к нескольким приемникам акустической эмиссии.

Наиболее точную информацию об источнике акустической эмиссии дает датчик, который является самым близким к нему.

Строение типовых схем. Объекты, для которых допустимо определение только одной координаты, т.е. таких, у которых один размер (длина) во много раз больше других размеров (ширины и толщины), являются линейными.

Для определения одной координаты достаточно измерить одну разность времени прихода, следовательно, достаточно двух приемников.

Если начало отсчета выбрать посередине между приемниками, т.е. , то на счетчике разности времени прихода будет фиксироваться координата источника в масштабе с коэффициентом $2f/V$. Если частоту генератора заполняющих импульсов f подобрать численно равной $V/2$, то на счетчике разности времени прихода можно получить координату x в виде:

$$x = (x_0 + x_1 + V\Delta t) / 2, \quad (2)$$

где x_0 и x_1 – соответственно координаты нулевого и первого приемников, а V – скорость распространения волн акустической эмиссии.

Для случая двухмерных объектов функция расстояния до источника акустической эмиссии имеет вид:

$$R(x, y) = \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2}, \quad (3)$$

Следовательно, определение координат для этого случая сводится к решению уравнения следующего вида:

$$VT_0 + V\Delta t_i \sqrt{(x-x_i)^2 - (y-y_i)^2}, \quad (4)$$

То есть для определения координат на плоскости необходимо измерить две независимых разности времен прихода. Для этого достаточно расположение на контролируемой поверхности трех приемников акустической эмиссии (рис. 1)

$D_0(0;0)$, $D_1(x_1; y_1)$, $D_2(x_2; y_2)$.

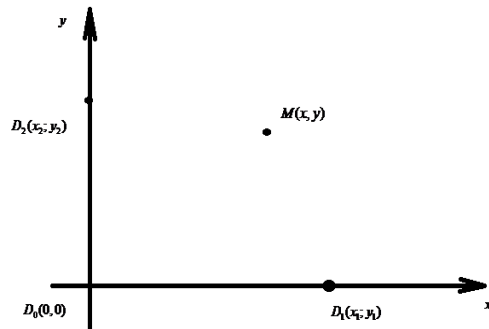


Рис. 1. – Расположение трех датчиков

Формулы для определения координат источник $M(x,y)$ находятся при использовании следующих обозначений:

$$VT_0 = R, \quad (5)$$

$$VT_1 = R + r_1, \quad (6)$$

$$VT_2 = R + r_2, \quad (7)$$

При расположении начала координат в точке приемника D_0 получим систему уравнений следующего вида:

$$(x-x_i)^2 - (y-y_i)^2 = (R+r_i)^2 i = 0, 2, \quad (8)$$

Решение данной системы выглядит следующим образом:

$$x = K_1 R + A_1; \quad (9)$$

$$y = K_2 R + A_2; \quad (10)$$

$$r_1 = V\Delta t_1 = V(T_1 - T_0); \quad (11)$$

$$r_2 = V\Delta t_2 = V(T_2 - T_0); \quad (12)$$

$$K_1 = (r_1 y_2 - r_1 y_1) / (x_2 y_1 - x_1 y_2); \quad (13)$$

$$K_2 = (r_1 x_2 - r_2 x_1) / (x_1 y_1 - x_2 y_2); \quad (14)$$

$$A_1 = \frac{r_1^2 y_2 - r_2^2 y_1 + y_1 y_2 (y_2 - y_1) + x_2^2 y_2 - x_1^2 y_2}{2(x_2 y_1 - x_1 y_2)}; \quad (15)$$

$$A_2 = \frac{r_1^2 x_2 - r_2^2 x_1 + x_1 x_2 (x_2 - x_1) + y_2^2 x_2 - y_1^2 x_2}{2(x_1 y_2 - x_2 y_1)}; \quad (16)$$

$$R = \frac{(A_1 K_1 + A_2 K_2 \pm \sqrt{A_1^2 A_2^2 - (A_1 K_2 + A_2 K_1)^2})}{(K_1^2 K_2^2 - 1)}. \quad (17)$$

Представленные формулы позволяют определять координаты источника при произвольном расположении приемников.

Выводы

Преимуществами метода акустической эмиссии перед другими методами неразрушающего контроля являются: интегральность метода, которая заключается в том, что используя один или несколько датчиков, установленных неподвижно на поверхности объекта, можно проконтролировать весь объект целиком. В отличие от сканирующих методов неразрушающего контроля метод акустической эмиссии не требует тщательной подготовки поверхности объекта контроля. Обнаружение регистрации развивающихся дефектов позволяет классифицировать дефекты не только по их размерам, но и по степени их опасности.

Предложенное математическое обеспечение построения моделей определения координат источников акустической эмиссии позволяет локализовать дефекты, наглядно просмотреть или накопить информацию о поведении дефекта.

Метод акустической эмиссии позволяет обнаруживать дефекты структуры материала на уровне скопления дислокаций. При этом анализируется только развивающиеся дефекты.

Список литературы:

1. Miller, R. K. Nondestructive Testing Handbook. Vol. 5. Acoustic Emission Testing [Text] / R. K. Miller, P. McIntire. – 2nd ed. – Amer Society for Nondestructive, 1987. – 603 p.
2. Drouillard, T. F. Production Acoustic Emission Testing of Braze Joint [Text] / T. F. Drouillard, T. G. Glenn // J. Acoust. Emiss. – 1985. – Vol. 1, Issue 2. – P. 81–85.
3. Vahaviolos, S. Real Time Detection of Microcracks in Brittle Materials Using Stress Wave Emission (SWE) [Text] / S. Vahaviolos // IEEE Transactions on Parts, Hybrids, and Packaging. – 1974. – Vol. 10, Issue 3. – P. 152–159. doi: [10.1109/tphp.1974.1134857](https://doi.org/10.1109/tphp.1974.1134857)
4. Неразрушающий контроль: Справочник. Т. 7, Кн. 1 [Текст] / ред. В. В. Клюев. – М.: Машиностроение, 2005. – 829 с.
5. Серьезнов, А. Н. Диагностика объектов транспорта методом акустической эмиссии [Текст] / А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, В. В. Муравьев. – М.: Машиностроение, 2004. – 392 с.
6. Бунина, Н. А. Исследование пластической деформации металлов методом акустической эмиссии [Текст] / Н. А. Бунина. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1990. – 176 с.
7. Букетов, А. В. Влияние изменения дислокационной структуры на акустические характеристики материалов [Текст] / А. В. Букетов, В. Д. Нигалатий, С. А. Рожков, А. В. Шарко // Наукові нотатки. – 2015. – Вип. 48. – С. 220–224.
8. Кайно, Г. Акустические волны: Устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов [Текст] / Г. Кайно. – М.: Мир, 1990. – 652 с.
9. Pärtzel, K. H. Acoustic Emission for Crack Inspection During Fully Automatic and Manual Straightening of Transmission Shafts, in

- Proceedings of the Acoustic Emission Symposium (Bad Nauheim) [Text] / K. H. Pärtzel // Deutsche Gesellschaft für Metallkunde. – 1988. – P. 157–164.
10. Parry, D. L. Industrial Application of Acoustic Emission Analysis Technology [Text] / D. L. Parry // Monitoring Structural Integrity by Acoustic Emission. – 1975. – P. 150–150-34. doi: [10.1520/stp32249s](https://doi.org/10.1520/stp32249s).
 11. Fowler, T. J. Recent Developments in Acoustic Emission Testing of Chemical Process Equipment [Text] / T. J. Fowler // Progress in Acoustic Emission IV, Proceedings of the Ninth International Acoustic Emission Symposium. – 1988. – P. 391–404.
 12. Cole, P. C. Acoustic Emission. Part 7 [Text] / P. C. Cole // The Capabilities and Limitations of NDT. The British Institute of Non-Destructive Testing. – 1988.

References

1. Miller, R. K., McIntire, P. (1987). Nondestructive Testing Handbook. Vol. 5. Acoustic Emission Testing. Amer Society for Nondestructive, 603.
2. Drouillard, T. F., Glenn, T. G. (1985). Production Acoustic Emission Testing of Braze Joint. J. Acoust. Emiss, 1 (2), 81–85.
3. Vahaviolos, S. (1974). Real Time Detection of Microcracks in Brittle Materials Using Stress Wave Emission (SWE). IEEE Transactions on Parts, Hybrids, and Packaging, 10 (3), 152–159. doi: [10.1109/tphp.1974.1134857](https://doi.org/10.1109/tphp.1974.1134857).
4. Klyuev, V. V. (Ed.) (2005). Nerazrushayushchiy kontrol': Spravochnik. Vol. 7, Kn. 1. Moscow: Mashinostroenie, 829.
5. Ser'eznov, A. N., Stepanova, L. N., Murav'ev, V. V. (2004). Diagnostika ob'ektov transporta metodom akusticheskoy emissii. Moscow: Mashinostroenie, 392.
6. Bunina, N. A. (1990). Issledovanie plasticheskoy deformatsii metallov metodom akusticheskoy emissii. Leningrad: Izd-vo LGU, 176.
7. Buketov, A. V., Nigalatiy, V. D., Rozhkov, S. A., Sharko, A. V. (2015). Vliyanie izmeneniya dislokatsionnoy struktury na akusticheskie harakteristiki materialov. Naukovi notatky, 48, 220–224.
8. Kayno, G. (1990). Akusticheskie volny: Ustroystva, vizualizatsiya i analogovaya obrabotka signalov. Moscow: Mir, 652.
9. Pärtzel, K. H. (1988). Acoustic Emission for Crack Inspection During Fully Automatic and Manual Straightening of Transmission Shafts, in Proceedings of the Acoustic Emission Symposium (Bad Nauheim). Deutsche Gesellschaft für Metallkunde, 157–164.
10. Parry, D. L. (1975). Industrial Application of Acoustic Emission Analysis Technology. Monitoring Structural Integrity by Acoustic Emission, 150–150-34. doi: [10.1520/stp32249s](https://doi.org/10.1520/stp32249s).
11. Fowler, T. J. (1988). Recent Developments in Acoustic Emission Testing of Chemical Process Equipment. Progress in Acoustic Emission IV, Proceedings of the Ninth International Acoustic Emission Symposium, 391–404.
12. Cole, P. C. (1988). Acoustic Emission. Part 7. The Capabilities and Limitations of NDT. The British Institute of Non-Destructive Testing.

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Математична модель визначення координат дефектів як джерел акустичної емісії/ Савченко С. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 33(1255). – С. 8–12. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.

Математическая модель определения координат дефектов как источников акустической эмиссии/ Савченко С. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 33(1255). – С.8–12. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.

Mathematical model of definition of coordinates of defects as sources of acoustic emission/ Savchenko S. // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 33 (1255). – P. 8–12. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Савченко Сергій Васильович – аспірант, Кафедра виробництва приладів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», проспект Перемоги 37, м. Київ, Україна, 03056, e-mail: savchenko0102@ukr.net.

Савченко Сергей Васильевич – аспирант, Кафедра производства приборов, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», проспект Победы 37, г. Киев, Украина., 03056, e-mail: savchenko0102@ukr.net.

Sergey Savchenko – postgraduate student, Department of Instrument Production, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute", 37, Peremohy ave., Kyiv, Ukraine, 03056, E-mail: savchenko0102@ukr.net.

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА УПРАВЛІННЯ МЕХАНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИМИ СИСТЕМАМИ ТА КОМПЛЕКСАМИ

УДК.514.18

Є. О. АДОНЬЄВ, В. М. ВЕРЕЩАГА

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГЕОМЕТРИЧНИХ МАТРИЦЬ

При моделюванні багатофакторних процесів виникає проблема використання матриць великих розмірів. Потреба в уникненні цієї проблеми викликала необхідність розробки нових методів моделювання багатофакторних задач. Точкове БН-числення [1, 2], що побудоване на встановленні внутрішніх геометричних зв'язків між елементами геометричної фігури, дає можливість для збільшення кількості вихідних факторів будь-якої задачі інтерполяції. Застосування методів точкового БН-числення для розв'язання задач інтерполяції, названо геометричною інтерполяцією.

Ключові слова: точкове БН-числення, геометричні матриці точок та параметрів, операції над геоматрицями, задачі з геоматрицями, Б-лінії, Б-поверхні, Б-моделі.

При моделировании многофакторных процессов возникает проблема использования матриц больших размеров. Потребность избежать этой проблемы вызвала необходимость разработки новых методов моделирования многофакторных задач. Точечное БН-исчисление [1, 2], построенное на установлении внутренних геометрических связей между элементами геометрической фигуры, предоставляет возможность увеличения количества исходных факторов любой задачи интерполяции. Применение методов точечного исчисления для решения задач интерполяции названо методом геометрической интерполяции.

Ключевые слова: точечное БН-исчисление, геометрические матрицы точек та параметров, операции над геоматрицами, задачи с геоматрицами, Б-линии, Б-поверхности, Б-модели.

When modeling multifactor processes, the problem of the use of large-size matrices arises. The need to avoid this problem has necessitated the development of new methods for modeling multifactor tasks. Point BN-calculation [1, 2], built on the establishment of internal geometric connections between the elements of a geometric figure, provides an opportunity to increase the number of initial factors of any interpolation problem. The application of the methods of point calculation to solving interpolation problems is called the method of geometric interpolation.

To construct geometric shapes, in a point BN-calculation, it is advisable to use matrices that provide a convenient scheme for drawing point shapes for B-lines and B-surfaces. In this connection, the concept of a geometric matrix (geomatrix) and the corresponding notation are introduced. Defined properties of the geomatrices, as well as the method of compiling geomatrices. Operations on geomatrices and actions with them are developed.

The application of the properties of the geomatrices in the modelling of multifactorial situations and processes by means of point BN-calculation avoids the need to establish analytical connections between the source elements of the model, which greatly simplifies the process of interpolation during modeling.

Keywords: point BN-calculus, geometric matrixes of points and parameters, operations on geomatrixes, problems with geomatrixes, B-lines, B-surfaces, B-models.

Вступ. Однією з найважливіших задач математики є дослідження і розв'язання систем рівнянь першого ступеня, для вирішення якої було розроблено теорію матриць. Застосування матриць до розв'язання систем рівнянь, у кінцевому рахунку, розв'язує задачі інтерполяційного характеру. Однак, розвиток людства створює умови для появи нових методів досліджень, які потребують введення нових математичних понять, визначень, тощо, які б задовольняли вимогам, що висувають прикладні науки.

Існуюча теорія матриць призначена для розв'язання систем лінійних рівнянь алгебраїчними методами. Однак, при цьому, збільшення розмірів матриць приводить до зростання похибки у розрахунках, що зводить нанівець результати розв'язання будь-якої задачі.

При використанні методів геометричної інтерполяції не застосовуються матриці і тому не виникає проблем, пов'язаних з великими розмірами матриць. Однак, при цьому, виникає проблема безпомилкового складання точкового рівняння інтерполанта, що інтерполіює велику кількість вихідних даних. Наприклад, інтерполяція поверхні, визначеної кількістю точок у двох напрямках $m \times n$: 3×4 ; 5×8 ; 7×9 ; 10×10 . Для уникнення цієї проблеми вводимо геоматриці.

У цій статті вказується на деякі властивості та особливості геоматриць. Одержані результати досліджень, щодо цілей створення геоматриць, є завершеними. У той же самий час, досягнуті результати відносно геоматриць не є закритими і мають можливість подальшого розширення. Однак, розробки в рамках цієї статті, на різі, цього не потребують.

Метод геометричної інтерполяції у точковому БН-численні. Метод базується на простому відношенні трьох точок прямої [3]. Просте відношення трьох точок прямої умовно позначається (ABC) , що з геометричної точки зору означає відношення двох відтінків $\frac{AC}{BC}$. У точковій формі кожен з відтінків подається як різниця між точками, тоді відношення відтінків у точковій формі матиме вигляд: $\frac{A-C}{B-C}$. Таким чином, можемо записати $(ABC) = \frac{AC}{BC} \rightarrow \frac{A-C}{B-C}$, що у координатній формі означає:

$$\frac{A-C}{B-C} \rightarrow \frac{X_A - X_C}{X_B - X_C} = \frac{Y_A - Y_C}{Y_B - Y_C} = \frac{Z_A - Z_C}{Z_B - Z_C} = \dots = t.$$

Тоді можемо записати із наведеного вище рівняння $\frac{A-C}{B-C} = t$.

Розв'яжемо це рівняння відносно точки C , застосовуючи до точок загальновідомі алгебраїчні операції, та отримаємо:

$$A - C = (B - C)t, \rightarrow A = (B - C)t + C; \quad (0 \leq t \leq 1).$$

У цьому рівнянні точки B і C є базовими, точка A – змінювана. Якщо параметр t дорівнює нулю, отримаємо $A \equiv C$, якщо параметр $t=1$, отримаємо $A \equiv B$. Таким чином, змінювана точка A , переміщуючись уздовж відтинку BC , геометрично інтерполює його. На відміну від алгебраїчної інтерполяції, виконання геометричної інтерполяції не потребує розв'язання систем лінійних рівнянь [4].

Якщо узяти симплекс CAB , що визначає двомірний геометричний образ – площину, то точкові рівняння, що визначають змінювану точку M на цій площині, відносно точок C, A, B симплексу CAB , матимуть вигляд:

$$M = (A - C)p + (B - C)q + C, \text{ або} \\ M = Ap + Bq + Cr, \text{ при умові } p + q + r = 1.$$

При цьому, якщо усі параметри p, q, r є додатними, точка M пробігає усі положення в середині $\triangle ABC$, якщо хоча б один з вказаних параметрів є від'ємним, то змінювана точка M знаходиться за межами $\triangle ABC$.

У наведених прикладах виконувалась геометрична інтерполяція двох та трьох точок. Однак, запропонований метод геометричної інтерполяції має можливість інтерполювати значно більшу кількість точок, наприклад, 20, 30, 40, 50 і так далі. У таких випадках складання точкових рівнянь не є таким простим, як для двох та трьох точок. Тут виникає потреба застосування геоматриць для складання відповідних точкових рівнянь інтерполяції великої кількості вихідних точок.

Введення геоматриць надає певні алгоритми утворення точкових рівнянь інтерполяції для необхідної кількості вихідних точок. Наявність таких алгоритмів виключає появу механічних помилок у точкових рівняннях інтерполянтів.

Деякі властивості геоматриць. Як відомо [5], матрицею розміру $m \times n$ називається прямокутна таблиця чисел, яка складається з m рядків та n стовпчиків.

Позначаються матриці прописними (заголовними) літерами латинського алфавіту, а елементи – відповідними рядковими літерами. При цьому, таблиці чисел беруться у круглі чи квадратні дужки, або обмежуються прямими подвійними лініями:

$$A = (a_{ij}); \quad B = [b_{ij}]; \quad C = \parallel\!\!\parallel c_{ij} \parallel\!\!\parallel, \quad i = \overline{1, m}; \quad j = \overline{1, n}. \quad (1)$$

Однак, з появою точкового БН-числення [1], у якому інтерполяції та апроксимації розв'язуються не алгебраїчними, а геометричними методами, виникла

необхідність створення геометричних матриць, які є схемою для безпомилкового складання точкових форм для Б-ліній та Б-поверхонь [7]. Як відомо [8, 9], точкові рівняння забезпечують проходження через наперед визначені точки. Вони побудовані на використанні внутрішніх геометричних відношень між елементами у локальних симплексах [10]. При цьому, немає необхідності розв'язувати систему рівнянь.

Означення 1. Геометричною матрицею, у точковому БН-численні, будемо називати прямокутну таблицю, елементами якої є точки або параметри двомірної геометричної фігури, що розташовані у цій матриці у повній відповідності з розташуванням на геометричній фігурі.

Наприклад, Б-поверхня (рис. 1) четвертого порядку визначається дев'ятьма наперед заданими точками A_{ij} .

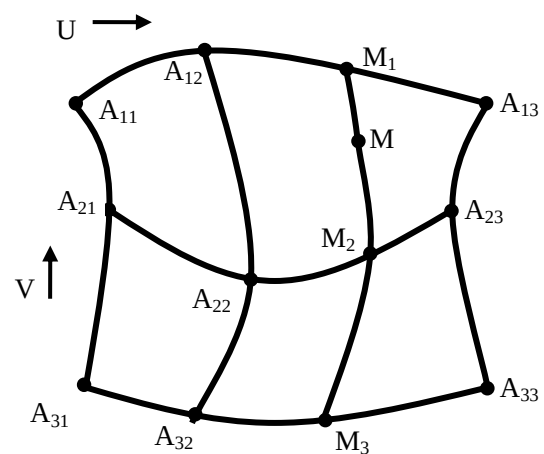


Рис. 1. Геометрична схема Б-поверхні у просторі

Тоді для точок геометрична матриця A , що відповідає схемі (рис. 1), матиме вигляд

$$A_T = \left(\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{pmatrix} \right) \quad (2)$$

На відміну від (1), для геометричної матриці нами застосовано подвійні круглі дужки. У скороченому вигляді для точок геометричну матрицю можна записати:

$$A_T = ((A_{ij})); \quad B_T = [[B_{ij}]]; \quad C_T = \parallel\!\!\parallel c_{ij} \parallel\!\!\parallel; \quad i = \overline{1, m}; \\ j = \overline{1, n}. \quad (3)$$

У скороченому запису для параметрів геоматриця матиме вигляд:

$$A_{II} = ((a_{ij})); \quad B_{II} = [[b_{ij}]]; \quad C_{II} = \parallel\!\!\parallel c_{ij} \parallel\!\!\parallel; \quad i = \overline{1, m}; \\ j = \overline{1, n}.$$

Вживання у позначеннях (3) додаткових дужок та прямих у порівнянні з (1), на нашу думку, надасть можливість відрізнити геометричну матрицю від алгебраїчної. Геоматриці (2) у точковій формі відпові-

дають геоматриці у координатній формі. Наприклад, для 3-простору:

$$X_A = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} \end{pmatrix}, \quad Y_A = \begin{pmatrix} y_1 & 1 & y_1 \\ 2 & y_1 & y_2 \\ y_3 & 1 & y_3 \end{pmatrix} y$$

$$Z_A = \begin{pmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} \\ z_{31} & z_{32} & z_{33} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Наведені геометричні матриці (3), (4) A , X_A , Y_A , Z_A є квадратними і можуть позначатися $\overset{A}{A}_{3 \times 3}$, $\overset{X}{X}_{3 \times 3}$, $\overset{Y}{Y}_{3 \times 3}$, $\overset{Z}{Z}_{3 \times 3}$.

Однак, у подальших дослідженнях, будуть розглядатися і прямокутні геометричні матриці $\overset{A}{A}_{m \times n}$, $i = \overline{1, m}$; $j = \overline{1, n}$. Число, яке дорівнює $\min(m; n)$, визначає порядок геометричної матриці.

В усіх розглянутих випадках, і взагалі, запис елементів матриці для параметрів і точок повністю відповідає розташуванню на Б-лініях та Б-поверхнях. Однакові індекси точок геометричної фігури та елементів геоматриці надає ознаки співставлення Б-ліній і рядків або стовпців геоматриці; Б-поверхні та геоматриці в цілому.

Означення 2. Дві геометричні матриці A і B одного порядку називають рівними, якщо співпадають точки, що входять до їхнього складу, тобто:

$$A_{ij} = B_{ij}, \quad \forall \quad i = \overline{1, m}; \quad j = \overline{1, n}.$$

Означення 3. Геометрична матриця $((A_{ij}))$, що складається з одного рядка, називається геометричною матрицею-рядком, яка відповідає вихідним точкам ребра поверхні у напрямку U .

Означення 4. Геометрична матриця $((A_{il}))$, що складається з одного стовпчика – називається геометричною матрицею-стовпцем, до якого включено вихідні точки ребра Б-поверхні у напрямку V . Наприклад:

$A_i = ((A_{i1} \ A_{i2} \ A_{i3}))$, $i = \overline{1, 3}$, тобто, геометричних матриць-рядків може бути $i = \overline{1, m}$, у наведеному прикладі – три.

$$B_{ij} = \begin{pmatrix} B_{1j} \\ B_{2j} \\ B_{3j} \end{pmatrix} \quad \text{– матриця-стовпець.}$$

для $j = \overline{1, 3}$ таких стовпців буде – три.

Точки геометричної матриці A_{ij} , у яких номер стовпця дорівнює номеру рядка ($i=j$), називаються діагональними.

Якщо усі точки геометричної матриці дорівнюють одиниці, то така геометрична матриця (геоматриця) називається одиничною.

Геоматриця будь-якого розміру називається нульовою геоматрицею, або нуль-геоматрицею, якщо усі її точки дорівнюють нулю. Наприклад, A – одинична геоматриця, B – нуль-геоматриця:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

У прикладах, що наведені вище і будуть наведені далі, розглянуто 3-вимірні випадки, що ні в якому випадку не знижує цінність результатів. Більш загальний результат досягається простим збільшенням значень $m \times n$.

Над геоматрицями, як і над матрицями, можна робити ряд операцій, які у більшості своїй відрізняються від операцій над матрицями.

Множення геоматриці на число. Добутком геоматриці A на число λ називається геоматриця $B = \lambda \cdot A$, точки якої $B_{ij} = \lambda \cdot A_{ij}$, для $i = \overline{1, m}$; $j = \overline{1, n}$.

Множення геоматриці параметрів на геоматрицю точок. Добутком геоматриці параметрів B на геоматрицю точок A є геоматриця точок C , кожен елемент якої є точка $C_{ij} = b_{ij} \cdot A_{ij}$, $i = \overline{1, m}$; $j = \overline{1, n}$ є добутком відповідних елементів b_{ij} на A_{ij} за умови, що індекси цих елементів співпадають.

Наприклад:

$$B \cdot A = C = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} b_{11} \cdot A_{11} & b_{12} \cdot A_{12} & b_{13} \cdot A_{13} \\ b_{21} \cdot A_{21} & b_{22} \cdot A_{22} & b_{23} \cdot A_{23} \\ b_{31} \cdot A_{31} & b_{32} \cdot A_{32} & b_{33} \cdot A_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Елементами геоматриці B є параметри, тому вони записані малими літерами b_{ij} , а елементами геоматриці A є точки, тому вони записані великими літерами A_{ij} .

Розташування елементів геоматриць параметрів і точок знаходяться у співставленні з точками Б-поверхні. Відмінність між ними полягає лише у вигляді елементів.

Таке правило множення геоматриці параметрів B на геоматрицю точок A запроваджується для виконання умов геометричної інтерполяції. Це правило множення є результатом громіздких алгебраїчних перетворень, наведення яких перевищить дозвалені межі даної публікації. Впровадження геоматриць як раз і дозволяє уникнути помилок при виконанні кожного разу цих алгебраїчних перетворень для здійснення геометричної інтерполяції. Уникнення помилок при виконанні алгебраїчних перетворень для геометричної інтерполяції якраз і спонукали впровадження такого правила множення геоматриць.

Застосування геоматриць значно скорочує час складання точкового рівняння інтерполянта.

Добутком геоматриці параметрів B на геоматрицю параметрів C , елементами яких є параметри геометричної фігури, є геоматриця параметрів D , кожен з елементів якої є добутком відповідних елементів геоматриць B і C ; $d_{ij} = b_{ij} \cdot c_{ij}$, $i = \overline{1, m}$; $j = \overline{1, n}$ за умови, що індекси цих елементів співпадають.

$$B \cdot C = D = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{11} \cdot c_{11} & b_{12} \cdot c_{12} & b_{13} \cdot c_{13} \\ b_{21} \cdot c_{21} & b_{22} \cdot c_{22} & b_{23} \cdot c_{23} \\ b_{31} \cdot c_{31} & b_{32} \cdot c_{32} & b_{33} \cdot c_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Відмінністю між множенням (5) та (6) є те, що у першому випадку перемножуються геоматриці параметрів та точок, а у другому – дві геоматриці параметрів. Суперечностей, при цьому, не виникає.

Наслідком із добутоків геоматриці на число та на матрицю є те, що будь-яку геоматрицю можна скоротити на спільний множник.

$$((A_{ij})) = \lambda \cdot ((B_{ij})), \quad i = \overline{1, m}; \quad j = \overline{1, n}. \quad (7)$$

З геометричної точки зору, рівняння (7) означає зменшення на величину λ якоїсь однієї або усіх координат точок A_{ij} , тобто, перенесення координатної площини вихідної системи координат паралельно самій собі на величину λ .

Додавання геоматриць. Зауважимо, що геоматриці-доданки повинні бути однакового розміру і їхні елементи повинні мати однакові найменування – або точки, або параметри. Тобто, геоматрицю параметрів $((a_{ij}))$ не можна складати з геоматрицею точок $((B_{ij}))$. Кожній геоматриці точок A відповідає кількість геоматриць за координатами. Наприклад, для 3-вимірного простору геоматриця точок A має геоматриці уздовж:

- координати x – геоматрицю $A(x) = ((A_{ij}(x)))$;
- координати y – геоматрицю $A(y) = ((A_{ij}(y)))$;
- координати z – геоматрицю $A(z) = ((A_{ij}(z)))$.

Враховуючи сказане вище, під сумою двох геоматриць A і B треба розуміти геоматрицю C , елементами якої є $C_{ij} = A_{ij} + B_{ij}$, і якщо, при цьому, не указується, за якою координатою здійснювати додавання, то його треба виконати за усіма координатами. Наприклад, для 3-вимірного простору $C = A + B$ треба виконати:

$$\begin{aligned} C(x) &= ((A(x) + B(x))); \\ C(y) &= ((A(y) + B(y))); \\ C(z) &= ((A(z) + B(z))). \end{aligned}$$

Запишемо більш детально додавання геометричних матриць за координатою Z :

$$\begin{aligned} C(z) &= A(z) + B(z) = \\ &= \begin{pmatrix} A_{11}(z) + B_{11}(z) & A_{12}(z) + B_{12}(z) & A_{13}(z) + B_{13}(z) \\ A_{21}(z) + B_{21}(z) & A_{22}(z) + B_{22}(z) & A_{23}(z) + B_{23}(z) \\ A_{31}(z) + B_{31}(z) & A_{32}(z) + B_{32}(z) & A_{33}(z) + B_{33}(z) \end{pmatrix} \quad (7) \end{aligned}$$

Покоординатне додавання впливає з існуючих правил додавання точок. Якщо додаються дві точки, то необхідно знайти суми відповідних чисел, що їх визначають. Точка поля за Ленгом [11] завжди повинна задовольняти умовам $f(1)=1$, $f(a+b)=f(a)+f(b)$,

$f(ab)=f(a)f(b)$, що повністю узгоджується з операціями над геометричними матрицями, які пропонуються у цьому дослідженні.

Додавання геоматриці числа до геоматриць точок або параметрів. Означення. Геоматрицею числа λ будемо вважати таблицю розміром $m \times n$, елементами якої є однакові числа, які усі дорівнюють значенню λ , наприклад, геоматриця 3×3 для числа λ матиме вигляд:

$$\lambda = \begin{pmatrix} \lambda & \lambda & \lambda \\ \lambda & \lambda & \lambda \\ \lambda & \lambda & \lambda \end{pmatrix}.$$

Знову ж таки, виходячи з визначення точки за Ленгом [11], додаванням числа λ до геоматриці точок A є геоматриця B , елементами якої є $B_{ij} = A_{ij} + \lambda$. При цьому, якщо не вказано, до якої координати додавати число λ , то додавання необхідно виконати до усіх координат. Наприклад, для 3-вимірного простору запис $B = A + \lambda$ вказує на необхідність виконання наступних дій.

$$B(x) = A(x) + \lambda; \quad B(y) = A(y) + \lambda; \quad B(z) = A(z) + \lambda.$$

Для прикладу, запишемо детальніше додавання числа λ до геоматриці $A(x)$ за координатою X .

$$\begin{aligned} B(x) &= A(x) + \lambda = \begin{pmatrix} A_{11}(x) & A_{12}(x) & A_{13}(x) \\ A_{21}(x) & A_{22}(x) & A_{23}(x) \\ A_{31}(x) & A_{32}(x) & A_{33}(x) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \lambda & \lambda & \lambda \\ \lambda & \lambda & \lambda \\ \lambda & \lambda & \lambda \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} A_{11}(x) + \lambda & A_{12}(x) + \lambda & A_{13}(x) + \lambda \\ A_{21}(x) + \lambda & A_{22}(x) + \lambda & A_{23}(x) + \lambda \\ A_{31}(x) + \lambda & A_{32}(x) + \lambda & A_{33}(x) + \lambda \end{pmatrix}. \quad (8) \end{aligned}$$

Властивості геоматриць та операції над ними докорінно відрізняються від загальновідомих через те, що відрізняються філософії їхнього утворення та призначення геоматриць та традиційних матриць. Традиційні матриці призначені для алгебраїчної інтерполяції, а геоматриці – для геометричної інтерполяції, яка здійснюється з використанням Б-ліній та Б-поверхонь.

Висновки. Проведені дослідження базуються на математичному апараті точкового БН-числення, у якому інтерполяції та апроксимації розв'язуються не алгебраїчними, а геометричними методами. Для побудови геометричних фігур, у точковому БН-численні, доцільно використовувати матриці, які надають зручну схему для складання точкових форм для Б-ліній та Б-поверхонь. У зв'язку з цим, введено поняття геометричної матриці (геоматриці) та відповідне позначення. Визначені властивості геоматриць, а також спосіб складання геоматриць. Розроблено операції над геоматрицями та дії з ними.

Застосування властивостей геоматриць при моделюванні багатofакторних ситуацій та процесів інструментами точкового БН-числення дозволяє уникнути необхідності встановлення аналітичних залежностей між вихідними елементами моделі, що значно спрощує процес інтерполяції при моделюванні.

Список літератури:

1. Балюба, И. Г. Точечное исчисление [Текст]: учеб. пос. / И. Г. Балюба, В. М. Найдыш; под ред. В. М. Верещаги. – Мелитополь: МГПУ им. Б. Хмельницкого, 2015. – 236 с.
2. Балюба, И. Г. Конструктивная геометрия многообразий в точечном исчислении [Текст]: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук / И. Г. Балюба. – К., 1995. – 36 с.
3. Четверухин, Н. Ф. Проективная геометрия [Текст] / Н. Ф. Четверухин. – М.: Государственное учебно-педагогическое издательство министерства просвещения РСФСР, 1961. – 360 с.
4. Ефимов, Н. В. Краткий курс аналитической геометрии [Текст] / Н. В. Ефимов. – 12-е изд., стереотип. – Ленинград: Изд-во "Наука", 1975. – 272 с.
5. Мышкис, А. Д. Математика для ВТУЗов. Специальные курсы [Текст] / А. Д. Мышкис. – М., 1971. – 632 с.
6. Гантмахер, Ф. Р. Теория матриц [Текст] / Ф. Р. Гантмахер. – 4-е изд. – М., 1988. – 560 с.
7. Адоньев, Є. О. Визначення та аналіз параболічної поверхні Балюби (БПП) [Текст] / Є. О. Адоньев, В. О. Верещага // Системні технології. – 2017. – Вип. 1 (108). – С. 3–11.
8. Адоньев, Є. О. Композиційний метод геометричного моделювання: суть, особливості та перспективи застосування [Текст] / Є. О. Адоньев // Сучасні проблеми моделювання. – 2017. – Вип. 8. – С. 3–14.
9. Адоньев, Є. О. Алгоритм формування моделей багатотакторних процесів композиційного методу [Текст]: VI-ї Всеукр. наук.-практ. конф. / Є. О. Адоньев, В. М. Верещага, А. В. Найдиш // Прикладна геометрія, дизайн, об'єкти інтелектуальної власності та інноваційна діяльність студентів та молодих вчених. – 2017. – Вип. 6. – С. 12–18.
10. Давиденко, І. П. Конструювання поверхонь просторових форм методом рухомого симплексу [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / І. П. Давиденко; Таврійський державний агротехнологічний університет. – Мелітополь, 2012. – 23 с.
11. Ленг, С. Алгебра [Текст] / С. Ленг. – Москва: Мир, 1968. – 654 с.

Bibliography (transliterated):

1. Balyuba, I. G., Naydysh, V. M.; Vereshchaga, V. M. (Ed.) (2015). Tochechnoe ischislenie. Melitopol': MGPU im. B. Hmel'nitskogo, 236.
2. Balyuba, I. G. (1995). Konstruktyvnaya geometriya mnogoobraziy v tochechnom ischislenii. Kyiv, 36.
3. Chetveruhin, N. F. (1961). Proektivnaya geometriya. Moscow: Gosudarstvennoe uchebno-pedagogicheskoe izdatel'stvo ministerstva prosveshcheniya RSFSR, 360.
4. Efimov, N. V. (1975). Kratkiy kurs analiticheskoy geometrii. Leningrad: Izd-vo "Nauka", 272 s.
5. Myshkis, A. D. (1971). Matematika dlya VTUZov. Spetsial'nye kursy. Moscow, 632.
6. Gantmaher, F. R. (1988). Teoriya matrits. Moscow, 560.
7. Adoniev, Ye. O., Vereshchaga, V. O. (2017). Vyznachennia ta analiz parabolichnoi poverkhni Baliuby (BPP). Systemni tekhnolohiy, 1 (108), 3–11.
8. Adoniev, Ye. O. (2017). Kompozitsiynyi metod heometrychnoho modeliuвання: sut, osoblyvosti ta perspektyvy zastosuvannya. Suchasni problemy modeliuвання, 8, 3–14.
9. Adoniev, Ye. O., Vereshchaga, V. M., Naidysh, A. V. (2017). Alhorytm formuvannya modelei bahatofaktornykh protsesiv kompozitsiynoho metodu. Prykladna geometriya, dyzain, obiekty intelektualnoi vlasnosti ta innovatsiyna diyalnist studentiv ta molodykh vchenykh, 6, 12–18.
10. Davydenko, I. P. (2012). Konstruiuvannya poverkhon prostorovykh form metodom rukhomoho sympleksu. Melitopol, 23.
11. Leng, S. (1968). Algebra. Moscow: Mir, 654.

Надійшла (received) 24.05.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Розробка та дослідження властивостей геометричних матриць/ Адоньев Є. О., Верещага В. М. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 33(1255). – С. 13–17. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.

Разработка и исследование свойств геометрических матриц/ Адоньев Е. А., Верещага В. М. // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – № 33 (1255). – P.13–17. – Bibliogr.:11. – ISSN 2079-5459

Development and study of properties of geometric matrices/ Adoniev Y., Vereshchaga V. // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – № 33 (1255). – P. 13–17. – Bibliogr.:11. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Верещага Віктор Михайлович – доктор технічних наук, професор кафедри прикладної математики та інформаційних технологій Мелітопольського державного педагогічного університету ім. Богдана Хмельницького; вул. Гетьманська, 20, м. Мелітополь, Україна, 72300; e-mail: vervik49@gmail.com.

Адоньев Евгений Александрович – кандидат технічних наук, доцент, декан Економіко-гуманітарного факультета Запорізького національного університету в г. Мелітополе; ул. Героев України, 160А, г. Мелітополь, Україна, 72316, e-mail: evgen.adoniev@gmail.com.

Верещага Виктор Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики и информационных технологий Мелитопольского государственного педагогического университета им. Богдана Хмельницкого; ул. Гетьманская, 20, г. Мелітополь, Україна, 72300; e-mail: vervik49@gmail.com.

Adoniev Yevhen – PhD, associate professor, dean of the Economics and Humanities Faculty of the Zaporizhzhya National University in Melitopol. Heroiv Ukrainy str., 160A, Melitopol, Ukraine, 72316; e-mail: evgen.adoniev@gmail.com.

Vereshchaga Viktor – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Applied Mathematics and Information Technologies of the Melitopol State Pedagogical University named after Bohdan Khmelnytsky; Getmansky str., 20, Melitopol, Ukraine, 72300; e-mail: vervik49@gmail.com.

*Н. С. АЩЕПКОВА, А. Д. КУЛАГІН***ВИЯВЛЕННЯ ЦІЛЮВИХ ГРУП ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ КОНВЕРСІЇ ІНТЕРНЕТ-МАГАЗИНУ**

Представлено результати експериментального дослідження системи керування конверсією інтернет-магазину. Проаналізовано ефективність системи керування попитом для виділених цільових груп: родини з дітьми, молодь, жінки, чоловіки. При розробці системи керування конверсією інтернет-магазину варто враховувати, що приріст конверсії може істотно відрізнятися залежно від ознак цільових груп споживачів (соціальний статус, професія, рід занять, регіон й т. ін.), категорії товарів і добробуту суспільства.

Ключові слова: інтернет-магазин, попит, загальна частота, словоформи, точне входження, таргетування, сезонність, конверсія, цільова група споживачів, система керування

Представлены результаты экспериментального исследования системы управления конверсией интернет-магазина. Проанализирована эффективность системы управления спросом для выделенных целевых групп: семьи с детьми, молодежь, женщины, мужчины. При разработке системы управления конверсией интернет-магазина следует учитывать, что прирост конверсии может существенным образом отличаться в зависимости от признаков целевых групп потребителей (социальный статус, профессия, род занятий, регион и т.д.), категории товаров и благосостояния общества.

Ключевые слова: интернет-магазин, спрос, общая частота, словоформы, точное вхождение, таргетирование, сезонность, конверсия, целевая группа потребителей, система управления

Distribution of the Internet technologies increases quantity of the Internet - shop visitors, but not each "visitor" becomes "buyer". Desire to raise(increase) the income of sales in the Internet shop it is possible to present as a task of optimization of two factors: a maximum of quantity of the visitors and increase of efficiency, i.e. increase of a break-even sales level (conversion).

The results of an experimental research of a control system of conversion of Internet - shop are submitted. The system effectiveness of demand management for the selected target groups is analysed: families with children, youth, woman, man. At system engineering of management of conversion of the Internet-shop should be taken into account, that the gain of conversion can significantly differ depending on attributes of target groups of the consumers (social status, trade, occupation, region etc.), category of the goods and well-being of a society.

Urgency of the given job in necessity of the scientifically proved techniques for reception of leading positions in the market of the Internet-trade at constant increase of a competition.

Keywords: Internet-shop, demand, general (common) frequency, словоформы, exact entry, таргетирование, seasonal prevalence, conversion, target group of the consumers, control system.

Вступ. Інтернет-торгівля це галузь яка динамічно розвивається, без якої важко уявити собі сучасний ринок. Показники обсягу покупок, кількості операцій та товарообігу у інтернет-магазинах зростають неймовірно швидко, і інтернет-торгівля здійснює все більший і більший вплив на світову економіку. У 2016 році український ринок електронної комерції становив 39 млрд.грн., за даними групи компаній EVO Business [1] середній чек у інтернет-магазинах збільшився на 7 % – до 885 грн. Розробка програмно-технічних засобів для впровадження системи керування попитом дозволяє досягти ще більших прибутків.

Постановка проблеми. Розповсюдження інтернет технологій збільшує кількість відвідувачів інтернет-магазинів, але не кожен «відвідувач» є «покупцем». Бажання підвищити дохід від продажів у інтернет-магазині можна представити як задачу оптимізації двох факторів: максимізацію кількості відвідувачів і підвищення ефективності, тобто збільшення рівня продажів (конверсії).

Актуальність даної роботи в затребуваності науково обґрунтованих методик для одержання лідируючих позицій на ринку інтернет-торгівлі при постійно збільшенні конкуренції.

Аналіз літературних даних. Попит – платоспроможна потреба покупців у даному товарі при визначеній ціні, величина попиту – кількість товарів, що покупці готові придбати за даною ціною. Під словом «готові» потрібно розуміти те, що у них є бажання (потреба) і можливість (наявність необхідних грошових коштів) для купівлі означеного товару в даній кількості [2 – 4]. Необхідно зауважити, що попит – це потенційна платоспроможна потреба. Наявність попиту характеризує готовність покупців придбати деяку

кількість товарів, але це не означає, що угоди в таких обсягах дійсно відбудуться. Фактична кількість покупок залежить від ряду економічних чинників. Наприклад, виробники можуть виявитися не в змозі випустити таку кількість товару [2–5].

Можна аналізувати як індивідуальний попит (попит конкретного покупця), так і загальну величину попиту (попит всіх покупців, присутніх на ринку). В економіці вивчається, в основному, загальна величина попиту, оскільки індивідуальний попит істотно залежить від особистих переваг покупця і, як правило, не відображає реальної картини, що склалася на ринку. Так, конкретний покупець може взагалі не відчувати потреби в якому-небудь товарі (наприклад, велосипеді), тим не менш, на ринку в цілому попит на цей товар існує.

Застосовувані в системах інтернет-статистики інструменти аналізу дозволяють виділити декілька основних характеристик попиту [6, 7]:

Загальна частота – це частота запитуваної фрази, враховуючи всі словоформи даної фрази та всі вхідні і уточнюючі запити до даній фразі. Дуже часто це частота сильно завищена в порівнянні з іншими видами частот.

Словоформи – слова, синоніми, мовні звороти, які вводяться як пошукові запити. Дана частотність показує скільки разів в мережі запитують фразу, яка аналізується з урахуванням усіх її словоформ.

Точне входження – це найточніший параметр. Він показує скільки разів запитують слово або словосполучення саме в такому вигляді, як ми його аналізуємо.

Таргетування, або регіональна приналежність – визначення попиту на товар або послугу в конкретному регіоні.

Сезонність – вказує на зміни попиту та активності користувачів в залежності від пори року.

Конверсія – це відношення кількості відвідувачів сайту, що виконали на ньому будь які цільові дії (приховані або прямі вказівки рекламодавців, продавців, творців контенту – покупку, реєстрацію, підписку, відвідування певної сторінки сайту, перехід по рекламному посиланню); до загальної кількості відвідувачів сайту, виражене у відсотках [8, 9]. Наприклад: у вас є інтернет-магазин з продажу будь-якої продукції. Припустимо, що за добу на нього заходить 500 унікальних відвідувачів. Протягом цієї доби у вашому магазині відбувається 7 різних покупок, тоді

$$7 \text{ покупок} / 500 \text{ відвідувачів} * 100 \% = 1,4 \%$$

У даному випадку відсоток конверсії відвідувачів і покупців дорівнює 1,4.

Метою дослідження є розробка методу модернізації системи керування конверсією для впливу на цільові споживчі групи та аналіз збільшення продажів.

Для досягнення мети у ході дослідження вирішуються наступні завдання:

Розробити метод модернізації системи керування конверсією інтернет магазину.

Виділити основні цільові споживчі групи для впливів системи керування конверсією інтернет магазину:

Дослідити взаємозв'язок впливу на цільові споживчі групи та збільшення конверсії.

Оцінити отримані результати, виходячи з відношення отриманого додаткового прибутку до витрат на створення системи керування конверсією.

Метод дослідження. Успішна конверсія по-різному трактується продавцями, рекламодавцями або постачальниками контенту. Приміром, для продавця успішна конверсія означатиме операцію покупки споживачем, який зацікавився в продукті, натиснувши на відповідний рекламний банер. Для постачальника контенту успішна конверсія може бути реєстрацією відвідувачів на сайті, підпискою на поштову розсилку, скачуванням програмного забезпечення або які-небудь інші дії, очікувані від відвідувачів. Для сайтів, метою яких є спонукання до дій на форумі (наприклад, відвідування магазину або телефонна розмова), підрахунок конверсії стає скрутним заходом – походи в магазин не відслідковуються на сайті.

У цьому випадку рішенням може стати [6, 7]:

- використання Call tracking'a (відстеження дзвінків);
- опитування кожного відвідувача магазину або зворотній телефонний дзвінок покупцеві, з метою з'ясування як він дізнався про діяльність фірми;
- маркування номера телефону певної групи товарів за допомогою імені контактної особи (розміщується поруч з номером телефону). За кількістю звернень на обране ім'я підраховується попит даної групи товарів;
- розміщення на сайті промо-коду, пов'язаного з сесією відвідувача. Під час телефонної розмови

менеджер просить клієнта продиктувати обраний промо-код.

Експериментальні дослідження керування конверсією у інтернет-магазині. За даними EVO Business [1] у 2016 році порівняно з 2015 роком зросли усі показники економічної діяльності Prom.UA: товарообіг збільшився на 68% і досяг 8,23 млрд.грн.; середній чек зріс на 14% і дорівнює 924 грн.; кількість он-лайн замовлень збільшилась на 51% і становить 9 млн. Можна зробити висновок, що інтернет-торгівля – динамічно зростаюча галузь і продавці зацікавлені у перетворенні «відвідувачів» у «покупців».

Надаючи рекомендації про супутні та комплектуючі товари на картці замовленого товару інтернет-магазин підвищує зручність користування сайтом, допомагає користувачеві зробити наступну покупку, пропонує альтернативу, спрощує вибір [2, 3]. Майже всі товари мають супутні та комплектуючі, або альтернативні і новинки. Про це можна інформувати користувача за допомогою рекомендаційних блоків [5].

Статистика доводить, що керування конверсією залежить від споживачів. Цільова група споживачів – спільність людей, якій притаманні певні ознаки [4].

Поділ споживачів на цільові групи здійснюється по деяких ознаках [4, 10]:

- соціальний статус;
- професія, рід занять;
- стать, вік;
- соціально-демографічні ознаки;
- територіальні ознаки.

Найбільш активними користувачами інтернету є представники наступних споживчих груп [4, 10]:

- родини з дітьми різних вікових груп: немовлята, дошкільний вік, молодші школярі, середній шкільний вік, старшокласники;
- молодь (18–25 років);
- жінки;
- чоловіки.

Аналітики Bigl.ua підрахували, що в середньому кількість товарів у «відібраному» у чоловіків на 30% більша ніж у жінок. Керівник он-лайн маркету перевірених продавців Bigl.ua Віктор Кириченко вважає, що чоловіки здійснюють покупку зважено, а жінки – емоційно. Крім того перелік популярних товарів відрізняється. У табл. 1 за даними EVO Business [1] наведено перелік популярних товарів чоловіків та жінок по зниженню пріоритету.

Таблиця 1 – Перелік популярних товарів

Чоловіки	Жінки
Техніка і електроніка	Одяг, взуття, аксесуари
Одяг, взуття, аксесуари	Техніка і електроніка
Авто– та мото– товари	Товари для дітей
Дім та сад	Красота та здоров'я
Спорт відпочинок	Дім та сад

Таким чином варто враховувати, що для деяких категорій товарів явно виражені цільові споживчі групи. Так наприклад, основними споживачами товарів з категорії рибальського спорядження є чоловіки, а для категорії дитячих товарів у більшості

покупцями є жінки з дітьми. У зв'язку із цим існує статистичне відхилення керування конверсією для подібних категорій товарів.

У табл. 2 наведено результати досліджень зростання продажів для споживачів окремих цільових груп.

Таблиця 2 – Зростання продажів для споживачів окремих цільових груп

Цільові споживчі групи	Товар без явно виражених цільових споживчих груп	Товар з явно вираженими цільовими споживчими групами
родини з дітьми	3 %	1 %
молодь	3 %	6 %
жінки	6 %	7 %
чоловіки	4 %	5 %

Під час дослідження виявлено, що приріст кількості продаж при додаванні рекомендаційного блоку для товарів без явно виражених цільових споживчих груп, становить:

- родини з дітьми: 3 %;
- молодь: 3 %;
- жінки: 6 %;
- чоловіки: 4 %.

Приріст кількості продаж при додаванні рекомендаційного блоку для товарів з явно вираженими цільовими споживчими групами, становить:

- родини з дітьми : 1 %;
- молодь : 6 %;
- жінки: 7 %;
- чоловіки: 5 %.

Експериментальні дослідження довели, що найменший приріст конверсій становить споживча група «родини з дітьми». При замовленні товару для дітей, батьки підходять більш усвідомлено до вибору якості, бренду, ціни й не готові відмовлятися від обраних позицій на користь альтернативних або рекомендованих товарів. Найбільший відсоток приросту споживчого попиту властивий споживчій групі «жінки».

Висновки. При розробці системи керування конверсією інтернет-магазину варто враховувати, що приріст конверсії може істотно відрізнятися залежно від ознак цільових груп споживачів (соціальний статус, професія, рід занять, регіон й т. ін.), категорії товарів і добробуту суспільства.

Список літератури:

1. 5 фактов о поведении онлайн-покупателей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://evo.business/5-faktov-o-povedenii-onlajn-pokupatelej/>
2. Скотт, Б. Проектирование веб-интерфейсов [Текст] / Б. Скотт, Т. Нейл. – СПб.: Символ-Плюс, 2010. – 352 с.
3. Колисниченко, Д. Н. PHP и MySQL. Разработка Web-приложений [Текст] / Д. Н. Колисниченко. – СПб.: БХВ-Петербург, 2013. – 543 с.
4. Хант, Б. Конверсия сайта. Превращаем посетителей в покупателей [Текст] / Б. Хант. – СПб.: Питер, 2012. – 543 с.
5. Никсон, Р. Создаем динамические веб-сайты с помощью PHP, MySQL и JavaScript [Текст] / Р. Никсон. – СПб.: Питер, 2011. – 497 с.
6. Токарчук, А. М. Повышение эффективности методов и алгоритмов разработки, взаимодействия и хранения веб-приложений [Текст]: автореферат / А. М. Токарчук. – Москва, 2012. – 163 с. – Режим доступа: <http://www.dissercat.com/content/povyshenie-effektivnosti-metodov-i-algoritmov-razrabotki-vzaimodeystviya-i-khraneniya-veb-prilozheniy>
7. Мещеряков, С. В. Методы эффективной организации баз данных и их приложений в промышленных системах [Текст]: автореферат / С. В. Мещеряков. – Санкт-Петербург, 2012. – 294 с. – Режим доступа: <http://www.dissercat.com/content/metody-effektivnoi-organizatsii-baz-dannykh-i-ikh-prilozhenii-v-promyshlennykh-sistemakh>
8. Сырых, Ю. А. Современный веб-дизайн. Рисуем сайт, который продает [Текст] / Ю. А. Сырых. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2008. – 304 с.
9. Русаков, М. Создание сайта от начала и до конца [Текст] / М. Русаков. – Интернет-Издание, 2014. – 172 с.
10. Борисенко, А. А. Web-дизайн. Просто как дважды два [Текст] / А. А. Борисенко. – М.: Эксмо, 2008. – 320 с.

Bibliography (transliterated):

1. 5 faktov o povedenii onlayn-pokupateley. Available at: <https://evo.business/5-faktov-o-povedenii-onlajn-pokupatelej/>
2. Skott, B., Neyl, T. (2010). Proektirovaniye veb-interfeysov. Sankt-Peterburg: Simvol-Plyus, 352.
3. Kolisnichenko, D. N. (2013). PHP i MySQL. Razrabotka Web-prilozheniy. Sankt-Peterburg: BHV-Peterburg, 543.
4. Hant, B. (2012). Konversiya sayta. Prevrashchaem posetiteley v pokupateley. Sankt-Peterburg: Piter, 543.
5. Nikson, R. (2011). Sozdaem dinamicheskie veb-sayty s pomoshch'yu PHP, MySQL i JavaScript. Sankt-Peterburg: Piter, 497.
6. Tokarchuk, A. M. (2012). Povyshenie effektivnosti metodov i algoritmov razrabotki, vzaimodeystviya i hraneniya veb-prilozheniy. Moscow, 163. Available at: <http://www.dissercat.com/content/povyshenie-effektivnosti-metodov-i-algoritmov-razrabotki-vzaimodeystviya-i-khraneniya-veb-prilozheniy>
7. Meshcheryakov, S. V. (2012). Metody effektivnoy organizatsii baz dannyh i ih prilozheniy v promyshlennykh sistemakh. Sankt-Peterburg, 294. Available at: <http://www.dissercat.com/content/metody-effektivnoi-organizatsii-baz-dannykh-i-ikh-prilozhenii-v-promyshlennykh-sistemakh>
8. Syryh, Yu. A. (2008). Sovremennyy veb-dizayn. Risuem sayt, kotoryy prodает. Moscow: OOO «I.D. Vil'yams», 304.
9. Rusakov, M. (2014). Sozдание sayta ot nachala i do kontsa. Internet-Izdanie, 172.
10. Borisenko, A. A. (2008). Web-dizayn. Prosto kak dvazhdy dva. Moscow: Eksmo, 320.

Надійшла (received) 07.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Виявлення цільових груп для підвищення конверсії інтернет-магазину/ Ащепкова Н. С., Кулагін А. Д. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 33(1255). – С.18–21. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Выявление целевых групп для увеличения конверсии интернет-магазина/ Ащепкова Н. С., Кулагин А. Д. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 33(1255). – С. 18–21. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Revealing of target groups for increase conversion of the internet- shop/ Ashhepkova N., Kulagin A. // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 33 (1255). – P. 18–21. – Bibliogr.:10. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ащепкова Наталія Сергіївна – кандидат технічних наук, доцент, кафедра механотроніки, Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара, пр. Гагаріна, 72, Дніпропетровськ, Україна, 49010, e-mail: ashhepkova_natalja@rambler.ru.

Ащепкова Наталья Сергеевна – кандидат технических наук, доцент, кафедра механотроники, Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, пр. Гагарина, 72, Днепропетровск, Украина, 49010, e-mail: ashhepkova_natalja@rambler.ru.

Ashhepkova Natalja – PhD, Associate Professor, Department of mechatronics, Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, Gagarin ave., 72, Dnipro, Ukraine, 49010, e-mail: ashhepkova_natalja@rambler.ru.

Кулагин Антон Дмитриевич – аспирант, кафедра механотроніки, Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара, пр. Гагаріна, 72, Дніпро, Україна, 49010.

Кулагин Антон Дмитриевич – аспирант, Кафедра механотроники, Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, пр. Гагарина, 72, Днепр, Украина, 49010.

Kulagin Anton – Graduate, Department of mechatronics, Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, Gagarin ave., 72, Dnipro, Ukraine, 49010.

УДК 66.52

Г. Г. ГАСЫМОВ, С. Ю. ГАСЫМОВ

ПОДХОД К АВТОМАТИЗАЦИИ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА СОСТОЯНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В ЗАМКНУТЫХ АППАРАТАХ

В работе исследуются процессы теплообмена, происходящие в системах замкнутых аппаратов. Предполагается, что рассматриваемая сеть заполнена теплоносителем (жидкостью, газом, воздухом и т. д.) и состоит из линии тока, элементов конструкций и объемов. Разработан алгоритм автоматического построения математических моделей теплообмена в подобных сетях, описываемых системами дифференциальных уравнений (обыкновенных и в частных производных), а также численные схемы. Разработаны методика и алгоритм для решения задачи.

Ключевые слова: граничные условия, гиперболическое уравнение, метод сеток, разностные схемы, метод прямых, линии тока, элемент конструкций.

В роботі досліджуються процеси теплообміну, що відбуваються в системах замкнутих апаратів. Передбачається, що розглянута мережа заповнена теплоносієм (рідиною, газом, повітрям і т. д.) і складається з лінії струму, елементів конструкцій і обсягів. Розроблено алгоритм автоматичного побудови математичних моделей теплообміну в подібних мережах, що описуються системами диференціальних рівнянь (звичайних і в частинних похідних), а також чисельні схеми. Розроблено методику і алгоритм для вирішення завдання.

Ключові слова: граничні умови, гіперболічне рівняння, метод сіток, різницеві схеми, метод прямих, лінії струму, елемент конструкцій.

Heat exchange processes occurring in systems of closed devices are studied in the work. It is assumed, that considered network is filled with a coolant (liquid, gas, air etc.) and consists of current line of structural elements, elements of structures and volumes. An algorithm for the automatic construction of mathematical models of heat transfer in such networks has been developed. These models are described by systems of ordinary differential equations and partial differential equations. A methodology and algorithm for solving the problem is developed. This technique is used for those networks that are closed, but they do not have branching in each contour.

Keywords: boundary conditions, hyperbolic equation, grid method, difference schemes, direct method, line, volume, structural element.

Введение. В работе исследуются процессы теплообмена, происходящие в системах замкнутых аппаратов (ЗА). Предполагается, что рассматриваемая сеть заполнена теплоносителем (жидкостью, газом, воздухом и т. д.) и состоит из линии тока, элементов конструкций и объемов. В набор элементов сети могут войти также элементы автоматики: клапаны, регуляторы, смесители–разделители, датчики и др.

Основными элементами тепловой схемы являются: –теплообменные агрегаты (жидкостно–жидкостные и газо–жидкостные теплообменники, холодильно–сушильные агрегаты, змеевики термостатирова-

ния, радиационные теплообменники, змеевики непосредственного охлаждения или подогрева агрегата);

- соединительные трубопроводы и воздухопроводы;
- элементы конструкции;
- регуляторы расхода теплоносителя;
- арматура (клапаны) и люки;
- жидкостные и воздушные нагреватели, электронагреватели;
- элементы приборно–агрегатного оборудования (датчики и элементы автоматики)
- смесители–разделители.

Рассматриваемый аппарат, в котором происходит процесс теплообмена, задается в виде сети, приведенной на рис. 1

Для описания процессов, происходящих в таких сетях, вводим следующие понятия:

1. Линия тока – это теплопроводы определенной длины, в которых происходит направленное движение жидкости, газа или другого теплоносителя (жидкостно-жидкостные и радиационные теплообменники, змеевики термостатирования или непосредственного охлаждения или подогрева, соединительные трубопроводы, холодильно-сушильные агрегаты).

2. Объем – это замкнутое помещение определенного размера, в котором происходит перемещение теплоносителей, либо направлено по линии тока, либо хаотически. В объемах могут находиться источники тепла.

3. Элементы конструкции – это совокупность элементов аппарата, с которыми имеется тепловое взаимодействие теплоносителя в данном объеме.

4. Регулятор – это клапан с приводом, который имеет непосредственный контакт с линией тока и служит для регулирования потока теплоносителя в линии тока.

5. Датчик – предназначен для измерения температуры в определенных точках контура.

6. Смеситель-разделитель, который может работать в режиме смесителя или разделителя.

Процесс теплообмена в данной сети происходит путем подачи тепловых возмущений извне на отдельные элементы. Температура объектов терморегулирования определяется, либо исходя из их непосредственного теплового контакта, либо исходя из того, что этот контакт обеспечивается через определенную промежуточную тепловую связь. Тепловые нагрузки от элементов, находящихся в тепловом контакте с теплоносителями зависят от температуры теплоносителя в объеме.

Сеть состоит из совокупности контуров, связанных между собой. Каждый контур может содержать несколько ветвей. Под ветвью понимается последовательность объемов теплоносителя, не содержащая смесителей-разделителей. Ветвь характеризуется одинаковым расходом по всей длине.

Комплексную математическую модель процессов теплообмена в подобных сетях рассмотрены в работе [2-4] и представляет собой обобщенные уравнения теплообмена системы обыкновенных дифференциальных уравнений, уравнений в частных производных и алгебраических уравнений (если в сети задействованы элементы автоматики), решения которых связаны с определенными трудностями.

Задача заключается в следующем. Пусть в начальный момент времени все элементы сети имеют определенное поле температур. Требуется разработать алгоритм автоматического построения математических моделей теплообмена в подобных сетях, описываемых системами дифференциальных уравнений (обыкновенных и в частных производных), а также численные схемы. Их решения связаны с определенными трудностями.

Анализ математического описания тепловых режимов в сложных аппаратах показывает, что этот процесс может быть описан обобщенными уравнениями теплообмена, число которых достаточно велико [1, 3]. В связи с этим требуется найти подходящую конечно-разностную аппроксимацию системы и решить полученную систему уравнений наиболее эффективными методами.

Ниже излагается один из подходов к решению поставленной задачи. Идейная сторона данного подхода системы в расчленении объекта на элементы, математические модели процессов которых относительно просты и легко формируемы на уровне входа-выхода.

Нами были рассмотрены и проанализированы ряд численных методов применительно к задаче теплообмена в замкнутом аппарате (ЗА).

Постановка задачи. Рассмотрим математические модели процесса теплообмена для отдельных элементов данной сети на рис. 1.

1. Математическая модель процесса теплообмена в k -ой линии тока имеет вид:

$$C_k \rho_k \left(\frac{\partial T_k}{\partial t} + U_k \frac{\partial T_k}{\partial V_k} \right) = q_k \quad (1)$$

при начальных и граничных условиях:

$$\begin{aligned} T_k(V_k, 0) &= C, \quad (C = \text{const}) \\ T_k(0, t) &= T_{k-1}(L_{k-1}, t) \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$q_k = \frac{Q_k}{L_k \frac{V_k}{U_k}}, \quad 0 \leq |V_k| \leq L_k \quad (3)$$

q_k – теплопровод в единицу времени на единицу объема теплоносителя; U_k – скорость потока теплоносителя; $C_k \rho_k$ – соответственно плотность и теплоемкость теплоносителя; T_k – температура k -го элемента.

2. Математическая модель процессов теплообмена в объемах описывается в следующем виде:

$$C_k \rho_k V_k \frac{dT_k}{dt} = C_k \rho_k \left[\sum_{j \in \text{вх}} U_{j \rightarrow k} T_k - T_k \sum_{j \in \text{вых}} U_{k \rightarrow j} \right] + \sum_j Q_j + \sum_k Q_k \quad (4)$$

с начальным условием:

$$T_k(t)|_{t=0} = C, \quad (C = \text{const}) \quad (5)$$

где

$$Q_k = \sum_{l=1}^2 F_{l,k} (T_l - T_k) \quad (6)$$

3. Уравнение, описывающее изменение теплосохранения элемента конструкции или приборно-агрегатного оборудования, имеет следующий вид:

$$C_k \frac{dT_k}{dt} = F_{l,k} (T_l - T_k) + \sum_l Q_l + \sum_k Q_k \quad (7)$$

с начальным условием:

$$T_k(t)|_{t=0} = C, \quad (C = \text{const}) \quad (8)$$

где C_k и T_k – соответственно температура и теплоемкость k – го элемента; T_l – температура l – го элемента, находящегося в тепловом контакте с k – ым элементом; $F_{l,k}$ – параметр теплопередачи от теплоносителя к элементу, находящимся в контакте с теплоносителем; Q_k – тепло, переданное элементу от смежных элементов или окружающей среды; Q_l – внутреннее тепловыделение элемента.

Требуется решить комплексную математическую задачу и определить значение температуры каждого элемента.

Численный алгоритм решения задачи. Для решения системы (1)–(8) нами использован метод прямых и метод сеток.

Метод прямых. В отличие от метода сеток в методе прямых частные производные аппроксимируют не по всем, а только по некоторым избранным переменным, тем самым дифференциальные уравнения приближенно заменяют дифференциально-разностными с меньшим числом непрерывных независимых переменных.

Данный метод имеет две схемы – поперечную и продольную. Нами рассмотрены продольные схемы метода прямых для решения задачи теплообмена ЗА.

Рассмотрим участок тепловой сети и задачу о теплообмене в k –ой линии тока. Обозначим V_k – текущая координата k –ой линии тока; $L_k = |V_k|$ – длина k –ой линии тока; c_k – теплоемкость теплоносителя; ρ_k – плотность теплоносителя; T_k – искомая температура k –ой линии тока ($T_k = T_k(V_k, t)$), причем $0 \leq |V_k| \leq L_k$ – задано.

Пусть $T_{k-1}(L_{k-1}, t)$ – температура выхода $(k-1)$ –ой линии тока в любой момент времени, т.е. $T_{k-1} = T_{k-1}(L_{k-1}, t)$, которая подается на вход k –ой линии тока. Пусть V_f и T_f соответственно длина и температура (в данный момент) в f –ой линии тока, через которую осуществляется внешнее тепловое воздействие на k –ю линию тока с коэффициентом теплопередачи $F_{(f,k)}$, U_k – скорость потока теплоносителя, Ω – множество линий тока, q_k – теплоподвод в единицу времени на единицу объема теплоносителя. Тогда математическая модель процесса теплообмена в k –ой линии тока будет иметь вид:

$$\frac{\partial T_k}{\partial t} = -U_k \frac{\partial T_k}{\partial V_k} + \frac{1}{\rho_k c_k} q_k, \quad (9)$$

где

$$k \in \Omega, \quad q_k = F_{(f,k)} (T_f - T_{k,ex}) V_k^{-1}, 0 \leq V_k \leq L_k, \quad (10)$$

начальные условия:

$$T_k(V_k, 0) = C \quad (C = const), \quad (11),$$

краевые условия:

$$T_k(0, t) = T_{k-1}(L_{k-1}, t), \text{ т. е. при } V_k = 0, \quad T_{k,ex} = T_{(k-1)вых}.$$

При построении вычислительных схем методом прямых операция дифференцирования аппроксимируется по прямой V_k . Для этого предварительно в исходной области (V_k, t) проводятся прямые

$$V_k^j = jh, \quad j = \overline{0, N_k}, \quad N_k h = L_k,$$

и на каждой из внутренних прямых $V_k = V_k^j$, ($j = \overline{1, N_{k-1}}$), производные $\frac{\partial T_k}{\partial V_k}$ аппроксимируем через значения T_k на соседние прямые:

$$\frac{\partial T_k^j(t)}{\partial V_k} = \frac{T_k^{j+1}(t) - T_k^{j-1}(t)}{2h}, \quad j = \overline{1, N_{k-1}}, \quad (12)$$

Тогда уравнение (1) примет вид:

$$\frac{dT_k^j(t)}{dt} = -U_k \frac{T_k^{j+1}(t) - T_k^{j-1}(t)}{2h} + \frac{1}{c_k \rho_k} q_k, \quad (13)$$

$$q_k = F_{(f,k)} (T_f - T_{k,ex}) V_k^{-1}, 0 \leq V_k \leq L_k, \quad (14)$$

Начальные условия:

$$T_k(V_k^j, 0) = C, \quad j = \overline{1, N_k}, \quad (15)$$

Причем

$$T_k(0, t) = T_{k-1}(0, t) = C, \text{ т.е. при } V_k = 0, \quad (16)$$

где $T_k(0, t) = T_{k-1}(L_{k-1}, t)$ – конечная точка предыдущего элемента.

Таким образом, система дифференциальных уравнений в частных производных окажется сведенной к системе обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка с начальными условиями, т.е. к задаче Коши [3].

Уравнение теплообмена для элементов конструкции и объемов в тепловой сети сами по себе являются обыкновенными дифференциальными уравнениями.

Таким образом, комплексная математическая модель теплообмена при применении метода прямых, сводится к решению систем обыкновенных дифференциальных уравнений.

1) для линии тока:

$$\frac{dT_k^j(t)}{dt} = -U_k \frac{T_k^{j+1}(t) - T_k^{j-1}(t)}{2h} + \frac{1}{c_k \rho_k} q_k, (j = \overline{1, N_k}), \quad (17)$$

где

$$q_k = F_{(f,k)} (T_f - T_{k,ex}) V_k^{-1}, 0 \leq V_k \leq L_k.$$

Начальные условия имеют вид:

$$T_k^j(V_k, 0) = C, \quad j = \overline{1, N_k}, \quad (18)$$

2) для объемов:

$$\frac{dT_k}{dt} = \frac{1}{c_k \rho_k V_k} q_k, \quad (19)$$

где

$$q_k'' = \sum_{k_{ex}} (U_k T_k)_{ex} - T_k \left(\sum_{k_{ex}} U_k \right)_{ex} + q_k' c_k \rho_k V_k, \quad (20)$$

$$q_k' = \sum_i Q_i + \sum_m Q_m,$$

здесь $\sum_i Q_i$ – тепло, выделяемое в теплоноситель по

программе, независимо от его температуры в объеме;

$\sum_m Q_m$ – тепловая связь между k – ым элементом

конструкции и m – ым элементом сети.

Начальные условия

$$T_k(t)|_{t=0} = C \quad (C = const),$$

3) для элементов конструкции:

$$c_k \frac{dT_k}{dt} = F_{(l,k)} (T_k - T_l) + \sum_l Q_l + \sum_k Q_k, \quad (21)$$

где Q_l – внутреннее тепловыделение элемента, Q_k – тепло, переданное элементу от смежных элементов.

Начальные условия:

$$T_k(t)|_{t=0} = C \quad (C = const), \quad (22)$$

Применим к системе дифференциальных уравнений (17) – (22) метод Эйлера. При этом уравнения линии тока (17) примут вид:

$$T_k^j(t+l) = T_k^j(t) + l \left[\frac{1}{c_k \rho_k} - U_k \frac{T_k^{j+1}(t) - T_k^j(t)}{h} \right], \quad (23)$$

с начальными условиями

$$T_k^j(t)|_{t=0} = C, \quad (C = const), \quad (24)$$

для объемов

$$T_k^j(t+l) = T_k^j(t) + l F(t, c_k, \rho_k, V_k, T_k, T_{k-1}, Q_k), \quad (25)$$

с начальными условиями (21), для элементов конструкции

$$T_k^j(t+l) = T_k^j(t) + l F_1(t, c_k, V_k, T_k^{j+1}, T_k^j, F_k, Q_k), \quad (26)$$

с начальными условиями (22).

В качестве примера решим задачу, реализующую тепловую сеть, состоящую из линии тока, объема, элемента конструкции, а также из элементов автоматики (клапаны, датчики, регуляторы и смесители разделители). Сеть состоит из трех контуров, 17-ти линий тока, 3-х смесителей, 1-го клапана, разделителя, объема, элемента конструкции, регулятора (РРЖ) и датчика.

В правые части уравнения линии тока

$$c_i \rho_i V_i \left(\frac{\partial T_i(V_i, t)}{\partial t} + U_k \frac{\partial T_i(V_i, t)}{\partial V_i} \right) = \sum_i Q_i^{ex} + \sum_k Q_k^{in}, \quad (27)$$

входит слагаемое $Q(t)$, которое может быть задано в виде циклограммы (таблично заданная функция с неравномерным шагом по времени), функции или как постоянное.

Используя циклограмму, приведенную в таблице, аппроксимируем $Q = Q(t)$ по формуле:

$$Q(t) = \frac{(t - t_i) Q_i(t) - (t_{i+1} - t_i) Q_{i+1}(t)}{(t_i - t_{i-1})}, \quad (28)$$

в любой момент времени. Определение температуры смесителей–разделителей осуществляется в зависимости от их режимов работы (режим смесителя или разделителя).

Анализируя расходы, поступающие в разделитель–смеситель, согласно формуле (28) определяется его режим, далее, выбирая формулы из (28), соответствующие этому режиму работы, определяем его температуру.

Для данной задачи был реализован метод прямых, решалась система обыкновенных дифференциальных уравнений линии тока, объема и элемента конструкции, модифицированным методом Эйлера.

Метод сеток. Для этого введем равномерную сетку по V и t :

$$\omega_h = \{V_k^j = jh, \quad j = \overline{0, N_k}; \quad h = L_k / N_k\},$$

$$\omega_l = \{t_j = il, \quad i = \overline{0, 1, 2, \dots}\},$$

где N_k – количество узловых точек по V_k .

На сетке $\Omega_{hl} = \omega_h \times \omega_l$ к уравнениям (18) линии тока, объема и элемента конструкции применим явные схемы: левый уголок, четырехточечную аппроксимацию и схему Лакса [3, 7]. Результаты решения примера по вышеназванным схемам приведены соответственно в табл. 1.

Чтобы можно было выбирать шаг по времени независимо от шага по объему, нами была рассмотрена и неявная схема аппроксимации $(**)$, (левый уголок), которая абсолютно устойчива.

А теперь для аппроксимации применим к уравнениям (1)–(7) неявную схему. В результате получена следующая система конечно-разностных уравнений:

$$\frac{T_{i+1,j}^k - T_{i,j}^k}{l} + U_k \frac{T_{i+1,j+1}^k - T_{i+1,j}^k}{h} = F(t, c_k, \rho_k, V_k, T^k, T^{k+1}, F_k, Q_k), \quad (29)$$

$$\left(\frac{1}{l} - \frac{U_k}{h} \right) T_{i+1,j}^k + \frac{U_k}{h} T_{i+1,j+1}^k = F(t, c_k, \rho_k, V_k, T^k, T^{k-1}, F_k, Q_k) + \frac{1}{8} T_{i,j}^k, \quad (i = \overline{1, 2, \dots, j = \overline{1, N}}), \quad (30)$$

где

$$F(t, c_k, \rho_k, V_k, T^k, T^{k-1}, F_k, Q_k) = \frac{\sum_{k'} Q_{k'} + \sum_l Q_l^{ex}}{c_k \rho_k V_k}, \quad k \in \Omega, \quad (31)$$

$\sum_l Q_l^{ex}$ сумма всех внутренних источников l – го

элемента.

Начальные и граничные условия таковы:

$$\begin{aligned} T_{i,0}^k &= C \quad (C = \text{const}), \quad i = \overline{0, N_k}, \\ T_{0,j}^k &= T_{N_{k-1},j}^{k-1}, \quad j = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (32)$$

где $(k-1)$ -ый элемент является предыдущим элементом для k .

Система, полученная с помощью неявной схемы аппроксимации (30)–(32), решалась методом Гаусса и модифицированным методом прогонки, разработанным для решения систем дифференциальных уравнений первого порядка. Левая часть системы (29)–(32) представляет двухдиагональную ленточную матрицу в виде:

$$G = \begin{pmatrix} \frac{1}{l} - \frac{U_k}{h} & \frac{U_k}{h} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{l} - \frac{U_k}{h} & \frac{U_k}{h} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

В последней строке матрицы записаны граничные условия. Такая структура последней строки матрицы G обусловлена тем, что рассматриваемая сеть является замкнутой. Решение системы с такой матрицей коэффициентов стандартными методами связано с большими трудностями. Действительно, матрица не полностью двухдиагональная и поэтому известный метод прогонки [1] не дает желаемых результатов. В связи с этим нами был модифицирован метод циклической прогонки [2],[3], разработанный для решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка.

Суть модификации метода прямых, заключается в отыскании коэффициентов прогонки применительно к нашей задаче.

Для этого уравнения (31)–(32) приведем к виду:

$$A_{j+1} T_{i+1,j}^k + T_{i+1,j+1}^k = B_{j+1}, \quad j = \overline{1, N}; \quad i = 1, 2, \dots, \quad (33)$$

где

$$\begin{aligned} A_{j+1} &= \left(\frac{1}{l} - \frac{U_k}{h} \right) / \left(\frac{U_k}{l} \right); \\ B_{j+1} &= \left[F(t, c_k, \rho_k, V_k, T^k, T^{k-1}, F_k, Q_k) + \frac{1}{l} T_{i,j}^k \right] / \left(\frac{U_k}{l} \right), \quad (34) \\ F(t, c_k, \rho_k, V_k, T^k, T^{k-1}, F_k, Q_k) &= \frac{\sum_k Q_k + \sum_l Q_l^{\text{вот}}}{c_k \rho_k V_k}, \end{aligned}$$

граничные и начальные условия имеют вид:

$$\begin{aligned} T_{i,0}^k &= C, \quad (C = \text{const}), \quad i = \overline{1, N}; \quad j = 1, 2, \dots, \\ T_{0,j}^k &= T_{N,j}^{k-1}, \end{aligned} \quad (35)$$

где $T_{i,j}^{k-1}$ – температура предыдущей $(k-1)$ -ой линии тока.

Решение систем линейных алгебраических уравнений будем отыскивать в следующем виде:

$$T_{i+1,j}^k = P_{j+1} T_{i+1,j+1}^k + q_{j+1}, \quad j = 1, 2, \dots, \quad i = \overline{1, N}, \quad (36)$$

где P_{j+1} и q_{j+1} являются прогоночными коэффициентами.

Теперь с учетом граничных условий определим эти коэффициенты. Подставив в (36) значение (34), получим:

$$T_{i+1,j+1}^k = A_{j+1} (P_j T_{i+1,N}^k + q_j) + B_{j+1}. \quad (37)$$

С учетом формулы (37) и граничных условий из формул (34), (35) получим формулы для подсчета коэффициентов циклической прогонки:

$$\begin{aligned} P_1 &= 1, \quad q_1 = 0, \\ P_{j+1} &= A_{j+1} P_j, \quad q_{j+1} = A_{j+1} q_j + B_{j+1}, \quad (j = 1, 2, \dots). \end{aligned} \quad (38)$$

Из формулы (38) при $j = N, N-1$ соответственно получим:

$$\begin{aligned} T_{i+1,j+1}^k &= A_{N+1} T_{i+1,N}^k + q_N, \\ T_{i+1,N}^k &= P_N T_{i+1,N+1}^k + q_N. \end{aligned} \quad (39)$$

Отсюда имеем:

$$T_{i+1,N+1}^k = (B_{N+1} + A_{N+1} q_N) / (1 - A_{N+1} P_{N-1}), \quad (i = 1, 2).$$

Значение температуры $T_{i+1,j}^k$ при $j = N, N-1, \dots, 0$ определяется аналогично по формуле (33). Несмотря на такое преимущество, неявную схему применять в данной задаче не очень выгодно. Результат приведен в табл. 2.

А теперь рассмотрим один из подходов, позволяющий выбирать наиболее оптимальные шаги Δt и ΔV . Как известно, в явной схеме шаг по времени Δt сильно связан с шагом ΔV . Попробуем увеличить шаг интегрирования при сохранении условия устойчивости по Куранту.

Пусть сеть C состоит из контуров $\{K_j\}_{j=1}^{N_1}$ и в каждом j -ом контуре имеются ветви $\{B_{ji}\}_{i=1}^{T_j}$ и каждая ветвь состоит из множества элементов $\{\Lambda_{jik}\}_{k=1}^P$ типа "линия тока" с разными длинами $\{V_{jik}\}_{k=1}^P$ и скоростями теплоносителей $\{U_{ji}\}_{i=1}^{T_j}$. Необходимо подобрать оптимальные шаги аппроксимации интегрирования $\{\Delta t_{jik}\}, \{\Delta V_{jik}\}$ для систем, являющихся теплообменной моделью данной сети.

Для такого подбора предлагается следующий алгоритм.

1. Определим те элементы сети, которые можно рассматривать как точки или вовсе не рассматривать;

2. Определим $\{\Delta t_{jik}\}$ для всех j, i, k , где

$$\Delta t_{jik} = |V_{jik}| / U_{ji};$$

3. Определим $\Delta t_c^* = \max_j \{\Delta t_{jik}\};$

4. Находим значения длины шага по объему $\Delta V_{jik}^* = U_{ji} \Delta t_{jik}$;

5. Примем в качестве шага по объему любую величину ΔV_{jik} , равную или большую, чем $\Delta V_{jik}^* \left(\Delta \tilde{V}_{jik} \geq \Delta_{jik}^* \right)$, для любого i, j, k ;

6. Конечно-разностная аппроксимация уравнений для данного элемента производится с шагом

$\Delta \tilde{V}_{jik}$ (по объему), Δt_{jik} (по времени и полученная система решается до тех пор, пока $\Delta t_{jik} \leq \Delta t_c^*$);

7. Расчет продолжается до заданного реального времени $T_{зао}$, где j – номер контура, i – номер ветви, k – номер элемента.

Таблица 1 – Явная схема "левый уголок"

№ элемента	Время счета (8 сек)	Начальное состояние элемента	Значения температуры в начале элемента	Значения температуры в середине элемента	Значения температуры в конце элемента	Положение переключки и регулятора	Температура датчика	Положение клапана
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	10800	283	297,16	297,20	297,25	1	275,5	Отк.
2.	10800	283	297,25	297,24	297,24	1	275,5	Отк.
3.	10800	283	297,24	297,24	297,24	1	275,5	Отк.
4.	10800	283	297,24	297,20	297,17	1	275,5	Отк.
5.	10800	283	297,17	297,20	297,17	1	275,5	Отк.
6.	10800	283	297,24	297,24	297,23	1	275,5	Отк.
7.	10800	283	297,17	297,24	297,16	1	275,5	Отк.
8.	10800	283	297,24	297,24	297,23	1	275,5	Отк.
9.	10800	283	297,17	297,24	297,16	1	275,5	Отк.
10.	10800	283	297,93	297,24	297,93	1	275,5	Отк.
11.	10800	283	297,93	297,86	297,79	1	275,5	Отк.
12.	10800	283	297,99	298,00	298,01	1	275,5	Отк.
13.	10800	283	298,01	298,00	298,00	1	275,5	Отк.
14.	10800	283	298,01	298,00	298,60	1	275,5	Отк.
15.	10800	283	298,01	298,005	298,00	1	275,5	Отк.
16.	10800	283	298,01	298,005	298,01	1	275,5	Отк.
17.	10800	283	298,01	298,005	298,01	1	275,5	Отк.
18.	10800	283	298,01	298,005	298,01	1	275,5	Отк.
19.	10800	283	298,01	298,005	298,01	1	275,5	Отк.

Таблица 2 – Неявная схема "левый уголок"

№ элемента	Время счета (8 сек)	Начальное состояние элемента	Значения температуры в начале элемента	Значения температуры в середине элемента	Значения температуры в конце элемента	Положение переключки и регулятора	Температура датчика	Положение клапана
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	10800	283	297,13	297,18	297,20	1	275,5	Отк.
2.	10800	283	297,20	297,22	297,21	1	275,5	Отк.
3.	10800	283	297,21	297,22	297,23	1	275,5	Отк.
4.	10800	283	297,20	297,21	297,16	1	275,5	Отк.
5.	10800	283	297,16	297,20	297,16	1	275,5	Отк.
6.	10800	283	297,23	297,23	297,22	1	275,5	Отк.
7.	10800	283	297,18	297,20	297,18	1	275,5	Отк.
8.	10800	283	297,23	297,23	297,22	1	275,5	Отк.
9.	10800	283	297,17	297,18	297,16	1	275,5	Отк.
10.	10800	283	297,90	297,64	297,90	1	275,5	Отк.
11.	10800	283	297,92	297,84	297,76	1	275,5	Отк.
12.	10800	283	297,95	298,00	298,10	1	275,5	Отк.
13.	10800	283	298,01	298,00	298,00	1	275,5	Отк.
14.	10800	283	298,01	298,00	298,40	1	275,5	Отк.
15.	10800	283	298,01	298,005	298,00	1	275,5	Отк.
16.	10800	283	298,01	298,005	298,01	1	275,5	Отк.
17.	10800	283	298,01	298,005	298,01	1	275,5	Отк.
18.	10800	283	298,01	298,005	298,01	1	275,5	Отк.
19.	10800	283	298,01	298,005	298,01	1	275,5	Отк.

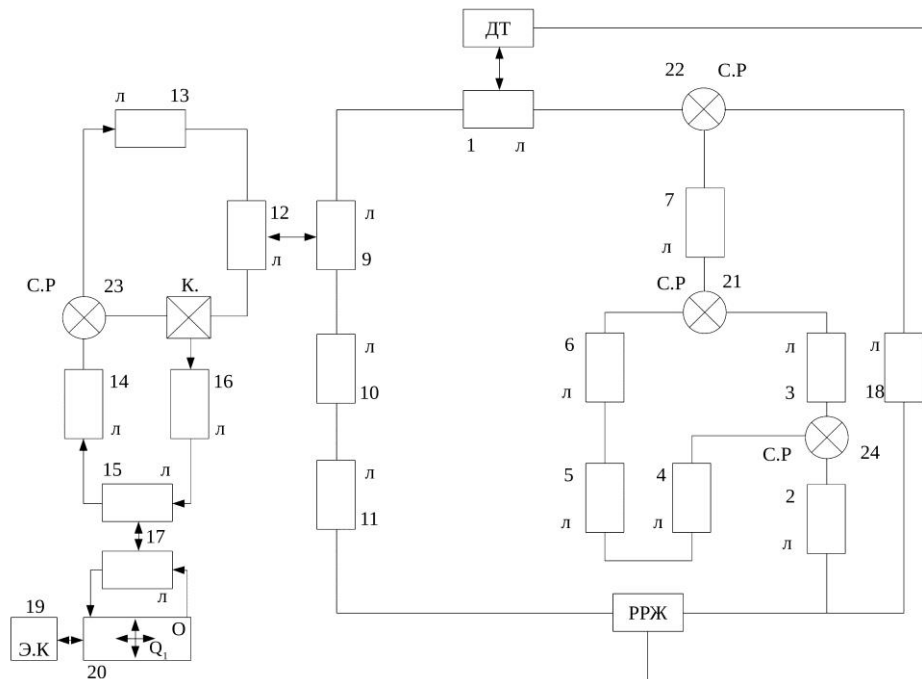


Рис. 1 – Тепловой сеть: Л – линия тока; О – объем; Э. К. – элемент конструкций; К – клапан, ДТ – датчик; С. Р. – смеситель-разделитель.

Результаты численных расчетов. Результаты задачи теплообмена для сети, указанной на рис. 1 приведены в табл. 1. Как следовало ожидать, наиболее хорошие результаты получены методом сеток с шаблоном аппроксимации «левый уголок» (явная схема). Однако для устойчивости метода требуется выполнения условия Куранта: $U_k \frac{\Delta t}{\Delta V} \leq 1$, т.е. выбор шага по времени Δt зависит от шага по объему ΔV и при малом Δt задача решалась достаточно долго.

Известно, что при использовании неявной схемы условие устойчивости имеет вид: $U_k \frac{\Delta t}{\Delta V} \geq 1$, что означает возможность выбора шагов по объему независимо друг от друга.

Замечание. Данная методика применяется для тех сетей, которые замкнуты, но не имеют разветвленности в каждом контуре. При разветвленном контуре учитывать такие принципы предоставляется сложным. Разветвление в основном бывает там, где находится смеситель-разделитель и клапаны. В одном контуре может быть несколько контуров. С помощью теории графов можно предложить методику решения

данной задачи, однако это не позволит решать практические задачи теплообмена в реальном масштабе времени. Если не учитывать условия замкнутости, получилось бы некорректная задача. Поэтому условия замкнутости при решении систем добавляются.

Выводы. Разработан алгоритм для автоматизации построения дискретных аналогов математических моделей (17), (19), (23).

При этом необходимо знание начальных значений температур каждого элемента, собственных конструктивных размеров элементов сети, значений коэффициентов теплопередачи между элементами, значение объемных расходов и др. На основе этих данных строятся таблицы связей, которые и являются основной информационной базой для автоматической генерации конечно-разностных схем для моделей (17), (19), (23).

Для учета различных тепловых связей в комплексной математической модели, в алгоритме предусмотрена специальная система кодировки, которая позволяет идентифицировать типы элементов и их взаимное расположение (смежность между собой).

Список литературы:

1. Новрузбеков, И. Г. Исследование систем обеспечения теплового режима [Текст] / И. Г. Новрузбеков, К. Г. Касумов // Изв. АН. Аз. ССР. – 1987. – № 3. – С. 99–104.
2. Мирсалимов, В. М. Об одном подходе к численному решению задач теплообмена [Текст] / В. М. Мирсалимов, К. Г. Касумов, И. Г. Новрузбеков // Вопросы разрушения и оптимизации деформируемых сред. – 1989. – С. 3–9.
3. Самарский, А. А. Теория разностных схем [Текст] / А. А. Самарский. – М.: Наука, 1983. – 614 с.
4. Степаненко, В. М. Численное моделирование процессов теплообмена в системе водоем-грунт [Текст] / В. М. Степаненко, В. Н. Лысков // Метеорология и гидрология. – 2005. – № 3. – С. 95–104.
5. Степаненко, В. М. Численная модель процессов теплообмена в системе атмосфера – водоем – почва [Текст] / В. М. Степаненко // Вычислительные технологии. – 2004. – Т. 9. – С. 112–122.
6. Малоземов, В. В. Тепловой режим космических аппаратов [Текст] / В. В. Малоземов. – М.: Машиностроение, 1980. – 230 с.

7. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамика жидкости [Текст] / С. Патанкар. – М.: Энергоиздат, 1984. – 152 с.
8. Малоземов, В. В. Математическое моделирование тепловых процессов малогабаритной бортовой аппаратуры [Текст] / В. В. Малоземов // Вестник Московского авиационного института. – 2010. – Т. 17, № 1. – С. 55–61.
9. Блинов, В. Н. Малые космические аппараты. Миниспутник. Миниспутники. Унифицированные космические платформы для малых космических аппаратов [Текст] / В. Н. Блинов. – Омск: Изд. Ом ГТУ, 2010. – 348 с.
10. Бабаев, Т. А. Численное моделирование процессов нестационарной фильтрации газа и воды в пористой среде [Текст] / Т. А. Бабаев, Г. М. Мусаев, В. Г. Пирмамедов // Численное решение задач фильтрации многофазной несжимаемой жидкости. – Новосибирск, 1977.

Bibliography (transliterated):

1. Novruzbekov, I. G., Kasumov, K. G. (1987). Issledovanie sistem obespecheniya teplovogo rezhima. Izv. AN. Az. SSR, 3, 99–104.
2. Mirsalimov, V. M., Kasumov, K. G., Novruzbekov, I. G. (1989). Ob odnom podhode k chislenному resheniyu zadach teploobmena. Voprosy razrusheniya i optimizatsii deformiruyemykh sred, 3–9.
3. Samarskiy, A. A. (1983). Teoriya raznostnykh skhem. Moscow: Nauka, 614.
4. Stepanenko, V. M., Lyksov, V. N. (2005). Chislennoe modelirovaniye protsessov teplovlagooobmena v sisteme vodoem-grunt. Meteorologiya i gidrologiya, 3, 95–104.
5. Stepanenko, V. M. (2004). Chislennaya model' protsessov teplovlagooobmena v sisteme atmosfera – vodoem – pochva. Vychislitel'nye tekhnologii, 9, 112–122.
6. Malozemov, V. V. (1980). Teplovoy rezhim kosmicheskikh apparatov. Moscow: Mashinostroenie, 230.
7. Patankar, S. (1984). Chislennyye metody resheniya zadach teploobmena i dinamika zhidkosti. Moscow: Energoizdat, 152.
8. Malozemov, V. V. (2010). Matematicheskoe modelirovaniye teplovykh protsessov malogabaritnoy bortovoy apparatury. Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta, 17 (1), 55–61.
9. Blinov, V. N. (2010). Malye kosmicheskie apparaty. Minisputnik. Minisputniki. Unifitsirovannyye kosmicheskie platformy dlya malyyh kosmicheskikh apparatov. Omsk: Izd. Om GTU, 348.
10. Babaev, T. A., Musaev, G. M., Pirmamedov, V. G. (1977). Chislennoe modelirovaniye protsessov nestatsionarnoy fil'tratsii gaza i vody v poristoy srede. Chislennoe reshenie zadach fil'tratsii mnogofaznoy neszhimaemoy zhidkosti. Novosibirsk.

Поступила (received) 01.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Подход к автоматизации численного расчета состояния процессов теплообмена в замкнутых аппаратах/ Гасымов Г. Г., Гасымов С. Ю. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 33(1255). – С. 21–28. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Підхід до автоматизації чисельного розрахунку стану процесів теплообміну в замкнутих апаратах/ Гасимов Г. Г., Гасимов С. Ю. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 33(1255). – С.21–28. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Approach to the automation of numerical calculation of the state of heat exchange processes in closed devices/ Qasimov Q. Q., Qasimov S. Yu. //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 33 (1255).– P. 21–28.– Bibliogr.:10. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гасымов Гасым Гурбан – кандидат технических наук, доцент кафедры “Общая и прикладная математика”, Азербайджанский Государственный Университет Нефти и Промышленности, пр. Азадлыг, 20, г. Баку, Азербайджан, AZ1010, e-mail: q.qasim56@gmail.com.

Гасимов Гасим Гурбанов – кандидат технічних наук, доцент кафедри "Загальна та прикладна математика", Азербайджанський державний університет Нафти і Промисловості, пр. Азадліг, 20, м Баку, Азербайджан, AZ1010, e-mail: q.qasim56@gmail.com.

Qasimov Qasym Qurban – PhD, Associate Professor of the Department "General and Applied Mathematics", Azerbaijan State University of Oil and Industry, Azadlig ave., 20, Baku, Azerbaijan, AZ1010, e-mail: q.qasim56@gmail.com.

Гасымов Сардар Юсуб – кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры “Общая и прикладная математика”, Азербайджанский Государственный Университет Нефти и Промышленности, пр-т. Азадлыг, 20, г. Баку, Азербайджан, AZ1010; e-mail: sardarkasumov1955@mail.ru

Гасимов Сардар Юсубов – кандидат фіз.-мат. наук, доцент кафедри "Загальна та прикладна математика", Азербайджанський державний університет Нафти і Промисловості, пр-т. Азадліг, 20, м Баку, Азербайджан, AZ1010; e-mail: sardarkasumov1955@mail.ru

Qasimov Sardar Yusub – PhD in Physics and Mathematics. Sci., Associate Professor of the Department "General and Applied Mathematics", Azerbaijan State University of Oil and Industry, Prospect. Azadlig, 20, Baku, Azerbaijan, AZ1010; E-mail: sardarkasumov1955@mail.ru.

В. В. ГЛАДКОВСЬКА**ПРОЕКТУВАННЯ КОНФІГУРАЦІЇ СКЛАДСЬКОЇ МЕРЕЖІ**

Представлена економіко-математична модель, яка дозволяє спроектувати конфігурацію складської мережі з урахуванням специфіки обслуговування вантажопотоків транспортно-експедиторською компанією для забезпечення мінімальних транспортних витрат, а також розподіляти матеріальні потоки. Таким чином, для кожного регіону може бути визначено безліч можливих варіантів розташування складської мережі регіону. Де основним критерієм оптимізації конфігурації складської мережі є мінімізація транспортних витрат.

Ключові слова: складська мережа, транспортно-експедиторська компанія, ринок, логістичний оператор, регіон, вантажопоток.

Представлена экономико-математическая модель, которая позволяет спроектировать конфигурацию складской сети с учетом специфики обслуживаемых грузопотоков транспортно-экспедиторской компанией для обеспечения минимальных транспортных затрат, а так же распределить материальные потоки. Таким образом, для каждого региона может быть определено множество возможных вариантов местоположения складской сети региона. Где основным критерием оптимизации конфигурации складской сети является минимизация транспортных затрат.

Ключевые слова: складская сеть, транспортно-экспедиторская компания, рынок, логистический оператор, регион, грузопоток.

У статті розглядаються питання, пов'язані з конфігурацією складської мережі з урахуванням специфіки обслуговування вантажопотоків транспортно-експедиторською компанією для забезпечення мінімальних транспортних витрат.

Результатом дослідження є рішення задачі за допомогою розробленої економіко-математичної моделі, яка дозволить забезпечити отримання оптимальної конфігурації складської мережі. При цьому будуть розподілятися матеріальні потоки для безлічі обраних складів з урахуванням потужності яка проходить через склади. Даний підхід транспортних зв'язків у системі складів логістичного оператора враховує можливості міжрегіональних зв'язків й таким чином, охоплює всі можливі варіанти. Де основним критерієм оптимізації конфігурації складської мережі є мінімізація транспортних витрат.

Практична значимість розроблених процедур та методи можуть бути використані при створенні схеми руху транспортних засобів у процесі обслуговування складської мережі логістичного оператора. А також дозволить транспортно-експедиторській компанії визначити перспективи її присутності на розглянутих регіональних ринках в якості логістичного оператора, і в процесі розвитку вийти на нові ринки і стати частиною логістичної інфраструктури регіонів.

Ключові слова: складська мережа, транспортно-експедиторська компанія, ринок, логістичний оператор, регіон, вантажопоток.

Вступ. Багато транспортно-експедиторських компаній (особливо на півдні України) обслуговують вантажопотоки, пов'язані з імпортом вантажів, які надходять морем (через порти). При цьому експедитори, як правило, відповідають за передачу даних вантажів до складів клієнтів, які далі самостійно займаються розподільною логістикою. Новий статус експедитора – логістичний оператор – припускає самостійне виконання ним операцій з розподілу. Отже, експедитор повинен сформувати складську мережу, яка б забезпечувала розподіл з мінімальними витратами.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. До задачі розміщення складської мережі (мережі розподільчих центрів) досить часто звертаються у сучасних публікаціях.

Теоретична база логістики включає в себе розробки, які стосуються визначення місця розташування складів. Наприклад, у роботах [1] базовим методом визначення місця розташування складів є метод центру тяжіння та його модифікації.

Відзначимо, що в багатьох джерелах по логістиці наводяться принципові види залежності витрат на розподіл від кількості складів у системі (наприклад, [1, 2]). Але даний підхід є лише концептуальною моделлю, орієнтованою на продукцію конкретного виробника. Крім того, можуть бути використані інші методи для формування безлічі можливих варіантів знаходження складів у регіоні (наприклад, якщо вже є наявні обладнані приміщення для оренди або продажу і т.д.).

Наприклад, автор роботи [3, 4] вважає, що слід використовувати для рішення даної задачі концепції визначення можливих варіантів розміщення складів на базі транспортних зв'язків регіонів.

При більш детальному розгляді регіонів з точки зору транспортної інфраструктури слід визначити

конфігурацію складської мережі (тобто те, де і які ємності склади повинні бути розміщені). Тому проблема проектування складської мережі логістичного оператора є актуальною.

Ціль та задачі дослідження. Метою дослідження є проектування конфігурації складської мережі з урахуванням специфіки обслуговування вантажопотоків транспортно-експедиторською компанією у процесі її трансформації в логістичного оператора.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Розробити економіко-математичну модель, яка дозволить встановити оптимальну конфігурацію складської мережі.

2. Визначити схеми роботи транспортних засобів, які обслуговують дану складську мережу.

Матеріали та методи дослідження проектування конфігурації складської мережі. Основу дослідження створює системна модель транспортних зв'язків (рис. 1) та системна модель можливих варіантів руху транспортних засобів (рис. 2). У якості метода дослідження використовується метод дослідження операцій – нелінійна оптимізація.

Результати проектування конфігурації складської мережі транспортно-експедиторської компанії у процесі її трансформації у логістичного оператора. На першому етапі планування транспортно-експедиторська компанія формує безліч регіонів для ведення своєї діяльності, а також визначає необхідні сумарні ємності складів $X^{скл,i}$ та кількість транспортних засобів $X_{kl}^{mp,i}$ k -го типу l - марки (виробника), які обслуговують i -ий регіон. Для цього пропонується використовувати модель, яка наведена у [5].

Таким чином, для кожного регіону може бути визначено $P_{\mathcal{Q}^i}$ – безліч можливих варіантів розташування складської мережі i -го регіону які формуються на базі попереднього аналізу логістичної інфраструктури регіону. Приймаємо у подальшому, що кожен варіант $\mathcal{Q}^i \in P_{\mathcal{Q}^i}$ пов'язаний з конкретною кількістю складів J^i .

На першому етапі дослідження прийемо, що джерелами зародження обслуговуваних матеріальних потоків є порти рис. 1, де J – безліч портів, $j = \overline{1, J}$ – індекс порта.

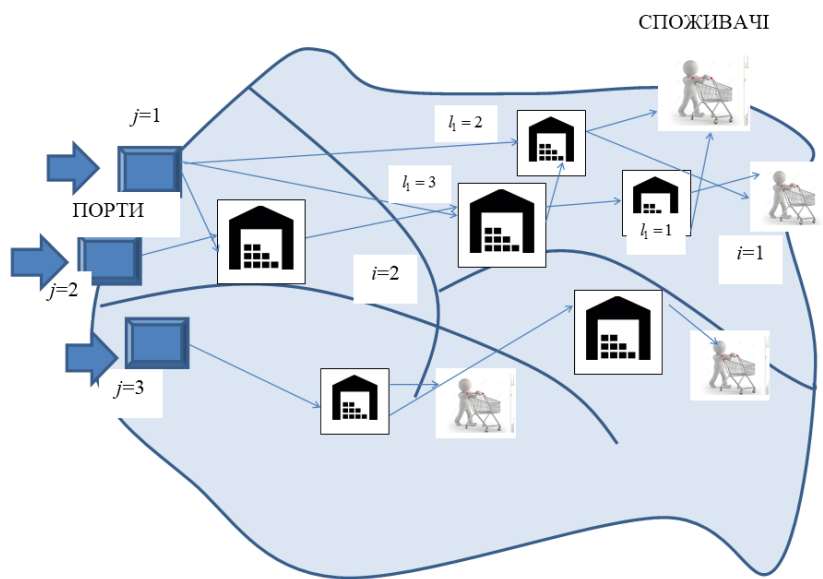


Рис. 1 – Формування складської мережі на базі існуючої системи вантажопотоків, яка обслуговується транспортно-експедиторською компанією

Стоком матеріального потоку, є склади споживачів. Позначимо K_i – безліч споживачів у i -му регіоні, $k_i = \overline{1, K_i}$ – індекс споживачів регіону.

Функціонування складської мережі може здійснюватися наступним чином: з портів до споживачів матеріальний потік може проходити по таким основним ділянкам:

- порт – склад регіону – споживач;
- порт – склад регіону – склад регіону – споживач;
- порт – склад іншого регіону – склад регіону – порт – склад регіону – споживач.

Відзначимо, що прямі зв'язки «порт – споживачі» не розглядаються, так як вони не пов'язані з проектуванням логістичної інфраструктури в контексті даного дослідження.

Таким чином, у складській мережі, що проектується, введемо наступні позначення розглянутих видів транспортних зв'язків:

1) Транспортні зв'язки «порти–склади»: $X_j^{il_i}$ – транспортний зв'язок j -го порту й l_i -го складу, де L_i – безліч розглянутих складів регіону $l_i = \overline{1, L_i}$. Для розглянутого часового періоду планування характерно те, що не доцільно деталізація по постачальникам,

тому в якості «агрегованого» постачальника виступає порт. Тому продукція, яка була доставлена в конкретний порт, пов'язана з сукупністю імпортерів; а споживачам повинна бути поставлена в заданих обсягах продукція з конкретного порту;

- Транспортні зв'язки «склад – склад» можна розділити на дві категорії: «склад – склад одного регіону», «склад – склад різних регіонів»: $X_{m_i}^{il_i} - l_i$ -го складу з m_i -им складом у регіоні i , поставки з порта j ; $X_{sl_s}^{il_i} - l_i$ -го складу у i -му регіоні з l_s -им складом у s -му регіоні, поставки з порта j ;

2) Транспортні зв'язки «склад – споживачі» також можуть бути розділені на дві категорії – «склад одного регіону – споживачі іншого регіону», «склад та споживачі одного регіону»:

- $X_{l_i}^{jk_i} - z l_i$ -го складу k_i -му споживачу у регіоні i , поставки з порта j ;

- $X_{il_i}^{jsk_s} - z l_i$ -го складу в i -му регіоні k_s -му споживачу у s -му регіоні, поставки з порта j .

Зазначені параметри управління обчислюються у тонах та відображають потужності матеріальних потоків, які проходять через елементи розподільної системи логістичного оператора. Відзначимо, що даний підхід до ідентифікації транспортних зв'язків у системі складів логістичного оператора враховує можли-

вості міжрегіональних зв'язків й таким чином, охоплює всі можливі варіанти.

Основним критерієм оптимізації конфігурації складської мережі є мінімізація транспортних витрат. Тому розглянемо деталізовано структуру транспортних витрат логістичного оператора з урахуванням ідентифікованих транспортних зв'язків. Відзначимо, що при вирішенні даної задачі не враховується нomenклатура товарів у складі матеріальних потоків – такий розгляд актуально при вирішенні задачі оптимізації роботи складської мережі на базі імітаційного моделювання та відповідного програмного забезпечення (наприклад, як у [6-7] – це наступний рівень розгляду поетапної оптимізації роботи логістичного оператора).

Позначимо:

$R_j^{il_i}$ – витрати на транспортування з j -го порту у l_i -ий склад, де L_i – безліч розглянутих складів регіону $l_i = \overline{1, L_i}$; $R_{m_i}^{il_i}$ – витрати на транспортування з l_i -го складу у m_i -ий склад у регіоні i ; $R_{sl_s}^{il_i}$ – витрати на транспортування з l_i -го складу у i -му регіоні у l_s -ий склад у s -му регіоні; $R_{l_i}^{ik_i}$ – витрати на транспортуван-

ня з l_i -го складу k_i -му споживачу у регіоні i ; $R_{il_i}^{sk_i}$ – витрати на транспортування з l_i -го складу у i -му регіоні k_s -му споживачу у s -му регіоні.

На базі прийнятих позначень сформулюємо вираження транспортних витрат за всіма можливими варіантами функціонування складської мережі: – витрати на транспортування від портів до складів у всіх регіонах

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^n \sum_{l_i=1}^{L_i} R_j^{il_i} (X_j^{il_i}), \quad (1)$$

– витрати на транспортування між складами у межах одного регіону у цілому по всій мережі

$$\sum_{i=1}^n \sum_{l_i=1}^{L_i} \sum_{m_i=1}^{L_i} R_{m_i}^{il_i} \left(\sum_{j=1}^J X_{m_i}^{il_i} \right), \quad (2)$$

– матеріальний потік на даній ділянці об'єднує продукцію, поставлену в усі розглянуті порти J ;

$$\sum_{j=1}^J X_{m_i}^{il_i}, \quad (3)$$

– витрати на транспортування між складами різних регіонів

$$\sum_{i=1}^n \sum_{l_i=1}^{L_i} \sum_{s=1}^n \sum_{l_s=1}^{L_s} R_{sl_s}^{il_i} \left(\sum_{j=1}^J X_{sl_s}^{il_i} \right), \quad (4)$$

– витрати на транспортування від складів до споживачів, які знаходяться у одному регіоні по всій мережі

$$\sum_{i=1}^n \sum_{l_i=1}^{L_i} \sum_{k_i=1}^{K_i} R_{k_i}^{il_i} \left(\sum_{j=1}^J X_{k_i}^{il_i} \right), \quad (5)$$

– витрати на транспортування від складів до споживачів, які знаходяться у різних регіонах

$$\sum_{i=1}^n \sum_{l_i=1}^{L_i} \sum_{s=1}^n \sum_{k_s=1}^{K_s} R_{il_i}^{sk_s} \left(\sum_{j=1}^J X_{il_i}^{sk_s} \right), \quad (6)$$

На даному етапі проектування зазначені витрати можуть бути визначені на базі середньостатистичних показників. Як відомо, витрати на транспортування залежать від відстані перевезення. Витрати автотранспортного підприємства при придбанні транспортних засобів для обслуговування заданих вантажопотоків досить детально розглянуті у працях [9, 10]. У даному випадку слід зазначити той факт, що відстань, яку у середньому за рейс буде проходити транспортний засіб на різних ділянках складської мережі визначається наступним: в одному або різних регіонах знаходяться склади, склад та споживачі рис. 2.

Так, доставка вантажу на склад з порту вимагає здійснити круговий рейс, це значить, що транспортний засіб пройде подвійну відстань між портом та складом. Аналогічно для об'єктів, які перебувають у різних районах. При цьому якщо об'єкти перебувають у одному районі (наприклад, склади, споживачі та склади), то транспортні засоби можуть здійснювати як маятникові рейси, так й кільцеві (тобто, охоплювати декількох споживачів за рейс). Так як на даному етапі проектування визначити те, яким чином транспортні засоби будуть охоплювати споживачів у регіо-

ні неможливо, то слід прийняти найбільш подовжений маршрут – маятниковий, який представлений на рис. 2.

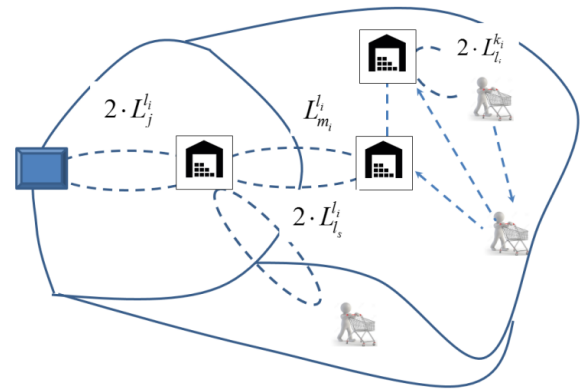


Рис. 2 – Схеми руху транспортних засобів у процесі обслуговування складської мережі логістичного оператора

Так як у контексті даної задачі транспортні засоби належать оператору, то структура витрат на транспортування може бути представлена наступним чином:

– витрати на транспортування від портів до складів

$$R_j^{il_i} (X_j^{il_i}) = \frac{X_j^{il_i}}{q} \left[r_1^{nep} \cdot 2 \cdot L_j^{il_i} + r_1^{nocm} \cdot 2 \cdot \left(\frac{L_j^{il_i}}{24 \cdot V} + t_n^{ппр} + t_n^{ожс} \right) \right], \quad (7)$$

де r_1^{nep} – норматив змінних витрат на 1 км (паливо, мастильні матеріали і т. д.),

r_1^{nocm} – норматив добових постійних витрат (амортизація, страхування, заробітна плата водіям і т.д.). Відзначимо, що на різних етапах проходження матеріального потоку використовуються різні види транспортних засобів: наприклад, в порт вантаж приходить, як правило, у контейнерах, тому використовуються відповідні транспортні засоби. Між складами та від складів до споживачів товар може доставлятися транспортними засобами різної вантажопідйомності у залежності від розмірів партій. Тому у подальшому;

$r_2^{nep}, r_2^{nocm}, r_3^{nep}, r_3^{nocm}, r_4^{nep}, r_4^{nocm}, r_5^{nep}, r_5^{nocm}$ – відповід-

но, нормативи змінних та постійних витрат для транспортних засобів, які обслуговують інші ділянки проходження матеріального потоку; $L_j^{il_i}$ – відстань у (км)

від j -го порту до l_i -го складу, $l_i = 1, \dots, L_i$ i -го регіону;

q_1 – вантажопідйомність транспортного засобу на ділянці від порту до складу, т; (у подальшому – q_2, q_3, q_4, q_5 – відповідно, вантажопідйомності транспортних засобів на інших ділянках проходження матеріального потоку); V – середня швидкість руху автотранспорту в Україні, км/год; $t_n^{ппр}, t_n^{ожс}$ – час на вантажно-розвантажувальні операції, очікування (простої), наприклад, у порту;

– витрати на транспортування між складами одного регіону

$$R_{m_i}^{il_i} (X_{m_i}^{il_i}) = \frac{X_{m_i}^{il_i}}{q_2} \left[r_2^{nep} \cdot L_{m_i}^{il_i} + r_2^{nocm} \cdot \left(\frac{L_{m_i}^{il_i}}{24 \cdot V} + t_2^{ппр} + t_2^{ожс} \right) \right], \quad (8)$$

$L_{m_i}^{il_i}$ – відстань між складами у одному регіоні;

$t_2^{ППП}, t_2^{ОЖ}$ – час на вантажно-розвантажувальні роботи, очікування (у подальшому, $t_3^{ППП}, t_3^{ОЖ}, t_4^{ППП}, t_4^{ОЖ}, t_5^{ППП}, t_5^{ОЖ}$ – відповідно аналогічні тимчасові параметри для інших ділянок проходження матеріального потоку);

– витрати на транспортування між складами різних регіонів

$$R_{sl_s}^{il_i} = \frac{X_{sl_s}^{il_i}}{q_3} \left[r_3^{nep} \cdot L_{sl_s}^{il_i} + r_3^{nocm} \cdot \left(\frac{L_{sl_s}^{il_i}}{24 \cdot V} + t_3^{ППП} + t_3^{ОЖ} \right) \right], \quad (9)$$

$L_{sl_s}^{il_i}$ – відстань між складами різних регіонів;

– витрати на транспортування від складів до споживачів, які знаходяться у різних регіонах

$$R_{il_i}^{sk_s} = \frac{X_{il_i}^{sk_s}}{q_4} \left[r_4^{nep} \cdot 2 \cdot L_{il_i}^{sk_s} + r_4^{nocm} \cdot \left(\frac{2 \cdot L_{il_i}^{sk_s}}{24 \cdot V} + t_4^{ППП} + t_4^{ОЖ} \right) \right], \quad (10)$$

$L_{il_i}^{sk_s}$ – відстань між складами та споживачами у різних регіонах;

– витрати на транспортування від складів до регіональних споживачів

$$R_{il_i}^{ik_i} = \frac{X_{il_i}^{ik_i}}{q_5} \left[r_5^{nep} \cdot 2 \cdot L_{il_i}^{ik_i} + r_5^{nocm} \cdot \left(\frac{2 \cdot L_{il_i}^{ik_i}}{24 \cdot V} + t_5^{ППП} + t_5^{ОЖ} \right) \right], \quad (11)$$

$L_{il_i}^{ik_i}$ – відстань від складу до регіонального споживача.

Зазначимо, що інвестиційні витрати по складах у різних регіонах різні, що було враховано на попередньому етапі проектування логістичної інфраструктури оператора.

Сумарні витрати на транспортне забезпечення проходження матеріального потоку через складську мережу оператора до споживачів формують критерій оптимальності для задачі, що розглядається:

$$R^{mp} = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^n \sum_{l_i=1}^{L_i} R_j^{il_i} \left(X_j^{il_i} \right) + \sum_{i=1}^n \sum_{l_i=1}^{L_i} \sum_{m_i=1}^{M_i} R_{m_i}^{il_i} \left(\sum_{j=1}^J X_{m_i}^{jil_i} \right) + \sum_{i=1}^n \sum_{l_i=1}^{L_i} \sum_{s=1}^n \sum_{l_s=1}^{L_s} R_{sl_s}^{il_i} \left(\sum_{j=1}^J X_{sl_s}^{jil_i} \right) + \sum_{i=1}^n \sum_{l_i=1}^{L_i} \sum_{k_i=1}^{K_i} R_{k_i}^{il_i} \left(\sum_{j=1}^J X_{k_i}^{jil_i} \right) + \sum_{i=1}^n \sum_{l_i=1}^{L_i} \sum_{s=1}^n \sum_{k_s=1}^{K_s} R_{sl_s}^{il_i} \left(\sum_{j=1}^J X_{sl_s}^{jil_i} \right) \rightarrow \min. \quad (12)$$

Далі необхідно визначити та сформулювати математично обмежувальні умови.

Перш за все, обмежувальними умовами є потужності потоків у пунктах зародження a_j (у даному випадку у портах), та потреби по стокам $b_j^{k_i}$ (споживачам), які формуються наступним чином:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{l_i=1}^{L_i} X_j^{il_i} = a_j, \quad (j = \overline{1, J}), \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{l_i=1}^{L_i} X_{l_i}^{jil_i} + \sum_{s=1}^n \sum_{l_s=1}^{L_s} X_{sl_s}^{jil_i} = b_j^{k_i}, \quad (i = \overline{1, n}, k_i = \overline{1, K_i}, j = \overline{1, J}), \quad (14)$$

(13) відображає той факт, що все, що прийшло в j -ий порт - має бути звідти відправлено на склад L_i всіх розглянутих регіонів n .

(14) відображає те, що кожному споживачу (стоку) з безлічі K_i кожного з n регіонів товар може бути доставлений з регіональних складів L_i або зі складів інших регіонів $L_s, s \neq i$.

Далі формуються обмежувальні умови по ємностям складів у кожному регіоні – сумарна потужність матеріальних потоків, яка проходить через склад регіону, повинна не перевищувати задані обмеження. На базі економіко-математичної моделі, представленій вище, були визначені величини $X^{ckl,i}$, які характеризують сумарну ємність складів у регіоні. Тому дані величини є екзогенними параметрами на даному етапі проектування. Виконаємо перепозначення: $X^{ckl,i} = Q^i$.

Обмеження за сумарною ємністю складів регіону, тобто потужності потоків, які проходять через склад, повинні не перевищувати задану ємність:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{l_i=1}^{L_i} X_j^{il_i} + \sum_{j=1}^J \sum_{l_i=1}^{L_i} \sum_{m_i=1}^{M_i} X_{m_i}^{jil_i} + \sum_{j=1}^J \sum_{l_i=1}^{L_i} \sum_{s=1}^n \sum_{l_s=1}^{L_s} X_{sl_s}^{jil_i} \leq Q^i, \quad (i = \overline{1, n}), \quad (15)$$

У (15) перший доданок – кількість товару, яка поставляється на склад регіону з портів (потужність матеріального потоку на ділянці «порт – регіон»). Друге – зі складів того ж регіону (потужність матеріального потоку на ділянці «склад – склад – один регіон»). Третє – зі складів інших регіонів (потужність потоку на ділянці «склад–склад–різні регіони»).

Балансові обмеження по складах описують баланс потужностей вхідних та вихідних потоків від кожного постачальника (у даному випадку кожного порту) представленого на рис. 3:

$$X_j^{il_i} + \sum_{m_i=1}^{M_i} X_{m_i}^{jil_i} + \sum_{s=1}^n \sum_{l_s=1}^{L_s} X_{sl_s}^{jil_i} = \sum_{k_i=1}^{K_i} X_{k_i}^{jil_i} + \sum_{s=1}^n \sum_{k_s=1}^{K_s} X_{sl_s}^{jil_i} + \sum_{m_i=1}^{M_i} X_{m_i}^{jim_i} + \sum_{s=1}^n \sum_{l_s=1}^{L_s} X_{sl_s}^{jil_i}, \quad i = \overline{1, n}, l_i = \overline{1, L_i}, j = \overline{1, J}, \quad (16)$$

Відзначимо, що параметри управління моделі що розробляється повинні приймати не негативні значення:

$$X_j^{il_i} \geq 0, \quad j = \overline{1, J}, i = \overline{1, n}, l_i = \overline{1, L_i}, \quad (17)$$

$$X_{m_i}^{jil_i} \geq 0, \quad j = \overline{1, J}, i = \overline{1, n}, l_i = \overline{1, L_i}, m_i = \overline{1, M_i}, l_i \neq m_i, \quad (18)$$

$$X_{sl_s}^{jil_i} \geq 0, \quad j = \overline{1, J}, i = \overline{1, n}, l_i = \overline{1, L_i}, s = \overline{1, n}, l_i \neq s, \quad (19)$$

$$j = \overline{1, J}, i = \overline{1, n}, l_i = \overline{1, L_i}, k_i = \overline{1, K_i}, \quad (20)$$

$$X_{sl_s}^{jil_i} \geq 0, \quad j = \overline{1, J}, i = \overline{1, n}, l_i = \overline{1, L_i}, s = \overline{1, n}, s \neq n, k_s = \overline{1, K_s}, \quad (21)$$

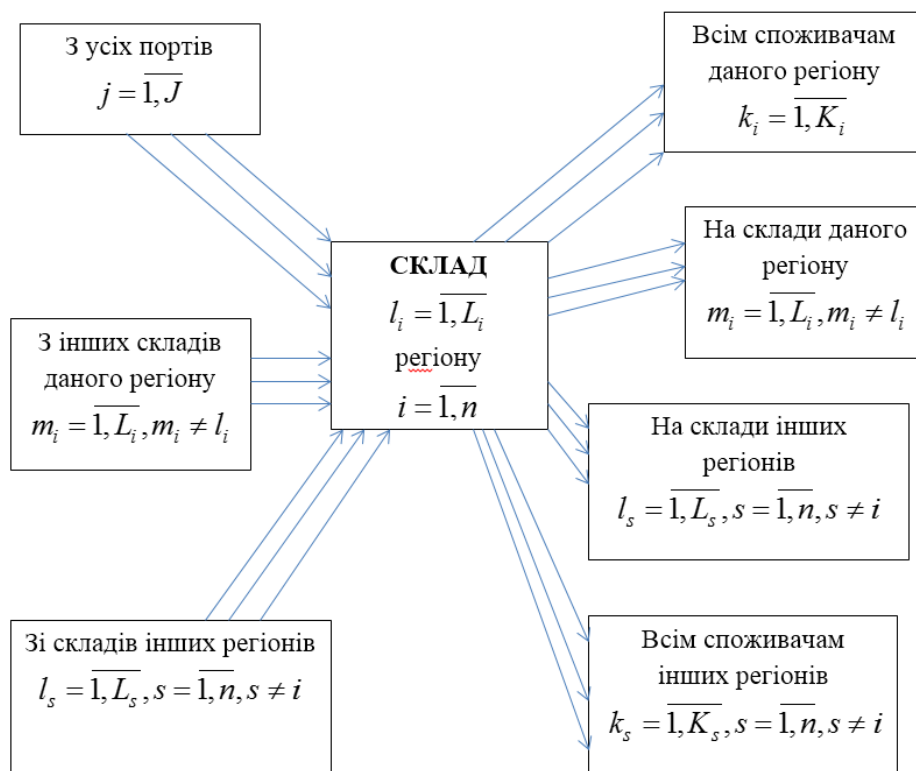


Рис. 3 – Баланс вхідних та вихідних матеріальних потоків через склад, як елемент логістичної інфраструктури оператора

Сформульована система обмежень може бути доповнена обмеженнями по ємності кожного складу (наприклад, склад уже готовий та здається в оренду або продається) наступного вигляду:

$$\sum_{j=1}^J X_j^{il_i} + \sum_{j=1}^J \sum_{\substack{m_i=1 \\ m_i \neq l_i}}^{L_i} X_{m_i}^{jil_i} + \sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^n \sum_{\substack{l_s=1 \\ i \neq s}}^{L_s} X_{sl_s}^{jil_i} \leq Q_i^i, (i = \overline{1, n}, l_i = \overline{1, L_i}), \quad (22)$$

де Q_i^i – верхня межа ємності кожного з розглянутих складів, яка задається.

Також модель може бути доповнена обмеженнями по нижній межі ємності складу з точки зору доцільності (наприклад, якщо сумарна потужність проходить через склад потоків менше заданої величини $Q_i^{min,i}$, то організація такого складу недоцільна):

$$\sum_{j=1}^J X_j^{il_i} + \sum_{j=1}^J \sum_{\substack{m_i=1 \\ m_i \neq l_i}}^{L_i} X_{m_i}^{jil_i} + \sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^n \sum_{\substack{l_s=1 \\ i \neq s}}^{L_s} X_{sl_s}^{jil_i} \geq Q_i^{min,i}, (i = \overline{1, n}, l_i = \overline{1, L_i}), \quad (23)$$

$$\geq Q_i^{min,i}, (i = \overline{1, n}, l_i = \overline{1, L_i}),$$

$$Q_i^{ck,i} = \sum_{j=1}^J X_j^{il_i} + \sum_{j=1}^J \sum_{\substack{m_i=1 \\ m_i \neq l_i}}^{L_i} X_{m_i}^{jil_i} + \sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^n \sum_{\substack{l_s=1 \\ i \neq s}}^{L_s} X_{sl_s}^{jil_i}, (i = \overline{1, n}, l_i = \overline{1, L_i}). \quad (24)$$

Обговорення результатів дослідження проектування конфігурації складської мережі. Таким чином, сформульовано критерій оптимальності (сумарні транс-

портні витрати), система обмежуючих умов та умови не заперечності параметрів управління економіко-математичної моделі. Проектування конфігурації складської мережі транспортно-експедиторської компанії у процесі її трансформації в логістичного оператора.

Відзначимо, що економіко-математична модель також може використовуватися для обґрунтування портів, які беруть участь у проведенні матеріальних потоків шляхом введення ще однієї групи параметрів управління, які характеризують обсяги поставок від постачальників у порти.

Пропонована економіко-математична модель (12) – (23) не враховує обмеження по провізній спроможності транспортних засобів, з припущення, що їх досить для забезпечення розглянутих матеріальних потоків. Рішення зазначеної задачі за допомогою даної моделі забезпечить отримання оптимальної конфігурації складської мережі. При цьому для безлічі обраних складів (яким у оптимальному плані будуть відповідати ненульові параметри управління, пов'язані з ними) величини характеризують ємність складів, де $Q_i^{ck,i}$ – необхідна ємність складу з урахуванням потужності яка проходить через матеріальний потік.

Дана економіко-математична модель дозволяє встановлювати конфігурацію складської мережі логістичного оператора та розподіляти матеріальні потоки між портами, регіонами, складами.

Висновки. У результаті проведених досліджень:

1. Розроблено економіко-математичну модель, яка дозволяє спроектувати конфігурацію складської мережі з урахуванням специфіки обслуговування вантажопотоків транспортно-експедиторською компанією для забезпечення мінімальних транспортних ви-

трат, а також розподіляти матеріальні потоки між портами, регіонами, складами.

2. Визначено схеми роботи транспортних засобів у процесі, з урахуванням транспортних зв'язків в сис-

темі складів логістичного оператора, що враховує можливості міжрегіональних зв'язків й таким чином, охоплює всі можливі варіанти.

Список літератури:

1. Константинов, Р. В. Проектирование оптимальной складской сети [Текст] / Р. В. Константинов // Инженерный вестник Дона. – 2011. – Т. 18, № 4. – С. 243–250.
2. Иванова, Н. В. Факторы формирования логистической инфраструктуры на предприятиях по производству питьевой бутилированной воды [Электронный ресурс] / Н. В. Иванова // Управление экономическими системами. – Режим доступа: <http://uecs.ru/marketing/item/1517-2012-08-31-05-22-38>
3. Покровская, О. Д. Алгоритмизация задачи комплексного расчета параметров терминальной сети региона [Текст] / О. Д. Покровская, И. В. Воскресенский // Транспорт Урала. – 2011. – № 1 (28). – С. 10–13.
4. Покровская, О. Д. Инновационно-методологический подход к обоснованию создания в регионе сети терминалов как единого транспортно-экспедиционного пространства (на примере Кемеровской области) [Текст] / Т. П. Воскресенская, О. Д. Покровская // Транспорт Урала. – 2010. – № 1 (24). – С. 23–27.
5. Boulding, W. A Dynamic Process Model of Service Quality: From Expectations to Behavioral Intentions [Text] / W. Boulding, A. Kalra, R. Staelin, V. A. Zeithaml // Journal of Marketing Research. – 1993. – Vol. 30, Issue 1. – P. 7. doi: [10.2307/3172510](https://doi.org/10.2307/3172510)
6. William, M. Marketing (International Edition) [Electronic resource] / M. William, O. C. Ferrell. – Houghton Mifflin Company Boston, 1995. – Available at: <http://trove.nla.gov.au/work/28296078>
7. Schnaars, S. P. Marketing Strategy: Customers & Competition [Text] / S. P. Schnaars. – New York: Free Press, 1998. – 216 p.
8. Prahalad, C. K. The Core Competence of the Corporation [Text] / C. K. Prahalad, G. Hamel. – Harvard Business review, 1990.
9. Очеретна, В. В. Аналіз інтегрованої логістичної системи на прикладі роботи транспортно-експедиторської компанії [Текст] / В. В. Очеретна // Технологічний аудит і резерви виробництва. – 2014. – Т. 6, № 3 (20). – С. 16–20. doi: [10.15587/2312-8372.2014.31348](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2014.31348)
10. Юдин, Б. Д. Математические методы управления в условиях неполной информации [Текст] / Б. Д. Юдин. – М.: Сов. радио, 1974. – 400 с.

Bibliography (transliterated):

11. Konstantinov, R. V. (2011). Proektirovanie optimal'noy skladskoy seti. Inzhenernyy vestnik Dona, 18 (4), 243–250.
12. Ivanova, N. V. Faktory formirovaniya logisticheskoy infrastruktury na predpriyatiyah po proizvodstvu pit'evoy butilirovannoy vody. Upravlenie ekonomicheskimi sistemami. Available at: <http://uecs.ru/marketing/item/1517-2012-08-31-05-22-38>
13. Pokrovskaya, O. D., Voskresenskiy, I. V. (2011). Algoritimizatsiya zadachi kompleksnogo rascheta parametrov terminal'noy seti regiona. Transport Urala, 1 (28), 10–13.
14. Pokrovskaya, O. D., Pokrovskaya, O. D. (2010). Innovatsionno-metodologicheskii podhod k obosnovaniyu sozdaniya v regione seti terminalov kak edinogo transportno-ekspeditsionnogo prostranstva (na primere Kemerovskoy oblasti). Transport Urala, 1 (24), 23–27.
15. Boulding, W., Kalra, A., Staelin, R., Zeithaml, V. A. (1993). A Dynamic Process Model of Service Quality: From Expectations to Behavioral Intentions. Journal of Marketing Research, 30 (1), 7. doi: [10.2307/3172510](https://doi.org/10.2307/3172510)
16. William, M., Ferrell, O. C. (1995). Marketing (International Edition). Houghton Mifflin Company Boston. Available at: <http://trove.nla.gov.au/work/28296078>
17. Schnaars, S. P. (1998). Marketing Strategy: Customers & Competition. New York: Free Press, 216.
18. Prahalad, C. K., Hamel, G. (1990). The Core Competence of the Corporation. Harvard Business review.
19. Ocheretna, V. V. (2014). Analysis of the integrated logistic system on example of transport forwarding firm work. Technology Audit and Production Reserves, 6 (3 (20)), 16–20. doi: [10.15587/2312-8372.2014.31348](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2014.31348)
20. Yudin, B. D. (1974). Matematicheskie metody upravleniya v usloviyah nepolnoy informatsii. Moscow: Sov. radio, 400.

Надійшла (received) 26.10.2017

Бібліографічні описи/ Библиографические описания/ Bibliographic descriptions

Проектування конфігурації складської мережі/ Гладковська В. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 33(1255). – С.29–34. – Бібліогр.: 20 назв. – ISSN 2079-5459.

Проектирование конфигурации складской сети/ Гладковская В. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 33(1255). – С.29–34. – Бібліогр.: 20 назв. – ISSN 2079-5459.

Designing the configuration of the warehouse network/ Gladkovska V. // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 33 (1255). – P. 29–34. – Bibliogr.:20. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гладковська Валентина Валеріївна – асистент, Одеський національний морський університет, асистент кафедри «Судноводіння і морська безпека», м. Одеса, Україна, 65000 вул. Мечникова, 34.

Гладковская Валентина Валерьевна – асистент, Одесский национальный морской университет, ассистент кафедры «Судовождение и морская безопасность», г. Одесса, 65000, Украина ул. Мечникова, 34

Gladkovska Valentyna – assistant, Odessa National Maritime University, assistant of the department «Navigation and Maritime Safety», str. Mechnikova, 34, Odessa, Ukraine, 65000; e-mail: fikyss2003@rambler.ru.

В. В. ШЛЫКОВ, В. А. ДАНИЛОВА

КЛИНИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОГРАФИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ СЕРДЦА

Предложен метод термографического контроля температуры на поверхности миокарда при операциях на открытом сердце, основанный на вычислении плотности теплового потока через поверхность миокарда по данным градиентов температур, которые определяются из термографических изображений сердца при гипотермии и гипертермии в условиях искусственного кровообращения. Применение разработанной математической модели теплообмена для поверхностного слоя миокарда позволяет определить границы между прогретыми и охлажденными участками миокарда при проведении гипотермии или гипертермии сердца.

Ключевые слова: температура, сосуды, тепловой поток, распределение температуры, миокард, искусственное кровообращение, гипотермия, гипертермия, градиент, термограмма сердца.

Запропоновано метод термографічного контролю температури на поверхні міокарду при операціях на відкритому серці що базується на обчисленні щільності теплового потоку через поверхню міокарда за даними градієнтів температур, які визначаються із термографічних зображень серця при гіпотермії і гіпертермії в умовах штучного кровообігу. Застосування розробленої математичної моделі теплообміну для поверхневого шару міокарду дозволяє визначити межі між прогрітими і охолодженими ділянками міокарду при проведенні гіпотермії або гіпертермії серця.

Ключові слова: температура, судини, тепловий потік, розподіл температури, міокард, штучний кровообіг, гіпотермія, гіпертермія, градієнт, термограма серця.

A method is proposed for thermographic temperature monitoring on the surface of the myocardium during open heart operations based on calculating the heat flux density through the surface of the myocardium from temperature gradient data, which are determined from thermal images of the heart under hypothermia and hyperthermia under conditions of artificial circulation. Application of the developed mathematical model of heat exchange for the surface layer of the myocardium allows us to determine the boundaries between heated and cooled portions of the myocardium during hypothermia or cardiac hyperthermia. Evaluation of the rate of heat spread in the myocardium, which is performed for the time intervals for which the heart is cooled or warmed, indirectly makes it possible to assess the state of small coronary vessels in the myocardium.

Keywords: temperature, blood vessels, heat flow, temperature distribution, myocardium, artificial circulation, hypothermia, hyperthermia, gradient, heart thermogram.

Введение. В процессе проведения операции на открытом сердце существует необходимость неинвазивного контроля температуры на поверхности миокарда [1], что позволяет контролировать температуру сердца при гипотермии и гипертермии в условиях искусственного кровообращения. Для оценки неоднородности распределения температуры на поверхности сердца разработаны математические модели теплообмена в поверхностном слое миокарда [2]. Применение систем тепловизионной диагностики, в которых используется разработанная оптическая система стабилизации термограмм [3] и данные моделирования для распределения температуры в миокарде и коронарных сосудах [4], позволяет реализовать неинвазивный метод контроля температуры и теплового потока через поверхность миокарда в условиях искусственного кровообращения.

Метод определения питательного кровоснабжения сердца. Характер распределения температуры в миокарде и коронарных сосудах существенно зависит от скорости изменения температуры в тканях миокарда при гипотермии и гипертермии. Поэтому, для определения градиентов температур в условиях искусственного кровообращения необходимо контролировать перепад температур между коронарными сосудами и миокардом. Скорость изменения температуры в среде (миокарде) характеризует коэффициент температуропроводности [5]:

$$\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \rho},$$

где λ – коэффициент теплопроводности миокарда, $Вт/(м \cdot К)$, ρ – плотность тканей миокарда, $кг/м^3$, c – удельная теплоемкость миокарда, $Дж/(кг \cdot К)$.

Перепад температуры на расстоянии δ от стенки сосуда можно найти из уравнения для количества тепла Q_m , которое передается в миокард через поверхность сосуда площадью S за промежуток времени τ :

$$Q_m = q \cdot S \cdot \tau = \frac{\lambda}{\delta} (T_c - T_m) \cdot S_c \cdot \tau,$$

где q – плотность теплового потока через поверхность сосуда, $Вт/м^2$, S_c – площадь поверхности сосуда, $м^2$, δ – расстояние от стенки сосуда, $м$, T_c – температура крови в сосуде, $^{\circ}C$, T_m – температура тканей миокарда, $^{\circ}C$.

Из уравнения находим перепад температур между сосудом и миокардом:

$$\Delta T = T_c - T_m = \frac{\delta}{\lambda} q.$$

Соотношение δ/λ характеризует тепловую проводимость миокарда, а величина ΔT определяет полный температурный напор из сосудов в миокард. Для текущего температурного напора крови ΔT_i , которая охлаждается или нагревается до температуры T_i , можно записать выражение:

$$\Delta T_i = T_i - T_m = \Delta T - \frac{\Delta T}{\delta} l,$$

где l – расстояние от стенки сосуда, на которое распространяется тепло из сосуда в тело миокарда, m .

Соотношение $\Delta T/\Delta T_i$ представляет собой безразмерную избыточную температуру, которая характеризует распределение температуры из стенки сосуда с кровью в миокард:

$$\theta = \frac{\Delta T}{\Delta T_i} = 1 - \frac{l}{\delta}.$$

Это выражение представляет собой уравнение температурного поля в предположении, что коэффициент теплопроводности λ для миокарда является постоянной величиной. Для определения питательного кровоснабжения сердца по мелким коронарным сосудам целесообразно оценивать изменение величины S_i/S_m , которая представляет отношение прогретой площади миокарда S_i к общей площади поверхности S_m за равные интервалы времени Δt в течение процесса гипертермии:

$$\theta = \frac{\Delta T}{\Delta T_i} = 1 - \frac{S_i}{S_m},$$

где S_m – общая площадь поверхности миокарда, m^2 , S_i – площадь поверхности миокарда, через которую происходит процесс теплообмена m^2 .

При толщине стенок предсердий 2–3 мм и толщине стенок левого желудочка сердца 11–14 мм, который имеет наибольшую толщину миокарда, зависимость коэффициента теплопроводности от температуры $\lambda(T)$ имеет практически линейный характер:

$$\lambda(T) = \lambda_m (1 + bT),$$

где λ_m – значение коэффициента теплопроводности миокарда для температуры $T = 0,0^\circ C$ при охлаждении сердца, $Bm/(m \cdot K)$, b – эмпирический коэффициент температурной кривой $\lambda(T)$.

Для среднеарифметического значения температуры на участке миокард – коронарные сосуды выражение для коэффициента теплопроводности принимает вид:

$$\lambda(T) = \lambda_m \left[1 + \frac{b}{2} (T_c - T_m) \right] = \lambda_m \left[1 + \frac{b}{2} \Delta T \right].$$

В этом случае выражение для плотности теплового потока q на поверхности миокарда имеет следующий вид:

$$q = \frac{\lambda(T)}{\delta} (T_c - T_m) = \frac{\lambda_m}{\delta} (T_c - T_m) \left[1 + \frac{b}{2} (T_c - T_m) \right].$$

Из этого уравнения находим, что перепад температур ΔT в слое миокарда является нелинейной функцией даже при линейной зависимости коэффициента теплопроводности миокарда $\lambda(T)$:

$$\Delta T = \sqrt{\frac{1}{b^2} - \frac{2\delta}{b} \frac{q}{\lambda_m}} - \frac{1}{b}.$$

Если тепловой поток от сосудов передается миокарду за счет теплоотдачи от крови в сосудах, то удельный тепловой поток определяется из закона Ньютона-Рихмана:

$$q = \frac{\lambda(T)}{\delta} (T_c - T_m) = \alpha_c (T_i - T_m),$$

где α_c – значение коэффициента температуропроводности крови в сосудах.

Подставляя значение теплового потока в выражение для температурного поля, получим зависимость для соотношения S_i/S_m :

$$\frac{S_i}{S_m} = 1 - \frac{\Delta T}{\Delta T_i} = 1 + \frac{1}{b \Delta T_i} - \sqrt{\left(\frac{1}{b \Delta T_i} \right)^2 - \frac{2\delta}{b} \frac{\alpha_c}{\lambda_m \Delta T_i}}.$$

Безразмерная величина $F = \frac{S_i}{S_m}$ определяется

скоростью изменения температуры крови в сосудах – температуропроводностью крови α_c , теплопроводностью миокарда λ_m , разницей температур между кровью и миокардом ΔT_i , а также знаком и численным значением коэффициента b для температурной кривой. Отклонение значений соотношения F от линейной зависимости уравнения температурного поля θ , характеризует неравномерность распределения температуры в миокарде вследствие различной скорости распространения тепла в среде (рис. 1).

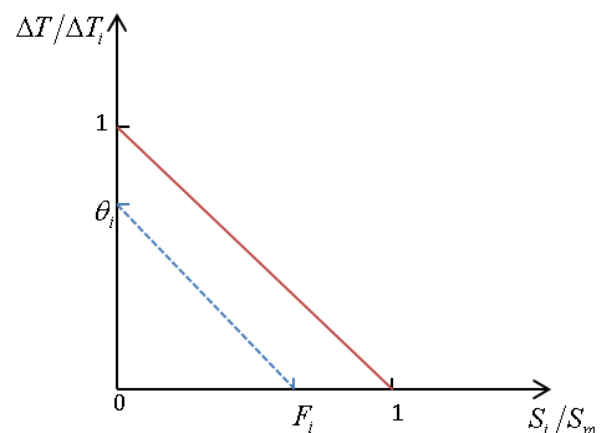


Рис. 1. Кривые распределения температуры в слое миокарда для уравнения температурного поля

Относительное отклонение Δ_F от линейной зависимости температурного поля для текущего температурного напора вычисляется как разница площадей под кривыми распределения температур [7]:

$$\Delta_F = (1 - F_i \cdot \theta_i) < 1.$$

где θ_i – текущее значение соотношения $\Delta T/\Delta T_i$, F_i – текущее значение соотношения S_i/S_m .

Очевидно, что при прочих равных условиях температура в миокарде ΔT_i меняется тем быстрее, чем выше плотность теплового потока через поверхность S_i , и следовательно величина F_i должна приближаться к значению $F_i \rightarrow 1$. Кривые распределения температуры в слое миокарда позволяют определить пло-

щадь участка миокарда S_i , через которую происходит наиболее выраженный процесс теплообмена, а также вычислить безразмерную величину $F = S_i/S_o$, которая показывает изменение площади теплообмена относительно общей площади поверхности миокарда S_o в процессе переноса тепла [8].

Апробация термографического метода контроля температуры сердца. Эффективность применения метода неинвазивного контроля температуры сердца для оценки состояния коронарных сосудов миокарда показывают экспериментальные исследования на изолированном сердце свиньи (рис. 2).

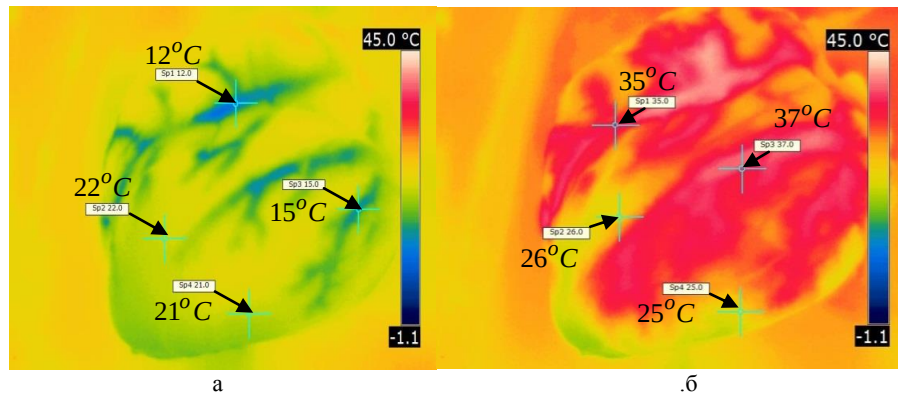


Рис. 2. Применение термографического метода контроля температуры для изолированного сердца свиньи: а – при согревании; б – при охлаждении

В экспериментальных исследованиях выполнена имитация согревания и охлаждения миокарда через канюли, которые установлены в начальный отдел аорты в области верхушки сердца [6]. Для прокачки кардиоплегического раствора по правой коронарной артерии канюли установлены в ветвь правой венечной артерии, а для прокачки раствора по левой коронарной артерии канюли установлены у поверхности лувовицы аорты. При охлаждении сердца отчетливо выделяется коронарное русло при градиенте температур между тканями миокарда и раствором 6°C и более (до температуры 10°C). Соответственно, при согревании

сердца коронарное русло выделяется при градиенте температур 9°C и более (до температуры 12°C) [9]. Исходная температура миокарда в начале процесса охлаждения была не менее $21\text{--}22^{\circ}\text{C}$ и в начале согревания – не более $25\text{--}26^{\circ}\text{C}$.

Клиническое применение термографического метода контроля температуры. Оценку скорости изменения температуры для распределения температуры в миокарде можно выполнить для последовательности термограмм сердца, которые выполнены для состояния гипотермии и гипертермии в условиях искусственного кровообращения (рис. 3).

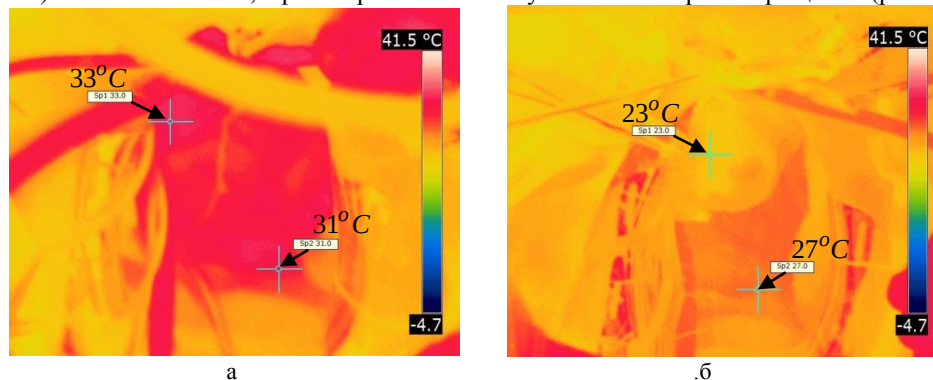


Рис. 3. Последовательность термограмм сердца человека для состояния гипотермии и гипертермии: а – начало охлаждения; б – в процессе охлаждения

Применение разработанной математической модели теплообмена для поверхностного слоя миокарда [4] позволяет определить границы между прогретыми и охлажденными участками миокарда при проведении гипотермии или гипертермии сердца. На завершающей стадии процессов гипотермии и гипертермии величина $F_{гипо} = S_{гипо}/S_o$ меньше в 1,3 раза значения $F_{гипер} = S_{гипер}/S_o$, соответственно, что практически выражается в более равномерном прогревании исследуемого участка сердца при гипертермии по сравнению с процессом его охлаждения при гипотермии в условиях ис-

кусственного кровообращения [10].

Выводы. Метод неинвазивного контроля температуры и последующий анализ градиентов температуры позволяет выделить области на поверхности миокарда, в которых изменение температуры значительно отстает от средней температуры на поверхности при согревании или охлаждении сердца. Оценка скорости распространения тепла в миокарде, которая выполняется для временных интервалов, за которые сердце охлаждается или согревается, косвенно позволяет оценивать состояние мелких коронарных сосудов в миокарде.

Список літератури:

1. Ghosh, S. Cardiopulmonary Bypass [Text] / S. Ghosh, F. Falter, D. J. Cook. – New York: Cambridge University Press, 2009. – 207 p. doi: [10.1017/cbo9780511635564](https://doi.org/10.1017/cbo9780511635564).
2. Shlykov, V. The Model of the Myocardium in the MSC Sinda System [Text] / V. Shlykov, V. Danilova, V. Maksymenko // Cardiology and Cardiovascular Research. – 2017. – Vol. 1, Issue 1. – P. 18–22.
3. Пат. № 118184. Світлосильний атермалізований об'єктив для інфрачервоної області спектра [Текст] / Муравйов О. В., Назарчук О. О., Шликов В. В., Максименко В. В. – № u201701404; заявл. 14.02.2017; опубл. 25.07.2017, Бюл. № 14.
4. Maksymenko, V. B. The Discrete Model for the System of the Myocardium and Coronary Vessels [Text] / V. B. Maksymenko, V. A. Danilova, V. V. Shlykov // Research Bulletin of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". – 2017. – Issue 1. – P. 54–60. doi: [10.20535/1810-0546.2017.1.90044](https://doi.org/10.20535/1810-0546.2017.1.90044).
5. Лобасова, М. С. Тепломассообмен: курс лекций [Текст] / М. С. Лобасова, К. А. Финников, Т. А. Миловидова и др. – Красноярск: ИПК СФУ, 2009. – 295 с.
6. Локин, Л. С. Искусственное и вспомогательное кровообращение в сердечно-сосудистой хирургии [Текст]: практ. пос. / Л. С. Локин, Г. О. Лурье, И. И. Деметр'ева. – М.: Научный центр хирургии, Российская академия медицинских наук, 1998. – 93 с.
7. Sonka, M. Image Processing. Analysis and Machine Vision [Text] / M. Sonka, V. Hlavac, R. Boyle. – Thomson, 2008. – 866 p.
8. Moin, P. Fundamentals of Engineering Numerical Analysis [Text] / P. Moin. – 2nd ed. – Cambridge University Press, 2010. doi: [10.1017/cbo9780511781438](https://doi.org/10.1017/cbo9780511781438).
9. Ткаченко, Ю. А. Клиническая термография (обзор основных возможностей) [Текст] / Ю. А. Ткаченко, М. В. Голованова, А. М. Овечкин. – Ростов на Дону, 1999. – 274 с.
10. Khudetskyy, I. U. Use of Thermal Imaging for Control of the Process Hypothermia Cardiac [Text] / I. U. Khudetskyy, V. A. Danilova, V. V. Shlykov // The Polish Journal of Applied Sciences. – 2015. – P. 93–96.

Bibliography (transliterated):

1. Ghosh, S., Falter, F., Cook, D. J. (2009). Cardiopulmonary Bypass. New York: Cambridge University Press, 207. doi: [10.1017/cbo9780511635564](https://doi.org/10.1017/cbo9780511635564).
2. Shlykov, V., Danilova, V., Maksymenko, V. (2017). The Model of the Myocardium in the MSC Sinda System. Cardiology and Cardiovascular Research, 1 (1), 18–22.
3. Muraviov, O. V., Nazarchuk, O. O., Shlykov, V. V., Maksymenko, V. B. (2017). Pat. No. 118184. Lightweight antermalized lens for the infrared spectrum. No. u201701404; declared: 14.02.2017; published: 25.07.2017, Bul. No. 14.
4. Maksymenko, V. B., Danilova, V. A., Shlykov, V. V. (2017). The Discrete Model for the System of the Myocardium and Coronary Vessels. Research Bulletin of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", 1, 54–60. doi: [10.20535/1810-0546.2017.1.90044](https://doi.org/10.20535/1810-0546.2017.1.90044).
5. Lobasova, M. S., Fynnykov, K. A., Mylovydova, T. A. et al. (2009). Heat and Mass Transfer: lectures. Krasnoyarsk: IPK SFU, 295.
6. Lokshin, L. S., Lur'e, G. O., Dement'eva, I. I. (1998). Artificial and auxiliary blood circulation in cardiovascular surgery. Moscow: Nauchnyy tsentr hirurgii, Rossiyskaya akademiya meditsinskih nauk, 93.
7. Sonka, M., Hlavac, V., Boyle, R. (2008). Image Processing. Analysis and Machine Vision. Thomson, 866.
8. Moin, P. (2010). Fundamentals of Engineering Numerical Analysis. Cambridge University Press. doi: [10.1017/cbo9780511781438](https://doi.org/10.1017/cbo9780511781438).
9. Tkachenko, Yu. A., Golovanova, M. V., Ovechkin, A. M. (1999). Clinical thermography (review of main features). Rostov na Donu, 274.
10. Khudetskyy, I. U., Danilova, V. A., Shlykov, V. V. (2015). Use of Thermal Imaging for Control of the Process Hypothermia Cardiac. The Polish Journal of Applied Sciences, 93–96.

Поступила (received) 28.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Клиническое применение термографического метода контроля температуры сердца/ Шлыков В. В., Данилова В. А. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 33(1255). – С.35–38. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Клінічне застосування термографічного методу контролю температури серця/ Шликов В. В., Данилова В. А. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 33(1255). – С.35–38 – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Clinical application of the thermographic method of monitoring heart temperature/ Shlykov V., Danilova V. //Bulletin of NTU "KhPI". Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – № 33 (1255).– P. 35–38.– Bibliogr.:10. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шликов Владислав Валентинович – кандидат технічних наук, доцент кафедри біомедичної інженерії ФБМІ, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056; e-mail: v.shlykov@kpi.ua.

Данилова Валентина Анатоліївна – асистент кафедри біомедичної інженерії ФБМІ, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056; e-mail: valnaa@ukr.net.

Шлыков Владислав Валентинович – кандидат технических наук, доцент кафедры биомедицинской инженерии ФБМИ, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», пр. Победы, 37, Киев, Украина, 03056, e-mail: v.shlykov@kpi.ua.

Данилова Валентина Анатольевна – ассистент кафедры биомедицинской инженерии ФБМИ, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», проспект Победы, 37, Киев, Украина, 03056, e-mail: valnaa@ukr.net.

Shlykov Vladyslav – PhD, associate Professor of Biomedical Engineering, Department of BME, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Peremogy ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056,

Danilova Valentyna – assistant of Biomedical engineering, Department of BME, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Peremogy ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056, e-mail: valnaa@ukr.net.

УДК 541.182. 183.546.134 551.510

Н. В. ДЕЙНЕКО

АНАЛІЗ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СЕНСОРІВ СУЧАСНИХ ГАЗОАНАЛІЗАТОРІВ

В роботі розглядаються твердотільні газові сенсори, які є складовою сучасного газоаналізатора. За принципом функціонування газові сенсори розділені на кілька основних категорій: електрохімічні, термохімічні (термокаталітичні), масочутливі оптичні та напівпровідникові. Наведено переваги використання напівпровідникових сенсорів на основі оксидів. Проведено аналіз напівпровідникових сенсорів для сучасних газоаналізаторів, в основі якого лежить залежність чутливості сенсора від вмісту шкідливого або небезпечного газу, що міститься в повітрі, в обмеженому просторі.

Ключові слова: система моніторингу, газоаналізатор, напівпровідниковий сенсор, оксид металу, чутливість сенсора, газові домішки.

В работе рассматриваются твердотельные газовые сенсоры, которые являются составляющей современного газоанализатора. По принципу функционирования газовые сенсоры разделены на несколько основных категорий: электрохимические, термохимические (термокаталитические), масочувствительные оптические и полупроводниковые. Приведены преимущества использования полупроводниковых сенсоров на основе оксидов. Проведен анализ полупроводниковых сенсоров для современных газоанализаторов, в основе которого лежит зависимость чувствительности сенсора от содержания вредного или опасного газа, содержащегося в воздухе, в ограниченном пространстве.

Ключевые слова: система мониторинга, газоанализатор, полупроводниковый сенсор, оксид металла, чувствительность сенсора, газовые примеси

The paper deals with solid-state gas sensors, which are a component of a modern gas analyzer. The effectiveness of the emergency monitoring system is largely determined by the perfection of the technical characteristics of the primary information sensors to which the gas analyzer belongs. According to the principle of operation, gas sensors are divided into several main categories: electrochemical, thermo chemical (thermo catalytic), sensitive, optical and semiconductor. Advantages of using semiconductor sensors based on oxides are given. The analysis of semiconductor sensors for modern gas analyzers is based on the dependence of the sensor sensitivity on the content of harmful or dangerous gas contained in the air in a confined space. The multifunctional properties of nanostructure semiconductors make it possible to consider them as an excellent material for manufacturing highly sensitive and selective gas sensors.

Key words: monitoring system, gas analyzer, semiconductor sensor, metal oxide, sensor sensitivity, gas impurities.

Вступ. Ефективна система моніторингу надзвичайних ситуацій є невід'ємною складовою державної політики у сфері цивільного захисту, спрямованої на забезпечення конституційного права громадян на безпечне середовище існування. Системи моніторингу надзвичайних ситуацій включають три підсистеми, одна з яких забезпечує збір, обробку та зберігання інформації про надзвичайні ситуації. Ефективність функціонування системи моніторингу надзвичайних ситуацій багато в чому визначається досконалістю технічних характеристик датчиків первинної інформації, які також є складовою автоматизованої системи раннього виявлення загрози виникнення надзвичайних ситуацій та оповіщення населення [1]. Однією з проблем сучасних датчиків первинної інформації є низка чутливість до шкідливих та небезпечних газів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Газоаналізатор – прилад для визначення якісного і кількісного складу сумішей газів. Їх розділяють на 3 види: індикатори, сигналізатори і безпосередньо газоаналізатори. Індикатори дають якісну оцінку газової суміші за наявністю контрольованого компонента і, як правило, відображають інформацію за допомогою лінійки із декількох точкових індикаторів. Сигналізатори також дають приблизну оцінку концентрації контрольованого компоненту, але при цьому мають один або декілька порогів сигналізації. При досягненні концентрацією порогового значення, спрацьовують елементи сигналізації. І безпосередньо газоаналізатори. Робота газоаналізатора ґрунтується на вимірюванні фізичних, фізико-хімічних характеристик газової суміші або її окремих компонентів (табл. 1).

Таблиця 1 – Характеристика сенсорів для сучасних газоаналізаторів

№ з/п	Тип сенсора	Принцип дії	Недоліки
1	Електрохімічний	Принцип дії заснований на залежності потенціалів електродів, поміщених в досліджувану середу, величини струму, що протікає через неї, або її електропровідності (опору) від кількості аналіту, що міститься в ній [6].	– неповна селективність до вимірюваного компоненту; – зменшення чутливості з часом
2	Термохімічний	Принцип дії заснований на вимірі корисного теплового ефекту хімічної реакції аналізованого компоненту [7]	– обмежений термін служби; – зменшення чутливості з часом
3	Масочутливий	Принцип дії заснований на зміні резонансної частоти при зміні маси п'єзоелектричного покриття датчика, що виникає за рахунок поглинання газу [8]	– низька чутливість – обмежений термін служби;
4	Оптичний	Принцип дії заснований на зміні оптичних властивостей газової суміші (переломлення, поглинання, випромінювання) [9]	– висока селективна чутливість до світлових перешкод; – схильність до впливу температури; – висока вартість
5	Напівпровідникові	Принцип дії заснований на зміні електрофізичних властивостей чутливого шару напівпровідникового зразка при зміні складу аналізованого газового середовища [10]	– низька селективність до вимірюваного компоненту

© Н. В. Дейнеко. 2017

Твердотільні газові сенсори, які є складовою сучасного газоаналізатора знайшли широке застосування в якості ефективних інструментів моніторингу шкідливих та небезпечних для життя концентрацій токсичних речовин, вибухонебезпечних газів і парів, а також кисню, що містяться в повітрі, в обмеженому просторі [2-5].

За принципом функціонування відомі газові сенсори можуть бути розділені на кілька основних категорій: електрохімічні, термохімічні (термокаталітичні), масочутливі оптичні та напівпровідникові.

Аналіз наведеної у табл. 1 інформації демонструє переваги використання в сучасних газоаналізаторах напівпровідникових сенсорів. Оскільки вони мають найменшу кількість недоліків у порівнянні з іншими.

Постановка завдання та його вирішення. Метою роботи є проведення аналізу стану розвитку напівпровідникових сенсорів для сучасних газоаналізаторів.

Серед більшості газоаналізаторів найбільше поширення отримали напівпровідникові оксиди металів такі, як ZnO [11], SnO₂ [12], WO₃ [13], CuO [14], Fe₂O₃ [15], In₂O₃ [16], CdO [17], TeO₂ [18] і MoO₃ [19].

Чутливість газових сенсорів на основі напівпровідників, визначається зміною числа носіїв заряду в зоні провідності, що відбувається в процесах адсорбції і десорбції молекул газу. Дійсно, електрони провідності з'являються при тепловій іонізації структурних дефектів, енергетичні рівні яких лежать поблизу дна зони провідності напівпровідника. При цьому виникає зміна концентрації носіїв заряду. Атоми кисню, що утворилися в результаті дісоціативної адсорбції молекул кисню, захоплюють електрони з зони провідності напівпровідника і зменшують його провідність. При адсорбції молекул аналізованого газу відбувається взаємодія цих молекул з негативними іонами кисню з утворенням нейтральних молекул і електронів, які потрапляють в зону провідності.

Залежно від типу домішок (донори або акцептори), що визначаються і типу провідності напівпровідника (n- або p-тип) опір чутливого шару сенсора збільшується або зменшується. При адсорбції акцепторних частинок (O₂) на поверхні напівпровідника з провідністю n-типу опір чутливого шару збільшується (акцепторний сигнал), а при адсорбції донорних частинок (H₂) – зменшується (донорний сигнал).

Залежність сигналу напівпровідникового сенсора від вмісту шкідливих або небезпечних газів, як правило, нелінійна, її апроксимують поліномом або степеневою функцією виду:

$$\frac{R}{R_0} = K \cdot C^x, \text{ для } C > 1,$$

де R – стаціонарний рівень сигналу сенсора в присутності домішок, R_0 – сигнал сенсора за відсутності домішок, C – вміст газової домішки в повітрі, ppm, K , (ppm)^{-x} і x (безрозмірна величина) – постійні, які залежать від природи газу і природи чутливого шару сенсора.

Аналіз представлених у табл. 2 даних показує наступне. Параметри x і K напівпровідникового сенсора від змісту домішок, отримані за даними різних авторів для сенсорів одного хімічного складу і для одного і того ж газу, істотно розрізняються.

Така відмінність пов'язана із залежністю параметрів чутливого шару сенсора від способу його виготовлення. Найбільшу чутливість в широкому інтервалі концентрацій напівпровідникові сенсори різного хімічного складу виявляють до озону. Висока чутливість до озону при низьких концентраціях спостерігається у сенсора на основі ZnO. Крім того сенсор на основі ZnO має чутливість до декількох газів одночасно.

Таблиця 2 – Параметри рівняння залежності сигналу сенсора від вмісту в повітрі O₃, NO₂, ClO₂, CO₂, NH₃,

№ з/п	Газ	Сенсор	K, (ppm) ^{-x}	x
1	O ₃	WO ₃	444,8	0,89
		In ₂ O ₃ :Fe	41,1	0,39
		In ₂ O ₃ : Fe ₂ O ₃	37,5	0,41
2	NO ₂	WO ₃	6,7	0,3
		In ₂ O ₃	13,19	2,6
		MoO ₃ :In ₂ O ₃ :	15,62	0,71
		SnO ₂	18,0	0,75
		ZnO	2,0	0,7
3	ClO ₂	In ₂ O ₃ : Fe ₂ O ₃	25,9	0,75
4	CO ₂	In ₂ O ₃ : Fe ₂ O ₃	8,5	0,6
		In ₂ O ₃ :Fe	3,3	0,29
5	NH ₃	ZnO	5,5	0,2

Висновки. В роботі проведено аналіз напівпровідникових сенсорів для сучасних газоаналізаторів. Розглянуто чутливість напівпровідникових сенсорів різного хімічного складу до шкідливих та небезпечних газів. Висока чутливість до озону найбільш виражена для сенсорів на основі ZnO. Крім того сенсор на основі ZnO має чутливість до декількох газів одночасно. Таким чином створення газоаналізаторів на основі ZnO є перспективним напрямком для проведення подальших досліджень.

Список літератури:

- ДБН В.2.5-76:2014. Автоматизовані системи раннього виявлення загрози виникнення надзвичайних ситуацій та оповіщення населення [Текст]. – Державні Будівельні Норми, 2014.
- Kobrinisky, V. Tunable gas sensing properties of p- and n-doped ZnO thin films [Text] / V. Kobrinisky, E. Fradkin, V. Lumelsky, A. Rothschild, Y. Komem, Y. Lifshitz // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2010. – Vol. 148, Issue 2. – P. 379–387. doi: [10.1016/j.snb.2010.05.025](https://doi.org/10.1016/j.snb.2010.05.025)
- Петров, В. В. Исследование физико-химических и электрофизических свойств, газочувствительных характеристик наноконструктивных пленок состава SiO₂-SnO_x-CuO_y [Текст] / В. В. Петров, Т. Н. Назарова, Н. Ф. Копылова, О. В. Заблуда, И. Кисилев, М. Брунс // Нано- и микросистемная техника. – 2010. – № 8. – С. 15–21.
- Петров, В. В. Формирование тонких газочувствительных оксидных пленок смешанного состава, легированных серебром [Текст] / В. В. Петров, Т. Н. Назарова, А. Н. Королев, А. Т. Козаков, Н. К. Плуготаренко // Физика и химия обработки материалов. – 2005. – № 3. – С. 58–62.
- Аль-Хадрами, И. С. Исследование газочувствительных свойств медьсодержащего полиакрилонитрила [Текст] / И. С. Аль-Хадрами, А. Н. Королев, Т. В. Семенистая, Т. Н. Назарова, В. В. Петров // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2008. – № 1. – С. 20–25.

6. Химические сенсоры [Электронный ресурс]. – ЗАО «Экологические сенсоры и системы». – Режим доступа: <http://www.eksis.ru/>
7. Перегуд, Е. А. Быстрые методы определения вредных веществ в воздухе [Текст] / Е. А. Перегуд, М. С. Быховская, Е. В. Гернет. – 2-е изд., доп. и испр. – Москва: Изд-во «Химия», 1970. – 142 с.
8. Litovchenko, V. G. Investigation of MIS gas sensitive structures with Pd and Pd/Cu metal layers [Text] / V. G. Litovchenko, T. I. Gorbanyuk, A. A. Efremov, A. A. Evtukh, D. Schipanski // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 1999. – Vol. 74, Issue 1-3. – P. 233–236. doi: [10.1016/S0924-4247\(98\)00314-8](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(98)00314-8)
9. Tang, D. L. Optical H₂S Gas sensor based on spectrum-absorption [Text] / D. L. Tang, Y. Wang, F. Guo, D. Zhao // *Chinese Journal of Sensors and Actuators*. – 2005. – Vol. 23. – P. 458–460.
10. Seiyama, T. A New Detector for Gaseous Components Using Semiconductive Thin Films [Text] / T. Seiyama, A. Kato, K. Fujiishi, M. Nagatani // *Analytical Chemistry*. – 1962. – Vol. 34, Issue 11. – P. 1502–1503. doi: [10.1021/ac60191a001](https://doi.org/10.1021/ac60191a001)
11. Liao, L. Size Dependence of Gas Sensitivity of ZnO Nanorods [Text] / L. Liao, H. B. Lu, J. C. Li, H. He, D. F. Wang, D. J. Fu et. al. // *The Journal of Physical Chemistry C*. – 2007. – Vol. 111, Issue 5. – P. 1900–1903. doi: [10.1021/jp065963k](https://doi.org/10.1021/jp065963k)
12. Choi, Y.-J. Novel fabrication of an SnO₂ nanowire gas sensor with high sensitivity [Text] / Y.-J. Choi, I.-S. Hwang, J.-G. Park, K. J. Choi, J.-H. Park, J.-H. Lee // *Nanotechnology*. – 2008. – Vol. 19, Issue 9. – P. 095508. doi: [10.1088/0957-4484/19/9/095508](https://doi.org/10.1088/0957-4484/19/9/095508)
13. Rout, C. S. Room temperature hydrogen and hydrocarbon sensors based on single nanowires of metal oxides [Text] / C. S. Rout, G. U. Kulkarni, C. N. R. Rao // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2007. – Vol. 40, Issue 9. – P. 2777–2782. doi: [10.1088/0022-3727/40/9/016](https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/9/016)
14. Gou, X. Chemical synthesis, characterisation and gas sensing performance of copper oxide nanoribbons [Text] / X. Gou, G. Wang, J. Yang, J. Park, D. Wexler // *Journal of Materials Chemistry*. – 2008. – Vol. 18, Issue 9. – P. 965. doi: [10.1039/b716745h](https://doi.org/10.1039/b716745h)
15. Hao, Q. Anomalous conductivity-type transition sensing behaviors of n-type porous α -Fe₂O₃ nanostructures toward H₂S [Text] / Q. Hao, L. Li, X. Yin, S. Liu, Q. Li, T. Wang // *Materials Science and Engineering: B*. – 2011. – Vol. 176, Issue 7. – P. 600–605. doi: [10.1016/j.mseb.2011.02.002](https://doi.org/10.1016/j.mseb.2011.02.002)
16. Zheng, W. A highly sensitive and fast-responding sensor based on electrospun In₂O₃ nanofibers [Text] / W. Zheng, X. Lu, W. Wang, Z. Li, H. Zhang, Y. Wang, Z. Wang, C. Wang // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2009. – Vol. 142, Issue 1. – P. 61–65. doi: [10.1016/j.snb.2009.07.031](https://doi.org/10.1016/j.snb.2009.07.031)
17. Guo, Z. Highly porous CdO nanowires: preparation based on hydroxy- and carbonate-containing cadmium compound precursor nanowires, gas sensing and optical properties [Text] / Z. Guo, M. Li, J. Liu // *Nanotechnology*. – 2008. – Vol. 19, Issue 24. – P. 245611. doi: [10.1088/0957-4484/19/24/245611](https://doi.org/10.1088/0957-4484/19/24/245611)
18. Liu, Z. Room temperature gas sensing of p-type TeO₂ nanowires [Text] / Z. Liu, T. Yamazaki, Y. Shen, T. Kikuta, N. Nakatani, T. Kawabata // *Applied Physics Letters*. – 2007. – Vol. 90, Issue 17. – P. 173119. doi: [10.1063/1.2732818](https://doi.org/10.1063/1.2732818)
19. Rahmani, M. B. Gas sensing properties of thermally evaporated lamellar MoO₃ [Text] / M. B. Rahmani, S. H. Keshmiri, J. Yu, A. Z. Sadek, L. Al-Mashat, A. Moafi et. al. // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2010. – Vol. 145, Issue 1. – P. 13–19. doi: [10.1016/j.snb.2009.11.007](https://doi.org/10.1016/j.snb.2009.11.007)

Bibliography (transliterated):

1. DBN V.2.5-76:2014. Avtomatyzovani systemy rannoho vyvaylennia zahrozy vynyknennia nadzvychainykh sytuatsiy ta opovishchennia naselennia (2014). Derzhavni Budivelni Normy.
2. Kobrinsky, V., Fradkin, E., Lumelsky, V., Rothschild, A., Komem, Y., Lifshitz, Y. (2010). Tunable gas sensing properties of p- and n-doped ZnO thin films. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 148 (2), 379–387. doi: [10.1016/j.snb.2010.05.025](https://doi.org/10.1016/j.snb.2010.05.025)
3. Petkov, V. V., Nazapova, T. N., Kopylova, N. F., Zabluda, O. V., Kisilev, I., Bpuns, M. (2010). Issledovanie fiziko-himicheskikh i elektrofizicheskikh svoystv, gazochuvstvitel'nykh hapaktepistik nanokompozitnykh plenok sostava SiO₂-SnOX-CuOY. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 8, 15–21.
4. Petrov, V. V., Nazarova, T. N., Korolev, A. N., Kozakov, A. T., Plugotarenko, N. K. (2005). Formirovanie tonkih gazochuvstvitel'nykh oksidnykh plenok smeshannogo sostava, legirovannykh serebrom. *Fizika i himiya obrabotki materialov*, 3, 58–62.
5. Al'-Hadrami, I. S., Korolev, A. N., Semenistaya, T. V., Nazarova, T. N., Petrov, V. V. (2008). Issledovanie gazochuvstvitel'nykh svoystv med'soderzhashchego poliakrilonitrila. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika*, 1, 20–25.
6. Himicheskie sensory. ZAO «Ekologicheskie sensory i sistemy». Available at: <http://www.eksis.ru/>
7. Peregud, E. A., Byhovskaya, M. S., Gernet, E. V. (1970). Bystrye metody opredeleniya vrednykh veshchestv v vozduhe. Moscow: Izd-vo «Himiya», 142.
8. Litovchenko, V. G., Gorbanyuk, T. I., Efremov, A. A., Evtukh, A. A., Schipanski, D. (1999). Investigation of MIS gas sensitive structures with Pd and Pd/Cu metal layers. *Sensors and Actuators A: Physical*, 74 (1-3), 233–236. doi: [10.1016/S0924-4247\(98\)00314-8](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(98)00314-8)
9. Tang, D. L., Wang, Y., Guo, F., Zhao, D. (2005). Optical H₂S Gas sensor based on spectrum-absorption. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 23, 458–460.
10. Seiyama, T., Kato, A., Fujiishi, K., Nagatani, M. (1962). A New Detector for Gaseous Components Using Semiconductive Thin Films. *Analytical Chemistry*, 34 (11), 1502–1503. doi: [10.1021/ac60191a001](https://doi.org/10.1021/ac60191a001)
11. Liao, L., Lu, H. B., Li, J. C., He, H., Wang, D. F., Fu, D. J. et. al. (2007). Size Dependence of Gas Sensitivity of ZnO Nanorods. *The Journal of Physical Chemistry C*, 111 (5), 1900–1903. doi: [10.1021/jp065963k](https://doi.org/10.1021/jp065963k)
12. Choi, Y.-J., Hwang, I.-S., Park, J.-G., Choi, K. J., Park, J.-H., Lee, J.-H. (2008). Novel fabrication of an SnO₂ nanowire gas sensor with high sensitivity. *Nanotechnology*, 19 (9), 095508. doi: [10.1088/0957-4484/19/9/095508](https://doi.org/10.1088/0957-4484/19/9/095508)
13. Rout, C. S., Kulkarni, G. U., Rao, C. N. R. (2007). Room temperature hydrogen and hydrocarbon sensors based on single nanowires of metal oxides. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40 (9), 2777–2782. doi: [10.1088/0022-3727/40/9/016](https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/9/016)
14. Gou, X., Wang, G., Yang, J., Park, J., Wexler, D. (2008). Chemical synthesis, characterisation and gas sensing performance of copper oxide nanoribbons. *Journal of Materials Chemistry*, 18 (9), 965. doi: [10.1039/b716745h](https://doi.org/10.1039/b716745h)
15. Hao, Q., Li, L., Yin, X., Liu, S., Li, Q., Wang, T. (2011). Anomalous conductivity-type transition sensing behaviors of n-type porous α -Fe₂O₃ nanostructures toward H₂S. *Materials Science and Engineering: B*, 176 (7), 600–605. doi: [10.1016/j.mseb.2011.02.002](https://doi.org/10.1016/j.mseb.2011.02.002)
16. Zheng, W., Lu, X., Wang, W., Li, Z., Zhang, H., Wang, Y., Wang, Z., Wang, C. (2009). A highly sensitive and fast-responding sensor based on electrospun In₂O₃ nanofibers. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 142 (1), 61–65. doi: [10.1016/j.snb.2009.07.031](https://doi.org/10.1016/j.snb.2009.07.031)
17. Guo, Z., Li, M., Liu, J. (2008). Highly porous CdO nanowires: preparation based on hydroxy- and carbonate-containing cadmium compound precursor nanowires, gas sensing and optical properties. *Nanotechnology*, 19 (24), 245611. doi: [10.1088/0957-4484/19/24/245611](https://doi.org/10.1088/0957-4484/19/24/245611)
18. Liu, Z., Yamazaki, T., Shen, Y., Kikuta, T., Nakatani, N., Kawabata, T. (2007). Room temperature gas sensing of p-type TeO₂ nanowires. *Applied Physics Letters*, 90 (17), 173119. doi: [10.1063/1.2732818](https://doi.org/10.1063/1.2732818)
19. Rahmani, M. B., Keshmiri, S. H., Yu, J., Sadek, A. Z., Al-Mashat, L., Moafi, A. et. al. (2010). Gas sensing properties of thermally evaporated lamellar MoO₃. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 145 (1), 13–19. doi: [10.1016/j.snb.2009.11.007](https://doi.org/10.1016/j.snb.2009.11.007)

Надійшла (received) 11.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Аналіз напівпровідникових сенсорів сучасних газоаналізаторів/ Дейнеко Н. В. // Вісник НТУ «ХП».

Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 33(1255). – С. 39–42. – Бібліогр.: 19 назв. – ISSN 2079-5459.

Анализ полупроводниковых сенсоров современных газоанализаторов/ Дейнеко Н. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 33(1255). – С. 39–42. – Бібліогр.: 19 назв. – ISSN 2079-5459.

Analysis of semiconductor sensors of modern gas analyzers/ Deyneko N. // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 33 (1255). – P. 39–42. – Bibliogr.: 19. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Дейнеко Наталя Вікторівна – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник наукового відділу з проблем цивільного захисту та техногенно-екологічної безпеки науково-дослідного центру, Національний університет цивільного захисту України, вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023; e-mail: natalyadeyneko@gmail.com.

Дейнеко Наталья Викторовна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник научного отдела по проблемам гражданской защиты и техногенно-экологической безопасности научно-исследовательского центра, Национальный университет гражданской защиты Украины, ул. Чернышевская, 94, г. Харьков, Украина, 61023; e-mail: natalyadeyneko@gmail.com.

Deyneko Natalia – PhD, Senior Researcher of the Scientific Division for Civil Defense Issues and Technogenic and Environmental Safety Research Center, National University of Civil Protection of Ukraine, Chernyshevskaya, 94, Kharkiv, Ukraine, 61023; e-mail: natalyadeyneko@gmail.com.

УДК 621.391

Я. Ю. ДОРОГИЙ

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ТА ОБГРУНТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ КРИТИЧНОЇ ІТ-ІНФРАСТРУКТУРИ

Розглядаються підходи до обґрунтування проектних рішень щодо архітектури критичної ІТ-інфраструктури. Проведено детальний порівняльний аналіз основних підходів, що використовуються для проектування архітектури на базі запропонованих критеріїв порівняння. Визначені їх основні недоліки та переваги, перевірена можливість використання даних підходів при проектуванні критичної ІТ-інфраструктури. Зроблено висновок про необхідність створення нового підходу до обґрунтування проектних рішень щодо архітектури критичної ІТ-інфраструктури через неможливість застосування розглянутих методів та підходів.

Ключові слова: архітектура підприємства, критична ІТ-інфраструктура, компаративний аналіз, ADDT, V&B, AREL, QOC, IBIS.

Рассматриваются подходы к обоснованию проектных решений по архитектуре критической ИТ-инфраструктуры. Проведен детальный сравнительный анализ основных подходов, используемых для проектирования архитектуры на базе предложенных критериев сравнения. Определены их основные недостатки и преимущества, проверена возможность использования данных подходов при проектировании критической ИТ-инфраструктуры. Сделан вывод о необходимости создания нового подхода к обоснованию проектных решений по архитектуре критической ИТ-инфраструктуры из-за невозможности применения рассмотренных методов и подходов.

Ключевые слова: архитектура предприятия, критическая ИТ-инфраструктура, компаративный анализ, ADDT, V & B, AREL, QOC, IBIS.

The article deals with issues related to the problem of justification of design decisions regarding the architecture of critical IT infrastructure.

The result of the study is: a comparative analysis of the approaches to justify and present the architecture of the enterprise based on imposed criteria, identification of their disadvantages and advantages, possibility of its using to justify the design of critical IT infrastructure. It is concluded that there is a need to create a new approach to the justification of design solutions for the architecture of critical IT infrastructure due to the impossibility of applying the methods and approaches considered.

As a scientific novelty, for the first time, a detailed comparative analysis of the methods of presentation and justification of design solutions of the enterprise architecture from the point of view of their application for the design of the critical IT infrastructure was considered.

The practical significance of the proposed analysis lies in the fact that it can be used to create rationale model for automated decision support systems for designing and justifying design decisions about the architecture of a critical IT infrastructure, while developing additional tools for architects of critical infrastructure architectures and public critical infrastructure objects.

Keywords: enterprise architecture, critical IT infrastructure, comparative analysis, ADDT, V & B, AREL, QOC, IBIS.

Вступ. Мови представлення архітектури підприємств (АП) розглядаються як інструмент цілісного описування підприємства [1], що пов'язують всі напрямки діяльності організації, які зазвичай розглядаються окремо. Маючи такий опис, можна розглянути загальносистемний вплив змін [2] на всіх рівнях від бізнес-процесів до ІТ [3]. Наприклад, для новоствореного ІТ-застосування мови моделювання АП можуть

бути використані для розгляду впливу на бізнес-процеси, людські ресурси, організаційні цілі тощо.

Хоча мови моделювання АП можуть бути використані для вираження цілісного дизайну організації, вони не надають проектних рішень за отриманими моделями. Ми повинні бути обережними у використанні аналогії, так як досвід у галузі архітектури про

© Я. Ю. Дорогий. 2017

грамного забезпечення показує, що залишення неявним обґрунтування дизайну веде до «випаровування архітектурних знань» [4]. Це означає, що без конструктивного обґрунтування залишаються неявними критерії проектування, причини проектування та альтернативні рішення.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. У результаті недостатньої раціоналізації архітектори не можуть підтвердити якість своїх проєктів. Крім того, нові проєкти не беруть до уваги обмеження, що випливають з попередніх проєктних рішень [5]. Ці обмеження можуть бути бізнесового або технічного характеру, наприклад вибір мови програмування.

Крім того, дослідження серед практиків проектування АП [6] дає вказівки на корисність раціоналізації проектування з метою мотивації проєктних рішень та архітектурного забезпечення. У той же час, однак, дослідження показує, що професіонали часто відмовляються від використання структурованого шаблону/підходу при раціоналізації архітектури, покладаючись, натомість, на фіксацію спеціальної інформації за допомогою таких простих інструментів, як Microsoft Office.

Проте раціоналізаторські підходи з фокусуванням на програмну архітектуру зосереджені на проблемах програмного забезпечення (наприклад, кодова документація). Проте ці проблеми відрізняються від тих, які виникають в корпоративній архітектурі [7] і, особливо, в архітектурі критичних інфраструктур. Архітектори підприємств займаються повним стеком проблем бізнес-ІТ [3]. Наприклад, вони аналізують вплив змін в ІТ-інфраструктурі на бізнес-процеси та навпаки. Таким чином, архітектори підприємств вирішують різні, перехресні організаційні питання, в той час, як програмні архітектори займаються головним чином проблемами програмного забезпечення. Тому завдання полягає в визначенні такого підходу, який би використав переваги цих методів, зневілював їх негативні сторони та надав би можливість досліднику використовувати його при проектуванні критичної ІТ-інфраструктури.

Ціль та мета дослідження. Метою дослідження є визначення основних особливостей підходів до раціоналізації архітектури та можливості їх використання для проектування та обґрунтування проєктних рішень щодо критичної ІТ-інфраструктури.

Задачею дослідження є визначення недоліків основних підходів до раціоналізації архітектури, їх порівняння з точки зору використання як підходу до раціоналізації архітектури критичної ІТ-інфраструктури.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання:

1. Дослідження існуючих підходів та визначення їх недоліків та переваг.
2. Дослідження можливості їх застосування для обґрунтування проєктних рішень щодо критичної ІТ-інфраструктури.

Методи обґрунтування проєктних рішень архітектури. Прийняття рішення щодо вибору дизайну системи включає наступні компоненти:

- обґрунтування проєктних рішень;

- стратегії прийняття цих рішень;
- чинники, що впливають на їх прийняття.

Обґрунтування рішення. Просте пояснення обґрунтування проєктного рішення – *явне / чітке* уявлення про процес міркування над проєктом. Існують і інші аспекти проектування. Принцип проектування може бути наміром мотивувати створення артефакту проектування, бути обмеженням або припущенням, яке впливає на артефакт проектування, компромісом між вимогами, судженням для вибору з ряду варіантів проектування та аргументацією «за» чи «проти» проєктної пропозиції.

Є різні підходи до процесу проєктного міркування. Один з них – аргументація. Основним аргументаційним представленням є використання вузлів та посилає для позначення знань та відносин. Він бере свій початок від аргументованого представлення Тулміна, яке будується за допомогою даних, вимог, гарантій, підстав та спростувань [8]. У схемі Тулміна прикладом вузла є дані або претензія, які являють собою спостереження та висновки відповідно. *Tun/vid* зв'язку типу «так» може бути використаний для з'єднання вузлів для представлення індуктивних відносин. Цей підхід став базою для численних аналогічних аргументальних підходів, таких як інформаційна система на основі проблем (IBIS) [1] та мова обґрунтування проектування (DRL) [9]. Вони в основі демонструють проблему, аргумент та вирішення аргументації проектування.

Інший підхід до представлення концепції проектування полягає у використанні методологій на основі шаблонів. Ці методи використовують стандартні шаблони, які входять в процес розробки, щоб полегшити схему обґрунтування проектування. На відміну від методів, що базуються на аргументації, практики, які використовують методи на основі шаблонів, не створюють аргументаційні діаграми для обговорення, а натомість фіксують результати міркування. Цей підхід орієнтований на практичне застосування обґрунтування проектування в галузі. Прикладами цього підходу є шаблон опису рішення архітектури (ADDT) [10] та шаблон Views and Beyond (V&B) [11].

Використання підходів обґрунтування проєктів заснованих на аргументації іноді недостатньо, щоб визначити правильне рішення серед альтернатив. На проєктне рішення може впливати багато факторів та вимог. Деякі з них мають більш високе значення або пріоритет, ніж інші. Тому, додатково у процесі прийняття рішень можуть використовуватися кількісні методи оцінки пріоритетів, витрат та переваг. Прикладом такого підходу є метод аналізу витрат (CBAM) [12].

Розглянемо більш детально основні методи обґрунтування проєктних рішень.

Інформаційна система на основі проблем (IBIS) та її варіанти. Інформаційна система, що базується на проблемах (IBIS), є методом структурування та документування обґрунтування проєкту [1], що базується на обговоренні проблеми. Подібний підхід був використаний і в інших областях проектування, таких як будівництво архітектурного проєкту та містобудування.

Ключовим аспектом дизайну IBIS є артикуляція проблем. За кожною проблемою слідує позиція, що

відповідають на питання. Позиція може бути підтримана або заперечена аргументами. Позиція може походити від або бути наслідком артефакту. На рисунку 1 представлена діаграма, яка показує такі відносини. Різні проблеми обговорення пов'язані такими відносинами, як «аналогічно до», «замінює», «тимчасовий наступник» тощо.

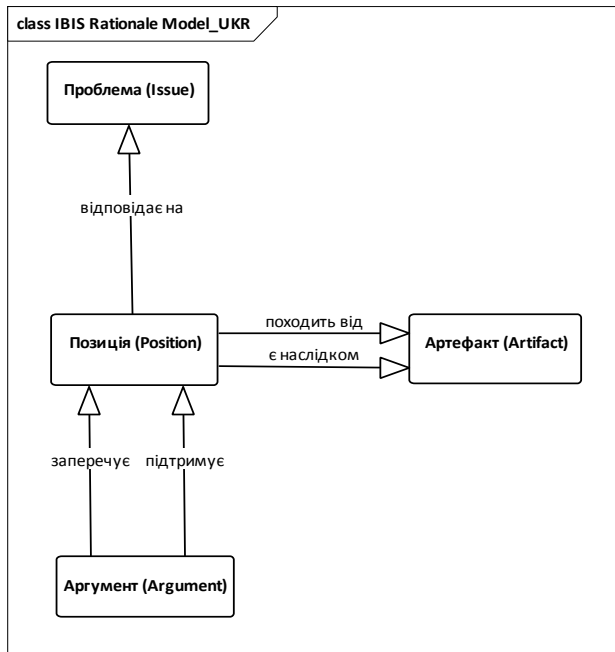


Рис. 1 – Модель обґрунтування дизайну IBIS

З 1970 по 1980 рр. було зроблено багато спроб використання IBIS, але жодна з цих систем не пройшла етап пілотного проекту [13]. Це пов'язано з тим,

що в IBIS не використовуються наступних два важливих моменти:

- пов'язані між собою питання, такі як суб-питання, не можуть бути представлені в IBIS в якості залежності, і тому важко моделювати деякі обговорення;
- плюси і мінуси альтернативних позицій не обговорюються.

Мета-модель методу прийняття рішення представлена на рис. 2.

IBIS підходить для обґрунтування простого дизайну, але може не спрацювати, коли проекти стають складнішими та захаращеними.

Щоб подолати ці обмеження, МакКолл розробив процедурну ієрархію проблем (PHI) для документування обґрунтування проекту [14]. PHI використовує більш широке визначення концептуальних позицій і використовує новий принцип для об'єднання проблем. У IBIS позиції визначають проектні питання, які обговорюються. В PHI враховується кожне проектне питання незалежно від того, обговорюється воно чи ні. PHI спрощує взаємовідносини в IBIS за допомогою спеціального типу відносин. Проблема А слугує проблемі В, якщо і тільки якщо вирішення А впливає на вирішення В. Таким чином, домінуючий тип відносин в PHI є спеціальний тип відносин «підпроблема».

PHI є простою квазіієрархічною структурою, яка з'єднує проблеми лише за допомогою спеціального типу відносин (рисунк 3). Подібно до IBIS, PHI забезпечує взаємозв'язок залежностей між проблемами і фіксує плюси і мінуси альтернативних позицій. PHI має лише обмежений успіх у прийнятті проектних рішень для промислового використання [15].

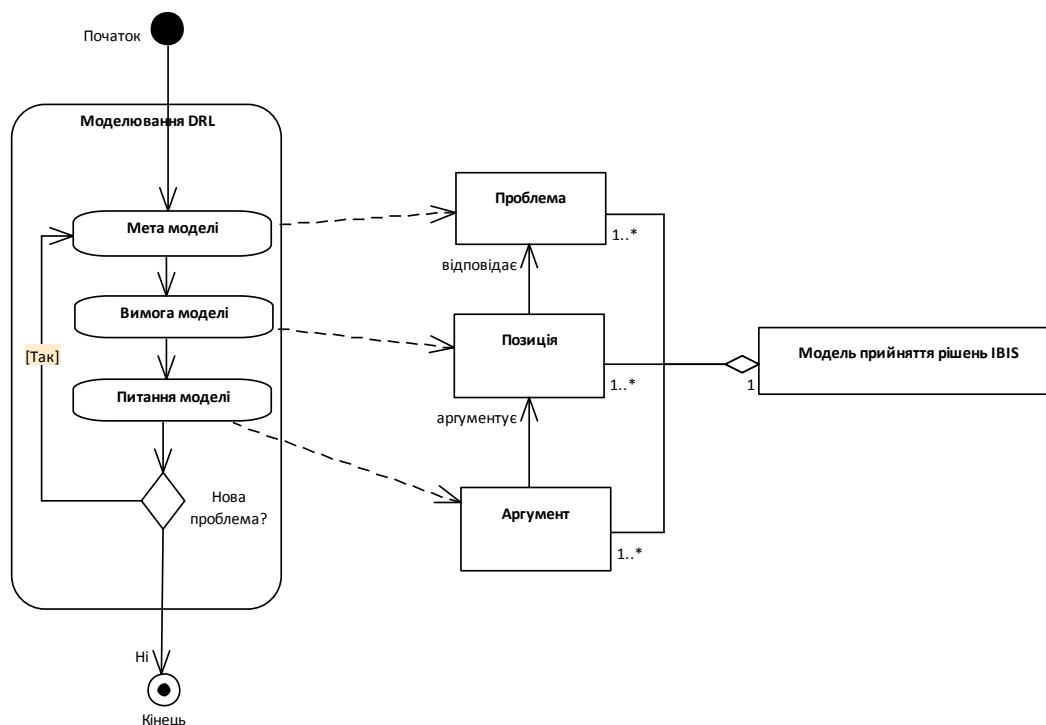


Рис. 2 – Модель рішення IBIS

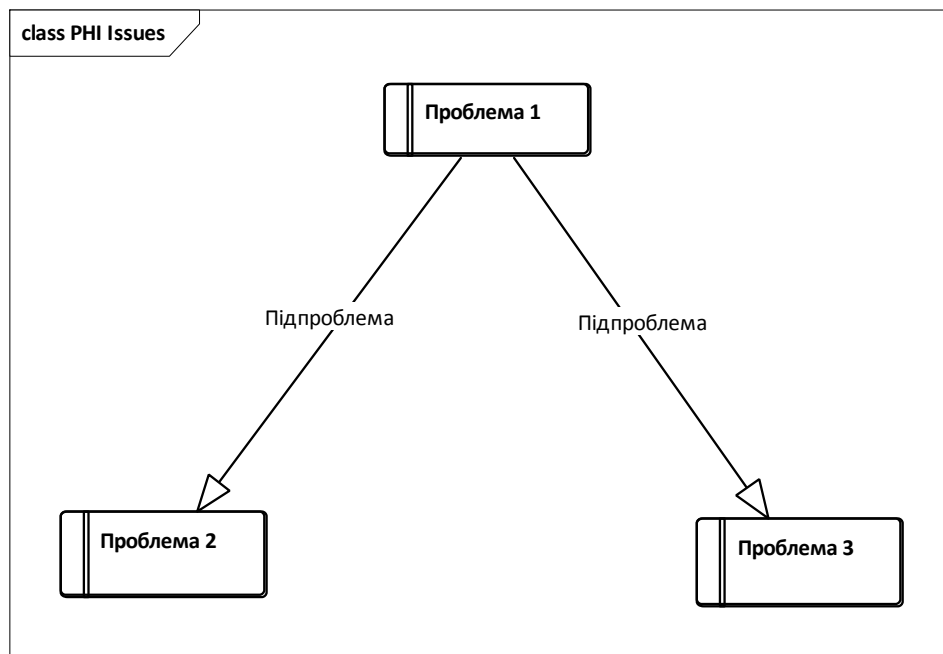


Рис. 3 - Проблеми в РНІ

gIBIS покращує IBIS, дозволяючи використовувати «інший» тип вузла для включення зовнішніх матеріалів [16]. Він підтримує агрегацію дерева issue-position-argument (IPA) у вузол з'єднання IPA. Графічне представлення gIBIS реалізовано в MCC. Графічний макет gIBIS складається з:

- глобального представлення даних мережі;
- представлення локальної мережі;
- представлення індексу, що відображає ієрархію проблем і аргументи;
- представлення вузла, що показує вміст та атрибути вибраного вузла;
- представлення панелі керування.

Система представлення та обслуговування процесу знань (REMAP) також базується на методі IBIS [17]. Вона розширює основні конструкції IBIS, таких як проблема, позиція та аргумент з вимогами, обмеженнями та об'єктами проектування. Це розширення забезпечує зв'язок між вимогами та об'єктами дизайну для його обґрунтування (рис. 4)

Дана модифікація дозволяє зафіксувати історію проектних рішень в циклі розробки в якості знання процесу. Проблеми піднімаються та вирішуються на етапі проробки вимог при створенні об'єктів проектування.

Мова обґрунтування проектування (DRL). DRL визначає обґрунтування проекту, описуючи, як артефакт служить або задовольняє очікувані функції. DRL є мовою, яка представляє якісні елементи в просторі міркувань навколо рішень [18]. У DRL можливі варіанти проектування містяться в альтернативному просторі, а аргументи в підтримку або заперечення проекту містяться в аргументному просторі. Кожна конструктивна можливість оцінюється і результати розміщуються в просторі оцінки. Оцінка виконується відповідно до певних критеріїв, що містяться в просторі критеріїв. Проблеми, які є явними та містять альтернативи, оцінки та критерії, містяться в просторі проблеми. Основні типи об'єктів в DRL – мета, проблеми, вимоги та альтерна-

тиви. Структура графа прийняття рішення за допомогою цих елементів показана на рис. 5.

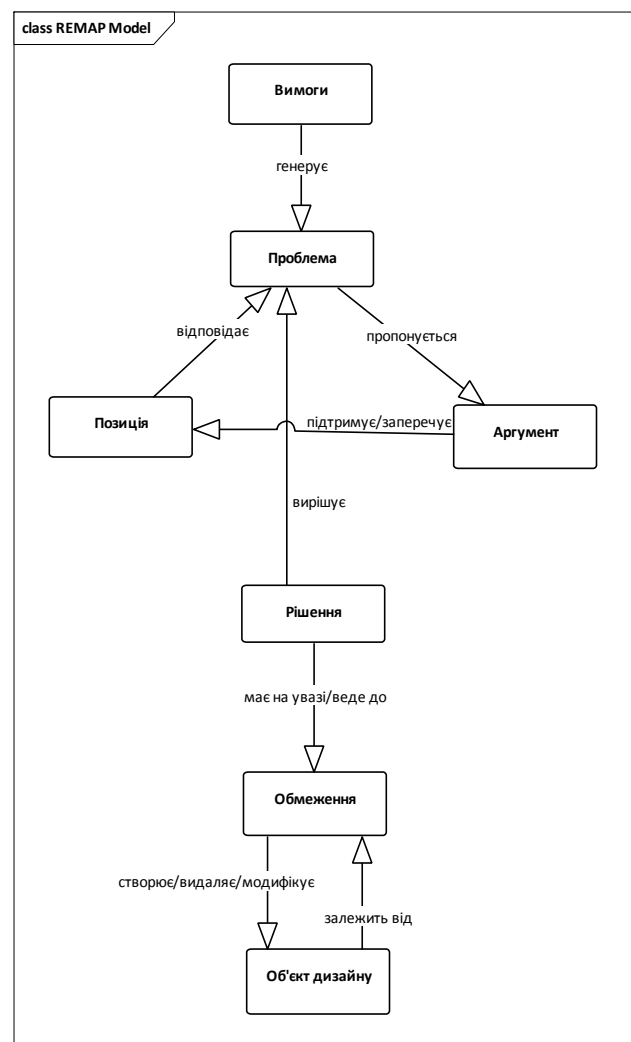


Рис. 4 – Модель REMAP

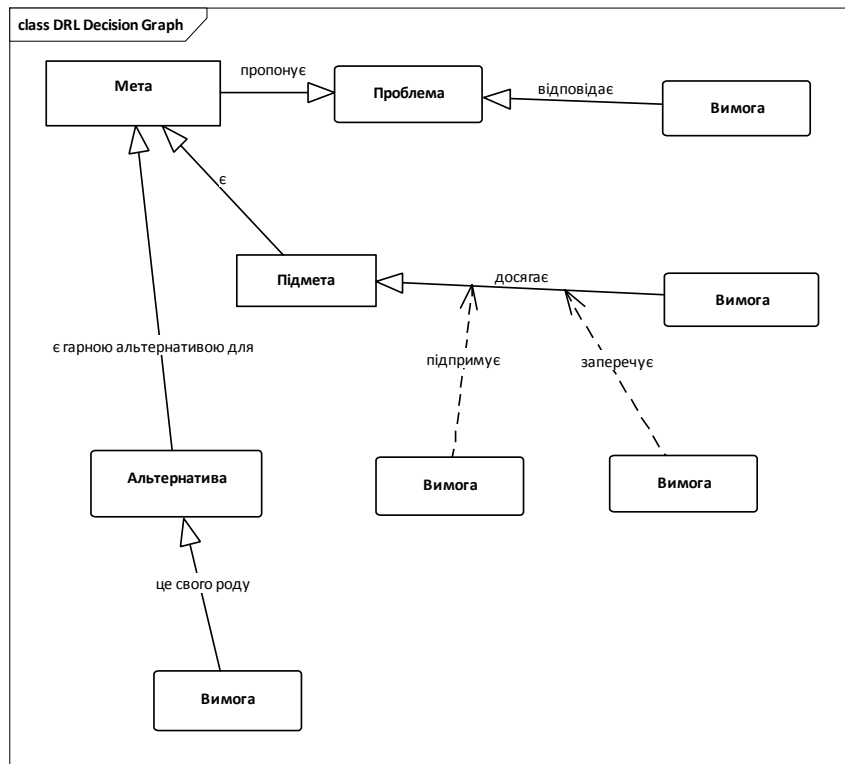


Рис. 5 – Структура графу прийняття рішень DRL

Мета – це критерії, які необхідно задовольнити. Альтернатива являє собою варіант, який розглядається. Його зв'язок з метою полягає в визначенні, чи це хороша альтернатива. Проблема є питанням,

яке виникає з мети, на яку потрібно відповісти. Вимога є відповіддю на запитання і дозволяє досягти або не досягти мети. Мета-модель методу представлена на рис. 6.

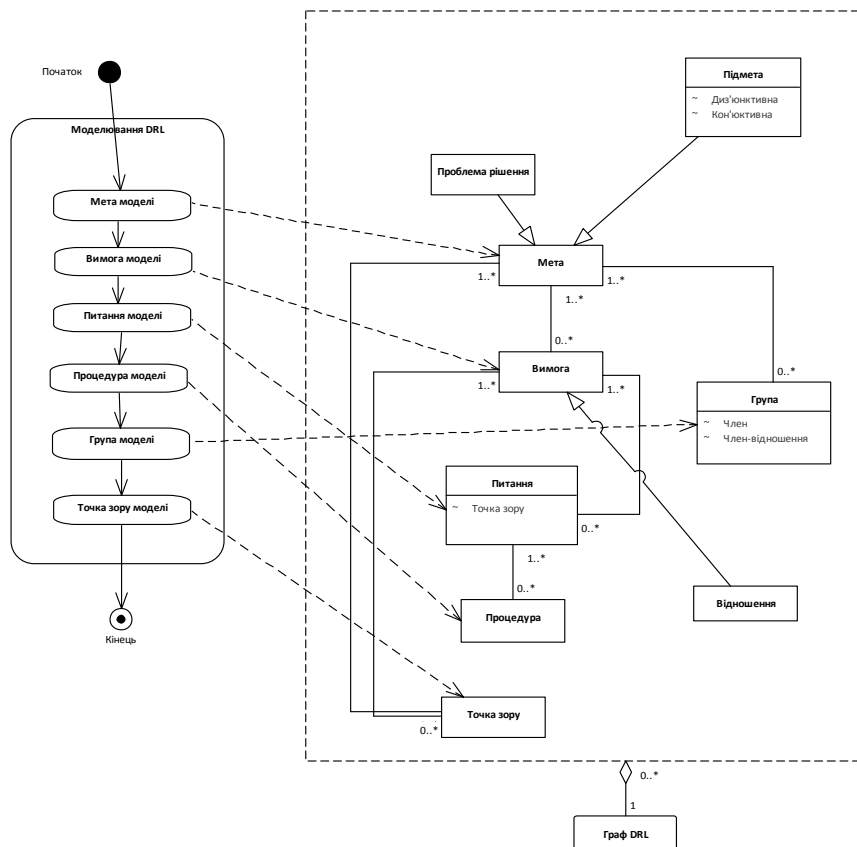


Рис 6. – Модель прийняття рішення DRL

Аргументація проектування в DRL побудована з наведених вище елементів. Вони в свою чергу згруповані в різні конструктивні та аргументаційні простори. DRL реалізується системою під назвою SIBYL [19].

Інженерія програмного забезпечення на базі обґрунтування проектного рішення (SeuRAT). Бург розробив систему SeuRAT для підтримки використання обґрунтування проектування під час обслуговування програмного забезпечення, асоціювання обґрунтування з кодом та здійснення ряду висновків за обґрунтуванням з метою забезпечення консистентності та повноти принципів проектування [20].

Система представлення обґрунтування проектування RATSpeak – це модифікація DRL. На рисунку 7 показані елементи, які представлені в RATSpeak. Ключовою відмінністю між RATSpeak і DRL є те, що RATSpeak представляє концепцію вимог, а не цілей.

Вимоги складаються як з функціональних, так і з нефункціональних вимог. Проблема прийняття рішення пов'язана з вимогами для підтримки аргументу щодо альтернативних рішень. Аргументна онтологія – це ієрархія типових типів аргументів, які обслуговують типи вимог. Вони забезпечують можливість підтримки в SeuRAT синтаксичного та семантичного виведення. Синтаксичне виведення пов'язане з правильністю структури графу обґрунтування рішення. Наприклад, якщо існує альтернатива (тобто потенційне рішення) для прийняття рішення (тобто проблема), то альтернатива повинна мати аргумент, що її підтримує (тобто підтвердження). Семантичне виведення вимагає від дослідника вивчення змісту обґрунтування. Наприклад, дозволяє ідентифікувати вибрану альтернативу, яка не так добре підтримує іншу альтернативу, порівнюючи їх обґрунтування.

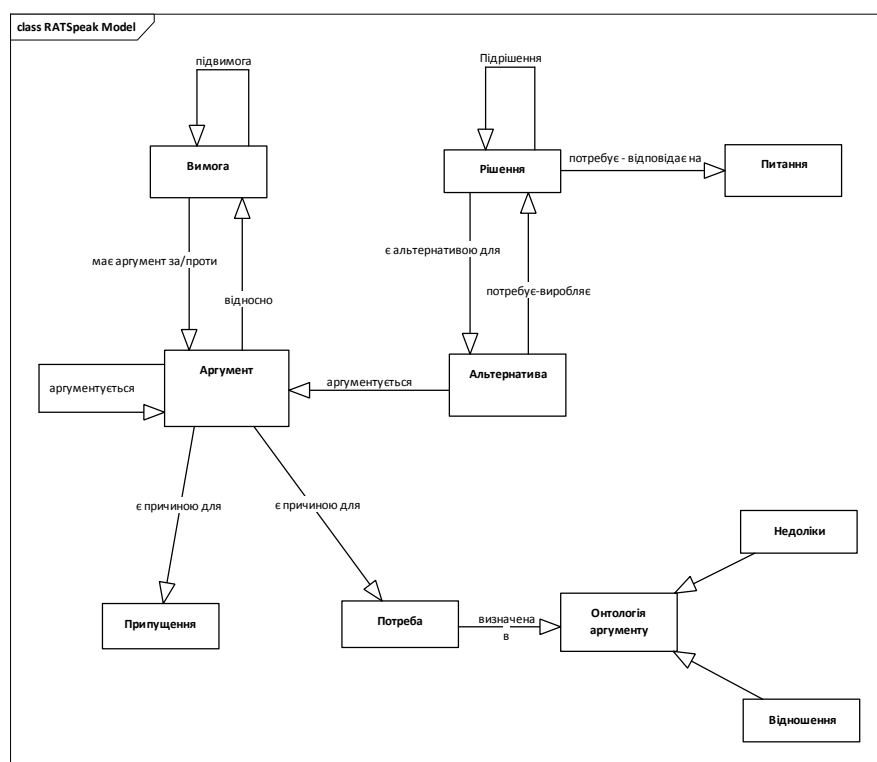


Рис. 7 – Модель обґрунтування рішення RATSpeak

Запитання, варіанти та критерії (QOC). QOC – напівформальна нотація, яке представляє аналіз простору проекту артефакту. Вона пояснює, як і чому артефакт проекту вибирається з простору можливостей. Основними елементами QOC є питання, які визначають основні проблеми проектування, варіанти, які надають можливі відповіді на поставлені питання, а також критерії оцінки та порівняння варіантів проектування.

Представлення QOC супроводжується аналізом простору проектування. Маклін та співавтори стверджують, що дослідники здатні аналізувати та аргументувати з QOC при розробці артефактів у просторі проекту в природному стилі [20]. Таким чином, аналіз обґрунтування проекту є просто додатковим продуктом проектування. На рисунку 8 зображено представлення QOC, яке показує приклад проектування об'єкту екрана. Питання в тому, чи повинен об'єкт

екрану бути широким або вузьким. Якщо об'єкт є широким, то він використовує екранну нерухливість, але на ньому легко натиснути мишею. Якщо ж він вузький, то зберігає екранну нерухливість, але на ньому важко натиснути мишею. Оскільки обґрунтування є аргументом, а не доказом, Маклін та співавтори стверджують, що елементи QOC повинні використовуватися для обґрунтування проектування, навіть якщо вони можуть бути предметом додаткових аргументів. Таким чином, QOC може бути розширений на будь-який довільний рівень розробки. Дизайнери архітектур, що використовують QOC, повинні застосовувати ці аргументи тільки там, де вони будуть корисними, але не поширювати їх на всі можливі деталі проекту, оскільки це не є корисним.

QOC підтримує розвиток простору альтернатив. Це дає змогу розробникам враховувати критерії, що можуть

визначати життєздатність варіантів. На відміну від IBIS, PHI та REMAP, які відображають історію розробки про-

екту, QOC зосереджується на варіантах проектування. Мета-модель методу представлена на рис. 9.

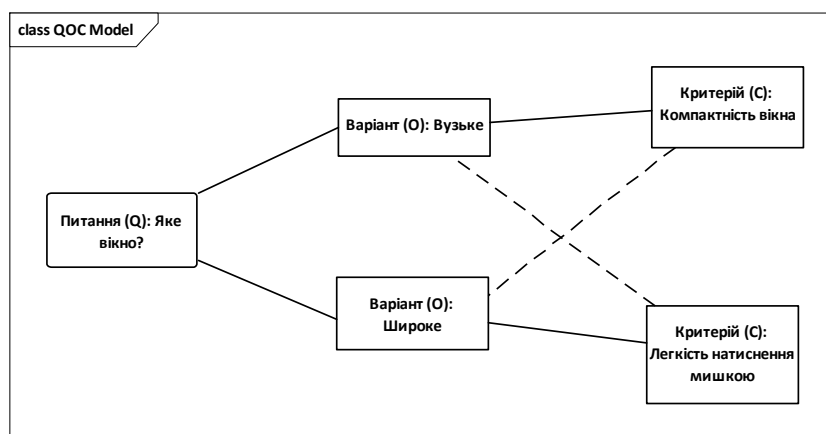


Рис. 8 – Приклад рішення QOC: суцільна лінія – позитивна оцінка, пунктирна лінія – негативна оцінка

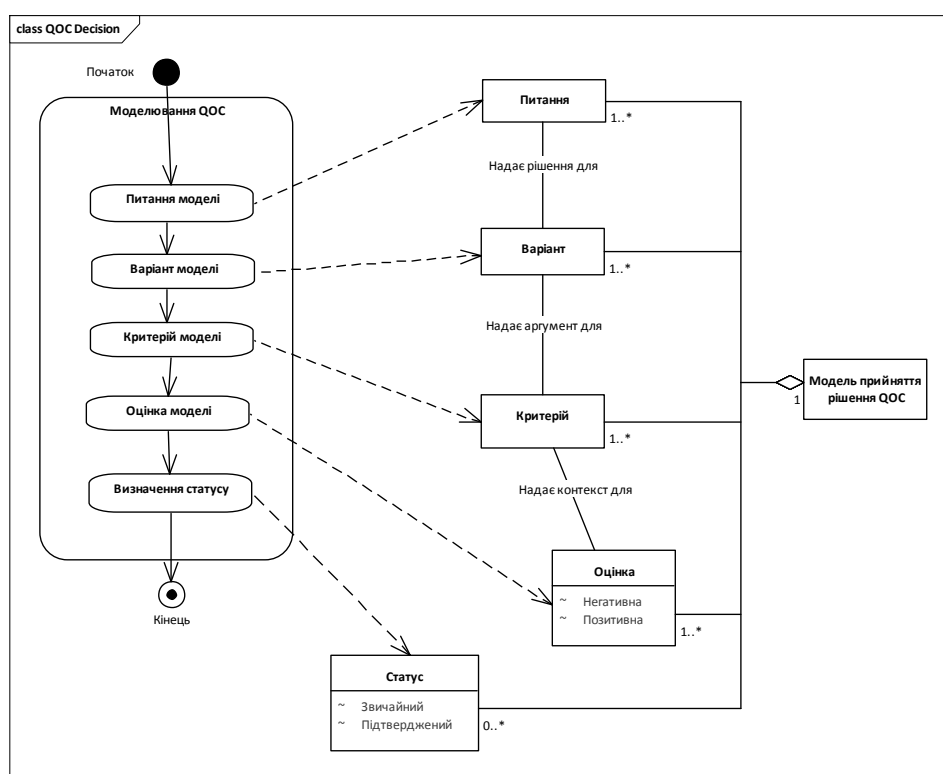


Рис. 9 – Модель прийняття рішення QOC

Дьюїт і Піч запропонували метод обґрунтування використання конкретного дизайну на основі обґрунтування, який поєднує в собі специфікацію використання з методом аргументації QOC [21]. Аргументація випадків використання, які складаються з функціональних та нефункціональних вимог, потім фіксуються в розширеній моделі QOC. Цей метод забезпечує кращу інтеграцію між специфікацією вимог, специфікацією проекту та його обґрунтуванням.

Views and Beyond (V&B). V&B – це сукупність методів, запропонованих Клеменсом та ін. для документування архітектури програмного забезпечення [11]. Він пропонує декілька типів представлень для опису архітектури програмного забезпечення:

- модульний;
- компонентно-конекторний;

– виділення.

Кожен тип представлення дає інший погляд на структуру системи. Наприклад, модульний тип представлення має декілька стилів подання, таких як розбиття коду та структура модулів за шарами.

Крім того, документуючи архітектуру, автори стверджують про те, що важливо документувати і те, чому саме така архітектура. Багато рішень приймається в проекті, але не всі рішення повинні бути виправданими. Запропоновано ряд принципів керівництва документацією щодо прийняття рішення:

- проектна команда витратила значний час, оцінюючи варіанти прийняття рішення;
- рішення має вирішальне значення для досягнення вимоги/мети;
- рішення вимагає розгляду нетривіальної під-

готовчої інформації;

- проблеми в нетривіальному рішенні;
- рішення має широке поширення на решту проекту архітектури і його буде важко скасувати;
- документування рішення є більш прийнятним зараз, а не пізніше.

Подібно до підходу ADDT, використовується прагматичний підхід до документування обґрунтування проекту. Замість документування обговорюваних відносин, фіксується наступна важлива інформація:

- *рішення* – резюме рішення;
- *обмеження* – основні обмеження, що виключають можливості;
- *альтернативи* – розглянуті варіанти та причини їх усунення;
- *ефекти* – наслідки та результати рішення;
- *докази* – будь-яке підтвердження того, що рішення є гарним.

Мета-модель методу представлена на рис. 10.

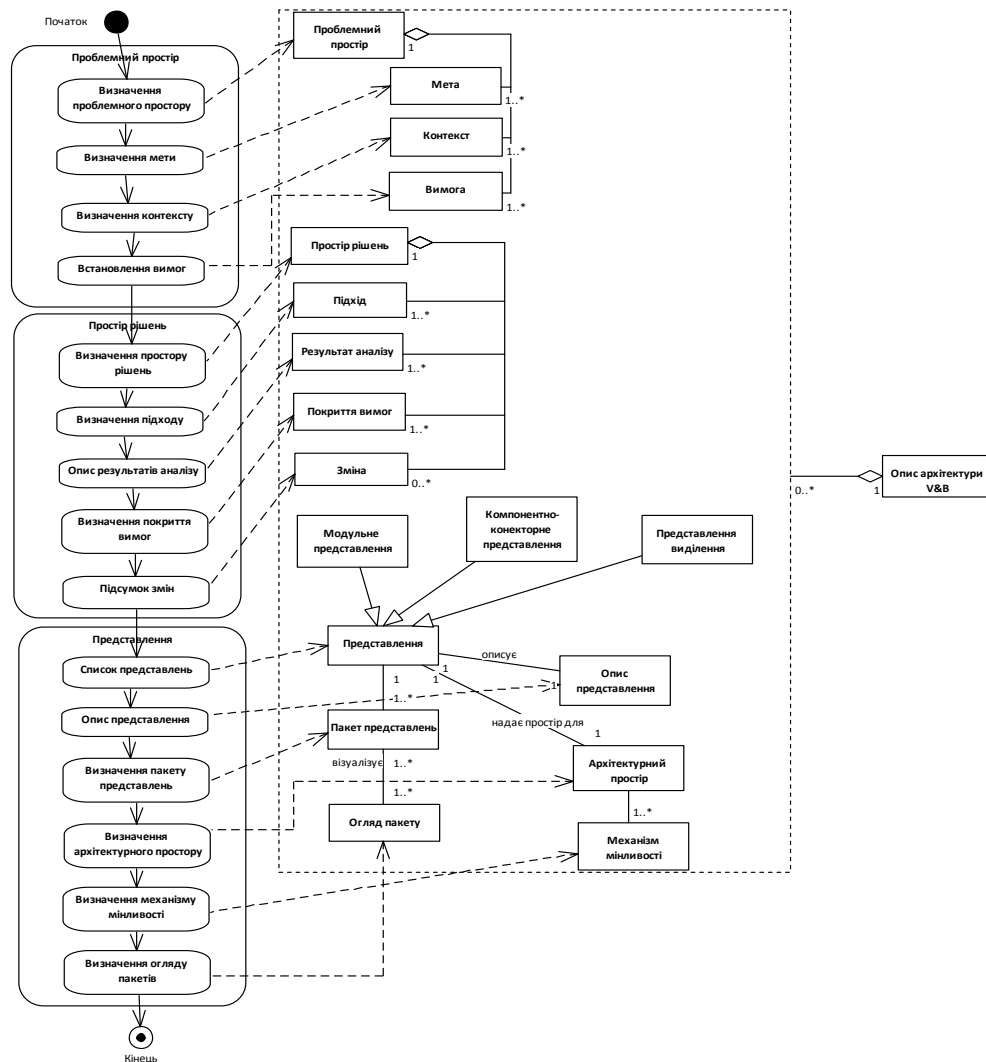


Рис. 10 – Модель прийняття рішення V&B

Вищенаведений список аргументів дизайну можна легко віднести до шаблону ADDT. ADDT надає більш детальну класифікацію, щоб допомогти дизайнерам зафіксувати всі обґрунтування проектних рішень. Шаблон V&B є більш загальним і простішим у використанні.

Подібно до ADDT, підхід V&B зосереджується на наданні дизайнерам повного шаблону та керівництва про те, як архітектура програмного забезпечення повинна бути задокументована. Є повний список, який описує, які елементи містять обґрунтування проекту, які його деталі слід задокументувати та як ці елементи пов'язані між собою.

Шаблон опису рішення щодо архітектури

(ADDT). Тирі та Акерман запропонували прагматичний підхід до представлення обґрунтування проекту [10]. Замість того, щоб зосередити увагу на обґрунтуванні дизайну та моделі представлення, вони надають шаблон, який дозволяє відобразити обґрунтування рішення.

Шаблон опису рішення містить декілька ключових елементів:

- *проблема* – описує проблему архітектури;
- *рішення* – вказує остаточне рішення щодо архітектури (наприклад, вибрана позиція);
- *статус* – статус рішення: очікують на розгляд, вирішується або затверджене;

- *групування* – групування рішень в галузі архітектури за такими типами, як інтеграція, презентація та дані. Ця онтологія використовується для організації множини рішень;
- *припущення* – основні припущення, які впливають на рішення;
- *обмеження* – обмеження, які рішення можуть спричинити для середовища;
- *позиції* – життєздатні варіанти вирішення проблеми;
- *аргумент* – причини для підтримки позиції;
- *наслідки* – наслідки прийняття рішення, які можуть призвести до необхідності прийняття інших рішень, запровадження нових вимог, нових обмежень тощо;
- *пов'язані рішення* – рішення, які є взаємозалежними;

- *супутні вимоги* – цілі чи вимоги, пов'язані з рішенням;
- *пов'язані артефакти* – пов'язані з архітектурою, проектуванням і документами сфери застосування;
- *супутні принципи* – узгоджений набір принципів проектування, з якими рішення узгоджено;
- *примітки* – ідеї, котрі обговорювалися командою і зафіксовані як додаткова інформація.

Інформація, зібрана в цьому шаблоні, є повною. Вона забезпечує підтримку знань під час та після процесу проектування архітектури. Тирі та Акерман стверджують, що ця інформація – це той набір, який є потрібним для спілкування з іншою організацією [10].

Мета-модель методу представлена на рис. 11.

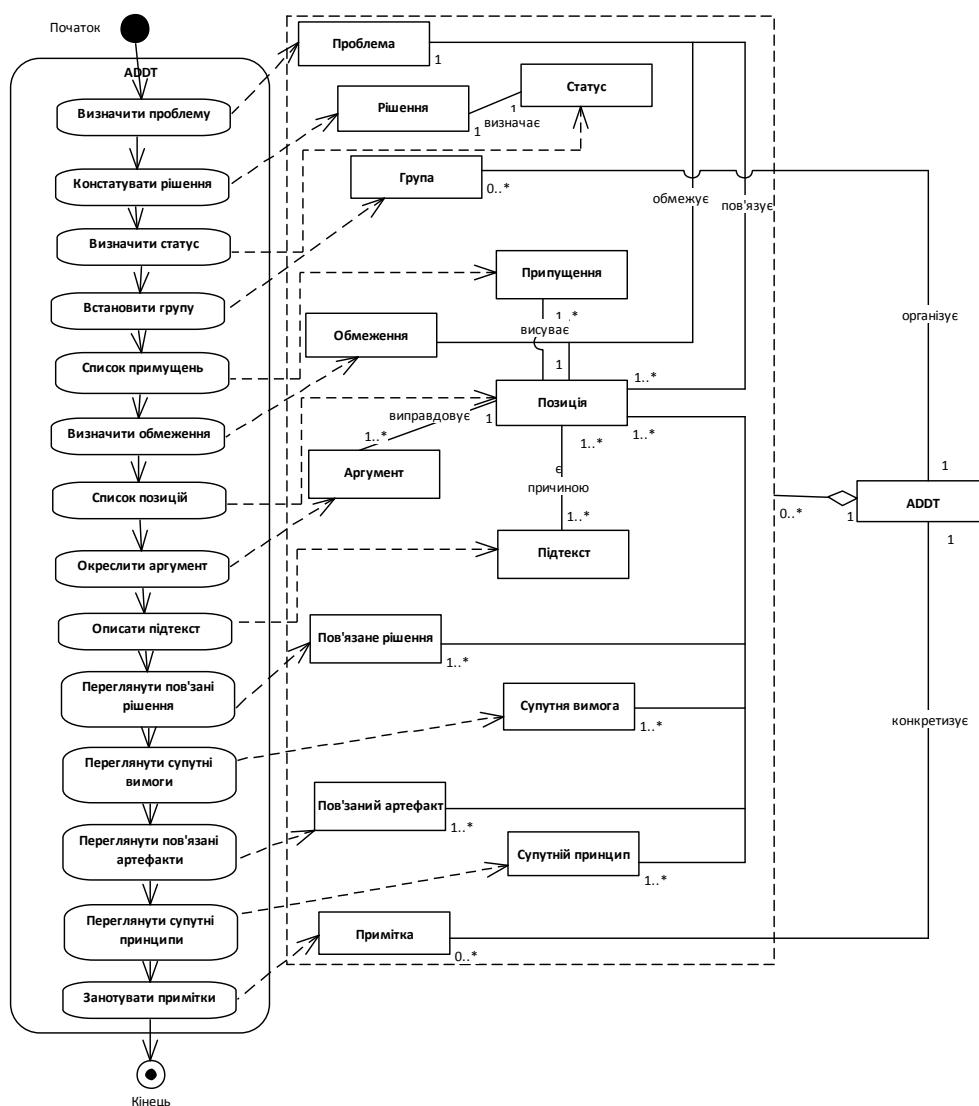


Рис. 11 – Модель прийняття рішень ADDT

У ADDT немає конкретних методів обґрунтування та обговорення для управління процесом обґрунтування проекту.

ADDT не надає сам процес міркування над проє-

ктом, а також не надає повного керівництва про те, як слід аргументувати ту чи іншу позицію. На відміну від IBIS та QOC, ADDT надає повний список щодо збору знань при обґрунтуванні проекту. Ця інформа-

ція часто залишається недоступною або частково доступною при використанні інших підходів. Використовуючи ADDT, архітектори можуть чітко відслідковувати, які рішення були прийняті, чому вони були зроблені, і будь-яку додаткову інформацію, яка має відношення до рішення. Головною перевагою ADDT є всебічність і повнота проектування, яка фіксується за допомогою шаблону. Однак ADDT не пропонує методів обґрунтування чи аргументації, що супроводжує шаблон. Іншим недоліком можна вважати ресурсомістке завдання заповнювання всього шаблону, оскільки не всі рішення повинні бути повністю задокументовані через їх простоту.

Архітектура обґрунтування та зв'язування елементів (AREL). AREL має на меті допомогти архітекторам створювати та документувати архітектурний дизайн з акцентом на архітектурні рішення та обґрунтування проекту [5]. AREL охоплює три типи знань архітектури: проектні питання, проектні рішення та результати проектування. Ці об'єкти знань представлені стандартними об'єктами уніфікованого моделювання (UML). Проблема проектування – це матеріали,

які впливають на прийняття дизайнерських/проектних рішень. Ця сутність інкапсулює такі поняття, як функціональні вимоги (наприклад, сценарії та діаграма співпраці), нефункціональні вимоги (наприклад, всі атрибути якості) та контексти проекту. Він також фіксує інформацію про проектні рішення та обґрунтування проекту. Результати проектування включають в себе отримані рішення. Прикладами є класи, компоненти, інтерфейс та спосіб використання. AREL було реалізовано як плагін для інструменту моделювання під назвою Enterprise Architect (EA). Плагін AREL використовує стандартні позначення UML для представлення об'єктів проектування та рішень. Будь-який індивідуальний тип об'єкту архітектурного знання фіксується шляхом застосування заздалегідь визначеного тегового шаблону стереотипу. Інструменти імпорту доступні для отримання інформації із специфікації вимог на базі документу Word, а вбудовані в плагін інструменти дозволяють виконувати графічне відстеження та аналіз інформації. Концептуальна модель підходу представлена рис. 12.

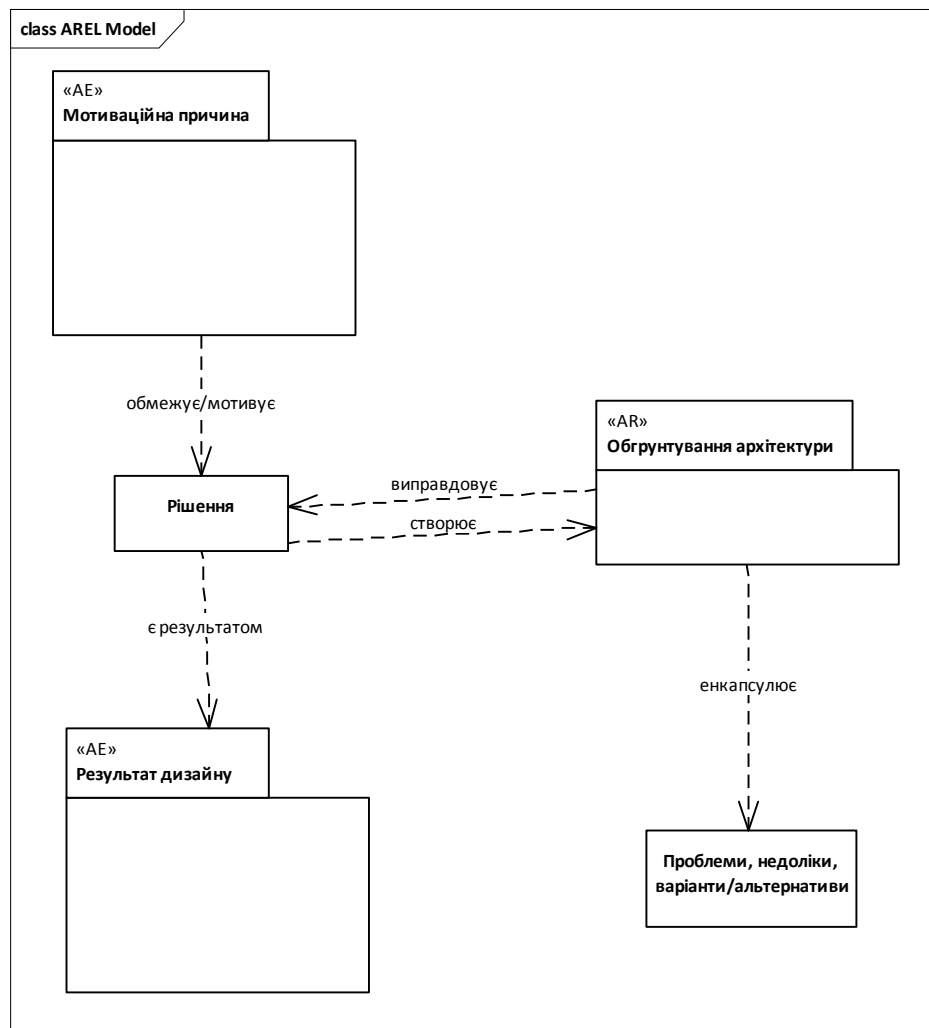


Рис. 12 – Концептуальна модель AREL [5]

Цей інструмент авторами перевірено на специфікації промислової електронної платіжної системи. Основною відмінністю між AREL та іншими систе-

мами є те, що AREL, на відміну від IBIS, QOC та DRL, – це як якісний, так і кількісний метод представлення обґрунтування проекту з вбудованим пошуко-

вим механізмом, який надає конструктору мову, що допомагає процесу обговорення та дозволяє зафіксувати текстові обґрунтування.

Кількісні методи обґрунтування. Проектування архітектури передбачає вибір оптимального рішення шляхом усунення альтернативних варіантів проектування нижчого рівня. Один із способів полегшити такий процес відбору полягає в тому, щоб певним чином кількісно оцінити варіанти проектування. Існує ряд методів, які використовують кількісний аналіз як засіб у процесі відбору. Метод аналізу недоліків архітектури (АТАМ) – це спосіб використання компромісів для обґрунтування прийняття архітектурних рішень [22]. Метод АТАМ дозволяє виконати наступні кроки:

- визначити атрибути якості, як цілі в рішенні;
- визначити відносну пріоритетність цілей;
- ідентифікувати підходи до архітектури (варіанти);
- створити дерево використання для переліку атрибутів якості, уточнення їх атрибутів та сценаріїв;
- провести аналіз альтернативних підходів шляхом вивчення точок чутливості (тобто, які якісні атрибути впливають), точки компромісу (тобто компроміс, необхідний для задоволення атрибутів якості), ризиків та не ризиків.

Метод аналізу витрат (СВАМ) розглядає витрати та переваги, пов'язані з рішеннями. Метод розраховує очікувану віддачу стратегії щодо архітектури шляхом зважування переваг та витрат. Вигоди та витрати обчислюються шляхом розрахунку зважених вигод та зважених витрат усіх пов'язаних сценаріїв. Цей зважений метод забезпечує кількісне обґрунтування прийняття рішень [12].

Результати компаративного аналізу методів обґрунтування проектних рішень. Незважаючи на те, що методи раціонального проектування заклали основу для конструкторських міркувань, більшість з них все ще мають проблеми з точки зору зручності використання. Для їх порівняння використані наведені нижче критерії успішного впровадження концепції розробки:

- *Ефективне представлення обґрунтування дизайну* – на основі аргументації моделей фіксуються як міркування, так і структура аргументації обґрунтування дизайну. Структура аргументації є часовитратною і її важко простежити. Тому її слід спростити, не втрачаючи основну інформацію про обґрунтування дизайну.
- *Ефективна комунікація обґрунтування дизайну* – дизайнери хочуть знати проблеми, обґрунту-

вання, потенційні альтернативи та елементи дизайну, на які впливає рішення. Отже, необхідність повторювати процес обговорення, як це пропонується аргументованими моделями, таким чином зменшена. Отже, проблеми в моделях, що базуються на аргументації, розташовуються вище над представленням їх обговорення та нище, ніж їх представлення взаємозв'язків з дизайнерськими артефактами.

– *Фокус на артефактах дизайну* – вимоги та специфікації дизайну об'єктів використовуються для підтримки системи оцінки та технічного обслуговування. Тому для обґрунтування дизайну необхідно пояснити артефакти дизайну, що містяться в цих специфікаціях.

– *Простежуваність та аналіз впливу* – основне використання концепції дизайну полягає в тому, щоб допомогти дизайнерам зрозуміти обґрунтування та проблеми дизайну з метою виконання подальшого технічного обслуговування. Одним з таких заходів є аналіз впливу змін. Методи обґрунтування дизайну повинні підтримувати аналіз ефектів пульсації (хвильовий вплив), використовуючи можливість простежувати обґрунтування конкретних проектних рішень з метою пояснення конструктивної залежності.

– *Обґрунтування комплексного дизайну* – обґрунтування дизайну складається з багатьох типів інформації. Міркування може ґрунтуватися на аргументації або на кількісному аналізі. Тому методи обґрунтування дизайну повинні бути всеосяжними та гнучкими, щоб відобразити ці різні типи міркувань.

– *Загальна підтримка інструментів* – розробники архітектури завжди стикаються з дуже обмеженим графіком проектування. Використання іншого інструменту для представлення конструкторського обґрунтування збільшує накладні витрати на документацію та відокремлює знання від дизайну. Обґрунтування дизайну слід зафіксувати як побічний продукт, за допомогою того самого інструмента, в якому розробляється сам дизайн.

– *Корисність підходу для розробки критичних ІТ-інфраструктур* – можливість, корисні засоби та елементи у підходах, які можна використати для проектування та обґрунтування дизайну критичних ІТ-інфраструктур.

Проаналізуємо корисність існуючих методів обґрунтування дизайну за критеріями, викладеними вище. Кожен метод оцінюється відповідно до того, чи відповідає він критеріям повністю (2 бали), частково (1 бал) чи не відповідає (0 балів) (табл. 1).

Таблиця 1 – Аналіз корисності існуючих методів обґрунтування дизайну

Метод Критерій	gIBIS	PHI	REM AP	DR L	SeuT AT	QO C	V& B	AD DT	ARE L
<i>Ефективне представлення обґрунтування дизайну</i>	0	0	0	0	0	0	2	2	2
<i>Ефективна комунікація обґрунтування дизайну</i>	0	0	0	0	0	0	2	2	2
<i>Фокус на артефактах дизайну</i>	1	1	2	1	2	0	2	1	2
<i>Простежуваність та аналіз впливу</i>	0	0	1	0	1	0	0	1	2
<i>Обґрунтування комплексного дизайну</i>	0	0	0	0	0	0	1	1	2
<i>Загальна підтримка інструментів</i>	0	0	0	0	0	0	2	2	2
<i>Корисність підходу для розробки критичних ІТ-інфраструктур</i>	0	0	0	0	0	0	0	1	1
<i>Всього</i>	1	1	3	1	3	0	9	10	13

Підхід QOC підходить для простого, аргументованого проектування, де рішення мають чіткі варіанти, а критерії та елементи можуть бути узагальнені. Він розроблений для надання архітекторам простого методу, що стимулює міркування. Однак, це не настільки однозначно у випадку складного дизайну. Проектування архітектури є досить складним завданням і вимагає зазвичай залучення багатьох варіантів з власними критеріями та оцінками. Прості конструктивні рішення можуть легко стати заплутаними і незрозумілими.

Як і IBIS, QOC, DRL призначена для того, щоб забезпечити архітекторам модель і словниковий запас, що стимулює обговорення проектування. Велика різниця методу, на відміну від IBIS і QOC, полягає в тому, що DRL призначений для асинхронного використання. Іншими словами, DRL слід використовувати після того, як сам процес проектування вже здійснений. Він використовується для побудови обґрунтування за допомогою аналізу історичних записів дизайнерських сеансів. Очевидний і його недолік при аналізі моделі, її складність швидко зростає при ускладненні дизайну.

Використовуючи задокументоване обґрунтування рішення, SeuRAT дозволяє супроводжувачам користувачам отримувати та перевіряти обґрунтування для проведення технічного обслуговування. Бург виявив, що SeuRAT забезпечує кращі результати серед протестованих людей, які не є експертами в Java, ніж результати їх відповідної контрольної групи для виявлення проблем та виконання завдань [23].

Мета ADDT і V&B полягає в наданні методів обґрунтування дизайну для практиків. Тому вони мають більш прагматичний підхід, ніж інші методи. З точки зору представлення та комунікації дизайну обґрунтування, їх структура менш формальна, ніж інші методи. Через це вони можуть бути реалізовані за допомогою різних типів програмних інструментів і легко

можуть бути прийняті організацією. Проте обмежене графічне представлення в цих двох методах обмежує їх здатність надавати обґрунтоване обчислення і можливість відстеження. Інший підхід AREL не має вад двох вище наведених методів обґрунтування дизайну, але також не може бути використаний у вихідному стані для проектування та обґрунтування проектних рішень критичної IT-інфраструктури.

Обговорення результатів дослідження. У даній роботі представлений детальний компаративний аналіз підходів до обґрунтування проектних рішень, визначені їх недоліки. Як результат. Таким чином, зроблено перший крок на шляху до створення інструментарію документування та обґрунтування процесу прийняття проектних рішень щодо архітектури критичної IT-інфраструктури.

Для майбутніх досліджень, насамперед, планується розробка мета моделі нового підходу, що можна буде застосовувати для проектування архітектури критичної IT-інфраструктури та програмного забезпечення для створення архітектури критичної IT-інфраструктури, яке б підтримувало запропоновану мета-модель підходу.

Крім того, буде розглянуто можливість застосування підходу для модернізації вже існуючих критичних IT-інфраструктур.

Нарешті, одним з головних завдань є вивчення способів зменшення зусиль при проектуванні з використанням запропонованого підходу.

Висновки. В результаті проведених досліджень:

1. Проаналізовано основні існуючі підходи до обґрунтування проектних рішень щодо архітектури підприємства, визначені їх недоліки та переваги.
2. Досліджено можливість їх подальшого застосування при проектуванні архітектури критичної IT-інфраструктури.

Список літератури:

1. Kunz, W. Issues as Elements of Information Systems [Text] / W. Kunz, H. Rittel. – Berkeley, 1970. doi: [10.1515/9783038210665.147](https://doi.org/10.1515/9783038210665.147)
2. Op't Land, M. Enterprise architecture: creating value by informed governance [Text] / M. Op't Land, E. Proper, M. Waage, J. Cloo, C. Steghuis. – Springer, 2009. – 145 p. doi: [10.1007/978-3-540-85232-2](https://doi.org/10.1007/978-3-540-85232-2)
3. Aier, S. Virtual Decoupling for IT/Business Alignment – Conceptual Foundations, Architecture Design and Implementation Example [Text] / S. Aier, R. Winter // Business & Information Systems Engineering. – 2008. – Vol. 1, Issue 2. – P. 150–163. doi: [10.1007/s12599-008-0010-7](https://doi.org/10.1007/s12599-008-0010-7)
4. Jansen, A. Software Architecture as a Set of Architectural Design Decisions [Text] / A. Jansen, J. Bosch // 5th Working IEEE/IFIP Conference on Software Architecture (WICSA'05). – 2005. doi: [10.1109/wicsa.2005.61](https://doi.org/10.1109/wicsa.2005.61)
5. Tang, A. A rationale-based architecture model for design traceability and reasoning [Text] / A. Tang, Y. Jin, J. Han // Journal of Systems and Software. – 2007. – Vol. 80, Issue 6. – P. 918–934. doi: [10.1016/j.jss.2006.08.040](https://doi.org/10.1016/j.jss.2006.08.040)
6. Plataniotis, G. Capturing Decision Making Strategies in Enterprise Architecture – A Viewpoint [Text] / G. Plataniotis, S. de Kinderen, H. A. Proper // Lecture Notes in Business Information Processing. – 2013. – P. 339–353. doi: [10.1007/978-3-642-38484-4_24](https://doi.org/10.1007/978-3-642-38484-4_24)
7. Coggins, C. The methodology for business transformation v1.5: A practical approach to segment architecture [Text] / C. Coggins, J. Spiegel // Journal of Enterprise Architecture. – 2007.
8. Toulmin, S. The Uses of Argument [Text] / S. Toulmin. – 2nd ed. – Cambridge University Press, 2003. – 247 p. [10.1017/cbo9780511840005](https://doi.org/10.1017/cbo9780511840005)
9. Lee, J. Extending the Potts and Bruns model for recording design rationale [Text] / J. Lee // 13th International Conference on Software Engineering. – 1991. doi: [10.1109/icse.1991.130629](https://doi.org/10.1109/icse.1991.130629)
10. Tyree, J. Architecture Decisions: Demystifying Architecture [Text] / J. Tyree, A. Akerman // IEEE Software. – 2005. – Vol. 22, Issue 2. – P. 19–27. doi: [10.1109/ms.2005.27](https://doi.org/10.1109/ms.2005.27)
11. Clements, P. Documenting Software Architectures: Views and Beyond [Text] / P. Clements et. al. – 1st ed. – Addison Wesley, 2002.
12. Asundi, J. Using Economic Considerations to Choose Amongst Architecture Design Alternatives [Text] / J. Asundi, R. Kazman, M. Klein // Defense technical information center. – 2001. doi: [10.21236/ada399151](https://doi.org/10.21236/ada399151)
13. Fischer, G. Making Argumentation Serve Design [Text] / G. Fischer, A. Lemke, R. McCall // Design Rationale: Concepts, Techniques and Use. – Lawrence Erlbaum Associates, 1996. – P. 267–294.
14. McCall, R. J. PHI: a conceptual foundation for design hypermedia [Text] / R. J. McCall // Design Studies. – 1991. – Vol. 12, Issue 1. – P. 30–41. doi: [10.1016/0142-694x\(91\)90006-i](https://doi.org/10.1016/0142-694x(91)90006-i)
15. Riddle, W. Software Technology Maturation [Text] / W. Riddle // Proceedings of the 8th International Conference on Software Engineering (ICSE). – 1985. – P. 189–200.
16. Conklin, J. gIBIS: a hypertext tool for exploratory policy discussion [Text] / J. Conklin, M. L. Begeman // Proceedings of the 1988 ACM conference on Computer-supported cooperative work – CSCW '88. – 1988. doi: [10.1145/62266.62278](https://doi.org/10.1145/62266.62278)

17. Ramesh, B. Supporting systems development by capturing deliberations during requirements engineering [Text] / B. Ramesh, V. Dhar // IEEE Transactions on Software Engineering. – 1992. – Vol. 18, Issue 6. – P. 498–510. doi: [10.1109/32.142872](https://doi.org/10.1109/32.142872).
18. Lee, J. What's in Design Rationale [Text] / J. Lee, K. Lai // Design Rationale: Concepts, Techniques and Use. – 1996. – Vol. 2. – P. 21–52.
19. Lee, J. SIBYL: a tool for managing group design rationale [Text] / J. Lee // Proceedings of the 1990 ACM conference on Computer-supported cooperative work – CSCW '90. – 1990. doi: [10.1145/99332.99344](https://doi.org/10.1145/99332.99344).
20. Maclean, A. Questions, Options and Criteria [Text] / A. Maclean, R. Young, V. Bellotti, T. Moran // Design Rationale: Concepts, Techniques and Use. – Lawrence Erlbaum Associates, 1996. – P. 53–106.
21. Dutoit, A. H. Rationale-Based Use Case Specification [Text] / A. H. Dutoit, B. Paech // Requirements Engineering. – 2002. – Vol. 7, Issue 1. – P. 3–19. doi: [10.1007/s007660200001](https://doi.org/10.1007/s007660200001).
22. Bass, L. Software Architecture in Practice [Text] / L. Bass, P. Clements, R. Kazman. – Boston: Addison Wesley, 2003.
23. Burge, J. Software Engineering Using design Rationale [Text]: PhD dissertation / J. Burge. – Worcester Polytechnic Institute, 2005.

Bibliography (transliterated):

1. Kunz, W., Rittel, H. (1970). Issues as Elements of Information Systems. Berkeley. doi: [10.1515/9783038210665.147](https://doi.org/10.1515/9783038210665.147).
2. Op't Land, M., Proper, E., Waage, M., Cloo, J., Steghuis, C. (2009). Enterprise architecture: creating value by informed governance. Springer, 145. doi: [10.1007/978-3-540-85232-2](https://doi.org/10.1007/978-3-540-85232-2).
3. Aier, S., Winter, R. (2008). Virtual Decoupling for IT/Business Alignment – Conceptual Foundations, Architecture Design and Implementation Example. Business & Information Systems Engineering, 1 (2), 150–163. doi: [10.1007/s12599-008-0010-7](https://doi.org/10.1007/s12599-008-0010-7).
4. Jansen, A., Bosch, J. (2005). Software Architecture as a Set of Architectural Design Decisions. 5th Working IEEE/IFIP Conference on Software Architecture (WICSA'05). doi: [10.1109/wicsa.2005.61](https://doi.org/10.1109/wicsa.2005.61).
5. Tang, A., Jin, Y., Han, J. (2007). A rationale-based architecture model for design traceability and reasoning. Journal of Systems and Software, 80 (6), 918–934. doi: [10.1016/j.jss.2006.08.040](https://doi.org/10.1016/j.jss.2006.08.040).
6. Plataniotis, G., de Kinderen, S., Proper, H. A. (2013). Capturing Decision Making Strategies in Enterprise Architecture – A Viewpoint. Lecture Notes in Business Information Processing, 339–353. doi: [10.1007/978-3-642-38484-4_24](https://doi.org/10.1007/978-3-642-38484-4_24).
7. Coggins, C., Speigel, J. (2007). The methodology for business transformation v1.5: A practical approach to segment architecture. Journal of Enterprise Architecture.
8. Toulmin, S. (2003). The Uses of Argument. Cambridge University Press, 247. [10.1017/cbo9780511840005](https://doi.org/10.1017/cbo9780511840005).
9. Lee, J. (1991). Extending the Potts and Bruns model for recording design rationale. 13th International Conference on Software Engineering. doi: [10.1109/icse.1991.130629](https://doi.org/10.1109/icse.1991.130629).
10. Tyree, J., Akerman, A. (2005). Architecture Decisions: Demystifying Architecture. IEEE Software, 22 (2), 19–27. doi: [10.1109/ms.2005.27](https://doi.org/10.1109/ms.2005.27).
11. Clements, P. et al. (2002). Documenting Software Architectures: Views and Beyond. Addison Wesley.
12. Asundi, J., Kazman, R., Klein, M. (2010). Using Economic Considerations to Choose Amongst Architecture Design Alternatives. Defense technical information center. doi: [10.21236/ada399151](https://doi.org/10.21236/ada399151).
13. Fischer, G., Lemke, A., McCall, R. (1996). Making Argumentation Serve Design. Design Rationale: Concepts, Techniques and Use. Lawrence Erlbaum Associates, 267–294.
14. McCall, R. J. (1991). PHI: a conceptual foundation for design hypermedia. Design Studies, 12 (1), 30–41. doi: [10.1016/0142-694x\(91\)90006-i](https://doi.org/10.1016/0142-694x(91)90006-i).
15. Riddle, W. (1985). Software Technology Maturation. Proceedings of the 8th International Conference on Software Engineering (ICSE), 189–200.
16. Conklin, J., Begeman, M. L. (1988). gIBIS: a hypertext tool for exploratory policy discussion. Proceedings of the 1988 ACM Conference on Computer-Supported Cooperative Work – CSCW '88. doi: [10.1145/62266.62278](https://doi.org/10.1145/62266.62278).
17. Ramesh, B., Dhar, V. (1992). Supporting systems development by capturing deliberations during requirements engineering. IEEE Transactions on Software Engineering, 18 (6), 498–510. doi: [10.1109/32.142872](https://doi.org/10.1109/32.142872).
18. Lee, J., Lai, K. (1996). What's in Design Rationale. Design Rationale: Concepts, Techniques and Use, 2, 21–52.
19. Lee, J. (1990). SIBYL: a tool for managing group design rationale. Proceedings of the 1990 ACM Conference on Computer-Supported Cooperative Work – CSCW '90. doi: [10.1145/99332.99344](https://doi.org/10.1145/99332.99344).
20. Maclean, A., Young, R., Bellotti, V., Moran, T. (1996). Questions, Options and Criteria. Design Rationale: Concepts, Techniques and Use. Lawrence Erlbaum Associates, 53–106.
21. Dutoit, A. H., Paech, B. (2002). Rationale-Based Use Case Specification. Requirements Engineering, 7 (1), 3–19. doi: [10.1007/s007660200001](https://doi.org/10.1007/s007660200001).
22. Bass, L., Clements, P., Kazman, R. (2003). Software Architecture in Practice. Boston: Addison Wesley.
23. Burge, J. (2005). Software Engineering Using design Rationale. Worcester Polytechnic Institute.

Надійшла (received) 01.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Порівняльний аналіз методів представлення та обґрунтування архітектури критичної ІТ-інфраструктури/ Дорогий Я. Ю. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 33(1255). – С.42–54. – Бібліогр.:23 назв. – ISSN 2079-5459.

Сравнительный анализ методов представления и обоснования архитектуры критической ИТ-инфраструктуры/ Дорогий Я. Ю. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 33(1255). – С. 42–54. – Бібліогр.: 23 назв. – ISSN 2079-5459.

A comparative analysis of the methods for presenting and substantiating the architecture of a critical IT infrastructure/ Dorogyy Ya. // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 33 (1255). – P.42–54. – Bibliogr.:23. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Дорогий Ярослав Юрійович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент кафедри "Автоматика і управління в технічних системах"; Київ, пр. Перемоги, 37; e-mail: cisco.ma@gmail.com.

Дорогий Ярослав Юрьевич – кандидат технических наук, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», доцент кафедры "Автоматика и управление в технических системах"; Киев, пр. Победы, 37; e-mail: cisco.ma@gmail.com.

Dorogyy Yaroslav – candidate of technical sciences, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”; associate professor of the department «Automation and Control in Technical Systems»; av. Victory, 37, Kyiv

УДК 656.615.078.111

А. О. МУРАДЬЯН

ОБҐРУНТУВАННЯ УЗГОДЖЕНОГО УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ПЕРЕВАЛКИ ВАНТАЖІВ В ТРАНСПОРТНИХ ВУЗЛАХ

В статье впервые предложена постановка задачи оптимизации процесса перевалки грузов (ППГ) в транспортных узлах, основанная на логистической концепции «точно в срок», определен конструктивный подход к моделированию задачи и приведены ее оригинальные экономико – математические модели с указанием методов реализации. Также обоснована необходимость при постановке задачи оптимизации ППГ на этапе оперативного управления учета фактора качества информации о входящих в транспортные узлы грузопотоки и подвижной состав. Показано, что этот фактор дает представление о степени стойкости параметров управления и позволяет в итоге рассматривать характеризующую задачу, в условиях риска и в детерминированной постановке.

Ключевые слова: транспортный узел, процесс перевалки грузов (ППВ), постановка задачи управления ППВ

У статті вперше запропонована постановка задачі оптимізації процесу перевалки вантажів у транспортних вузлах, заснована на логістичній концепції "точно в строк", визначений конструктивний підхід до моделювання задачі й наведені її оригінальні економіко - математичні моделі із вказівкою методів реалізації. Також обґрунтована необхідність при постановці задачі оптимізації ППВ на етапі оперативного управління урахування фактору якості інформації про вхідних у ЗТВ вантажопотоках та рухомого складу. Показано, що цей фактор дає уявлення про ступінь стійкості параметрів управління і дозволяє в підсумку розглядати характеризуючу задачу, в умовах ризику і в детермінованій постановці.

Ключові слова: загальнотранспортні вузли, процес перевалки вантажів (ППВ), постановка задачі управління ППВ

In article the problem definition of optimization of cargo transfer process in transport hub, based on logistic conception "just in time" is offered for the first time, the constructive approach to modeling of a task is defined and are provided its original economic – mathematical models with the indication of methods of realization.

The necessity is also proved for setting the task of cargo transfer process optimization at the stage of operational management of information quality factor of t regarding cargo flows and rolling stock entering the transport nodes. It is shown that this factor gives an idea of the degree of stability of the control parameters and allows us to consider the problem under the conditions of risk and in a determinate formulation.

Keywords: transport hubs, the cargo transfer process (CTP), a problem definition of management of CTP

Вступ. Сучасний етап розвитку науки управління транспортом характеризується націленістю на збагачення теорії й методів управління комплексами сполучених транспортних систем методологічним інструментарієм ринкової економіки. У додатку до транспортних вузлів (ТВ) дана констатація означає, що раніше сформовану концепцію формування механізму управління ТВ, включаючи управління процесом перевалки вантажів (ППВ), що передбачає використання обчислювального арсеналу класичної теорії управління, має бути радикально перетворити. При цьому на початковому етапі такого роду перетворення найбільш актуальною є пророблення питань, пов'язаних з моделюванням задачі оптимізації ППВ в ринковій постановці як ключового елемента процесу функціонування ТВ, чому присвячується ця стаття.

Аналіз основних досягнень і літератури. Протягом останніх років був виконаний ряд досліджень, присвячених критичному аналізу сучасного стану згаданих вище питань [1-4 та ін.]. При цьому було встановлено й в [5-6] показано, що в цей період намітилася стійка тенденція в прагненні дослідників використати при розробці проблем організації управління ТВ поряд із традиційними підходами класичної теорії управління також можливості теорій, що залишалися в тіні, взаємодіючих систем, морфологічного й когнітивного моделювання, побудови фреймових моделей, системного програмування й мультиагентної оптимізації. Однак ці ініціативи поки не привели до створення методів управління ТВ, що враховують умови роботи транспорту в ринковому середовищі й надають науковою новизною. Таке твердження повною мірою поширюється й на задачу оптимізації ППВ, дослідження якої усе ще залишається в зародковому стані.

Наведені відомості підтверджують актуальність теми даної публікації й необхідність її подальшого поглибленого пророблення.

Мета дослідження, постановка задачі. Загальна мета дійсної роботи зв'язується з обґрунтуванням підходу до оптимізації й моделювання ППВ у постановці, адекватної механізму забезпечення погодженого управління ТВ у сучасних ринкових умовах. Відповідно до поставленої вище мети дійсного дослідження обговоримо спочатку найважливіші передумови розгляду задачі управління ППВ в оптимальній постановці, а потім перейдемо до її моделювання з обліком практично реального інформаційного забезпечення процесу проходження вантажів і транспортних засобів через ТВ.

Матеріали досліджень. Приступаючи до постановки розглянутої задачі, будемо виходити із принципу, що затверджує, що ефективність управління ППВ прямо залежить від ступеня досконалості економіко-математичної моделі цього процесу як умови й засоба його оптимізації. При цьому будемо враховувати, що ключову роль у побудові моделі грає вибір критерію оптимальності, що гарантує досягнення необхідного рівня результативності ППВ. Очевидно, що в нашому випадку критерій оптимізації ППВ необхідно конструювати з позицій, що відповідають, з одного боку, природі ринкових відносин в економіці й, з іншого боку, практиці регулювання взаємин між суб'єктами ТВ й їхніми контрагентами в особі власників вантажів і транспортних засобів.

Обоє охарактеризованих фактора націлюють на універсальний ринковий критерій, тобто на максимізацію прибутку від реалізації ППВ із використанням виробничих ресурсів всіх діючих у ТВ суб'єктів. Од-

© А. О. Мурадян. 2017

нак, у силу того, що на етапі оперативного управління всі дохідні ставки (тарифи, плати, збори) по всіх операціях ППВ є константами (відповідно до норм угод між суб'єктами ТВ), як критерій оптимізації ППВ варто прийняти мінімум витрат на здійснення ППВ, включаючи витрати на обслуговування вантажопотоків і транспортних засобів, а також на зміст виробничих ресурсів. Така орієнтація представляється цілком коректною в силу того, що обидві складових зазначених витрат піддаються варіації (по вантажоопотокам, що перевалюються, технологічним схемам освоєння кожного вантажопотоку, режимам використання виробничих ресурсів порту й станції та ін.) при обов'язковому забезпеченні пропускної здатності вантажних фронтів без зміни їхньої технічної оснащеності.

Підкреслимо, що остання умова грає надзвичайно важливу роль у постановці й моделюванні обговорюваної задачі, тому що "працює" на підвищення ймовірності забезпечення проходження вантажів і транспортних засобів через ТВ у строки, передбачені угодами між суб'єктами ТВ і закріплені в нормах "Єдиного технологічного процесу роботи транспортного вузла", що повністю відповідає концепції "точно в строк". А це означає, що запропонований критерій оптимізації ППВ може розглядатися як загальна мета функціонування ТВ, що відповідає інтересам кожного суб'єкта транспортного вузла. Одночасно ця умова є вигідним і для транспортної клієнтури в силу того, що мінімізує ймовірність зриву її контрактних зобов'язань перед контрагентами, завдяки чому підвищується в її сприйнятті привабливість й, виходить, конкурентоздатність ТВ.

Відзначимо, що охарактеризований критерій оптимізації ППВ повністю погодиться із запропонованими нами в [5-6] критерієм й є його природним узагальненням.

Настільки ж важливу роль у постановці й моделюванні обговорюваного завдання грає фактор якості інформації о вантажопотоках і транспортних засобах, що направляються у ТВ. Як показано в [7], на сучасному етапі цей фактор необхідно розглядати з позиції створення автоматизованої системи інформаційного забезпечення взаємодії суб'єктів ТВ із виділенням спеціальних полігонів взаємодії - далеких, середнього й ближніх з передачею з них у ТВ відповідно до попередній, уточненій й остаточній інформації про переміщення вантажів і транспортних засобів. При цьому границями далеких полігонів є моменти початку перевезення вантажів "першим" видом магістрального транспорту після доставки їхнім промисловим транспортом відправників вантажів - виробників продукції для перевалки на магістральний транспорт в "першому" транспортному вузлі і завершення перевезення вантажів "передостаннім" видом магістрального транспорту; середні полігони обмежуються моментами початку перевалки вантажів в "передостанньому" транспортному вузлі і моментом закінчення перевезення вантажів "останнім" видом магістрального транспорту; границі ближніх полігонів збігаються з моментами початку - закінчення перевалки вантажів в "останньому" транспортному вузлі "останнього" виду

магістрального транспорту на промисловий транспорт одержувачів вантажів - споживачів продукції.

Відзначимо, що при такому підході забезпечується послідовне підвищення якості інформації о вантажопотоках і транспортних засобах, що направляються у ТВ. Дійсно, зазначена інформація в далеких полігонах взаємодії звичайно відрізняється гранично низькою якістю, у середніх полігонах - її якість, як правило, підвищується, а в ближніх погонах - ця інформація має найбільш високу якість. Ці обставини обумовлює можливість моделювання ППВ як задачі оптимізації вантажоперевалювального процесу, розглянутого в умовах ризику (для середніх полігонів) і в детермінованій постановці (для ближніх полігонів).

Результати досліджень ППВ. Розглянемо спочатку детермінований варіант задачі оптимізації ППВ у статичній постановці. Припустимо, що протягом деякого інтервалу часу, (наприклад, обліково-звітного періоду, прийнятого спільно портом і станцією), розбитого на рівні відрізки (тривалістю наприклад, по одній годині), необхідно реалізувати ППВ шляхом переміщення в межах ТВ певних обсягів вантажопотоків (наприклад, що відповідають завантаженню залізничних вагонів, або магістральних автомобілів, або судовим партіям) по заздалегідь прийнятим організаційно - технологічним варіантам (ОТВ).

Під "виробничими зонами" будемо мати на увазі комплекси стаціонарних і мобільних технічних засобів, призначених для обслуговування вантажів і транспортних засобів.

При цьому в якості виробничих будемо розглядати зони, обладнані на припортовій залізничній станції (шляхи - головний, приймально-відправний, відстійні й сполучні з портом), у порту (виставочні залізничні колії, вантажні фронти - кордонного, тилові, складські) і поблизу порту (транзитно - вантажні термінали для обслуговування магістральних автомобілів).

Умовимося, що ППВ характеризується двома показниками - питомими витратами на обслуговування вантажопотоків і транспортних засобів і питомих витрат на склад зон.

Відзначимо, що перший із зазначених показників є в загальному випадку змінною величиною в силу того, що його складова по транспортних засобах, залишаючись постійною величиною (тарифом) протягом нормативного часу, починає прогресивно зростати по його витіканні.

Перейдемо до формалізації обговорюваної задачі і введемо необхідні позначення при суцільній нумерації варіюваних величин.

Відомі величини (задані константи): i - індекс виробничих зон обслуговування вантажопотоків ($i = \overline{1, m}$); j - індекс обслуговуваних вантажопотоків ($j = \overline{1, n}$); k - індекс відрізків часу розглянутого інтервалу управління ($k = \overline{1, r}$); T_{ik} - резерв робочого часу i -ї зони на протязі k -го відрізка часу; a_{ijk} - питома ресурсомісткість (трудомісткість) обслуговування j -го вантажопотоку в i -ї зоні на протязі k -го відрізка часу; x_{ijk} та $\bar{x}_{ijk}$ - відповідно мінімальний і максимальний об'єми j -го вантажопотоку, які необхідно обслужити в

i -й зоні на протязі k -го відрізка часу; t_{ijk} та $\bar{t}_{ijk}$ – відповідно мінімально і максимально допустимий час використання i -ї зони для обслуговування j -го вантажопотока на протязі k -го відрізка часу; f_{ijk} – питомий дохід обслуговування j -го вантажопотока в i -й зоні на протязі k -го відрізка часу; c_{ik} – питомі витрати на утримання i -ї зони на протязі k -го відрізка часу.

Невідомі величини (керовані змінні): x_{ijk} – плановий обсяг обслуговування j -го вантажопотока в i -й зоні на протязі k -го відрізка часу; t_{ijk} – плановий час використання i -ї зони для обслуговування j -го вантажопотока на протязі k -го відрізка часу.

Залежності між відомими і невідомими величинами характеризуються наступним чином:

- обсяги освоєння вантажопотоків та показники використання виробничих зон повинні відповідати заздалегідь заданим межах їх зміни, тобто:

$$\left. \begin{aligned} \underline{x}_{ijk} \leq x_{ijk} \leq \bar{x}_{ijk}, \quad i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}; k = \overline{1, r}; \\ \underline{t}_{ijk} \leq t_{ijk} \leq \bar{t}_{ijk}, \quad i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}; k = \overline{1, r}. \end{aligned} \right\}; \quad (1)$$

- використання робочого часу виробничих зон має визначатися ресурсомісткістю (трудомісткістю) освоєння вантажопотоків, тобто:

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^r a_{ijk} x_{ijk} - \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^r t_{ijk} = 0, \quad i = \overline{1, m}; \quad (2)$$

- робочий час виробничих зон може використовуватися в межах його резерву для кожного відрізка часу, тобто:

$$\sum_{j=1}^n t_{ijk} \leq T_{ik}, \quad i = \overline{1, m}; k = \overline{1, r}; \quad (3)$$

- загальний результат реалізації ППВ визначається шляхом підсумовування доходів за всіма вантажопотоками за вирахуванням витрат на утримання виробничих зон протягом розглянутого інтервалу управління, тобто:

$$F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^r f_{ijk} x_{ijk} - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^r c_{ik} t_{ijk}. \quad (4)$$

Зазначимо, що співвідношення (1)–(4) є основою для побудови економіко-математичних моделей задачі оптимізації ППВ для всіх згадуваних вище випадків її постановки.

Представляється очевидним, що в детермінованому випадку модель оптимізації ППВ може бути представлена сукупністю наведених вище співвідношень з деяким перетворенням умови (2), тобто у вигляді наступної системи:

$$F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^r f_{ijk} x_{ijk} - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^r c_{ik} t_{ijk} \rightarrow \max; \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^r a_{ijk} x_{ijk} - \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^r t_{ijk} = 0, \quad i = \overline{1, m}; \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n t_{ijk} \leq T_{ik}, \quad i = \overline{1, m}; k = \overline{1, r}; \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{x}_{ijk} \leq x_{ijk} \leq \bar{x}_{ijk}, \quad i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}; k = \overline{1, r}; \\ \underline{t}_{ijk} \leq t_{ijk} \leq \bar{t}_{ijk}, \quad i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}; k = \overline{1, r}. \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

Звернемося тепер до нагоди відшукати варіанти оптимізації ППВ в умовах ризику, тобто показники питомих витрат на освоєння вантажопотоків і утримання виробничих зон трактуються як випадкові величини з відомими статистичними характеристиками. При цьому будемо враховувати, що на сучасному етапі приділяється підвищена увага так званому операційному ризику, під яким розуміється ризик діяльності підприємства, обумовлений невизначеністю його стану та функціонуванням під впливом як зовнішніх, так і внутрішніх факторів [9]. У додатку до ЗТВ, операційний ризик природним чином пов'язується з невисокою якістю інформації про терміни прибуття ТРЗ і вантажів із зазначенням найменувань і кількості останніх, а також про реалізацію ППВ, що в сукупності веде до неможливості однозначного завдання показників з освоєння вантажопотоків і утримання виробничих зон ЗТВ. Будемо вважати, що ці показники є випадковими величинами з відомими їх очікуваними значеннями та стандартними відхиленнями. За такої умови з'являється можливість прийняття керуючих рішень з управління ППВ в умовах ризику і невизначеності.

Виходячи з цього висновку, побудуємо економіко-математичну модель оптимізації ППВ в умовах ризику. З метою спрощення записів, але без порушення спільності зформованих тверджень, перейдемо до усереднених значень, характеризуючих ППВ величин, – планових обсягів вантажопотоків і питомих доходів на їх освоєння (за зонами та інтервалом управління в цілому), часу використання та витрат на утримання виробничих зон (за вантажопотоками і інтервалом управління) і введемо для них відповідні позначення.

Відомі величини (задані константи): i – індекс виробничих зон для обслуговування вантажопотоків ($i = \overline{1, m}$); j – індекс обслуговуваних вантажопотоків ($j = \overline{1, n}$); k – індекс відрізків часу розглянутого інтервалу управління ($k = \overline{1, r}$); T_{ik} – резерв робочого часу i -ї зони на протязі k -го відрізка часу; a_{ijk} – питома ресурсомісткість (трудомісткість) обслуговування j -го вантажопотока в i -й зоні на протязі k -го відрізка часу; $\underline{x}_{ijk}$ та $\bar{x}_{ijk}$ – відповідно мінімальний і максимальний об'єми j -го вантажопотоку, які необхідно обслужити в i -й зоні на протязі k -го відрізка часу; $\underline{t}_{ijk}$ та $\bar{t}_{ijk}$ – відповідно мінімально і максимально допустимий час використання i -ї зони для обслуговування j -го вантажопотока на протязі k -го відрізка часу; f_{ijk} – питомий дохід обслуговування j -го вантажопотока в i -й зоні на протязі k -го відрізка часу; c_{ik} – питомі витрати на утримання i -ї зони на протязі k -го відрізка часу.

Невідомі величини (керовані змінні): x_{ijk} – плановий обсяг обслуговування j -го вантажопотока в i -й зоні на протязі k -го відрізка часу; t_{ijk} – плановий час використання i -ї зони для обслуговування j -го вантажопотока на протязі k -го відрізка часу.

Залежності між відомими і невідомими величинами характеризуються наступним чином:

- обсяги освоєння вантажопотоків та показники використання виробничих зон повинні відповідати заздалегідь заданим межах їх зміни, тобто:

$$\left. \begin{aligned} \underline{X}_{ijk} \leq X_{ijk} \leq \overline{X}_{ijk}, \quad i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}; k = \overline{1, r}; \\ \underline{t}_{ijk} \leq t_{ijk} \leq \overline{t}_{ijk}, \quad i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}; k = \overline{1, r}; \end{aligned} \right\}; \quad (9)$$

• використання робочого часу виробничих зон має визначатися ресурсомісткістю (трудомісткістю) освоєння вантажопотоків, тобто:

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^r t_{ijk} = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^r a_{ijk} X_{ijk}; \quad (10)$$

• робочий час виробничих зон може використовуватися в межах його резерву для кожного відрізка часу, тобто:

$$\sum_{j=1}^n t_{ijk} \leq T_{ik}, \quad i = \overline{1, m}; k = \overline{1, r}; \quad (11)$$

• загальний результат реалізації ППВ визначаються шляхом підсумовування доходів по всіх вантажопотоках за вирахуванням витрат на утримання виробничих зон протягом розглянутого інтервалу управління, тобто:

$$F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^r f_{ijk} X_{ijk} - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^r c_{ik} t_{ijk}. \quad (12)$$

Зазначимо, що співвідношення (9)–(12) є основою для побудови економіко-математичних моделей задачі оптимізації ППВ для всіх згадуваних вище випадків її постановки.

Представляється очевидним, що в детермінованому випадку модель оптимізації ППВ може бути представлена сукупністю наведених вище співвідношень з деяким перетворенням умови (10), тобто у вигляді наступної системи:

$$F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^r f_{ijk} X_{ijk} - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^r c_{ik} t_{ijk} \rightarrow \max; \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^r a_{ijk} X_{ijk} - \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^r t_{ijk} = 0, \quad i = \overline{1, m}; \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^n t_{ijk} \leq T_{ik}, \quad i = \overline{1, m}; k = \overline{1, r}; \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{X}_{ijk} \leq X_{ijk} \leq \overline{X}_{ijk}, \quad i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}; k = \overline{1, r}; \\ \underline{t}_{ijk} \leq t_{ijk} \leq \overline{t}_{ijk}, \quad i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}; k = \overline{1, r}. \end{aligned} \right\}. \quad (16)$$

Звернемося тепер до нагоди відшукати варіанти оптимізації ППВ в умовах ризику, тобто показники питомих витрат на освоєння вантажопотоків і утримання виробничих зон трактуються як випадкові величини з відомими статистичними характеристиками. При цьому будемо враховувати, що на сучасному етапі приділяється підвищена увага так званому операційному ризику, під яким розуміється ризик діяльності підприємства, обумовлений невизначеністю його стану та функціонуванням під впливом як зовнішніх, так і внутрішніх факторів [11]. У додатку до ЗТВ, операційний ризик природним чином пов'язується з невисокою якістю інформації про терміни прибуття ТРЗ і вантажів із зазначенням найменувань і кількості останніх, а також про реалізацію ППВ, що в сукупності веде до неможливості однозначного завдання показників з освоєння вантажопотоків і утримання виробничих зон ЗТВ. Будемо вважати, що ці

показники є випадковими величинами з відомими їх очікуваними значеннями та стандартними відхиленнями. За такої умови з'являється можливість прийняття керуючих рішень з управління ППВ в умовах ризику і невизначеності.

Виходячи з цього висновку, побудуємо економіко-математичну модель оптимізації ППВ в умовах ризику. З метою спрощення записів, але без порушення спільності зформованих тверджень, перейдемо до усереднених значень, характеризуючих ППВ величин, – планових обсягів вантажопотоків і питомих доходів на їх освоєння (по зонам та інтервалу управління в цілому), часу використання та витрат на утримання виробничих зон (по вантажопотокам і інтервалу управління) і введемо для них відповідні позначення.

Відомі величини (задані константи): T_i – резерв робочого часу i -ї зони; a_{ij} – ресурсомісткість обслуговування j -го вантажопотока в i -й зоні; x_j та $\bar{x}_j$ – відповідно мінімальний і максимальний об'єм j -го планового вантажопотока; t_{ij} та $\bar{t}_{ij}$ – відповідно мінімальний і максимальний допустимий час використання i -ї зони для освоєння j -го вантажопотока; $\bar{f}_{ij}$ – середня величина питомих доходів на обслуговування j -го вантажопотока в i -й зоні; $\bar{c}_i$ – середня величина питомих витрат на утримання i -ї зони.

Невідомі величини (керовані змінні): x_j – плановий об'єм обслуговування j -го вантажопотока; t_{ij} – плановий час використання i -ї зони для освоєння j -го вантажопотока.

Зазначимо, що при трактуванні $\bar{f}_{ij}$ та $\bar{c}_i$ як випадкових величин прибуток з реалізації ППВ являє собою випадкову величину, статистичні характеристики якої визначаються статистичними характеристиками цих показників, а саме:

очікуваним значенням –

$$\bar{F} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \bar{f}_{ij} x_j - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \bar{c}_i t_{ij}; \quad (17)$$

дисперсією –

$$\sigma^2(F) = \sum_{j=1}^n \sigma_j^2 x_j^2 - \sum_{i=1}^m \sigma_i^2 t_i^2, \quad (18)$$

де σ_j та σ_i – середньоквадратичне відхилення, відповідно, доходів з освоєння вантажопотоків і витрат на утримання виробничих зон.

Зазначимо також, що у теорії ризику звертається увага на залежність прийнятих управлінських рішень від характеру відношення системи управління (особи, що приймає рішення) до ризику, який може бути нейтральним, або прямо протилежним. При цьому, як показано в [12], характер ставлення до ризику у формальному плані визначається функцією очікуваної ефективності прийнятих рішень, яка (функція) може бути: лінійною, що зв'язується з нейтральним ставленням до ризику; опуклою, що припускає схильність до ризику; увігнутою, що відповідає відсутності схильності до ризику. Ця обставина означає, що у

випадку нейтрального ставлення до ризику оптимізаційні задачі можна вирішувати в детермінованій постановці з використанням однокритеріальних моделей.

Спираючись на охарактеризовані положення теорії ризику, побудуємо відповідні економіко-математичні моделі задачі оптимізації ППВ, використовуючи наведені вище усереднені значення показника витрат за вантажопотоками і виробничими зонами. Очевидно, що при нейтральному відношенні до ризику шукана модель буде в структурному плані відповідати запису (13) – (16), тобто мати вигляд:

$$\bar{F} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \bar{f}_{ij} x_j - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \bar{c}_i t_{ij} \rightarrow \max; \quad (19)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j - T_i = 0, \quad i = \overline{1, m}; \quad (20)$$

$$\sum_{j=1}^n t_{ij} \leq T_i, \quad i = \overline{1, m}; \quad (21)$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{X}_j \leq x_j \leq \bar{X}_j, \quad j = \overline{1, n}; \\ \underline{t}_{ij} \leq t_{ij} \leq \bar{t}_{ij}, \quad i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

У разі, коли ставлення до ризику відрізняється від нейтрального, необхідно переходити, як зазначалося вище, до бікритеріальної задачі, модель якої записується наступним чином:

$$\bar{F} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \bar{f}_{ij} x_j - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \bar{c}_i t_{ij} \rightarrow \max; \quad (23)$$

$$\sigma^2(F) = \sum_{j=1}^n \sigma_j^2 x_j^2 - \sum_{i=1}^m \sigma_i^2 t_i^2 \rightarrow \min(\max); \quad (24)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j - T_i = 0, \quad i = \overline{1, m}; \quad (25)$$

$$\sum_{j=1}^n t_{ij} \leq T_i, \quad i = \overline{1, m}; \quad (26)$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{X}_j \leq x_j \leq \bar{X}_j, \quad j = \overline{1, n}; \\ \underline{t}_{ij} \leq t_{ij} \leq \bar{t}_{ij}, \quad i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}. \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

Підкреслимо, що рішення моделі (23)–(27) необхідно відшукувати на множині розв'язків задачі оптимізації ППВ, оптимальних за Парето.

Зазначимо, що оптимізаційна спрямованість показника $\sigma^2(F)$ визначається характером відношення керуючої системи до ризику: якщо система схильна до ризику, то $\sigma^2(F)$ необхідно мінімізувати; в іншому випадку – цей показник підлягає максимізації.

Зазвичай в теорії ризику використовують такий показник, як коефіцієнт варіації, який кількісно оцінює ступінь коливання досліджуваних показників біля їх середніх значень. У нашому випадку коефіцієнт варіації (V) визначається наступним чином:

$$V = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^n \delta_j^2 x_j^2 - \sum_{i=1}^m \delta_i^2 t_i^2}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f_{ij} x_j - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_i t_{ij}}. \quad (28)$$

Як зазначається в [11], коефіцієнт варіації не повинен бути занадто великим: у теорії ризику зазвичай приймаються його значення $V < 0.25$.

За такої умови модель оптимізації ППВ записується як схема (19) – (22) з додаванням обмеження:

$$V \leq 0.25, \quad (29)$$

де V визначено в (28).

Висновки. Узагальнення вищевикладеного дозволяє зробити висновок, що запропоновані в даній статті економіко-математичні моделі в єдності з методами їх реалізації можуть бути покладені в основу методики оптимізації ППВ при оперативному управлінні транспортними вузлами.

Список літератури:

1. Куренков, П. В. Управление доставкой в внешнеторговых грузов в смешанном сообщении [Текст]: дис. ... д-ра экон. наук / П. В. Куренков. – М.: ГУУ, 1999. – 478 с.
2. Клепиков, В. П. Методология комплексного развития транспортных систем в проектах взаимодействия железнодорожного и морского транспорта [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / В. П. Клепиков. – М.: МГУПС (МИИТ), 2007. – 352 с.
3. Сычев, А. А. Организация работы транспортного узла в составе транспортного коридора [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / А. А. Сычев. – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2009. – 167 с.
4. Ботнарюк, М. В. Методология формирования транспортного узла как института сетевых партнерских отношений [Текст] / М. В. Ботнарюк // Современная конкуренция. – 2012. – № 3 (38). – С. 98–110.
5. Muradian, A. Ensuring a coordinated cargo transshipment process management in general transport hubs [Text] / A. Muradian // Technology audit and production reserves. – 2014. – Vol. 3, Issue 1 (17). – P. 48–53. doi: [10.15587/2312-8372.2014.25291](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2014.25291)
6. Мурад'ян, А. О. Методичні основи узгодженого управління процесом перевалки вантажів у загальнотранспортних вузлах [Текст]: дис. канд. техн. наук / А. О. Мурад'ян. – Одеса, 2016. – 166 с.
7. Новиков, П. А. Организация эффективного взаимодействия железнодорожного и морского транспорта в припортовых транспортных узлах [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / П. А. Новиков. – Екатеринбург: УрГУПС, 2008. – 154 с.
8. Тейман, А. И. Управление комплексами операций [Текст] / А. И. Тейман. – М.: Политехнический музей, 1967. – 44 с.
9. Енгальчев, О. В. Совершенствование системы управления операционным риском на предприятии [Текст]: дис. ... канд. экон. наук / О. В. Енгальчев. – М.: МГТУ, 2005. – 174 с.
10. Кигель, А. В. Свойства и поиск оптимальных финансовых портфелей для ЛПП с разными отношениями к риску [Текст] / А. В. Кигель // Финансовые риски. – 1999. – № 2. – С. 86–91.
11. Подиновский, В. В. Парето – оптимальные решения многокритериальных задач [Текст] / В. В. Подиновский, В. Д. Ногин. – М.: Наука, 1982. – 256 с.
12. Кини, Р. Л. Принятие решений при многих критериях предпочтения и замещения [Текст] / Р. Л. Кини, Х. Райфа. – М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.

Bibliography (transliterated):

1. Kurenkov, P. V. (1999). Upravlenie dostavkoy v vneshnetorgovykh gruzov v smeshannom soobshchenii. Moscow: GUU, 478.

2. Klepikov, V. P. (2007). Metodologiya kompleksnogo razvitiya transportnyh sistem v proektah vzaimodeystviya zheleznodorozhnogo i morskogo transporta. Moscow: MGUPS (MIT), 352.
3. Sychev, A. A. (2009). Organizatsiya raboty transportnogo uzla v sostave transportnogo koridora. Rostov-na-Donu: RGUPS, 167.
4. Botnaryuk, M. V. (2012). Metodologiya formirovaniya transportnogo uzla kak instituta setevykh partnerskikh otnosheniy. Sovremennaya konkurentsia, 3 (38), 98–110.
5. Muradian, A. (2014). Ensuring a coordinated cargo transshipment process management in general transport hubs. Technology audit and production reserves, 3 (1 (17)), 48–53. doi: [10.15587/2312-8372.2014.25291](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2014.25291)
6. Muradian, A. O. (2016). Metodichni osnovy uzgodzhenoho upravlinnia protsesom perevalky vantazhiv u zahalnotransportnykh vuzlakh. Odessa, 166.
7. Novikov, P. A. (2008). Organizatsiya effektivnogo vzaimodeystviya zheleznodorozhnogo i morskogo transporta v priportovykh transportnykh uzlah. Ekaterenburg: UrGUPS, 154.
8. Teyman, A. I. (1967). Upravlenie kompleksami operatsiy. Moscow: Politekhicheskii muzey, 44.
9. Engalychev, O. V. (2005). Sovershenstvovanie sistemy upravleniya operatsionnym riskom na predpriyatii. Moscow: MGUTU, 174.
10. Kigel', A. V. (1999). Svoystva i poisk optimal'nykh finansovykh portfeley dlya LPR s raznymi otnosheniyami k risku. Finansovye riski, 2, 86–91.
11. Podinovskiy, V. V. (1982). Pareto – optimal'nye resheniya mnogokriterial'nykh zadach. Moscow: Nauka, 256.
12. Kini, R. L., Rayfa, H. (1981). Prinyatie resheniy pri mnogih kriteriyah predpochteniya i zameshcheniya. Moscow: Radio i svyaz', 560.

Поступила (received) 01.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Обґрунтування узгодженого управління процесом перевалки вантажів у транспортних вузлах/ Мурад'ян А. О. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 33(1255). – С. 55–60. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.

Обоснование согласованного управления процессом перевалки грузов в транспортных узлах/ Мурад'ян А. О. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 33(1255). – С. 55–60. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.

Modelling and optimization of cargo transfer process in transport hubs/ Muradian A. // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 33 (1255). – P.55–60. – Bibliogr.:12. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Мурад'ян Арсен Олегович – кандидат технічних наук, Одеський національний морський університет, доцент кафедри "Експлуатація портів і технологія вантажних робіт"; вул. Мечникова, 34, Одеса, Одеська область, 65000; e-mail: fhcty1@rambler.ru

Мурад'ян Арсен Олегович – кандидат технических наук, Одесский национальный морской университет, доцент кафедры "Эксплуатация портов и технология грузовых работ ул. Мечникова, 34, Одесса, Одесская область, 65000; e-mail: fhcty1@rambler.ru

Arsen Muradian – candidate of technical sciences, Odessa National Maritime University; associate professor of the department « Port operation and cargo handling technology»; 34 Mechnikova, Odessa, 65000; e-mail: fhcty1@rambler.ru

УДК 519.218.82

М. Я. ОСТРОВЕРХОВ, А. М. СІЛЬВЕСТРОВ, Б. Р. БОРЯК

КОМПЕНСАЦІЯ ЗАПІЗНЕННЯ В КОНТУРІ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ НАНЕСЕННЯ ІЗОЛЯЦІЇ НА СТРУМОПРОВІДНУ ЖИЛУ КАБЕЛЮ

З метою підвищення якості процесу нанесення полімерної ізоляції на струмопровідну жилу кабелів надвисокої напруги, розглянуто можливість використання в контурі керування технологічним процесом адаптивних до гетероскедастичних збурень фільтрів, функціональні блоки яких – екстраполятори Р. Брауна, що працюють по принципу потрійного експоненціального згладжування, підключені за ноніусним принципом і виконують функції компенсаторів транспортного запізнення. Алгоритм адаптації даного фільтра передбачає використання двох фільтруючих контурів, що функціонують за одним принципом, але із різними параметрами.

Ключові слова: фільтр-екстраполятор, запізнення, виробництво кабелів, прогнозування, адаптація, астатизм, експоненціальне згладжування.

С целью повышения качества процесса наложения полимерной изоляции на токопроводящую жилу кабелей сверхвысокого напряжения, рассмотрена возможность использования в контуре управления технологическим процессом адаптивных к гетероскедастическим возмущениям фильтров. Функциональные блоки фильтров являются экстраполяторами Р. Брауна, что работают по принципу тройного экспоненциального сглаживания, подключены между собой по нониусному принципу и выполняют функции компенсаторов транспортного запаздывания. Алгоритм адаптации данного фильтра предусматривает использование двух фильтрующих контуров, функционирующих по одному принципу, но с разными параметрами.

Ключевые слова: фильтр-экстраполятор, запаздывание, производство кабелей, прогнозирование, адаптация, астатизм, экспоненциальное сглаживание.

To improve quality of the polymer insulation winding process for extra high voltage cables we researched the possibility of using adaptive filter. This filter can be integrated into control system as data processing algorithm and its main aim is to compensate heteroscedastic noise.

The working principle is based on double exponential smoothing that was proposed by R. Brown. The lag of triple exponential smoothing was compensated by nonius connection of three filters. In such case filter can be used as a transport delay compensator as well.

Algorithm of adaptation was designed to get an ability to change the smoothing factor of the filter during the process. The variability of smoothing factor makes the filter to adapt to changes of noise level and to avoid loss of information. The adaptation process requires using two filtering contours that works with the same principle but with different smoothing factors.

Keywords: filter-extrapolator, delay, cable production, forecasting, adaptation, astaticism, exponential smoothing.

Вступ. Виробництво кабелів світового рівня з ізоляцією на надвисокій напругі [1, 2] (до 330 кВ) здійснюється на електротехнічному комплексі, який складається з десятків систем, взаємозв'язаних між собою через рухому кабельну продукцію в умовах дії багатьох збурюючих факторів. Стабілізація технологічних параметрів та фільтрація і прогнозування значень технологічних змінних сприяє зменшенню радіального та осевого зміщення ізоляції відносно металічної жили в процесі її багатошарового нанесення. Нанесення тришарової ізоляції на струмопровідну жилу, яка рухається зі швидкістю близько 50 м/хв здійснюється за допомогою блоку екструдерів 1 (рис. 1) [3, 4].

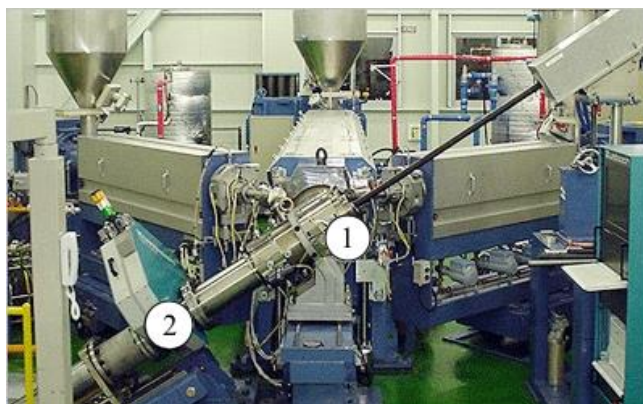


Рис. 1 – Блоки екструдерів (1) та датчиків (2)

Зовнішній діаметр кожного шару ізоляції вимірюється рентген-датчиками 2 (рис. 1), які встановлюються на відстані біля 0,5 м від виходу екструдерів. Це створює в контурах регулювання товщини шарів

ізоляції транспортне запізнення t_s в середньому 0,5 с. Наявність запізнення негативно впливає на швидкість і точність керування товщиною шарів та може призвести до коливань і втрати стійкості системи [5].

Товщина кожного шару ізоляції регулюється автоматизованими електроприводами екструдерів [6]. Спрощену функціональну схему системи регулювання товщини (зовнішнього діаметру) шарів ізоляції зображено на рис. 2, де: X^* , $X(t)$, $X(t - t_s)$, $\hat{X}(t)$ – вектор-функції заданих, дійсних, вимірюваних та прогнозованих діаметрів; $\Delta X(t)$, $U(t)$, $\omega(t)$ – вектор-функції похибки діаметрів, керуючого впливу та швидкостей обертання черв'яків трьох екструдерів.

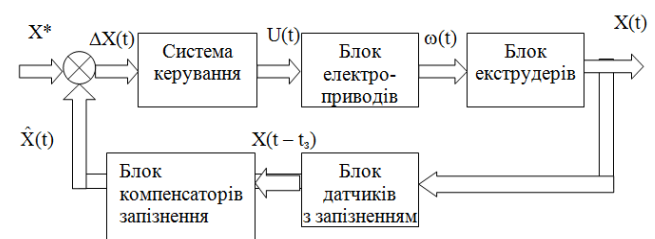


Рис. 2 – Спрощена функціональна схема системи регулювання

Мета та задачі дослідження. Мета роботи – підвищення якості керування товщиною шарів ізоляції кабелю шляхом компенсації негативного впливу транспортного запізнення в умовах невизначеності та нестационарності шумів вимірювання. Для досягнення цієї мети в контурі керування для компенсації транспортного запізнення t_s введено спеціальний блок прогнозування запізнених показників $X(t - t_s)$ блока датчиків (рис. 2).

© М. Я. Островерхов, А. М. Сільвестров, Б. Р. Боряк. 2017

Прогнозування сигналів $X(t-t_s)$ фільтром-екстраполятором Р. Брауна. Сигнали $X(t-t_s)$ з дачів вимірюваних діаметрів спотворено гетероскедастичною завадою (випадковим процесом з нестационарною дисперсією). Спектри корисної складової сигналу і випадкових збурень дещо рознесені. Тому для фільтрації випадкових збурень у фільтрі-екстраполяторі Р. Брауна [7, 8] використано три послідовно увімкнених інерційних ланки першого порядку:

$$W(p) = \frac{1}{\tau p + 1}, \quad (1)$$

де p – оператор Лапласа; τ – стала часу.

Інерційні ланки (1) з відповідними до схеми (рис. 3) з'єднаннями і пропорційними ланками та сумуючими елементами утворюють структуру фільтра-екстраполятора Р. Брауна. За умови квадратичної апроксимації:

$$\hat{x}(t+t_s) = \hat{x}(t) + t_s \cdot \frac{d\hat{x}}{dt} + \frac{t_s^2}{2} \cdot \frac{d^2\hat{x}}{dt^2} \quad (2)$$

прогнозного значення $\hat{x}(t+t_s)$ тричі згладженого фільтрами (1) сигналу $\hat{x}(t)$, коефіцієнти k_i , $i = \overline{1, 5}$ приймають наступні значення: $k_1 = -\alpha$; $k_2 = \alpha$; $k_3 + k_4 + k_5 = 0$; $2k_3 + k_5 = 0$; тоді $k_3 = k_4 = \alpha^2$; $k_5 = -2\alpha^2$.

Для дискретної форми реалізації інерційна ланка (1) замінюється дискретною

$$\hat{y}_1(k) = \alpha x(k) + (1-\alpha)y_1(k-1), \quad (3)$$

де $\alpha = \frac{\Delta t}{\tau}$.

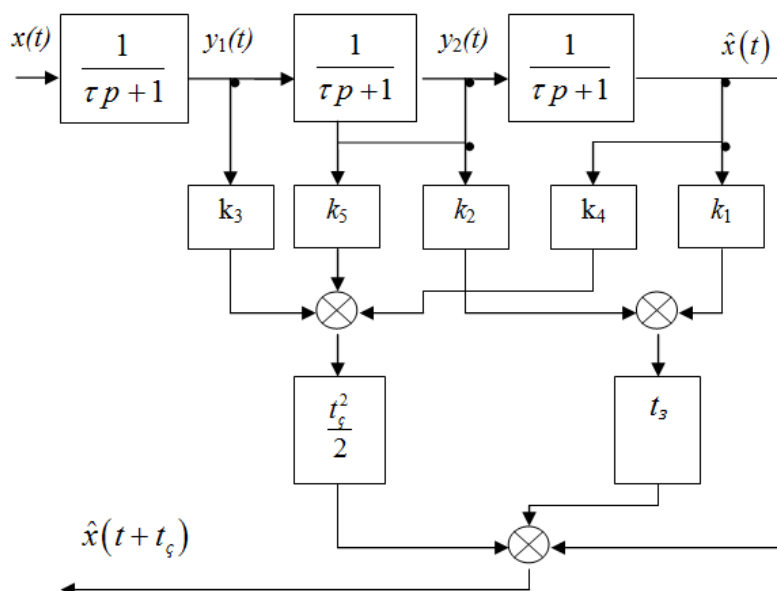


Рис. 3 – Аналогова реалізація фільтра-екстраполятора Р. Брауна

Тоді прогнозне на m дискретів Δt часу t значення $\hat{x}(k+m)$, аналогічно до (2), дорівнюватиме [7]:

$$\hat{x}(k+m) = \hat{x}(k) + t_s \cdot \frac{d\hat{x}}{dt}(k) + \frac{t_s^2}{2} \cdot \frac{d^2\hat{x}}{dt^2}(k), \quad (4)$$

де [2] $\hat{x}(k) = 3\Phi'(k) - 3\Phi''(k) + \Phi'''(k)$,

$$\frac{d\hat{x}}{dt}(k) = \frac{\alpha}{2(1-\alpha)^2} \times \left[(6-5\alpha)\Phi'(k) - (10-8\alpha)\Phi''(k) + (4-3\alpha)\Phi'''(k) \right],$$

$$\frac{d^2\hat{x}}{dt^2}(k) = \frac{\alpha^2}{2(1-\alpha)^2} \left[\Phi'(k) - 2\Phi''(k) + \Phi'''(k) \right],$$

$$\Phi'(k) = \alpha x(k) + (1-\alpha)\Phi'(k-1),$$

$$\Phi''(k) = \alpha\Phi'(k) + (1-\alpha)\Phi''(k-1),$$

$$\Phi'''(k) = \alpha\Phi''(k) + (1-\alpha)\Phi'''(k-1).$$

Для системи (рис. 2) достатньо лінійної апроксимації, бо за час t_s сигнал $x(t)$ суттєво не зміниться. І, взагалі, похибка апроксимацій прогнозного значення $X(t+t_s)$ чи $X(k+m)$ виразами (2), (4) суттєво менше похибки слідування $\hat{x}(t)$ за $x(t)$, яка утворюється внаслідок потрійного згладжування інерційними фільтрами (1). Так для лінійно зростаючого сигналу $x(t) = at$ (рис. 4), за теоремою Лапласа [5], ustalена похибка $\varepsilon(\infty)$ дорівнює:

$$\begin{aligned} \varepsilon(\infty) &= \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot W_\varepsilon(p) \cdot x(p) = \\ &= \lim_{p \rightarrow 0} p \left(1 - \frac{1}{(\tau p + 1)^3} \right) \cdot \frac{a}{p^2} = 3a\tau \end{aligned} \quad (5)$$

Для сигналу квадратичної форми похибка $\varepsilon(\infty)$ прямує до нескінченності (рис. 5).

Прогнозування ноніусно ввімкненою системою фільтрів Р. Брауна. Для ліквідації похибки слідування $\hat{x}(t)$ за $x(t)$ необхідно для сигналу, що лінійно змінюється, створити структуру фільтра з астатизмом [5] першого порядку, для квадратичної зміни сигналу – з астатизмом другого порядку [9]. На рис. 6 подано структуру фільтра – лінійного екстраполятора з астатизмом другого порядку, де Brown's DES – потрійне експоненціальне згладжування Брауна (Brown's triple exponential smoothing).

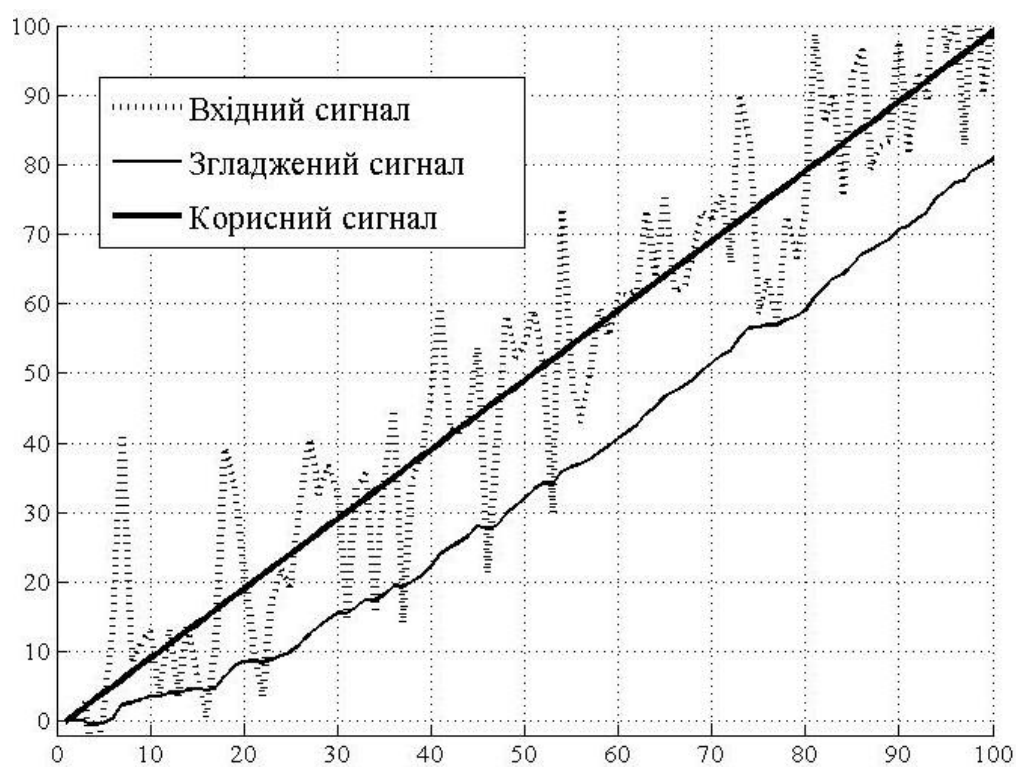


Рис. 4 – Процес згладжування суми лінійного сигналу $x(k) = k$ і шуму фільтром Брауна, $\varepsilon(\infty) \cong 20$

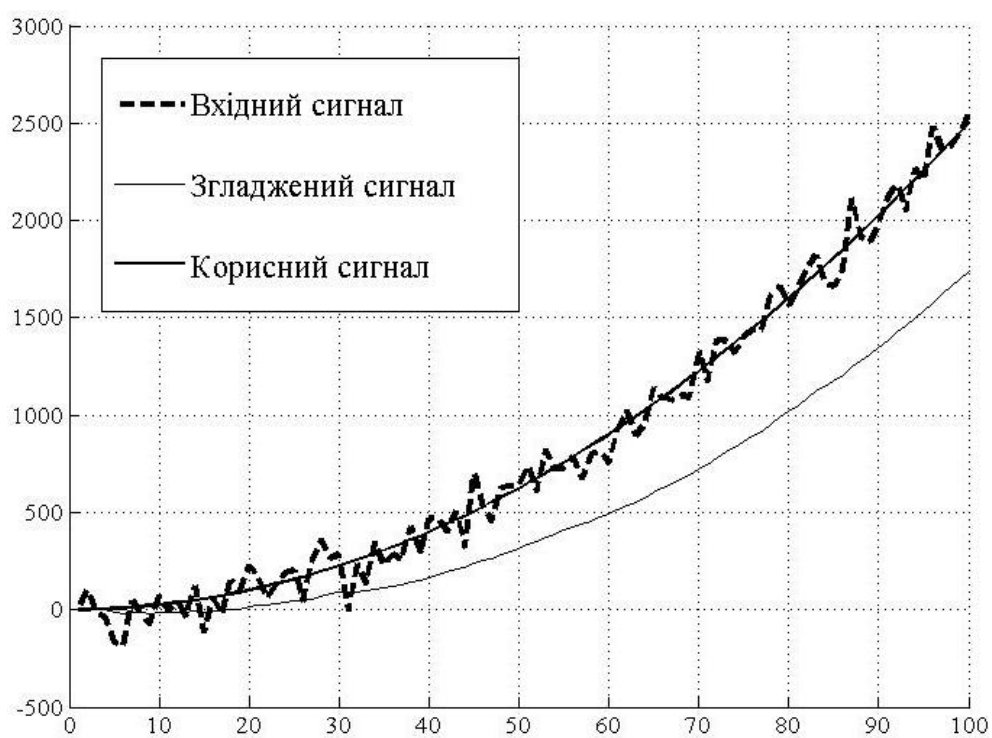


Рис. 5 – Процес згладжування фільтром Р. Брауна суми квадратично зростаючого сигналу

$$x(k) = \frac{k^2}{4} \text{ і випадкового збурення}$$

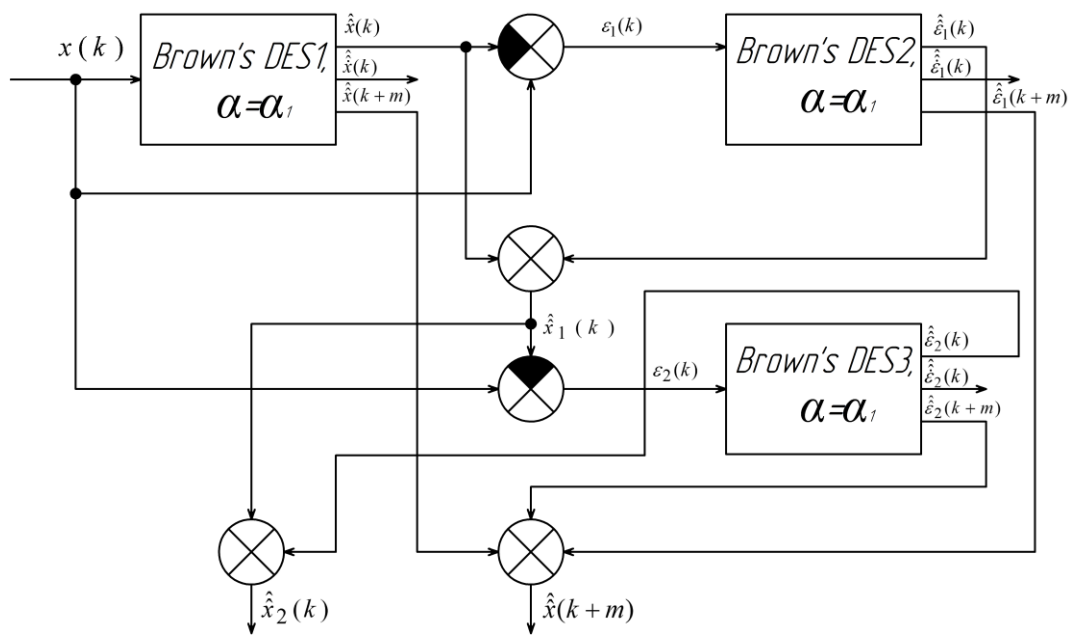


Рис. 6 – Ноніусне ввімкнення фільтрів Р. Брауна

Астатизм забезпечується ноніусним включенням трьох фільтрів Р. Брауна. Перший видає згладжене $\hat{x}(k)$ і прогнозне $\hat{x}(k+m)$ значення сигналу $x(k)$. На вхід другого фільтра подається похибка $\varepsilon_1(k)$ слідування $\hat{x}(k)$ за $x(k)$ першого фільтра. На вхід третього фільтра подано похибку $\varepsilon_2(k)$ між $x(k)$ і сумою $\hat{x}(k)$ і $\hat{\varepsilon}_1(k)$. У результаті складання $\hat{x}(k)$, $\hat{\varepsilon}_1(k)$ і $\hat{\varepsilon}_2(k)$ отримаємо скориговане на похибки слідування значення $\hat{x}_2(k)$. А при складанні прогноз-

них значень $\hat{x}(k+m)$, $\hat{\varepsilon}_1(k+m)$ і $\hat{\varepsilon}_2(k+m)$ отримаємо скориговане на похибку слідування прогнозне значення $\hat{x}_2(k+m)$. На рис. 7 показано роботу фільтра (рис. 6) при прогнозі лінійно змінюваного сигналу $x(k) = k$, на рис. 8 – квадратично. Як видно з рис. 7, рис. 8, ноніусне з'єднання фільтрів Р. Брауна зі сталим параметром α забезпечує достатньо якісну фільтрацію без похибки слідування і, відповідно, прогноз (за умов стаціонарності характеристик випадкових збурень у вимірах сигналу $x(k)$).

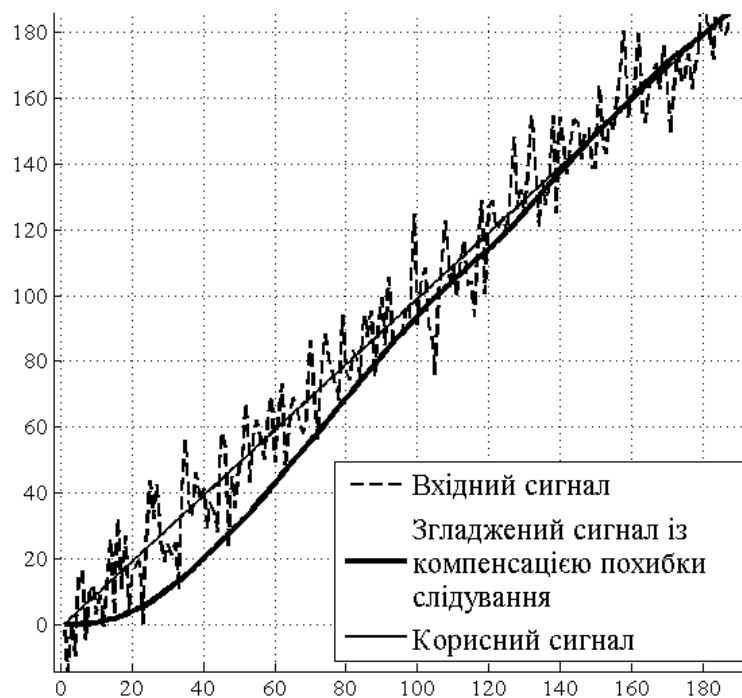


Рис. 7 – Процес прогнозу і компенсації похибки слідування

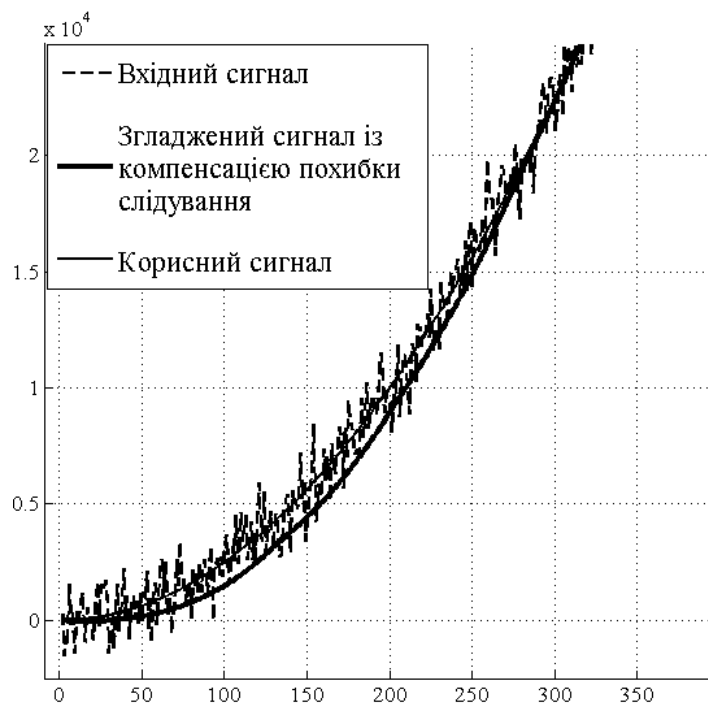


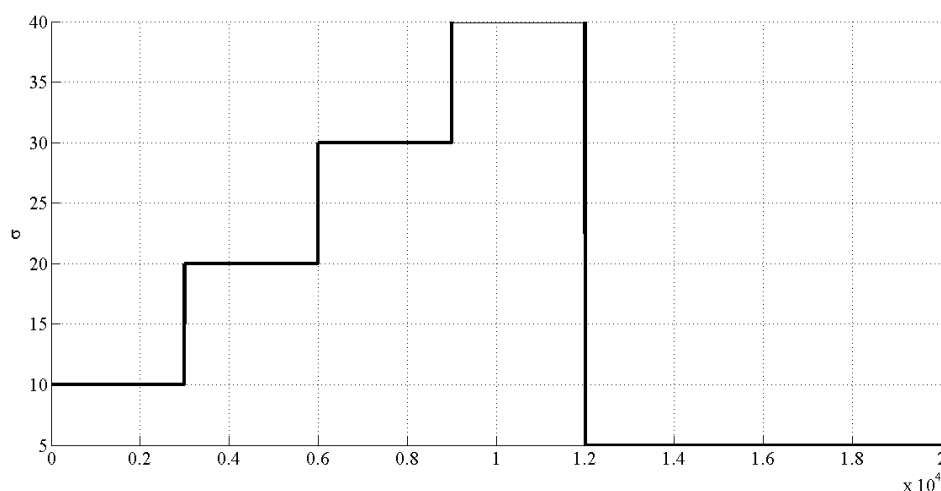
Рис. 8 – Процес прогнозу і компенсації похибки слідування

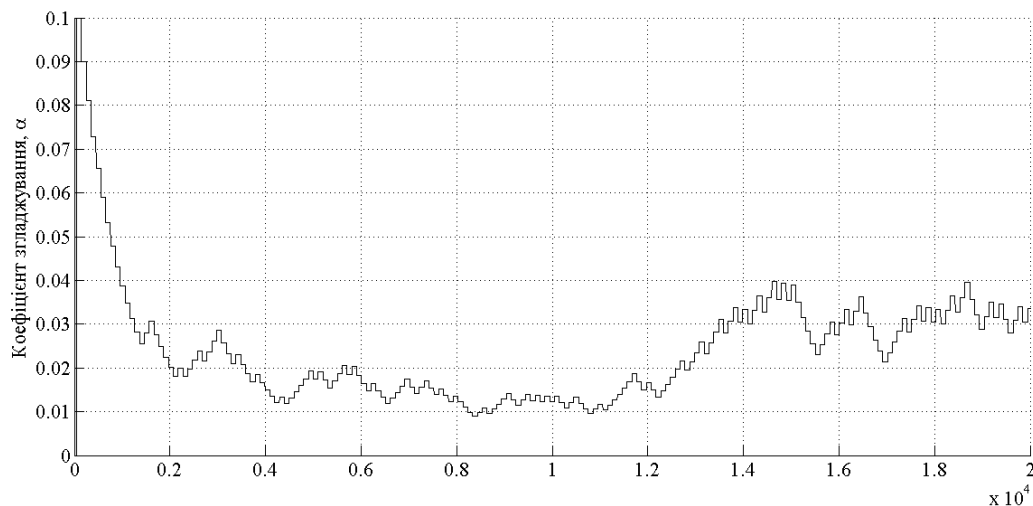
Однак, у випадку нестационарності (гетероскедастичності) випадкових збурень, для якісної фільтрації необхідно змінювати параметр α фільтра.

Адаптація фільтра до зміни характеристик сигналу і випадкових збурень. По ходу технологічного процесу нанесення ізоляції на металеву жилу кабелю мають місце природні зміни характеристик випадкових похибок у вимірюванні діаметрів. Це зміна співвідношення «шум – сигнал», а також частотного спектру шуму. Для якісного прогнозування сигналу $x(t)$ необхідна адаптація параметру α фільтра до змін характеристик сигналу і збурення [10]. Для цього скористаємось диференційним принципом. Прогноз $x(t)$ виконується двома фільтрами (рис. 6). Один має параметр α , другий $\alpha + \Delta\alpha$ ($\Delta\alpha = 0,1\alpha$). Прогнозні

значення обох фільтрів затримуються на t кроків і зіставляються з поточними значеннями $x(k)$. Модулі різниць цих значень усереднюються і відбувається збільшення чи зменшення параметра α залежно від різниці усереднених модулів. На рис. 9 подано графік зміни у часі стандартного відхилення σ випадкового збурення у вимірах $x(k)$, $k = 0, 20000$.

На рис. 10 – процес адаптації параметра α до σ . Зі збільшенням σ шумів від 10 до 40 (рис. 9) α зменшився з 0,1 до 0,01 (інтервал часу від $k = 0$ до $k = 1200$). Далі, при зменшенні амплітуди шуму до 5, відбулося зростання α до 0,03 і невеликі коливання в зоні $\alpha = 0,03$ внаслідок дискретності алгоритму настройки α .

Рис. 9 – Зміна стандартного відхилення σ шуму у вимірах $x(k)$

Рис. 10 – Процес адаптації параметра α до змінної σ

Таким чином, за невідомих характеристик сигналу $x(t)$ і випадкових збурень (окрім інформації про рознесення їх спектрів) відбувається налагоджування параметра α фільтра до області його оптимальних значень ($\alpha^* = 0,01 \pm 0,003$ для $\sigma = 40$ і $\alpha^* = 0,03 \pm 0,005$ для $\sigma = 5$).

Подальше покращення роботи запропонованого фільтра можливе шляхом завдання і адаптації різних значень параметра α фільтрів Р.Брауна: для першого фільтра (рис. 6) співвідношення шум – сигнал менше, ніж для другого, для другого менше, ніж для третього. Відповідно, оптимальне значення α^* для першого більше, ніж для другого, для другого більше, ніж для третього.

Для виключення ділянки часу з перехідним процесом від параметричного збурення (зміни параметра

α на $\pm\Delta\alpha$) замість схеми з двома ноніусними фільтрами можна використати схему з трьома: α ; $\alpha + \Delta\alpha$; $\alpha - \Delta\alpha$. З трьох схем для прогнозу використовується та, в якій похибка прогнозу мінімальна. Дві інші змінюють свої α так, щоб їх значення відрізнялись на $\pm\Delta\alpha$ від α оптимального каналу.

Висновки. Представлений ноніусний адаптивний фільтр дозволить в умовах статистичної невизначеності і нестационарності характеристик вимірів корисних сигналів забезпечити високоякісний прогноз корисної складової сигналу і, як наслідок, якість і стійкість систем автоматичного управління об'єктами, які мають транспортне запізнення у вимірах їх змінних стану.

Список літератури:

1. Шидловський, А. К. Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения [Текст]: монография / А. К. Шидловський, А. А. Щерба, В. М. Золотарев, А. Д. Подольцев, И. Н. Кучерявая. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2013. – 551 с.
2. Vahedy, V. Polymer insulated high voltage cables [Text] / V. Vahedy // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2006. – Vol. 22, Issue 3. – P. 13–18. doi: [10.1109/mei.2006.1639025](https://doi.org/10.1109/mei.2006.1639025)
3. Rubanenko, O. Determination of optimal transformation ratios of power system transformers in conditions of incomplete information regarding the values of diagnostic parameters [Text] / O. Rubanenko, O. Kazmiruk, V. Bandura, V. Matvijchuk, O. Rubanenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 4, Issue 3 (38). – P. 66–79. doi: [10.15587/1729-4061.2017.108945](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108945)
4. Бикинеева, Ю. Л. Интегрированная система автоматизации кабельного производства [Текст] / Ю. Л. Бикинеева, Е. И. Громаков, В. М. Павлов, А. М. Малышенко // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314, № 5. – С. 69–74.
5. Методы классической и современной теории автоматического управления [Текст]: учеб. / под ред. Н. Д. Егупова. – М.: Из-во МГТУ им. Н. Е. Баумана, 2000. – 1000 с.
6. Тарарыкин, С. В. Системы координирующего управления взаимосвязанными электроприводами [Текст] / С. В. Тарарыкин, В. В. Тютиков. – Иваново: ИГЭУ, 2000. – 212 с.
7. Brown, R. Exponential Smoothing for Predicting Demand [Text] / R. Brown. – Cambridge, Massachusetts: Arthur D. Little Inc, 1956.
8. Boriak, B. R. Filtering and forecasting signals algorithm based on exponential Brown's filter [Text] / B. R. Boriak, A. M. Silvestrov // Academic J. Control, Navigation and Communication Systems. – 2017. – Vol. 4, Issue 44. – P. 150–152.
9. Сільвестров, А. М. Згладжування та прогнозування сигналів за допомогою ноніусного включення експоненціальних фільтрів моделі Брауна [Текст] / А. М. Сільвестров // Матеріали Всеукраїнської наук.-практ. конференції «Електронні та механотронні системи: теорія, інновації, практика». – Полтава, 2015. – С. 65–68.
10. Боряк, Б. Р. Дослідження алгоритму згладжування і налаштування адаптивного фільтра Брауна при зміні амплітуди шумів [Текст] / Б. Р. Боряк // Матеріали 69 наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету, квітень-травень. – 2017. – Т. 1. – С. 4–6.

Bibliography (transliterated):

1. Shidlovskiy, A. K., Shcherba, A. A., Zolotarev, V. M., Podol'tsev, A. D., Kucheryavaya, I. N. (2013). Kabeli s polimernoy izolyatsiey na sverhvysokiye napryazheniya. Kyiv: In-t elektrodinamiki NAN Ukrainy, 551.
2. Vahedy, V. (2006). Polymer insulated high voltage cables. IEEE Electrical Insulation Magazine, 22 (3), 13–18. doi: [10.1109/mei.2006.1639025](https://doi.org/10.1109/mei.2006.1639025)
3. Rubanenko, O., Kazmiruk, O., Bandura, V., Matvijchuk, V., Rubanenko, O. (2017). Determination of optimal transformation ratios of power system transformers in conditions of incomplete information regarding the values of diagnostic parameters. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (3 (88)), 66–79. doi: [10.15587/1729-4061.2017.108945](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108945)

4. Bikineeva, Yu. L., Gromakov, E. I., Pavlov, V. M., Malysenko, A. M. (2009). Integrirovannaya sistema avtomatizatsii kabel'nogo proizvodstva. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 314 (5), 69–74.
5. Egupov, N. D. (Ed.) (2000). Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya. Moscow: Iz-vo MGTU im. N. E. Bauman, 1000.
6. Tararykin, S. V., Tyutikov, V. V. (2000). Sistemy koordiniruyushchego upravleniya vzaimosvyazannymi elektroprivodami. Ivanovo: IGEU, 212.
7. Brown, R. (1956). Exponential Smoothing for Predicting Demand. Cambridge, Massachusetts: Arthur D. Little Inc.
8. Boriak, B. R., Silvestrov, A. M. (2017). Filtering and forecasting signals algorithm based on exponential Brown's filter. Academic J. Control, Navigation and Communication Systems, 4 (44), 150–152.
9. Silvestrov, A. M. (2015). Zghladzhuvannya ta prohnozuvannya syhnaliv za dopomohoiu noniusnogo vkluchennia eksponentsialnykh filtriv modeli Brauna. Materialy Vseukrainskoi nauk.-prakt. konferentsiy «Elektronni ta mekhantronni systemy: teoriya, innovatsiy, praktyka». Poltava, 65–68.
10. Boriak, B. R. (2017). Doslidzhennia alhorytmu zghladzhuvannya i nalashtuvannya adaptivnogo filtra Brauna pry zmini amplitudy shumiv. Materialy 69 naukovoï konferentsii profesoriv, vykladachiv, naukovykh pratsivnykiv, aspirantiv ta studentiv universytetu, kviten-traven, 1, 4–6.

Надійшла (received) 21.09.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Компенсация запізнення в контурі керування процесом нанесення ізоляції на струмопровідну жилу кабелю/ Островерхов М. Я., Сильвестров А. М., Боряк Б. Р. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 33(1255). – С.61–67. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Компенсация запаздывания в контуре управления процессом нанесения изоляции на токопроводящую жилу кабеля/ Островерхов Н. Я., Сильвестров А. Н., Боряк Б. Р. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 33(1255). – С. 61–67.– Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Delay Compensation in the Control Circuit for the Insulation Process on the Conductor Cable/ Ostroverkhov M., Silvestrov A., Boryak B. //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 33 (1255).– P.61–67. – Bibliogr.:10. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Островерхов Микола Якович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теоретичної електротехніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», проспект Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: n.ostroverkhov@hotmail.com.

Сильвестров Антон Миколайович – доктор технічних наук, професор, кафедра теоретичної електротехніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», проспект Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: silvestrovananton@gmail.com.

Боряк Богдан Радиславович – аспірант, кафедра автоматики та електропривода, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Першотравневий проспект, 24, м. Полтава, Україна, 36011; e-mail: lightraven72@gmail.com.

Островерхов Николай Яковлевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической электротехники, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», проспект Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056; e-mail: n.ostroverkhov@hotmail.com.

Сильвестров Антон Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры теоретической электротехники, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», проспект Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056; e-mail: silvestrovananton@gmail.com.

Боряк Богдан Радиславович – аспирант, кафедра автоматики и электропривода, Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, Первомайский проспект, 24, м. Полтава, Украина, 36011; e-mail: lightraven72@gmail.com.

Ostroverkhov Mykola – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Theoretical Electrical Engineering, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 37, Peremohy Avenue, Kyiv, Ukraine, 03056; e-mail: n.ostroverkhov@hotmail.com.

Silvestrov Anton – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Theoretical Electrical Engineering, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 37, Peremohy Avenue, Kyiv, Ukraine, 03056; e-mail: silvestrovananton@gmail.com.

Boryak Bohdan – postgraduate student, department of automation and electric drive, Yuriy Kondratyuk Poltava National Technical University, 24, Pershotravnevy prospect, Poltava, Ukraine, 36011; 03056; e-mail: lightraven72@gmail.com.

А. В. БЕЗСМЕРТНА, І. В. ШОСТАК, А. П. СОБЧАК, О. І. ПОПОВА

ЛОГИСТИЧЕСКИЕ РИСКИ ЭТАПОВ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ПРОДУКЦИИ ВИРТУАЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

В данной статье рассмотрены цель и характерные особенности функционирования виртуального производственного предприятия, выделены преимущества и недостатки производственного предприятия виртуальной формы функционирования. Проведен анализ этапов жизненного цикла продукции, информационные потоки на входе и выходе каждого из этапов, а также идентифицированы риски, возникающие на этапах жизненного цикла продукции виртуального производственного предприятия, на виртуальном предприятии. Построена диаграмма в виде декомпозиции жизненного цикла продукции виртуального производственного предприятия, позволяющая разделить жизненный цикл на компоненты по уровням, что упрощает процесс идентифицирования логистических рисков. Определены факторы, которые подвергаются наибольшему риску на виртуальном предприятии с целью их минимизации. Определено, что для идентификации логистических рисков важным звеном является построение логистической среды причем логический вывод в распределенной системе может рассматриваться с позиции эквивалентной системы на основании уже определенной семантики, либо введением семантической функции распределенного ввода

Ключевые слова: виртуальное предприятие, классическое предприятие, логистические риски, логистическая среда, жизненный цикл продукции.

У даній статті розглянуті мета і характерні особливості функціонування віртуального виробничого підприємства, виділені переваги та недоліки виробничого підприємства віртуальної форми функціонування. Проведено аналіз етапів життєвого циклу продукції, інформаційні потоки на вході і виході кожного з етапів, а також ідентифіковані ризики, що виникають на етапах життєвого циклу продукції віртуального виробничого підприємства, на віртуальному підприємстві. Побудована діаграма у вигляді декомпозиції життєвого циклу продукції віртуального виробничого підприємства, що дозволяє розділити життєвий цикл на компоненти за рівнями, що спрощує процес ідентифікування логістичних ризиків. Визначено фактори, які піддаються найбільшому ризику на віртуальному підприємстві з метою їх мінімізації. Визначено, що для ідентифікації логістичних ризиків важливою ланкою є побудова логістичної середовища причому логічний висновок в розподіленій системі може розглядатися з позиції еквівалентної системи на підставі вже певною семантики, або введенням семантичної функції розподіленого вводу

Ключові слова: віртуальне підприємство, класичне підприємство, логістичні ризики, логістична середа, життєвий цикл продукції.

This article considers the purpose and characteristics of the virtual production enterprise, the advantages and disadvantages of the production enterprise of the virtual form of functioning are highlighted. The analysis of the stages of the product life cycle, the information flows at the input and output of each stage, as well as the risks that occur at the stages of the life cycle of the products of a virtual production enterprise, in a virtual enterprise, are analyzed. A diagram is constructed in the form of decomposition of the life cycle of products of a virtual production enterprise, which allows to divide the life cycle into components by levels, which simplifies the process of identifying logistics risks. The factors that are most at risk in virtual enterprises are identified with a view to minimizing them. It is determined that to identify logistics risks an important link is the construction of a logistics environment, and the logical conclusion in a distributed system can be viewed from the position of an equivalent system based on already defined semantics or by introducing the semantic function of distributed input

Keywords: virtual enterprise, classical enterprise, logistics risks, logistics environment, product life cycle.

Введение. Минимизация логистических рисков на предприятии – одна из важнейших задач, стоящих перед любой компанией, которая ориентируется на успех. Способность оперативно реагировать на изменения окружающей среды, умение провести грамотный анализ сложившейся ситуации, выявить риски и найти рычаги воздействия на появление проблемы – вот, что наиболее востребовано в современных условиях ведения бизнеса. Таким образом набирает популярность такое понятие как виртуальное предприятие.

Целью данной работы является способы идентификации рисков, возникающих на этапах жизненного цикла виртуального предприятия, продукционное представление знаний при построении виртуальной логистической среды с целью их минимизации

Аналитическая часть. Виртуальное производство – новый тип производства, не имеет фиксированной организационной и территориальной структуры, в котором процесс создания информации для программно управляющего технологического оборудования и самого изготовления изделия может быть распределен во времени и пространстве между многими предприятиями [10]. Определение классификационной группы виртуальных предприятий представлено на рис. 1.

Цель работы виртуального предприятия: получение прибыли путем максимально-возможного удовлетворения потребностей потребителей быстрее и каче-

ственной потенциальных конкурентов. Способность увеличивать качество и скорость выполнения заказа путем объединения ресурсов разных субподрядчиков в единое целое, является главной особенностью виртуального предприятия; виртуальные предприятия направляют свою деятельность в большей мере на выполнение индивидуальных заказов клиентов. Только виртуальное предприятие, которое способно организовать процесс создания и сбыта продукции на основе привлеченных ресурсов и может привлекать необходимые ресурсы для осуществления проекта, способно «выжить» в условиях возрастающей конкуренции.

Характерными особенностями виртуальных предприятий являются [1]:

- системное использование ресурсов;
- наличие гибкой и адаптивной организационной структуры;
- временный характер организации и производства продукции, что невозможно без объединения партнеров;
- минимальный стартовый капитал;
- работа в условиях неопределенности сбыта;
- гибкая смена номенклатуры продукции;
- работа без склада;
- отсутствие основных фондов;
- минимальное количество сотрудников;

Наряду с указанными выше преимуществами, виртуальные предприятия имеют и недостатки:

– чрезмерная экономическая зависимость от партнеров, что связано с узкой специализацией участников предприятия;

– практическое отсутствие социальной защиты и материальной поддержки партнеров (в ситуации взаимодействия с физическими лицами) вследствие отказа от классических долгосрочных договорных форм и обычных трудовых отношений;

– опасность чрезмерного усложнения, вытекающая из разнородности участников предприятия, неяс-

ности относительно членства в ней, динамики самоорганизации, неопределенности в планировании для участников и т.д.

С учетом сказанного выше, можно выделить ключевое преимущество виртуальных предприятий: возможность выбирать и использовать лучшие ресурсы (информационные, финансовые, материальные, интеллектуальные), предлагаемые мировым экономическим пространством.

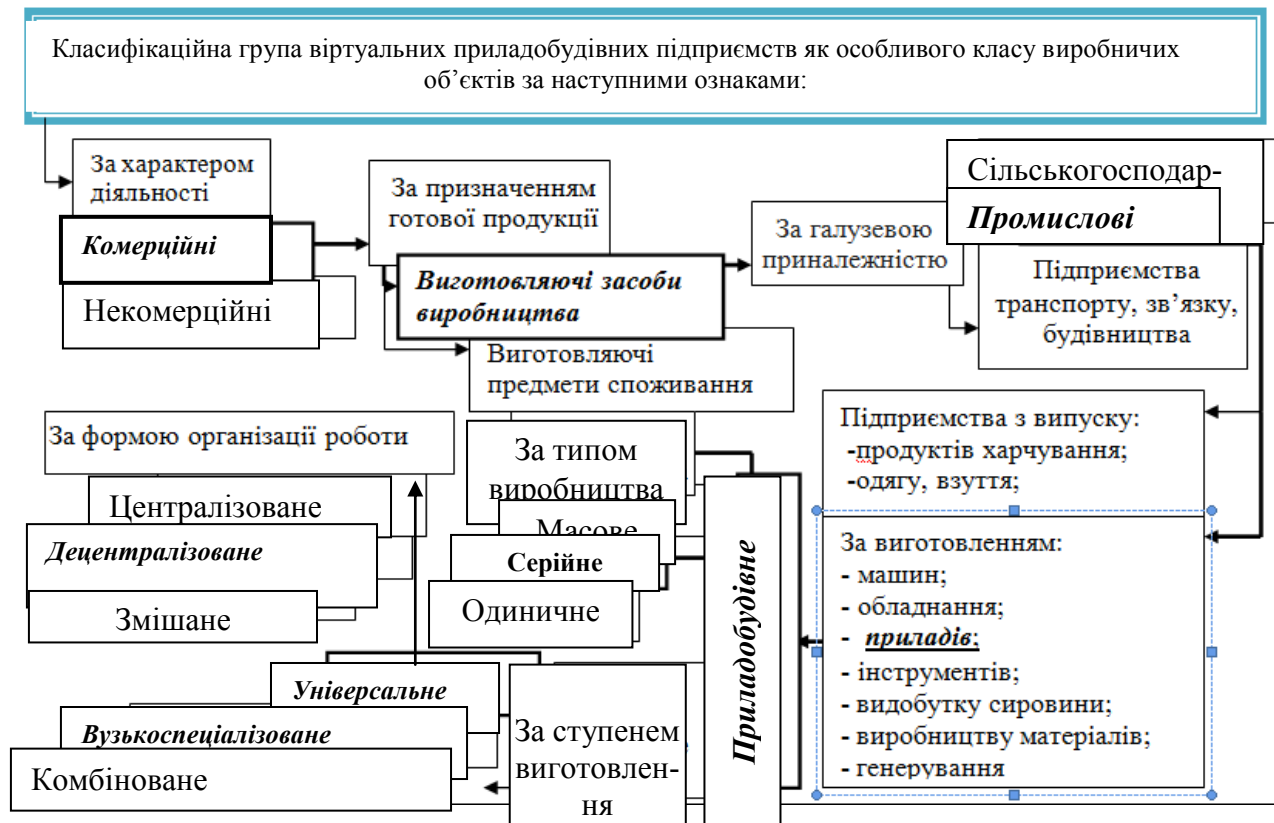


Рис. 1 – Классификационная группа виртуальных предприятий как особого класса производственных объектов

Идентификация рисков на этапах жизненного цикла продукции. Виртуальная компания объединяет цели, культуру, традиции, ресурсы и опыт нескольких предприятий-партнеров при разработке сложных инновационных проектов или при производстве продукции мирового уровня, координируя их развитие, то есть цель предприятия. Возникает искусственное сообщество, сформированное информационным путем [3]. При этом продолжается жизненный цикл отдельного предприятия (причем одни и те же предприятия могут одновременно входить в состав нескольких виртуальных объединений).

Жизненный цикл промышленных изделий включает ряд этапов, начиная от зарождения идеи нового продукта до его утилизации по окончании срока использования [4].

Рассмотрим жизненный цикл продукции на предприятии, который изображен на рис. 2.

На вход получаем заказ, соответственно на выходе получаем выполнение заказа. Управляющим воздействием является время необходимое для производства одной единицы продукции и запланированные риски, которые могут возникнуть на разных этапах жизненного цикла. Механизмами исполнения работ выступают главный инженер, коммерческий директор, конструкторское бюро, технологический отдел, транспортная служба и маркетинговая группа.

Далее контекстная диаграмма декомпозируется на 6 этапов и полученная диаграмма декомпозиции представлена на рис. 3

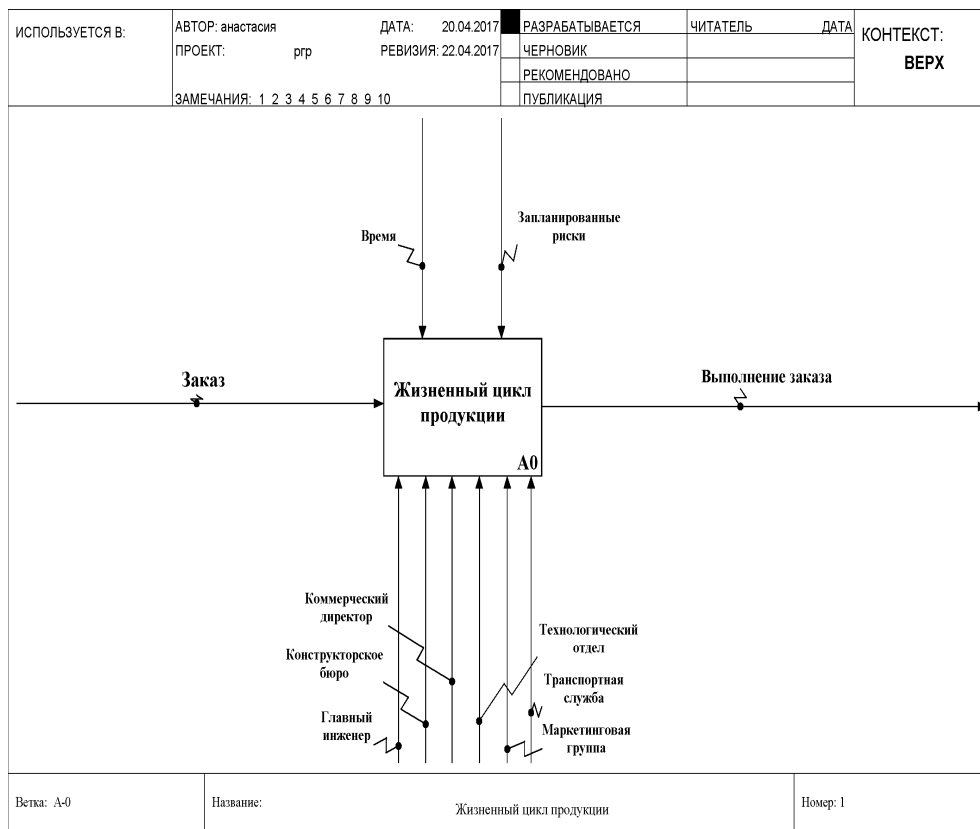


Рис. 2 – Контекстная диаграмма жизненного цикла продукции

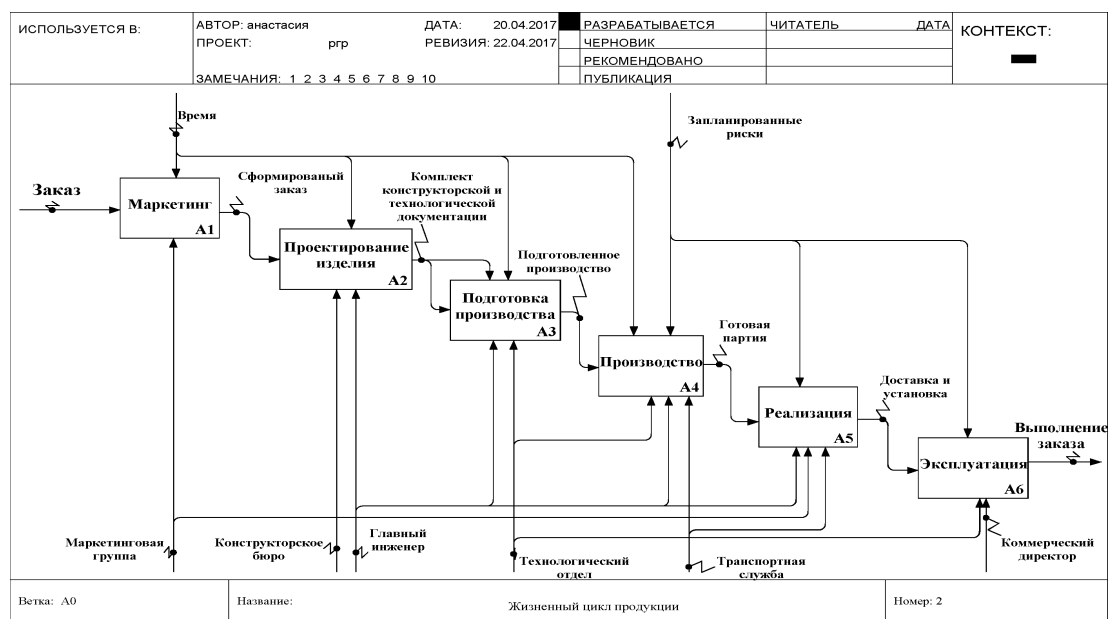


Рис. 3 – Диаграмма декомпозиции жизненного цикла продукции

Входная и выходная информация, управляющее воздействие и механизмы исполнения работ остаются такие же, как и на контекстной диаграмме.

1. Маркетинг. Основная задача маркетинга – понять нужды и потребности каждого рынка и выбрать те из них, которые их компания может обслуживать лучше других. Это позволит компании производить товары более высокого качества и тем самым увели-

чивать объемы продаж и повышать свои доходы путем лучшего удовлетворения потребностей целевых покупателей [5].

На выходе данного этапа получаем сформированный заказ. Управляющим воздействием является время. Механизмом исполнения работ выступает маркетинговая группа.

2. Проектирование изделия. На этапе проектирования выполняются проектные процедуры – формирование принципиального решения, разработка геометрических моделей и чертежей, расчеты, моделирование процессов, оптимизация и т.п.

На входе данного этапа получаем сформированный заказ, на выходе – комплект конструкторской и технологической документации. Управляющим воздействием является время. Механизмом исполнения работ выступают конструкторское бюро и главный инженер.

3. Подготовка производства. На этапе подготовки производства разрабатываются маршрутная и операционная технологии изготовления деталей, реализуемые в программах для станков ЧПУ; технология сборки и монтажа изделий; технология контроля и испытаний.

На входе данного этапа получаем комплект конструкторской и технологической документации, на выходе – подготовленное производство. Управляющим воздействием является время и полученный комплект конструкторской и технологической документации. Механизмом исполнения работ выступают технологический отдел и главный инженер.

4. Производство. На этапе производства осуществляются: календарное и оперативное планирование; приобретение материалов и комплектующих с их входным контролем; механообработки и другие требуемые виды обработки; контроль результатов обработки; сборка; испытания и итоговый контроль.

На входе данного этапа получаем подготовленное производство, на выходе – готовую партию изделий. Управляющим воздействием является время и запланированные риски [9]. Механизмом исполнения работ выступают технологический отдел, транспортная служба и главный инженер.

5. Реализация. На стадии реализации проекта важно непрерывно следить за использованием ресурсов, соблюдением сроков, а главное – за качеством и соответствием полученных результатов запланированным.

На входе данного этапа получаем готовую партию изделий, на выходе – доставка и установка изделия. Управляющим воздействием является запланированные риски. Механизмом исполнения работ выступают маркетинговая группа, транспортная служба и главный инженер.

6. Эксплуатация. Эксплуатационные данные об изделии – совокупность информационных объектов, порождаемых в процессе проектирования и разработки, содержащая сведения, необходимые для организации обслуживания, ремонта и других действий, обеспечивающих работоспособность изделия. Включает интерактивное электронное техническое руководство по эксплуатации и ремонту.

На входе данного этапа получаем доставленную и установленное изделие, на выходе – Выполнение заказа. Управляющим воздействием является запланированные риски. Механизмом исполнения работ выступают технологический отдел и коммерческий директор.

Декомпозиция позволяет разделить жизненный цикл на компоненты по уровням, что упрощает идентифицировать риски. Как на классическом предприятии, так и на виртуальном возникают различные риски. В данной статье проведем анализ логистических рисков, возникающих на виртуальном и классическом предприятии.

Под рисками подразумеваются нежелательные (непредвиденные) события, которые могут существенно ухудшить те или иные стороны проекта (стратегии) или даже привести к его срыву [7]. Риски на виртуальном предприятии можно представить в виде табл. 1.

Таблица 1

Логистические риски предприятия

Признак	Вид риска
1. Рыночные	1.1. Риски, уменьшения спроса на изделие.
2. Организационные	2.1. Риски, связанные с ошибками поставщика, ошибками менеджера по логистике; 2.2. Риски, связанные с организацией работы предприятия.
3. Коммерческие	3.1. Риск, связанный с приемом товара; 3.2. Риск, связанный с реализацией товара; 3.3. Риск, связанный с транспортировкой; 3.4. Риск снижения прибыли; 3.5. Риск уменьшения товарооборота; 3.6. Риск увеличения оптовых цен; 3.7. Риск роста товарных и транспортных издержек;
4. Технический	4.1. Риск возникновения пожаров, аварий и поломок, приостановление работы сети. 4.2. Форс-мажорные обстоятельства;
5. Техничко-технологический	5.1. Риск, связанный с поломкой, компьютерной техники и иного оборудования, при помощи которого осуществляется часть логистических функций.

Логистические риски – это риски выполнения логистических операций транспортировки, складирования, управления запасами и грузопереработки и

риски логистического менеджмента всех уровней, в том числе риски управленческого характера, которые

возникают при выполнении логистических операций и функций [8].

Для идентификации логистических рисков логисту предприятия необходимо построить логистическую среду.

Продукционное представление знаний при построении виртуальной логистической среды. Архитектура распределенной иерархии базируется на продукционном представлении знаний, в котором за основу принимается иерархия с отношением наследования и активными слотами, к процедурам-запросам и процедурам-демонам которых присоединены динамические знания в форме продукционных правил. Такой подход позволяет естественным образом сочетать в одной модели статистические знания о предметной области (логистическом риске) в виде иерархии наследования и динамические знания в виде присоединенных процедур, управляющих логическим выводом.

Таким образом, состояние системы может быть представлено функцией состояния $W: I^2 \rightarrow S$, где I – множество идентификаторов, S – множество рисков вида $\langle v, d, \{Q_i\}, \{D_j\}, \{C_k\}, \leq_q, \leq_d, \alpha \rangle$, включающих в себя текущее значение риска и значение по умолчанию, множества процедур-запросов и процедур-демонов с соответствующими им стратегиями разрешения конфликтов в форме отношений полного порядка на множестве процедур и, множество ограничений и т.д. Процедуры-запросы Q_i являются выражениями из некоторого множества E , а процедуры-демоны – функциями изменения состояния (где через W обозначено множество функций состояния иерархии). Множество значений рисков T может иметь произвольную природу (например, являться семейством типов с динамическим преобразованием или строгой типизацией) – для описания семантики вывод необходимо потребовать, чтобы это множество представляло собой полную решетку.

Отношение наследования: индуцируется риском с зарезервированным именем *parent*: . Таким образом становится возможным описание динамического наследования, в котором родитель фрейма вычисляется в процессе логического вывода. Типичная для систем операция спецификации фрейма по образцу реализуется неявным включением в модель правила. При рассмотрении множественного наследования слот *parent* предполагается спискового типа, и .

В основе определения семантики логического вывода лежит рекуррентное определение функции $\|\cdot\|: C \times E \times W \rightarrow T \times W$, описывающее процесс обратного логического вывода, а также функции целенаправленного прямого вывода. На множестве состояний W естественным образом индуцируется отношение частичного порядка, относительно которого это множество является полной решеткой. Так как предлагаемая модель вывода является монотонной (о чем говорит монотонность функций вывода по состояниям), то существует естественным образом определяемая семантика неподвижной точки, основанная на

последовательном применении функций $\|\cdot\|$ и Φ . Процесс комбинированного вывода может быть также проиллюстрирован как поиск пути в конечном биграфе состояний, факторизованных отношением неразличимости множеством всех посылок правил.

Семантика внешнего языка представления знаний описывается путем задания функции, преобразующей исходный текст базы знаний в начальное состояние, с последующим применением функции $\|\cdot\|$ для логического вывода.

Под распределенной виртуальной производственной логистической системой мы будем понимать набор функций состояния индивидуальных субиерархий с некоторой выделенной субиерархией. Синтаксис выражений E в этом случае расширим операциями вычисления удаленной ссылки: мобильной $\diamond$ и синтаксической $\blacklozenge$. Будем также без ограничения общности предполагать, что логистическая система в рамках отдельных субиерархий именуется уникальным образом.

Для функций состояний введем оператор комбинирования $*$ следующим образом:

$$W_1 * W_2 = \lambda f, s \left\{ \begin{array}{l} W_1(f, s), \text{если } \langle f, s \rangle \in I_1 \\ W_2(f, s), \text{если } \langle f, s \rangle \in I_2 \\ \perp, \text{в другом случае} \end{array} \right\}.$$

Этот оператор является симметричным и ассоциативным, что позволяет распространить его на случай произвольного числа аргументов. Будем называть функцией состояния распределенной логистической системы. При этом такая функция будет определять некоторую локальную иерархию, которую мы назовем эквивалентной порожденной системой для исходной распределенной системы.

Логический вывод в распределенной системе может рассматриваться с позиции эквивалентной системы на основании уже определенной семантики, либо введением семантической функции распределенного ввода, оперирующей над множествами функций состояний.

Для вычисления статических и мобильных ссылок эта функция будет определять взаимодействие составных частей распределенной иерархии:

$$\begin{aligned} \|\circ W_1(f, s)\|_{\{W_1 \dots W_i \dots W_n\} \rightarrow \tilde{W}} &= \|f \cdot s\|_{\{W_1 \dots W_i \cdot W_j \dots W_n\} \rightarrow \tilde{W}}, \\ \|\bullet W_1(f, s)\|_{\{W_1 \dots W_i \dots W_n\} \rightarrow \tilde{W}}^F &= \|f \cdot s\|_{\{W_1 \dots W_i \cdot W_j \dots W_n\} \rightarrow \tilde{W}}^{\bullet W_i(F)}. \end{aligned}$$

В то время как для выражений, не содержащих удаленных ссылок, она будет сводиться к определенной ранее локальной семантике:

$$\|E\|_{\{W_1 \dots \tilde{W}_i \dots W_n\} \rightarrow \tilde{W}} = \|E\|_{\{W_1 \dots W_i \dots W_n\}}.$$

Можно сказать, что для систем, использующих только мобильное или только статистическое

взаимодействие семантика распределенного вывода будет эквивалентна семантике локального вывода в порожденной системе.

Выводы. В результате проведенного анализа наблюдаем множество различий логистических рисков между классическим и виртуальным предприятием. Виртуальное предприятие не имеет множества технологического оборудования, а заказывает комплектующие у других организаций, что позволяет перенести ответственность за изготовление деталей на их производителя.

Виртуальное предприятие стремится к работе без склада, что позволяет уменьшить риски иммобилизации материальных ресурсов. Но возникает риск в договорных отношениях, что предполагает создание организационной структуры, основанной на равноправных отношениях партнеров.

Исследуя все логистические риски, свойственные виртуальному предприятию возможно предостеречь организацию от негативных последствий на всех этапах, а именно на этапе снабжения, транспортировки и сбыта.

Список літератури:

1. Катаев, А. В. Виртуальные бизнес-организации [Текст] / А. В. Катаев. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2009. – 120 с. – Режим доступа: http://bizlog.ru/lib/b9/2_1.htm
2. Титов, В. И. Производственное предприятие [Электронный ресурс] / В. И. Титов // Портал Деловой мир. – Режим доступа: <https://delovoymir.biz/ru/articles/view/?did=10087>
3. Жизненный цикл изделия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.studfiles.ru/preview/2030221/page/6/>
4. Маркетинг [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.grandars.ru/student/marketing/marketing.html>
5. Иванов, А. А. Основы бизнеса [Текст] / А. А. Иванов, С. А. Бочаров, С. Я. Олейников. – М.: МЭСИ, 2006.
6. Турусин, Ю. Д. Стратегический менеджмент [Текст] / Ю. Д. Турусин, С. Ю. Ляпина, Н. Г. Шаламова. – М., 2003.
7. Хохлов, Н. В. Управление риском [Текст]: учеб. пос. / Н. В. Хохлов. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. – 239 с.
8. Трейтак, В. В. Розробка технології консолідації та синхронізації даних інтегрованих автоматизованих систем виробничого призначення [Текст] / В. В. Трейтак // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2015. – Т. 6, № 2 (78). – С. 17–22. doi: [10.15587/1729-4061.2015.55923](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.55923)
9. Павленко, П. Н. Інформаційна технологія управління ефективністю промислового виробництва [Текст] / П. М. Павленко, О. В. Заріцький, А. О. Хлевний // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2015. – Т. 1, № 2 (73). – С. 24–30. doi: [10.15587/1729-4061.2015.36070](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.36070)
10. Собчак, А. П. Информационная технология автоматизации технологической подготовки виртуального производства предприятия [Текст] / А. П. Собчак, И. В. Шостак, В. Н. Павленко, О. И. Попова // Системы управления, навигации та зв'язку. – 2016. – № 3 (39). – С. 118–125.

Список літератури:

1. Kataev, A. V. (2009). Virtual'nye biznes-organizatsii. Sankt-Peterburg: Izd-vo Politekhicheskogo universiteta, 120. Available at: http://bizlog.ru/lib/b9/2_1.htm
2. Titov, V. I. Proizvodstvennoe predpriyatie. Portal Delovoy mir. Available at: <https://delovoymir.biz/ru/articles/view/?did=10087>
3. Zhiznennyi tsikl izdeliya. Available at: <http://www.studfiles.ru/preview/2030221/page/6/>
4. Marketing. Available at: <http://www.grandars.ru/student/marketing/marketing.html>
5. Ivanov, A. A., Bocharov, S. A., Oleynikov, S. Ya. (2006). Osnovy biznesa. Moscow: MESI.
6. Turusin, Yu. D., Lyapina, S. Yu., Shalamova, N. G. (2003). Strategicheskii menedzhment. Moscow.
7. Hohlov, N. V. (2001). Upravlenie riskom. Moscow: YUNITI-DANA, 239.
8. Treitiak, V. V. (2015). Development of technology for consolidation and synchronization of data of industrial-purpose integrated automated systems. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (2 (78)), 17–22. doi: [10.15587/1729-4061.2015.55923](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.55923)
9. Pavlenko, P. M., Zaritskyi, O. V., Khlevnyi, A. O. (2015). Information technology for performance management of industrial production. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (2 (73)), 24–30. doi: [10.15587/1729-4061.2015.36070](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.36070)
10. Sobchak, A. P., Shostak, I. V., Pavlenko, V. N., Popova, O. I. (2016). Informatsionnaya tekhnologiya avtomatizatsii tekhnologicheskoy podgotovki virtual'nogo proizvodstva predpriyatiya. Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku, 3 (39), 118–125.

Поступила (received) 10.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Логістичні ризики етапів життєвого циклу товарів віртуального виробничого підприємства/ Безсмертна А. В., Шостак І. В., Собчак А. П., Попова О. І. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 33(1255). – С. 68–74.– Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Логистические риски этапов жизненного цикла продукции виртуального производственного предприятия/ Безсмертная А. В., Шостак И. В., Собчак А. П., Попова О. И. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 33(1255). – С.68–74. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Logistic risks of stages of the life cycle of production of virtual industrial enterprise / Bezsmertnaya A., Shostak I., Sobchak A., Popova O. //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 33 (1255).– P. 68–74.– Bibliogr.:10. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бессмертная Анастасия Владимировна – студентка, Кафедра теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», ул. Чкалова, 17, г. Харьков, Украина, E-mail: nastuxa.1996@mail.ru

Безсмертна Анастасія Володимирівна – студентка, Кафедра теоретичної механіки, машинознавства і роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», ул. Чкалова, 17, м. Харків, Україна, E-mail: nastuxa.1996@mail.ru

Bezsmertna Anastasia – student, Department of Theoretical Mechanics, Machine Science and Robot-Mechanical Systems, National Aerospace University. N. E. Zhukovsky "KhAI", st. Chkalov, 17, m. Kharkiv, Ukraine, E-mail: nastuxa.1996@mail.ru

Шостак Игорь Владимирович – доктор технических наук, профессор инженерии программного обеспечения, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина; E-mail: iv.shostak@gmail.com

Шостак Ігор Володимирович – доктор технічних наук, професор кафедри інженерії програмного забезпечення, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна, E-mail: iv.shostak@gmail.com

Shostak Ihor – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Software Engineering, National Aerospace University. N. E. Zhukovsky "KhAI", Kharkov, Ukraine, E-mail: iv.shostak@gmail.com.

Собчак Андрей Павлович – кандидат технических наук, доцент кафедры менеджмента, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, E-mail: sobchak@ukr.net

Собчак Андрій Павлович – кандидат технічних наук, доцент кафедри менеджменту, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна, E-mail: sobchak@ukr.net

Sobchak Andrii – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Management, National Aerospace University. N. E. Zhukovsky "KhAI", Kharkov, Ukraine, E-mail: sobchak@ukr.net.

Попова Ольга Игоревна – коммерческий директор научно-производственного предприятия «КИАТОН», магистр Харьковского национального экономического университета, Харьков, Украина, E-mail: Batbkivna@ukr.net

Попова Ольга Ігорівна – комерційний директор науково-виробничого підприємства «КІАТОН», магістр Харківського національного економічного університету, Харків, Україна, E-mail: Batbkivna@ukr.net

Popova Olha – Commercial Director of the scientific-production enterprise "KIATON", Master of Kharkov National University of Economics, Kharkov, Ukraine, E-mail: Batbkivna@ukr.net.

**ТЕХНОЛОГІЇ ТА
ОБЛАДНАННЯ ВИРОБНИЦТВА**

УДК 543.1; 535.016

*Д. Г. РАДОВ, В. П. МАСЛОВ, Г. В. ДОРОЖИНСЬКИЙ, Г. В. ДОРОЖИНСЬКА***ВИЯВЛЕННЯ СІРКИ В НАФТОПРОДУКТАХ МЕТОДОМ ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСУ**

Частка нафти в загальному споживанні енергоресурсів світу безперервно зростає. Сірчані з'єднання в паливних нафтопродуктах знижують їх хімічну стабільність, повноту згоряння і викликають корозію двигунів. Сполуки сірки при згорянні забруднюють атмосферу, виділяючи оксиди сірки. Вміст сірки у нафті становить від сотих часток відсотка до 5–14 %. Існуючі методи контролю вмісту сірки у нафтопродуктах рентгенофлюоресцентний та ультрафіолетової флюоресценції мають межу детектування 3 мг/кг та забезпечують відносну похибку вимірювання 10 %. Вперше експериментально показано можливість визначати методом поверхневого плазмонного резонансу у три рази точніше (відносна похибка 2,6 %) менші концентрації сірки у нафтопродуктах (0,19 мг/кг).

Ключові слова: сірка, тіофен, контроль нафтопродуктів, поверхневий плазмонний резонанс.

Доля нефти в общем потреблении энергоресурсов мира непрерывно растет. Сернистые соединения в топливных нефтепродуктах снижают их химическую стабильность, полноту сгорания и вызывают коррозию двигателей. Соединения серы при сгорании загрязняют атмосферу, выделяя оксиды серы. Содержание серы в нефти составляет от сотых долей процента до 5–14 %. Существующие методы контроля содержания серы в нефтепродуктах рентгенофлюоресцентный и ультрафиолетовой флюоресценции имеют предел детектирования 3 мг / кг и обеспечивают относительную погрешность измерения 10 %. Впервые экспериментально показана возможность определять методом поверхностного плазмонного резонанса в три раза точнее (относительная погрешность 2,6%) меньшие концентрации серы в нефтепродуктах (0,19 мг / кг).

Ключевые слова: сера, тиофен, контроль нефтепродуктов, поверхностный плазмонный резонанс.

The share of oil in the overall consumption of energy resources in the world is continuously increasing. Sulfur compounds in fuel oil products reduce their chemical stability, completeness of combustion and cause corrosion of engines. Sulfur compounds during combustion pollute the atmosphere, producing sulfur oxides. The content of sulfur in oil is from hundredths of a percent to 5–14 %. Existing methods for controlling sulfur content in petroleum products X-ray fluorescence and ultraviolet fluorescence have a detection limit of 3 mg / kg and provide a relative error of measurement of 10 %. An alternative method may be based on the phenomenon of surface plasmon resonance (SPR), which allows for rapid analysis (measurement of length less than 10 sec.) And can be less expensive for existing methods. Diagnosing devices that are based on the phenomenon of surface plasmon resonance, have high sensitivity to low concentrations (0.01–2 mg/kg) of liquid and gaseous substances and are characterized by high accuracy measurements. For the first time, it has been shown experimentally that the concentration of sulfur in petroleum products (0.19 mg / kg) is three times more accurate (relative error 2.6 %) by surface plasmon resonance. Research results can be used to improve the existing and create new methods for monitoring sulfur in petroleum products.

Keywords: sulfur, thiophene, petroleum products, vaseline oil, surface plasmon resonance.

Вступ. Нафта – найважливіше джерело рідкого палива, мастил, сировина для синтетичних матеріалів, тощо. Нафта займає провідне місце в світовому паливно–енергетичному господарстві. Її частка в загальному споживанні енергоресурсів безперервно зростає і станом на 2016 рік складає близько 33,6 % [1]. Сірка є найпоширенішим з гетеро атомів в нафтах і нафтопродуктах. Її вміст у нафті становить від сотих часток відсотка (бакинські, туркменські, сахалінські нафти) до 5–6 % (нафти Урало–Поволжя та Сибіру), рідше до 14 % (родовище Пойнт, США). Нафти позбавленої сірки не існує [2]. Серед сірчанних сполук нафти і нафтових фракцій розрізняють три групи. До першої відносяться сірководень і меркаптани, які мають кислотні властивості, в зв'язку з чим, є найбільш агресивними. До другої групи відносять нейтральні на холоді і термічно мало стійкі сульфіді і дисульфіді, які при температурі 130–160° С починають розкладатися з утворенням сірководню і меркаптанів. У третю групу сполук входять термічно стабільні циклічні сполуки – тіофани і тіофени, які формують основну кількість сірки в нафтах [3]. Меркаптани токсичні, вони викликають сльозоточивість, запаморочення, головний біль. З усіх сірчанних сполук нафти вони найбільш небезпечні (особливо – ароматичні) і мають здатність до самоокислення з утворенням сульфенової і сірчаної кислот. У нафтах сульфіді і дисульфіді зустрічаються у вигляді аліфатичних і циклічних з'єднань.

Сірчані з'єднання в паливних нафтопродуктах знижують їх хімічну стабільність і повноту згоряння, надають неприємних запахів і викликають корозію двигунів. Сірка при згорянні палива взаємодіє з киснем повітря (окислюється). Внаслідок цього виникають оксиди сірки, які з водяними парами утворюють сірчану і сірчану кислоту. Крім деталей двигуна кислота руйнує всі металеві поверхні системи випуску відпрацьованих газів і псує каталізатори. Сірка є одним з найбільш шкідливих компонентів бензину. У бензинах з'єднання сірки знижують антидетонаційні властивості і реакційну здатність до тетраетилсвинцю, який додають для підвищення якості бензину. Крім цього, сполуки сірки при згорянні забруднюють атмосферу.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. За вимогами найсучаснішого чинного нормативу ЄВРО 5, вміст сірки в бензині А–95–Євро не повинен перевищувати 0,001% або 10 мг/кг [4]. При цьому згідно до паспорту на цей бензин, вміст сірки складає 7 мг/кг [5], що визначений методом ультрафіолетової флуоресценції, який забезпечує діапазон вимірювання вмісту сірки в нафтопродуктах від 3 мг/кг до 500 мг/кг та за тривалістю становить від 250 до 500 секунд [6]. ДП "Укрметртестстандарт" розробило стандартний зразок масової частки сірки в нафтопро-

дуктах, що представляє собою емульсію тіофену у вазеліновому маслі. Як відомо, тіофен є циклічним вуглеводнем і має у своєму складі атом сірки [7]. Стандартний зразок призначений для атестації, повірки, калібрування і градування аналізаторів сірки, дія яких базується на методі рентгенофлуоресцентної спектрометрії [8]. В Україні в Державний реєстр засобів вимірювань внесено аналізатор «СПЕКТРОН SW-D3», котрий використовує метод рентгенофлуоресцентної спектрометрії [9]. Цей прилад забезпечує визначення сірки від 3 мг/кг до 500 мг/кг та має межу визначення 0,3 мг/кг.

Основними недоліками існуючих методів визначення сірки в нафтопродуктах є необхідність джерел рентгенівського та іонізуючого випромінювань, потреба у пробі підготовці, велика вага та висока вартість обладнання [10]. Існуючі методи контролю вмісту сірки у нафтопродуктах мають нижню межу вимірювання 0,3 мг/кг, що для чинного нормативу Євро 5 на вміст сірки забезпечує відносну похибку вимірювання 10%. Враховуючи тенденції розвитку суспільства та підвищення вимог до якості палива, котрі будуть передбачати подальше зменшення вмісту сірки, актуальним напрямком є розробка альтернативного методу визначення сірки, наприклад, на основі явища поверхневого плазмонного резонансу (ППР), котрий дозволяє проводити експрес аналіз і може бути менш коштовним за існуючі методи. Такі діагностуючі пристрої мають високу чутливість до малих концентрацій (0,01 – 2 мкг/кг) досліджуваних речовин [11, 12] і характеризуються високою точністю вимірювань [13].

Враховуючи подальші тенденції розвитку екологічних стандартів по зменшенню вмісту сірки у нафтопродуктах можна прогнозувати виникнення проблеми невідповідності існуючих методів визначення вмісту сірки встановленим стандартам. Тому необхідно контролювати її вміст у нафтопродуктах методами, котрі мають високу чутливість і точність вимірювання.

Ціль та задачі дослідження. Метою дослідження є визначення перспективності методу на основі явища поверхневого плазмонного резонансу для виявлення масової концентрації сірки в органічних середовищах.

Для досягнення цієї мети були поставлені наступні завдання:

1. Виконати визначення методом ППР зміни показника заломлення (ПЗ) вазелінового масла при наявності в ньому тіофену з концентраціями сірки меншими за встановлені стандартами до існуючих методів контролю сірки в нафтопродуктах.

2. Провести аналіз та узагальнення результатів експериментів.

Матеріали та методи виявлення сірки в нафтопродуктах методом поверхневого плазмонного резонансу. Досліджувані матеріали:

1. Вазелінове масло з тіофеном (стандартний зразок 2–16226 згідно ДП «Укрметрестстандарт»). Згідно сертифікату масова частка сірки складає $0,0014 \pm 0,0005$ %, що відповідає концентрації сірки 14 ± 5 мг/кг.

2. Вазелінове масло (стандартний зразок 2–16226–2 згідно ДП «Укрметрестстандарт»).

Методичною основою виконання комплексних досліджень є: чисельний аналіз різниці ПЗ зразків чистого

вазелінового масла та з тіофеном різної концентрації. Значення різниці ПЗ (зсуву мінімуму ППР) вимірювали приладом «Сульфо–поляритон» з діапазоном вимірювання від 0...0,012 RIU (refractive index unit) з похибкою вимірювання $\pm 2 \cdot 10^{-5}$ RIU.

Малогабаритний спеціалізований рефрактометр «Сульфо–поляритон», котрий працює на явищі ППР. Явище ППР – це порушення повного внутрішнього відбиття монохроматичного р–поляризованого світла на межі двох середовищ з різними ПЗ: скляної призми та досліджуваної речовини (аналіту) між якими розташована тонка (10...100 нм) металева плівка. Обертаючи призму, змінюють кут падіння світла на її робочу грань з металевою плівкою і одночасно вимірюють характеристику відбиття – залежність нормованої інтенсивності відбитого світла (коефіцієнта відбиття R) від кута його падіння (рис. 1).

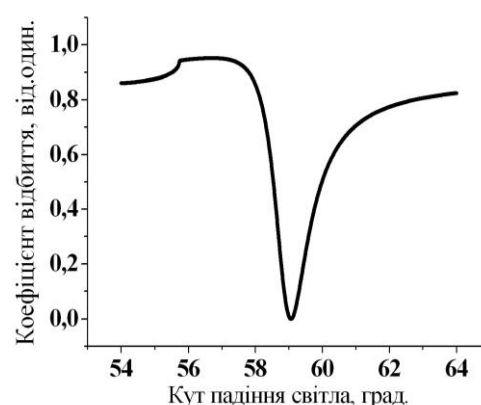


Рис. 1 – Залежність нормованої інтенсивності відбитого світла (коефіцієнта відбиття) від кута його падіння

Вимірний зсув кутового положення мінімуму характеристики відбиття визначає абсолютне значення та відносну зміну ПЗ аналіту.

Об'єктом дослідження є процес визначення сірковмісної сполуки у органічному середовищі методом поверхневого плазмонного резонансу.

Предметом дослідження є кутовий зсув мінімуму характеристики відбиття при вимірюванні емульсії вазелінового масла з тіофеном різної концентрації.

Методика дослідження:

Для визначення концентрації сірки у вазеліновому маслі використовували порівняльний метод, суть якого полягала у визначенні різниці між результатами вимірювання показника заломлення органічного середовища без сірки і органічного середовища з сіркою. Досліджувані зразки по чергово прокачували шприцевим насосом через вимірювальну кювету ППР–рефрактометру і вимірювали їх показники заломлення. Готували досліджувані зразки шляхом розведення стандартного зразку чистим вазеліновим маслом у співвідношеннях: 1:1, 1:9 та 1:74. Співвідношення були обрані з метою досягнення вмісту сірки меншого за визначений стандартом Євро 5. Більше розведення вимагає збільшення маси розчинника або зменшення маси стандартного зразку. При зменшенні вихідної маси стандартного зразку похибка зростає за гіперболою і не залежить від кратності розведення чистим вазеліновим маслом (рис. 2). Тому для мінімізації похибки вимірювання вихідна вага

стандартного зразку вазелінового масла з сіркою становила $1,00 \pm 0,02$ г, що забезпечило похибку приготовленого розчину 37,5 %, при чому у стандартному зразку вона становила 35 %.

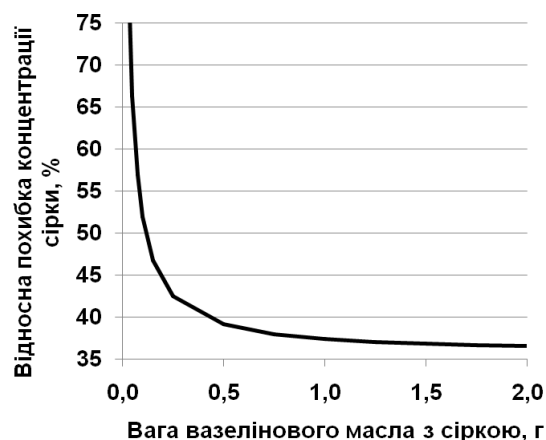


Рис. 2. Розрахована залежність відносної похибки концентрації приготовленої емульсії від вихідної ваги стандартного зразку

Для приготування розчинів потрібної концентрації вихідні речовини дозували семплером ПЛ-01-200 і зважували приладом Diamond Model 100 з похибкою вимірювання $\pm 0,02$ г. В результаті були отримані розчини тіофену у вазеліновому маслі з масовими концентраціями сірки 0,0007%, 0,00014% та 0,000019%. Вимірювання показника заломлення виконували ППР-рефрактометром в режимі Multiple [14] з похибкою $\pm 0,00002$ RIU.

Таблиця 1 – Виміряні показники заломлення стандартного зразку після розведення у вазеліновому маслі

№ п.п.	Розведення стандартного зразку у вазеліновому маслі	Показник заломлення розведеного зразку, RIU	Відносна зміна показника заломлення, $\text{RIU} \times 10^{-6}$	Концентрація сірки, мг/кг
1	без розведення	$1,45535 \pm 0,00002$	2300 ± 500	$14,0 \pm 5,0$
2	1:1	$1,45385 \pm 0,00002$	900 ± 510	$7,05 \pm 2,64$
3	1:9	$1,45337 \pm 0,00002$	320 ± 40	$1,41 \pm 0,53$
4	1:74	$1,45310 \pm 0,00002$	50 ± 20	$0,19 \pm 0,07$

Відносна похибка вимірювання показника заломлення при заміщенні чистого вазелінового масла на вазелінове масло з тіофеном різної концентрації знаходиться в межах від 13 % до 36 % і є наслідком похибки приготування розчинів тіофену.

Обговорення результатів дослідження. При зменшенні концентрації сірки зменшується відносна зміна показника заломлення, причому при розведенні у 75 разів величина відгуку (0,00005) у два рази більша за роздільну здатність ППР-рефрактометра та похибку вимірювання показника заломлення (0,00002).

Експрес метод на основі явища поверхневого плазмонного резонансу робить можливим детектувати концентрації сірки в органічному середовищі значно менші за визначені нормативом Євро 5 (10 мг/кг) та менші за межу визначення існуючих засобів вимірювання (0,3 мг/кг) за короткий проміжок часу (2 хвилини), що вдвічі менше ніж у існуючих методів визначення вмісту сірки (4–5 хвилин). При цьому метод ППР забезпечує відносну похибку вимірювання 2,6 %, що у 3 рази менше,

Результати виявлення сірки в нафтопродуктах методом поверхневого плазмонного резонансу. Залежність виміряних значень показників заломлення досліджуваних зразків від концентрації сірки у відповідних розчинах тіофену наведено на рис.3. Виміряна залежність добре апроксимується лінійною функцією $y = 157,28 \cdot x + 1,89$ з коефіцієнтом узгодження $R^2 = 0,979$.

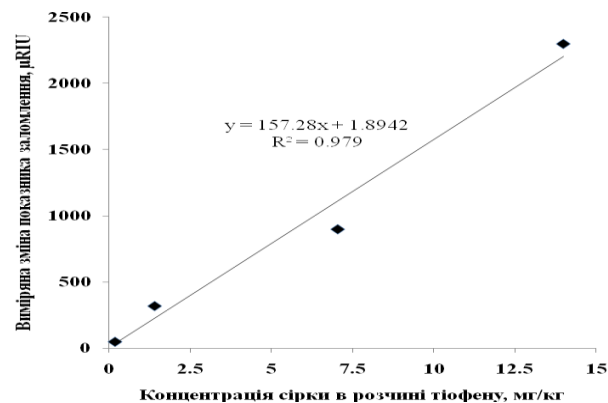


Рис. 3 – Виміряна залежність зміни показників заломлення вазелінових емульсій тіофену від концентрації в них сірки

В табл. 1 наведено виміряні значення показників заломлення приготовлених емульсій тіофену у вазеліновому маслі та наближені значення відповідних концентрацій сірки в них. Виміряне значення показника заломлення чистого вазелінового масла становило $1,45265 \pm 0,00002$ RIU. Відносна зміна показника заломлення вказана із врахуванням методичної похибки.

ніж у існуючого методу рентгенофлуоресцентної спектроскопії.

Висновки

1. Нафта займає провідне місце в світовому паливно-енергетичному господарстві. Сірчисті з'єднання в паливних нафтопродуктах знижують їх хімічну стабільність і повноту згоряння і викликають корозію двигунів. Нафт позбавлених сірки не існує, а її концентрація становить від сотих часток відсотка до 5–14 %.

Сірка присутня у всіх нафтопродуктах і контроль її вмісту є важливою задачею. Існуючі методи контролю сірки в нафтопродуктах рентгенофлуоресцентний та ультрафіолетової флуоресценції забезпечують визначення вмісту сірки в діапазоні від 3 до 500 мг/кг, в той час як допустимі концентрації сірки в бензинах згідно до існуючих екологічного стандарту Євро 5 (10 мг/кг) наближаються до нижньої межі вимірювання цими методами, що є причиною великої відносної похибки вимірювання 10 %. Тому актуальним є розробка та дослідження нових методів визначення вміс-

ту сірки, зокрема методу на основі явища поверхневого плазмонного резонансу (ППР).

2. Вперше показано на прикладі модельної речовини (вазелинового масла з тіофеном), що метод ППР є більш чутливий та більш точним за існуючі методи контролю сірки, бо дозволяє детектувати масову кон-

центрацію сірки $0,19 \pm 0,07$ мг/кг, яка менша за межу виявлення ($0,3$ мг/кг) зареєстрованих в Україні вимірювальних засобів для визначення вмісту сірки у нафтопродуктах і забезпечує у 3 рази меншу відносну похибку вимірювання $2,6\%$.

Список літератури:

1. Statistical Review of World Energy [Electronic resource]. – Available at: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
2. Магєррамов, А. М. Нефтехимия и нефтепереработка [Текст] / А. М. Магєррамов, Р. А. Ахмедова, Н. Ф. Ахмедова. – Баку: Баки Университети, 2009. – 660 с.
3. Вадецкий, Ю. В. Нефтегазовая энциклопедия. Т. 3 [Текст] / Ю. В. Вадецкий. – М.: Московское отделение «Нефть и газ» МАИ, 2004. – 308 с.
4. Гуревич, И. Л. Технология переработки нефти и газа. Т. 1 [Текст] / И. Л. Гуревич. – М.: Химия, 1972. – 360 с.
5. ДСТУ 7687:2015. Бензини автомобільні Євро. Технічні умови [Текст]. – Київ, 2015.
6. ISO 20846:2011. Petroleum products – Determination of sulfur content of automotive fuels – Ultraviolet fluorescence method [Text]. – International Organization for Standardization, 2011.
7. Черных, В. П. Органическая химия [Текст] / В. П. Черных, Б. С. Зименковский, И. С. Гриценко; под. ред. В. П. Черных. – 2-е изд., испр. и доп. – Х.: Изд-во НФаУ; Оригинал, 2007. – 765 с.
8. ДСТУ ISO 20847:2009. Нафтопродукти. Визначення вмісту сірки в автомобільному пальному методом рентгенофлуоресцентної спектроскопії з дисперсією за енергіями (ISO 20847:2004, IDT) [Текст]. – Державний стандарт України, 2009.
9. ДЕРЖРЕЄСТР ЗВТ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ukrcsm.kiev.ua/index.php/ru/services-ua/metrology-ua/regestry-metrology-ua>
10. Новиков, Е. А. Определение серы в нефтепродуктах. Обзор аналитических методов [Текст] / Е. А. Новиков // Мир нефтепродуктов. – 2008. – № 1. – С. 1–39.
11. Homola, J. Surface plasmon resonance sensors based on diffraction gratings and prism couplers: sensitivity comparison [Text] / J. Homola, I. Koudela, S. S. Yee // Sensors and Actuators B: Chemical. – 1999. – Vol. 54, Issue 1-2. – P. 16–24. doi: [10.1016/S0925-4005\(98\)00322-0](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(98)00322-0)
12. Gupta, G. Tuning and sensitivity enhancement of surface plasmon resonance sensor [Text] / G. Gupta, J. Kondoh // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2007. – Vol. 122, Issue 2. – P. 381–388. doi: [10.1016/j.snb.2006.06.005](https://doi.org/10.1016/j.snb.2006.06.005)
13. Shalabney, A. Sensitivity-enhancement methods for surface plasmon sensors [Text] / A. Shalabney, I. Abdulhalim // Laser & Photonics Reviews. – 2011. – Vol. 5, Issue 4. – P. 571–606. doi: [10.1002/lpor.201000009](https://doi.org/10.1002/lpor.201000009)
14. Дорожинський, Г. В. Сенсорні прилади на основі поверхневого плазмонного резонансу [Текст] / Г. В. Дорожинський, В. П. Маслов, Ю. В. Ушенін. – К.: НТУУ «КПІ» видав. «Політехніка», 2016. – 264 с.

Bibliography (transliterated):

1. Statistical Review of World Energy. Available at: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
2. Magerramov, A. M., Ahmedova, R. A., Ahmedova, N. F. (2009). Neftekhimiya i neftepererabotka. Baku: Baky Universiteti, 660.
3. Vadeckiy, Yu. V. (2004). Neftegazovaya enciklopediya. Vol. 3. Moscow: Moskovskoe otdelenie «Nef't' i gaz» MAI, 308.
4. Gurevich, I. L. (1972). Tekhnologiya pererabotki nef'ti i gaza. Vol. 1. Moscow: Himiya, 360.
5. DSTU 7687:2015. Benzyny avtomobilni Yevro. Tekhnichni umovy (2015). Kyiv.
6. ISO 20846:2011. Petroleum products – Determination of sulfur content of automotive fuels – Ultraviolet fluorescence method (2011). International Organization for Standardization, 2011.
7. Chernykh, V. P., Zimenkovskiy, B. S., Gricenko, I. S.; Chernykh, V. P. (Ed.) (2007). Organicheskaya himiya. Kharkiv: Izd-vo NFaU; Original, 765.
8. DSTU ISO 20847:2009. Naftoproducty. Vyznachennia vmistu sirky v avtomobilnomu palnomu metodom renthenofluorescentnoi spektroskopii z dyspersiyeiu za enerhiyamy (ISO 20847:2004, IDT) (2009). Derzhavnyi standart Ukrainy.
9. DERZHREleSTR ZVT. Available at: <http://www.ukrcsm.kiev.ua/index.php/ru/services-ua/metrology-ua/regestry-metrology-ua>
10. Novikov, E. A. (2008). Opredelenie sery v nefteproduktakh. Obzor analiticheskikh metodov. Mir nefteproduktov, 1, 1–39.
11. Homola, J., Koudela, I., Yee, S. S. (1999). Surface plasmon resonance sensors based on diffraction gratings and prism couplers: sensitivity comparison. Sensors and Actuators B: Chemical, 54 (1-2), 16–24. doi: [10.1016/S0925-4005\(98\)00322-0](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(98)00322-0)
12. Gupta, G., Kondoh, J. (2007). Tuning and sensitivity enhancement of surface plasmon resonance sensor. Sensors and Actuators B: Chemical, 122 (2), 381–388. doi: [10.1016/j.snb.2006.06.005](https://doi.org/10.1016/j.snb.2006.06.005)
13. Shalabney, A., Abdulhalim, I. (2011). Sensitivity-enhancement methods for surface plasmon sensors. Laser & Photonics Reviews, 5 (4), 571–606. doi: [10.1002/lpor.201000009](https://doi.org/10.1002/lpor.201000009)
14. Dorozhynskiy, H. V., Maslov, V. P., Ushenin, Yu. V. (2016). Sensorni prylady na osnovi poverkhnevoho plazmonnoho rezonansu. Kyiv: NTUU «KPI» vydav. «Politehnika», 264.

Надійшла (received) 25.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Виявлення сірки в нафтопродуктах методом поверхневого плазмонного резонансу/ Радов Д. Г., Маслов В. П., Дорожинський Г. В., Дорожинська Г. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 33(1255). – С. 75–79. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-5459.

Выявление серы в нефтепродуктах методом поверхностного плазмонного резонанса/ Радов Д. Г., Маслов В. П., Дорожинский Г. В., Дорожинская Г. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 33(1255). – С. 75–79. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-5459.

Identification of sulfur in petroleum products using surface plasmon resonance/ Radov D., Maslov V., Dorozinsky G., Dorozinska H. // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 33 (1255). – P. 75–79. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Радов Денис Георгійович – працівник ДК «Укроборонпром»; вул. Дегтярівська, 36, м. Київ, Україна, 04119; e-mail: Denis.Radov@ukroboronprom.com.

Маслов Володимир Петрович – доктор технічних наук, професор, завідувач відділу фізико-технологічних основ сенсорного матеріалознавства, Інститут фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкарьова НАН України; пр. Науки, 41, м. Київ, Україна, 03028; e-mail: vpmaslov@ukr.net.

Дорожинський Гліб Вячеславович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу фізико-технологічних основ сенсорного матеріалознавства, Інститут фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкарьова НАН України; пр. Науки, 41, м. Київ, Україна, 03028; e-mail: gvdorozinsky@ukr.net.

Дорожинська Ганна Василівна – аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», аспірант кафедри інформаційно-вимірювальних систем та технології екологічного моніторингу; пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: annakushnir30@ukr.net.

Радов Денис Георгиевич – работник ГК «Укроборонпром»; ул. Дегтярёвская, 36, г. Киев, Украина, 04119; e-mail: Denis.Radov@ukroboronprom.com.

Маслов Владимир Петрович – доктор технических наук, профессор, заведующий отделом физико-технологических основ сенсорного материаловедения, Институт физики полупроводников имени В. Е. Лашкарёва НАН; пр. Науки, 41, г. Киев, Украина, 03028; e-mail: vpmaslov@ukr.net.

Дорожинский Глеб Вячеславович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела физико-технологических основ сенсорного материаловедения, Институт физики полупроводников имени В. Е. Лашкарёва НАН; пр. Науки, 41, г. Киев, Украина, 03028; e-mail: gvdorozinsky@ukr.net.

Дорожинская Анна Васильевна – аспірант, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», аспирант кафедры информационно-измерительных систем и технологии экологического мониторинга; пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056; e-mail: annakushnir30@ukr.net.

Radov Denys – eng. SC “Ukroboronprom”; 36 Dehtiarivska str., Kyiv, Ukraine, 04119; e-mail: Denis.Radov@ukroboronprom.com.

Maslov Volodymyr – Dr.Sc., Prof., head of department of physical and technological bases of sensory materials, V. Ye. Lashkaryov Institute of semiconductor physics NAS of Ukraine; 41 pr. Nauky, Kyiv, Ukraine, 03028; e-mail: vpmaslov@ukr.net.

Dorozinsky Glib – PhD, senior researcher of department of physical and technological bases of sensory materials, V. Ye. Lashkaryov Institute of semiconductor physics NAS of Ukraine; 41 pr. Nauky, Kyiv, Ukraine, 03028; e-mail: gvdorozinsky@ukr.net.

Dorozinska Hanna – graduate student, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", graduate student of the Department of Information and Measurement Systems and Technology of Environmental Monitoring, Peremogy ave., 37, Kiev, Ukraine, 03056; e-mail: annakushnir30@ukr.net.

УДК 004.89

А. И. КРУГЛОВ

КЛАССИФИКАЦИЯ НАЗЕМНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

В данной статье рассматривается классификация мобильных робототехнических систем в зависимости от их среды та сферы использования, кинематики, класса, а также типа управления. Для наземных мобильных роботов также выделены подклассы, проведен анализ их преимуществ та недостатков. Проанализирован выбор типа управления в зависимости от среды применения робота. Результаты могут быть использованы для выбора или разработки собственной мобильной робототехнической системы.

Ключові слова: робототехнічні системи, наземні мобільні роботи, сфера та середовище використання, типи керування.

In this paper classification of mobile robotic systems is given depending on their application sphere and environment (indoor/outdoor), kinematics, class (aerial, ground, water or hybrid), control type, mass and size. Highlighted kinematics subclasses for ground mobile robots: wheeled, caterpillar, legged, biomorphic, composite and hybrid robots. Analyzed and shown their advantages and disadvantages such as speed and passability. Analyzed what control type to choose depending on robot sphere of appliance: from human-controlled to automated, semiautonomous and fully autonomous.

Ключевые слова: робототехнические системы, наземные мобильные роботы, сфера и среда применения, типы управления.

The development of artificial intelligence technologies suggests a wide implementation of robotic systems in different branches of industry, infrastructure and human life. In this paper classification of mobile robotic systems is given depending on their application sphere and environment (indoor/outdoor), kinematics, class (aerial, ground, water or hybrid), control type, mass and size. Highlighted kinematics subclasses for ground mobile robots: wheeled, caterpillar, legged, biomorphic, composite and hybrid robots. Analyzed and shown their advantages and disadvantages such as speed and passability. Analyzed what control type to choose depending on robot sphere of appliance: from human-controlled to automated, semiautonomous and fully autonomous.

Results and recommendations can be used to choose or develop one's own mobile robotic system, its software and control type based on desired goal, using analysis and systematic approach presented in this article.

Keywords: robotic systems, ground mobile robots, application sphere and environment, types of control.

Введение. Развитие технологии искусственного интеллекта предполагает широкое внедрение роботов в различные отрасли промышленности, инфраструктуры и жизнедеятельности человека. Принятие решений в выборе или разработке той или иной робототехнической системы базируется на анализе и использовании системного подхода. Первым этапом является систематизация существующих решений, выделение значимых признаков и определение преимуществ и недостатков таких решений.

Классификация робототехнических систем. Согласно Згуровскому М. З. – сегодня происходит информационная революция: переход общества от индустриального к информационному, а в дальнейшем ожидается его преобразование в общество знаний. По разным оценкам, 30–60 % рабочих мест будет заменено робототехническими системами к 2035 году. В

связи с этим, необходимо изучать и развивать направления, связанные с робототехникой, в частности – мобильными робототехническими системами. Для выбора того или иного робота, необходимо провести анализ и классификацию существующих решений, а также выявить их преимущества и недостатки.

Робототехнические системы классифицируют на манипуляционные (стационарные) и мобильные (способные самостоятельно передвигаться). Мобильные роботы (МР) разделяют в зависимости от их класса, кинематики, среды применения, сферы применения и типа управления [1, 2]. В первом случае выделяют наземные, воздушные (самолет [16], вертолет [6, 11], дирижабль [13], крылья [14, 15]), водные (подводные [7, 8] и надводные [9, 10]) и гибридные [12], а также иногда в отдельные класс выделяют космические [49] МР.



Рис. 1 – Наземный, воздушный и водный классы МР

Поскольку наземные роботы являются наиболее распространенными, их также классифицируют по кинематике: шагоходы, колесные, гусеничные [28], биоморфные [30], а также композитные [12, 31, 33] и гибридные [29]. Хотя шагоходных роботов и можно отнести к биоморфным (подобных животным), они выделяются в отдельную группу и классифицируются в зависимости от количества ног: одноногие [17], бипедальные (андроиды) [18, 19], четырехногие [21, 22],

паукообразные (6-ногий “гексапод” [20] и 8-ногий “октапод” [23]). Колесных МР можно классифицировать в зависимости от количества колес: двух- [27], трех- [25], четырех-колесные [24, 26, 51] и другие [37]. С одной стороны, преимуществом шагоходных роботов над колесными является их проходимость (возможность перемещаться по лестницам и прочим проблемным рельефам), с другой – они не способны развивать скорость, доступную колесным.

© А. И. Круглов. 2017

В связи с этим, дополнительный интерес вызывают гибриды шагоходных и колесных роботов [27, 32]. Гусеничные роботы близки к колесным и, хотя уступают им в скорости, с другой стороны – имеют большую проходимость и устойчивость. Биоморфные и композитные роботы обычно имеют более специализированное предназначение. Так, если биоморфные МР зачастую используются в исследованиях для имитирования передвижения живых организмов (змей, мух и других), то композитные МР чаще применяются для моделирования поведения мультиагентных систем, взаимодействий в группе или трансформации группы небольших роботов в более крупные группы [33].

Далее рассмотрим классификацию МР по их среде применения [4]: домашние роботы (функционируют в замкнутом, структурированном пространстве) [45] и уличные роботы (применяются в динамически меняющемся, не структурированном пространстве). В свою очередь, домашних роботов классифицируют по следующим типам:

- транспортировка и обслуживание [27, 45];
- помощь клиентам (музеи, магазины) [19, 52];
- персональные помощники [44];
- уборка (помещений и зданий) [35];
- исследования, развлечения, игрушки [43, 17],

обучение [44];

- охрана [34].

Уличных роботов классифицируют по следующим типам:

- космонавтика [36, 37];
- лес [40];
- горная добыча [39];
- сельское хозяйство [38];
- трубопроводы [28, 42];
- строительство [41];
- вода [46];
- пожаротушение [47];
- военные [20, 29, 40].

Также, МР классифицируют по их сфере применения [1, 3]:

- индустриальные/промышленные [38, 39, 41];
- обслуживающие [16, 28, 42];
- бытовые [35, 44, 51];
- развлекательные, спортивные [27, 43, 44];
- исследовательские [9, 30, 31, 46];
- космические [36, 37];
- для военных и военизированных целей [22, 48, 49];
- для экстремальных ситуаций [20, 24, 40, 47].

МР по типу управления можно разделить на управляемые оператором [20, 50, 51], автоматизированные [11, 12, 17, 19], полуавтономные [13, 24, 26,

29], автономные [16, 22, 25, 30, 31, 34, 35, 42, 47]. МР управляемые оператором уязвимы к потере управляющего сигнала, что существенно ограничивает область их применения. Автоматизированные роботы имеют базовые вспомогательные и контролирующие программы для упрощения работы оператора. В случае полуавтономного управления робот должен быть способен восстановить сигнал (например, вернувшись в исходную позицию) либо продолжить выполнять поставленную задачу без участия оператора. Это приводит к автономным роботам – роботам, способным действовать независимо от оператора. Авторы статьи [49] утверждают что переход напрямую от управляемого оператором МР к автономному невозможен и автономность должна быть заложена изначально, а также рассматривают следующую градацию управления: управляется человеком, человеческое содействие, делегировано человеком, человек–супервайзер, комбинированная инициатива и полная автономность.

Таким образом, в зависимости от сферы и среды применения следует выбирать подходящий тип управления, исходя из полуавтономного: полная автономность в случае критичности перехвата управляющего сигнала и угона робота злоумышленниками или невозможности передачи управляющего сигнала; полная управляемость – в случае узкоспециализированного или исследовательского применения МР. Очевидно, что развитие интеллектуальных робототехнических систем идет в сторону полной автономности.

Также МР можно классифицировать в соответствии с их размером: на нанороботы (менее 100 нм.), микророботы (менее 3 см.), а также маленькие (менее 50 см.), средние (менее 3 м.) [35] и большие роботы. Данная классификация также коррелирует с их весовой классификацией: сверхлегкие (до 1 кг.), легкие (до 150 кг.) [35], средние (до 1 т.), тяжелые (до 10 т.) и большие роботы [49]. Обычно, данные классификации зависят от объема энергии, доступного роботу для выполнения необходимых задач.

Выводы. Выбор для разработки или покупки конкретного мобильного робота должен быть связан со средой и сферой его применения, а также с задачами, которые он должен будет выполнять. Важно, чтобы робот и его программное обеспечение были модульными для легкой модернизации и замены вышедших из строя комплектующих. Предпочтение стоит отдавать автономной или полуавтономной системе управления, а интеллекта мобильного робота должно быть достаточно для выполнения необходимых задач.

Список литературы:

1. Zhang, H. Mobile Robotics [Electronic resource] / H. Zhang // Available at: https://tams.informatik.uni-hamburg.de/lehre/2010ss/seminar/ir/PDF/MobilerobotLecture3_Review%20on%20mobile%20robot.pdf
2. Пройдаков, Э. М. Классификация мобильных роботов [Электронный ресурс] / Э. М. Пройдаков // Режим доступа: <https://postnauka.ru/video/34424>
3. Астапкович, А. М. Мобильные роботы и комплексы на их основе [Текст] / А. М. Астапкович, М. Б. Сергеев // Экстремальная робототехника. – СПб., 2003.
4. Kapila, V. Introduction to Robotics [Electronic resource] / V. Kapila // Available at: <http://engineering.nyu.edu/mechatronics/smart/pdf/Intro2Robotics.pdf>
5. Васильев, А. В. Обобщенная классификация мобильных роботов [Текст] / А. В. Васильев // Экстремальная робототехника. – 2014. – С. 41–45.
6. Bülthoff, H. H. Flying Robots and Flying Cars [Electronic resource] / H. H. Bülthoff // Available at: http://www.kyb.tuebingen.mpg.de/fileadmin/user_upload/files/publications/2012/KAIST-2012-key.pdf

7. Giguere, P. Wide-Speed Autopilot System for a Swimming Hexapod Robot [Text] / P. Giguere, Y. Girdhar, G. Dudek // 2013 International Conference on Computer and Robot Vision. – 2013. doi: [10.1109/crv.2013.13](https://doi.org/10.1109/crv.2013.13)
8. Meger, D. 3D trajectory synthesis and control for a legged swimming robot [Text] / D. Meger, F. Shkurti, D. C. Poza, P. Giguere, G. Dudek // 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. – 2014. doi: [10.1109/iros.2014.6942867](https://doi.org/10.1109/iros.2014.6942867)
9. Floyd, S. A Novel Water Running Robot Inspired by Basilisk Lizards [Text] / S. Floyd, T. Keegan, J. Palmisano, M. Sitti // 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. – 2006. doi: [10.1109/iros.2006.282111](https://doi.org/10.1109/iros.2006.282111)
10. Suhr, S. H. Biologically Inspired Miniature Water Strider Robot [Text] / S. H. Suhr, Y. Seong Song, S. J. Lee, M. Sitti // Robotics: Science and Systems I. – 2005. doi: [10.15607/rss.2005.i.042](https://doi.org/10.15607/rss.2005.i.042)
11. Borenstein, J. The HoverBot C An Electrically Powered Flying Robot [Electronic resource] / J. Borenstein // Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.9.8963&rep=rep1&type=pdf>
12. Araki, B. Multi-robot path planning for a swarm of robots that can both fly and drive [Text] / B. Araki, J. Strang, S. Pohorecky, C. Qiu, T. Naegele, D. Rus // 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2017. doi: [10.1109/icra.2017.7989657](https://doi.org/10.1109/icra.2017.7989657)
13. Alkurdi, L. M. Visual Control of an Autonomous Indoor Robotic Blimp [Text] / L. M. Alkurdi, R. B. Fisher // Robotic Vision: Technologies for Machine Learning and Vision Applications. – 2013. – P. 352–370. doi: [10.4018/978-1-4666-2672-0.ch019](https://doi.org/10.4018/978-1-4666-2672-0.ch019)
14. Karpelson, M. Energetics of flapping-wing robotic insects: towards autonomous hovering flight [Text] / M. Karpelson, J. P. Whitney, G.-Y. Wei, R. J. Wood // 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. – 2010. doi: [10.1109/iros.2010.5650269](https://doi.org/10.1109/iros.2010.5650269)
15. Baek, S. S. Flight control for target seeking by 13 gram ornithopter [Text] / S. S. Baek, F. L. G. Bermudez, R. S. Fearing // 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. – 2011. doi: [10.1109/iros.2011.6048246](https://doi.org/10.1109/iros.2011.6048246)
16. Temizer, S. Collision Avoidance for Unmanned Aircraft using Markov Decision Processes* [Text] / S. Temizer, M. Kochenderfer, L. Kaelbling, T. Lozano-Perez, J. Kuchar // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. – 2010. doi: [10.2514/6.2010-8040](https://doi.org/10.2514/6.2010-8040)
17. Poulakakis, I. Modeling and control of the monopedal robot Thumper [Text] / I. Poulakakis, J. W. Grizzle // 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 2009. doi: [10.1109/robot.2009.5152708](https://doi.org/10.1109/robot.2009.5152708)
18. Wahde, M. A brief review of bipedal robotics research [Text] / M. Wahde, J. Pettersson // 8th Mechatronics Forum International Conference. – 2002.
19. Kim, J.-Y. Experimental realization of dynamic walking of the biped humanoid robot KHR-2 using zero moment point feedback and inertial measurement [Text] / J.-Y. Kim, I.-W. Park, J.-H. Oh // Advanced Robotics. – 2006. – Vol. 20, Issue 6. – P. 707–736. doi: [10.1163/156855306777361622](https://doi.org/10.1163/156855306777361622)
20. Ahmed, M. Walking Hexapod Robot in Disaster Recovery: Developing Algorithm for Terrain Negotiation and Navigation [Text] / M. Ahmed, M. R., M. Billah, S. Farh // New Advanced Technologies. – 2010. doi: [10.5772/9437](https://doi.org/10.5772/9437)
21. Oak, S. Design, Analysis and Fabrication of Quadruped Robot with Four bar Chain Leg Mechanism [Text] / S. Oak, V. Narwane // International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology. – 2014. – Vol. 1, Issue 6. – P. 340–345.
22. Schmidt, A. Legged Robotics & BigDog. Marc Raibert: Boston Dynamics [Electronic resource] / A. Schmidt // Available at: https://webpages.uncc.edu/~jmconrad/ECGR6185-2008-01/notes/BigDogRobot_Presentation.pdf
23. Ma, H. W. Design of a Crab-Like Octopod Robot [Text] / H. W. Ma, L. Q. Wang, D. L. Chen, X. W. Hao, H. W. Luo // Applied Mechanics and Materials. – 2008. – Vol. 10-12. – P. 263–266. doi: [10.4028/www.scientific.net/amm.10-12.263](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.10-12.263)
24. Mir-Nasiri, N. New Intelligent Transmission Concept for Hybrid Mobile Robot Speed Control [Text] / N. Mir-Nasiri, S. Hussaini // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2005. – Vol. 2, Issue 3. – P. 27. doi: [10.5772/5784](https://doi.org/10.5772/5784)
25. Pandey, A. Modeling and Control of an Autonomous Three Wheeled Mobile Robot with Front Steer [Text] / A. Pandey, S. Jha, D. Chakravarty // 2017 First IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC). – 2017. doi: [10.1109/irc.2017.67](https://doi.org/10.1109/irc.2017.67)
26. Wasuntapichaiikul, P. Implementation of torque controller for brushless motors on the omni-directional wheeled mobile robot [Electronic resource] / P. Wasuntapichaiikul, K. Sukvichai, Y. Tipsuwan // Available at: <https://arxiv.org/abs/1708.02271>
27. Lee, G. H. Line Tracking Control of a Two-Wheeled Mobile Robot Using Visual Feedback [Text] / G. H. Lee, S. Jung // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2013. – Vol. 10, Issue 3. – P. 177. doi: [10.5772/53729](https://doi.org/10.5772/53729)
28. Giergiel, M. The Mathematical Description of the Robot for the Tank Inspection [Text] / M. Giergiel, T. Buratowski, P. Malka // Mechanics and Mechanical Engineering. – 2011. – Vol. 15, Issue 4. – P. 53–60.
29. Schwarz, M. Hybrid driving-stepping locomotion with the wheeled-legged robot Momaro [Text] / M. Schwarz, T. Rodehutsors, M. Schreiber, S. Behnke // 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2016. doi: [10.1109/icra.2016.7487776](https://doi.org/10.1109/icra.2016.7487776)
30. Xiao, X. Locomotive reduction for snake robots [Text] / X. Xiao, E. Cappel, W. Zhen, J. Dai, K. Sun, C. Gong et. al. // 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2015. doi: [10.1109/icra.2015.7139718](https://doi.org/10.1109/icra.2015.7139718)
31. Xian-yi, C. Study of Self-Organization Model of Multiple Mobile Robot [Text] / C. Xian-yi, L. Shu-qin, X. De-shen // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2005. – Vol. 2, Issue 3. – P. 23. doi: [10.5772/5785](https://doi.org/10.5772/5785)
32. Owano, N. Handle: Boston Dynamics robot on wheels performs on stage [Electronic resource] / N. Owano // Available at: <https://techxplore.com/news/2017-02-boston-dynamics-robot-wheels-stage.html>
33. Yan, Z. A Survey and Analysis of Multi-Robot Coordination [Text] / Z. Yan, N. Jouandeau, A. A. Cherif // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2013. – Vol. 10, Issue 12. – P. 399. doi: [10.5772/57313](https://doi.org/10.5772/57313)
34. Chavan, D. A Surveillance Robot with Climbing Capabilities for Home Security [Text] / D. Chavan, S. A. Annadate // International Journal of Computer Science and Mobile Computing. – 2013. – Vol. 2, Issue 11. – P. 291–296.
35. Khalid, U. Smart Floor Cleaning Robot (CLEAR) [Electronic resource] / U. Khalid, M. F. Baloch, H. Haider, M. U. Sardar et. al. // Available at: <http://www.standardsuniversity.org/wp-content/uploads/Smart-Floor-Cleaning-Robot-CLEAR.pdf>
36. Pedersen, L. A Survey Of Space Robotics [Electronic resource] / L. Pedersen, D. Kortenkamp, D. Wettergreen, I. Nourbakhsh // Available at: http://wayback.archive-it.org/1792/20100207195709/http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20030054507_2003061124.pdf
37. Заборовский, В. С. Космическая робототехника: от автономных устройств к кибер-физическим системам [Текст] / В. С. Заборовский. – СПб.: Ленэксп, 2013. – 18 с.
38. Шаныгин, С. В. Роботы, как средство механизации сельского хозяйства сельхоз [Текст] / С. В. Шаныгин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2013. – № 3. – С. 39–42.
39. Кауркин, И. А. Роботизация в горнодобывающей промышленности [Текст] / И. А. Кауркин // IX Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых «РОССИЯ МОЛОДАЯ». – 2017. – Режим доступа: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/RM/2017/RM17/pages/Articles/0305006-.pdf>
40. Коршунов, Н. Воздушные роботы призваны на защиту и охрану лесов [Электронный ресурс] / Н. Коршунов // Лесной патруль. – Режим доступа: <https://fpatrol.ru/vozdushnye-roboty-prizvany-na-zashitu-i-oxranu-lesov-n-korshunov/>
41. Мишук, Д. Огляд та аналіз конструкцій роботів для будівельних робіт [Текст] / Д. Мишук // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2013. – № 82. – С. 28–37.
42. Kim, J.-H. FAMPER: A fully autonomous mobile robot for pipeline exploration [Text] / J.-H. Kim, G. Sharma, S. S. Iyengar // 2010 IEEE International Conference on Industrial Technology. – 2010. doi: [10.1109/icit.2010.5472748](https://doi.org/10.1109/icit.2010.5472748)
43. Varsani, J. Robotic Football [Electronic resource] / J. Varsani // BSc (Hons) Computing Session. – 2002. – Available at: https://minerva.leeds.ac.uk/bbcswebdav/orgs/SCH_Computing/FYProj/reports/0203/Varsani.pdf
44. Ding, I.-J. On the Use of Kinect Sensors to Design a Sport Instructor Robot for Rehabilitation and Exercise Training of the Elderly [Text] / I.-J. Ding, Y.-J. Chang // Sensors and Materials. – 2016. doi: [10.18494/sam.2016.1302](https://doi.org/10.18494/sam.2016.1302)

45. Prassler, E. Domestic Robotics [Text] / E. Prassler, K. Kosuge // Springer Handbook of Robotics. – 2008. – P. 1253–1281. doi: [10.1007/978-3-540-30301-5_55](https://doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5_55)
46. Rida, P. An Introduction to Applied Underwater Robotics [Electronic resource] / P. Rida // Available at: <http://www.irs.uj.edu.tr/ident/files/SIE017-Seminario-PRida.pdf>
47. Hassanein, A. An autonomous firefighting robot [Text] / A. Hassanein, M. Elhawary, N. Jaber, M. El-Abd // 2015 International Conference on Advanced Robotics (ICAR). – 2015. doi: [10.1109/icar.2015.7251507](https://doi.org/10.1109/icar.2015.7251507)
48. Simon, P. Military Robotics: Latest Trends and Spatial Grasp Solutions [Text] / P. Simon // International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence. – 2015. – Vol. 4, Issue 4. doi: [10.14569/ijarai.2015.040402](https://doi.org/10.14569/ijarai.2015.040402)
49. Finkelstein, R. Military robotics: malignant machines or the path to peace? [Electronic resource] / R. Finkelstein // Available at: <https://roboticstechnologyinc.com/images/upload/file/Presentation%20Military%20Robotics%20Overview%20Jan%202010.pdf>
50. Phung, M. D. Localization of Internet-based Mobile Robot [Electronic resource] / M. D. Phung, T. T. Van Nguyen, T. H. Tran, Q. V. Tran // Available at: <https://arxiv.org/abs/1703.03649>
51. Villani, V. Interacting With a Mobile Robot with a Natural Infrastructure-Less Interface [Text] / V. Villani, L. Sabattini, G. Riggio, A. Levratti, C. Secchi, C. Fantuzzi // IFAC-PapersOnLine. – 2017. – Vol. 50, Issue 1. – P. 12753–12758. doi: [10.1016/j.ifacol.2017.08.1829](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1829)
52. Burgard, W. The Interactive Museum Tour-Guide Robot [Text] / W. Burgard, A. B. Cremers, D. Fox, D. Hahnel // AAAI-98 Proceedings. – 1998. – Available at: <https://www.aaai.org/Papers/AAAI/1998/AAAI98-002.pdf>
53. Цимбал, О. М. Адаптивність у прийнятті рішень роботів [Текст] / О. М. Цимбал, А. І. Бронніков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – Т. 4, № 4 (52). – С. 40–43. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/eejet/article/viewFile/1389/1287>

Bibliography (transliterated):

1. Zhang, H. Mobile Robotics. Available at: https://tams.informatik.uni-hamburg.de/lehre/2010ss/seminar/ir/PDF/MobilerobotLecture3_Review%20on%20mobile%20robot.pdf
2. Proydakov, E. M. Klassifikatsiya mobil'nyh robotov. Available at: <https://postnauka.ru/video/34424>
3. Astapovich, A. M., Sergeev, M. B. (2003). Mobil'nye roboty i komplekсы na ih osnove. Ekstremal'naya robototekhnika. Sankt-Peterburg.
4. Kapila, V. Introduction to Robotics. Available at: <http://engineering.nyu.edu/mechatronics/smart/pdf/Intro2Robotics.pdf>
5. Vasil'ev, A. V. (2014). Obobshchennaya klassifikatsiya mobil'nyh robotov. Ekstremal'naya robototekhnika, 41–45.
6. Bülthoff, H. H. Flying Robots and Flying Cars. Available at: http://www.kyb.tuebingen.mpg.de/fileadmin/user_upload/files/publications/2012/KAIST-2012-key.pdf
7. Giguere, P., Girdhar, Y., Dudek, G. (2013). Wide-Speed Autopilot System for a Swimming Hexapod Robot. 2013 International Conference on Computer and Robot Vision. doi: [10.1109/crv.2013.13](https://doi.org/10.1109/crv.2013.13)
8. Meger, D., Shkurti, F., Poza, D. C., Giguere, P., Dudek, G. (2014). 3D trajectory synthesis and control for a legged swimming robot. 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. doi: [10.1109/iros.2014.6942867](https://doi.org/10.1109/iros.2014.6942867)
9. Floyd, S., Keegan, T., Palmisano, J., Sitti, M. (2006). A Novel Water Running Robot Inspired by Basilisk Lizards. 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. doi: [10.1109/iros.2006.282111](https://doi.org/10.1109/iros.2006.282111)
10. Suhr, S. H., Seong Song, Y., Lee, S. J., Sitti, M. (2005). Biologically Inspired Miniature Water Strider Robot. Robotics: Science and Systems I. doi: [10.15607/rss.2005.i042](https://doi.org/10.15607/rss.2005.i042)
11. Borenstein, J. The HoverBot C An Electrically Powered Flying Robot. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.9.8963&rep=rep1&type=pdf>
12. Araki, B., Strang, J., Pohorecky, S., Qiu, C., Naegeli, T., Rus, D. (2017). Multi-robot path planning for a swarm of robots that can both fly and drive. 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). doi: [10.1109/icra.2017.7989657](https://doi.org/10.1109/icra.2017.7989657)
13. Alkurdi, L. M., Fisher, R. B. (2013). Visual Control of an Autonomous Indoor Robotic Blimp. Robotic Vision: Technologies for Machine Learning and Vision Applications, 352–370. doi: [10.4018/978-1-4666-2672-0.ch019](https://doi.org/10.4018/978-1-4666-2672-0.ch019)
14. Karpelson, M., Whitney, J. P., Wei, G.-Y., Wood, R. J. (2010). Energetics of flapping-wing robotic insects: towards autonomous hovering flight. 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. doi: [10.1109/iros.2010.5650269](https://doi.org/10.1109/iros.2010.5650269)
15. Baek, S. S., Bermudez, F. L. G., Fearing, R. S. (2011). Flight control for target seeking by 13 gram ornithopter. 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. doi: [10.1109/iros.2011.6048246](https://doi.org/10.1109/iros.2011.6048246)
16. Temizer, S., Kochenderfer, M., Kaelbling, L., Lozano-Perez, T., Kuchar, J. (2010). Collision Avoidance for Unmanned Aircraft using Markov Decision Processes*. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. doi: [10.2514/6.2010-8040](https://doi.org/10.2514/6.2010-8040)
17. Poulakakis, I., Grizzle, J. W. (2009). Modeling and control of the monopodal robot Thumper. 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. doi: [10.1109/robot.2009.5152708](https://doi.org/10.1109/robot.2009.5152708)
18. Wahde, M., Pettersson, J. (2002). A brief review of bipedal robotics research. 8th Mechatronics Forum International Conference.
19. Kim, J.-Y., Park, I.-W., Oh, J.-H. (2006). Experimental realization of dynamic walking of the biped humanoid robot KHR-2 using zero moment point feedback and inertial measurement. Advanced Robotics, 20 (6), 707–736. doi: [10.1163/15685530677361622](https://doi.org/10.1163/15685530677361622)
20. Ahmed, M., R., M., Billah M., Farhm S. (2010). Walking Hexapod Robot in Disaster Recovery: Developing Algorithm for Terrain Negotiation and Navigation. New Advanced Technologies. doi: [10.5772/9437](https://doi.org/10.5772/9437)
21. Oak, S., Narwane, V. (2014). Design, Analysis and Fabrication of Quadruped Robot with Four bar Chain Leg Mechanism. International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology, 1 (6), 340–345.
22. Schmidt, A. Legged Robotics & BigDog. Marc Raibert: Boston Dynamics. Available at: https://webpages.uncc.edu/~jmconrad/ECGR6185-2008-01/notes/BigDogRobot_Presentation.pdf
23. Ma, H. W., Wang, L. Q., Chen, D. L., Hao, X. W., Luo, H. W. (2008). Design of a Crab-Like Octopod Robot. Applied Mechanics and Materials, 10-12, 263–266. doi: [10.4028/www.scientific.net/amm.10-12.263](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.10-12.263)
24. Mir-Nasiri, N., Hussaini, S. (2005). New Intelligent Transmission Concept for Hybrid Mobile Robot Speed Control. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2 (3), 27. doi: [10.5772/5784](https://doi.org/10.5772/5784)
25. Pandey, A., Jha, S., Chakravarty, D. (2017). Modeling and Control of an Autonomous Three Wheeled Mobile Robot with Front Steer. 2017 First IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC). doi: [10.1109/irc.2017.67](https://doi.org/10.1109/irc.2017.67)
26. Wasuntapichai, P., Sukvichai, K., Tipsuwan, Y. Implementation of torque controller for brushless motors on the omni-directional wheeled mobile robot. Available at: <https://arxiv.org/abs/1708.02271>
27. Lee, G. H., Jung, S. (2013). Line Tracking Control of a Two-Wheeled Mobile Robot Using Visual Feedback. International Journal of Advanced Robotic Systems, 10 (3), 177. doi: [10.5772/53729](https://doi.org/10.5772/53729)
28. Giergiel, M., Buratowski, T., Malka, P. (2011). The Mathematical Description of the Robot for the Tank Inspection. Mechanics and Mechanical Engineering, 15 (4), 53–60.
29. Schwarz, M., Rodehutsors, T., Schreiber, M., Behnke, S. (2016). Hybrid driving-stepping locomotion with the wheeled-legged robot Momaro. 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). doi: [10.1109/icra.2016.7487776](https://doi.org/10.1109/icra.2016.7487776)
30. Xiao, X., Cappel, E., Zhen, W., Dai, J., Sun, K., Gong, C. et. al. (2015). Locomotive reduction for snake robots. 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). doi: [10.1109/icra.2015.7139718](https://doi.org/10.1109/icra.2015.7139718)
31. Xian-yi, C., Shu-qin, L., De-shen, X. (2005). Study of Self-Organization Model of Multiple Mobile Robot. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2 (3), 23. doi: [10.5772/5785](https://doi.org/10.5772/5785)
32. Owano, N. Handle: Boston Dynamics robot on wheels performs on stage. Available at: <https://techxplore.com/news/2017-02-boston-dynamics->

- [robot-wheels-stage.html](#)
33. Yan, Z., Jouandeau, N., Cherif, A. A. (2013). A Survey and Analysis of Multi-Robot Coordination. International Journal of Advanced Robotic Systems, 10 (12), 399. doi: [10.5772/57313](#)
 34. Chavan, D., Annadate, S. A. (2013). A Surveillance Robot with Climbing Capabilities for Home Security. International Journal of Computer Science and Mobile Computing, 2 (11), 291–296.
 35. Khalid, U., Baloch, M. F., Haider, H., Sardar, M. U. et. al. Smart Floor Cleaning Robot (CLEAR). Available at: <http://www.standardsuniversity.org/wp-content/uploads/Smart-Floor-Cleaning-Robot-CLEAR.pdf>
 36. Pedersen, L., Kortenkamp, D., Wettergreen, D., Nourbakhsh, I. A Survey Of Space Robotics. Available at: http://wayback.archive-it.org/1792/20100207195709/http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20030054507_2003061124.pdf
 37. Zaborovskiy, V. S. (2013). Kosmicheskaya robototekhnika: ot avtonomnykh ustroystv k kiber-fizicheskim sistemam. Sankt-Peterburg: Lenek-spo, 18.
 38. Shanygin, S. V. (2013). Roboty, kak sredstvo mekhanizatsii sel'skogo hozyaystva sel'hoz. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie, 3, 39–42.
 39. Kaurkin, I. A. (2017). Robotizatsiya v gornodobyvayushchey promyshlennosti. IX Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya molodykh uchennykh «ROSSIYA MOLODAYA». Available at: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/RM/2017/RM17/pages/Articles/0305006-.pdf>
 40. Korshunov, N. Vozdushnye roboty prizvany na zashchitu i ohranu lesov. Lesnoy patrol'. Available at: <https://fpatrol.ru/vozdushnye-roboty-prizvany-na-zashchitu-i-oxranu-lesov-n-korshunov/>
 41. Mishchuk, D. (2013). Ohliad na analiz konstruktsiy robotiv dlia budivelnnykh robit. Hirnychi, budivelni, dorozhni ta meliorativni mashyny, 82, 28–37.
 42. Kim, J.-H., Sharma, G., Iyengar, S. S. (2010). FAMPER: A fully autonomous mobile robot for pipeline exploration. 2010 IEEE International Conference on Industrial Technology. doi: [10.1109/icit.2010.5472748](#)
 43. Varsani, J. (2002). Robotic Football. BSc (Hons) Computing Session. Available at: https://minerva.leeds.ac.uk/bbcswebdav/orgs/SCH_Computing/FYProj/reports/0203/Varsani.pdf
 44. Ding, I.-J., Chang, Y.-J. (2016). On the Use of Kinect Sensors to Design a Sport Instructor Robot for Rehabilitation and Exercise Training of the Elderly. Sensors and Materials. doi: [10.18494/sam.2016.1302](#)
 45. Prassler, E., Kosuge, K. (2008). Domestic Robotics. Springer Handbook of Robotics, 1253–1281. doi: [10.1007/978-3-540-30301-5_55](#)
 46. Ridao, P. An Introduction to Applied Underwater Robotics. Available at: <http://www.irs.uji.es/trident/files/SIE017-Seminario-PRidao.pdf>
 47. Hassanein, A., Elhawary, M., Jaber, N., El-Abd, M. (2015). An autonomous firefighting robot. 2015 International Conference on Advanced Robotics (ICAR). doi: [10.1109/icar.2015.7251507](#)
 48. Simon, P. (2015). Military Robotics: Latest Trends and Spatial Grasp Solutions. International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence, 4 (4). doi: [10.14569/ijarai.2015.040402](#)
 49. Finkelstein, R. Military robotics: malignant machines or the path to peace? Available at: <https://roboticstechnologyinc.com/images/upload/file/Presentation%20Military%20Robotics%20Overview%20Jan%202010.pdf>
 50. Phung, M. D., Van Nguyen, T. T., Tran, T. H., Tran, Q. V. Localization of Internet-based Mobile Robot. Available at: <https://arxiv.org/abs/1703.03649>
 51. Villani, V., Sabatini, L., Riggio, G., Levratti, A., Secchi, C., Fantuzzi, C. (2017). Interacting With a Mobile Robot with a Natural Infrastructure-Less Interface. IFAC-PapersOnLine, 50 (1), 12753–12758. doi: [10.1016/j.ifacol.2017.08.1829](#)
 52. Burgard, W., Cremers, A. B., Fox, D., Hahnel, D. (1998). The Interactive Museum Tour-Guide Robot. AAAI-98 Proceedings. Available at: <https://www.aaai.org/Papers/AAAI/1998/AAAI98-002.pdf>
 53. Tsymbal, O. M., Bronnikov, A. I. (2011). Adaptivity in decision-making of robots. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (4 (52)), 40–43. Available at: <http://journals.urau.ua/eejet/article/viewFile/1389/1287>

Поступила (received) 25.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Класифікація наземних мобільних роботів/ Круглов О. І. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 33(1255). – С. 80–84.– Бібліогр.: 53 назв. – ISSN 2079-5459.

Классификация наземных мобильных роботов/ Круглов А. И. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 33(1255). – С. 80–84.– Бібліогр.: 53 назв. – ISSN 2079-5459.

Ground mobile robots classification/ Kruglov A. //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 33 (1255).– P. 80–84.– Bibliogr.:53. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Олександр Ігорович Круглов – магістр математики, Київський національний університет Тараса Шевченка, аспірант кафедри "Інтелектуальних та інформаційних систем"; вул. Ванди Василевської, 24, м. Київ, Україна, 02000; e-mail: awahrhaft@gmail.com

Александр Игоревич Круглов – магістр математики, Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, аспірант кафедри "Интеллектуальных и информационных систем"; улица Ванды Василевской, 24, г. Киев, Украина, 02000; e-mail: awahrhaft@gmail.com

Kruglov Alexander – master of Mathematics, [Taras Shevchenko National University of Kyiv](#), post-graduate student of the department аспірант кафедри «Intellectual and Information Systems»; Vandy Vasilevskoj street, 24, Kiev, Ukraine, 02000; e-mail: awahrhaft@gmail.com

М. В. КОСТЕРЄВ, В. В. ЛІТВІНОВ, К. А. КІЛЬОВА

ОЦІНКА ВПЛИВУ ЗМІНИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ НА ІМОВІРНІСТЬ ЙОГО ВІДМОВИ НА ІНТЕРВАЛІ ЧАСУ

В статті розглянуто питання впливу зміни технічного стану обладнання протягом інтервалу часу, на якому визначається імовірність його відмови, на цю імовірність. Розроблено підхід до обґрунтування граничних інтервалів часу та умов на яких зміною технічного стану можна знехтувати і на яких врахування зміни технічного стану є обов'язковим. Удосконалено імовірнісно-статистичний метод оцінювання надійності об'єктів електроенергетичної системи, який дозволить використовувати його на великих інтервалах часу з урахуванням зміни стану об'єктів у часі. Визначено тенденції впливу зміни технічного стану об'єкту протягом інтервалу часу на імовірність відмови.

Ключові слова: імовірність відмови, технічний стан, інтервал часу, обмотка статора генератора, повітряний вимикач.

В статье рассмотрен вопрос влияния изменения технического состояния оборудования на интервале времени, на котором определяется вероятность его отказа, на эту вероятность. Разработан подход к обоснованию предельных интервалов времени и условий на которых изменением технического состояния можно пренебречь и на которых учет технического состояния является обязательным. Усовершенствован вероятностно-статистический метод оценки надежности объектов электроэнергетической системы, который позволит применять его на больших интервалах времени с учетом изменения состояния объектов во времени. Определены тенденции влияния изменения технического состояния объекта на протяжении интервала времени на вероятность отказа.

Ключевые слова: вероятности отказа, техническое состояние, интервал времени, обмотка статора генератора, воздушный выключатель.

In article considered the problem of equipment technical state influence at the time interval on the fault probability at same time interval. Because object state diagnostic features are changing at the time interval by the equipment resource decreasing, aging and degradation processes of object and its local parts, quantity estimation of its technical state is changing too. This leads to the change of condition probabilities $p(B/H_1)$ and $p(B/H_2)$ and, according to the Bayes theorem, to the change of time interval fault probability. For the obtaining of most verify probabilities was developed the forecasting approach to power engineering objects fault probability estimation at the time interval with technical state change consideration at this time interval. Limit time intervals on which are possible to neglect the technical state change was justified. Time intervals on which are necessary taking into consideration technical state change was justified too. The trends of time interval technical state change influence on fault probability are detected. In the case, when object has poor technical state and, as consequence, high value of condition probability $p(B/H_1)$, error is growing faster, then by low value of condition probability $p(B/H_1)$. This fact restrict the time interval on which is possible to fault probability estimation with fixed at the start-time technical state.

Keywords: fault probability, technical state, time interval, generator stator winding, air circuit breaker.

Вступ. На теперішній час до 80 % обладнання електроенергетичної системи (ЕЕС) України знаходиться у зношеному стані. Це стосується як комутаційного обладнання (вимикачі, роз'єднувачі) так і силового обладнання (генератори, трансформатори, реактори) та ліній електропередачі (повітряні, кабельні). Темпи заміни обладнання значно відстають від темпів старіння, а проведення профілактичних ремонтів та часткова реконструкція або модернізація [1] не дозволяють повністю відновити його ресурс [2, 3].

Надійність роботи ЕЕС України значною мірою залежить від пошкоджуваності силового та комутаційного обладнання, яка визначається його технічним станом (ТС). Надійність роботи та ТС електрообладнання ЕЕС безпосередньо пов'язані з тривалістю експлуатації обладнання, під час якого останнє піддається процесам фізичного та морального старіння та зовнішнім впливам (метеорологічні умови, аномальні режими у ЕЕС, людський фактор, тощо) [4]. Основним показником надійності, який дозволяє кількісно врахувати характеристики стану обладнання певного типу, індивідуальні характеристики стану та умови експлуатації є імовірність відмови на інтервалі часу. Нечітко-статистичний підхід до визначення імовірності відмови елементів ЕЕС на інтервалі часу з урахуванням індивідуальних характеристик та умов функціонування представлено в [4].

Дослідження стану проблеми. Для оцінки імовірності відмови обладнання найдоцільніше використати статистичні дані щодо функціонування

обладнання даного типу, на основі яких будується функція розподілу імовірності відмови [5]. Доцільність використання статистичних даних пояснюється тим, що вони враховують всі експлуатаційні фактори. Слід зауважити, що вказаний підхід до оцінки імовірності відмови може дати достовірні результати, якщо є однорідна та репрезентативна статистика, яку на практиці отримати дуже складно внаслідок різних умов експлуатації обладнання, його різноманітності, місця розташування в ЕЕС і т. д. Отримані в результаті обробки статистичних даних функції розподілу імовірності події базуються на генеральній сукупності подій і, строго кажучи, не є імовірнісними характеристиками окремої одиниці електрообладнання. В [4, 5] для врахування індивідуальних характеристик елементу ЕЕС застосовано метод Байєса:

$$p(H_1/B) = \frac{p(H_1) \cdot p(B/H_1)}{p(H_1) \cdot p(B/H_1) + p(H_2) \cdot p(B/H_2)}, \quad (1)$$

де H_1 – подія що означає відмову об'єкта, H_2 – подія, що означає безвідмовну роботу об'єкта, B – подія, що означає наявність у об'єкта ТС S , $p(H_1/B)$ – умовна імовірність відмови об'єкта на інтервалі часу Δt за умови, що в об'єкта було зафіксовано певний технічний стан S ; $p(H_1)$ – апіорна імовірність події H_1 до виявлення події B ; $p(H_2)$ – апіорна імовірність події H_2 до виявлення події B (апіорні імовірності в цьому

розгляді враховують той факт, що до моменту нагляду t_1 об'єкт знаходився в працездатному стані); $p(B/H_1)$ – умовна імовірність події B при настанні події H_1 (або імовірність підтвердження гіпотези «відмова об'єкта на інтервалі часу Δt » наявністю ознаки S , яка характеризує ТС об'єкта); $p(B/H_2)$ – умовна імовірність події B при настанні події H_2 (або імовірність підтвердження гіпотези «об'єкт не відмовив на інтервалі часу Δt » наявністю ознаки S , яка характеризує ТС об'єкта).

Для визначення умовних імовірностей $p(B/H_1)$ та $p(B/H_2)$ використано композиційне правило Заде з побудовою матриць нечітких причинних відносин між ТС S та імовірностями $p(B/H_1)$ та $p(B/H_2)$ на основі знань експерта за методом Сааті.

В даному методі визначення умовних імовірностей $p(B/H_1)$ та $p(B/H_2)$ відбувається за умови $S = \text{const}$ на всьому інтервалі часу Δt . Фактично ж, ТС об'єкту є змінною величиною на будь-якому інтервалі часу, таким чином цей метод використовується тільки на невеликих інтервалах часу на яких зміною стану об'єкту можна знехтувати і, як наслідок, не враховувати зміну імовірностей $p(B/H_1)$ та $p(B/H_2)$.

Постановка задачі. Дослідження впливу зміни кількісної характеристики стану обладнання протягом інтервалу часу, на якому визначається імовірність відмови об'єкта, для обґрунтування граничних інтервалів часу та умов на яких цією зміною можна знехтувати і на яких врахування зміни стану є обов'язковим. Удосконалення імовірнісно-статистичного методу оцінювання надійності об'єктів ЕЕС, яке дозволить використовувати його на великих інтервалах часу з урахуванням зміни ТС об'єктів у часі.

Оцінювання імовірності відмови об'єкта на інтервалі часу з урахуванням зміни його ТС протягом цього інтервалу. Розглянемо метод оцінювання імовірності відмови об'єкту на інтервалі часу з урахуванням його ТС S в момент часу спостереження t_1 . Імовірність відмови об'єкту на інтервалі часу Δt визначається за (1). Априорні імовірності $p(H_1)$ та $p(H_2)$ визначаються наступними чином [4]:

$$p(H_1) = \frac{F(t_2) - F(t_1)}{1 - F(t_1)}, \quad (2)$$

$$p(H_2) = 1 - p(H_1), \quad (3)$$

де $F(t_1)$, $F(t_2)$ - значення статистичної функції розподілу імовірності відмови обладнання даного типу в моменти часу t_1 та $t_2 = t_1 + \Delta t$.

Задача визначення умовних імовірностей $p(B/H_1)$ та $p(B/H_2)$ формулюється наступним чином. Сформована множина вхідних характеристик об'єкта $\bar{X} = \{x_1 \ x_2 \ \dots \ x_5\}$, де:

- x_1 – дуже великий загальний спрацьований ресурс об'єкта;
- x_2 – великий загальний спрацьований ресурс об'єкта;

- x_3 – допустимий загальний спрацьований ресурс об'єкта;

- x_4 – малий загальний спрацьований ресурс об'єкта;

- x_5 – дуже малий загальний спрацьований ресурс об'єкта.

Вхідні змінні $x_1 \div x_5$ характеризують собою інтегральний показник, який визначає спрацьований ресурс об'єкта S .

Для визначення умовної імовірності $p(B/H_1)$ сформована вихідна множина $\bar{Y}_p = \{y_{p1} \ y_{p2} \ y_{p3} \ y_{p4} \ y_{p5}\}$, яка складається з наступних змінних:

- y_{p1} – дуже висока імовірність підтвердження гіпотези «відмова на Δt » ознаками $\bar{S}$;

- y_{p2} – висока імовірність підтвердження гіпотези «відмова на Δt » ознаками $\bar{S}$;

- y_{p3} – середня імовірність підтвердження гіпотези «відмова на Δt » ознаками $\bar{S}$;

- y_{p4} – низька імовірність підтвердження гіпотези «відмова на Δt » ознаками $\bar{S}$;

- y_{p5} – дуже низька імовірність підтвердження гіпотези «відмова на Δt » ознаками $\bar{S}$.

Для визначення умовної імовірності $p(B/H_2)$ сформована вихідна множина

$\bar{Y}_q = \{y_{q1} \ y_{q2} \ y_{q3} \ y_{q4} \ y_{q5}\}$, яка складається з наступних змінних:

- y_{q1} – дуже висока імовірність підтвердження гіпотези «відсутність відмови на Δt » ознаками $\bar{S}$;

- y_{q2} – висока імовірність підтвердження гіпотези «відсутність відмови на Δt » ознаками $\bar{S}$;

- y_{q3} – середня імовірність підтвердження гіпотези «відсутність відмови на Δt » ознаками $\bar{S}$;

- y_{q4} – низька імовірність підтвердження гіпотези «відсутність відмови на Δt » ознаками $\bar{S}$;

- y_{q5} – дуже низька імовірність підтвердження гіпотези «відсутність відмови на Δt » ознаками $\bar{S}$.

Інтервали приналежності змінних вихідних множин $\bar{Y}_p$ та $\bar{Y}_q$ прийнято згідно зі шкалою Харрінгтона [6], яка має універсальне використання та може бути застосована для оцінки значення змінних цих множин. Множина вхідних змінних об'єкта $\bar{X}$ пов'язана з множинами вихідних змінних $\bar{Y}_p$ та $\bar{Y}_q$ через матриці причинних відносин R_p та R_q виразами:

$$P_p = R_p \circ S; \quad (4)$$

$$P_q = R_q \circ S. \quad (5)$$

Рішення на інтервалах приналежності визначаються на основі приблизної модифікації центру ваги [7, 8]:

$$y_{p0} = \frac{\sum_{i=1}^m p_{Pi} \cdot y_{Pi}}{\sum_{i=1}^m p_{Pi}}; \quad (6)$$

$$y_{Q0} = \frac{\sum_{i=1}^m p_{Qi} \cdot y_{Qi}}{\sum_{i=1}^m p_{Qi}}. \quad (7)$$

Кількісні значення імовірностей $p(B/H_1)$ та $p(B/H_2)$ визначаються наступним чином:

$$p(B/H_1) = y_{Pi \min} + y_{p0} \cdot (y_{Pi \max} - y_{Pi \min}); \quad (8)$$

$$p(B/H_2) = y_{Qj \min} + y_{Q0} \cdot (y_{Qj \max} - y_{Qj \min}). \quad (9)$$

В цьому методі протягом інтервалу часу $\Delta t = t_2 - t_1$ стан S приймається незмінною величиною. Як наслідок, умовні імовірності $p(B/H_1)$ та $p(B/H_2)$ у формулі Байєса (1) також є константами.

Оскільки діагностичні ознаки стану об'єкта змінюються протягом всього інтервалу часу Δt внаслідок спрацювання ресурсу, процесів старіння та деградації об'єкту і його локальних вузлів, кількісна оцінка ТС S також змінюється. Це призводить до зміни значень умовних імовірностей $p(B/H_1)$ та $p(B/H_2)$ і, за теоремою Байєса, до зміни значення імовірності $p(H_1/B)$.

Якщо інтервал часу Δt є великим, то зміна ознак стану об'єкту впливає на значення імовірності відмови об'єкту на цьому інтервалі. Для дослідження цього впливу інтервал часу Δt розбивається на k рівних підінтервалів t_{ik} тривалістю $\delta t = \Delta t / (k-1)$. На кожному підінтервалі часу δt визначаються безумовні імовірності $p(H_{1i})$ та $p(H_{2i})$ за виразами:

$$p(H_{1i}) = \frac{F(t_{i+1}) - F(t_i)}{1 - F(t_i)}; \quad (10)$$

$$p(H_{2i}) = 1 - p(H_{1i}). \quad (11)$$

В моменти часу t_{1i} визначається вектор ознак стану об'єкту P , за яким з використанням нечіткої моделі оцінки стану відповідного елементу (вимикач, трансформатор, генератор, ЛЕП, тощо) [3, 4, 9, 10], визначається стан об'єкту $S(t_{1i})$. Вихідна нечітка множина станів об'єкта S визначається із співвідношення:

$$S = F(\varphi(P), R, M, D, A), \quad (12)$$

де $\varphi(P)$ - функції приналежності вхідних і вихідних змінних, R - база нечітких правил виду «ЯКЩО – ТО», M - механізм нечіткого виводу, який реалізує логічні операції і використовує правила виду «ЯКЩО – ТО» для відображення вхідних нечітких змінних в нечітку вихідну змінну, D – метод дефазифікації.

Для кожного значення $S(t_{1i})$, $i=1, \dots, k$, за нечітким виводом Заде (максимінна композиція) визначаються умовні імовірності $p(B_i/H_{1i})$ та $p(B_i/H_{2i})$, після чого на кожному інтервалі δt визначається імовірність відмови $p(H_{1i}/B_i)$ за формулою Байєса:

$$p(H_{1i}/B_i) = \frac{p(H_{1i}) \cdot p(B_i/H_{1i})}{p(H_{1i}) \cdot p(B_i/H_{1i}) + p(H_{2i}) \cdot p(B_i/H_{2i})}. \quad (13)$$

Оскільки інтервали часу δt не перетинаються один з одним, то справедливим є вираз $\Delta t = \sum_{i=1}^{k-1} \delta t_i$. В

цьому випадку, результуюча імовірність відмови на інтервалі часу Δt за теоремою складання імовірностей несумісних подій [11], з урахуванням того, що $p(\delta t_i) = p(H_{1i}/B_i)$, а $p'(\Delta t) = p'(H_1/B)$, визначається наступним чином:

$$p'(H_1/B) = p'(\Delta t) = \sum_{i=1}^{k-1} p(\delta t_i) = \sum_{i=1}^{k-1} p(H_{1i}/B_i). \quad (14)$$

Отриманий результат представляє собою імовірність відмови елементу на інтервалі часу Δt з урахуванням зміни його ТС протягом цього інтервалу (рис. 1).

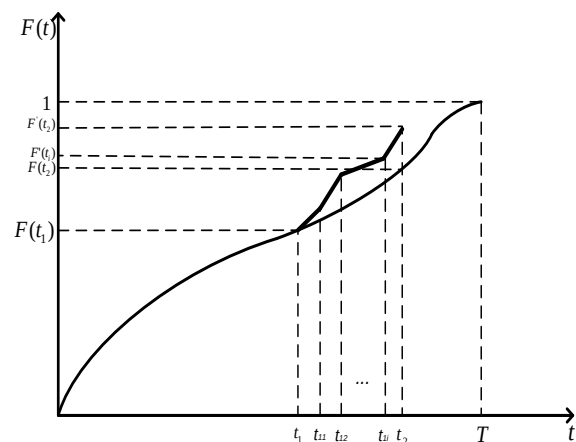


Рис. 1 – Модифікована функція $F(t)$, побудована з урахуванням зміни стану окремої одиниці обладнання протягом інтервалу часу Δt

Отриманий результат є більш достовірною оцінкою імовірності відмови об'єкту на інтервалі часу, у порівнянні з розробленим раніше методом у якому ТС на інтервалі часу Δt приймався незмінною величиною (рис. 2).

Запропонований підхід до врахування зміни стану об'єкту протягом інтервалу часу передбачає прогнозування стану об'єкту на цьому інтервалі часу. Для цього необхідна наявність ретроспективних даних про діагностичні ознаки стану обладнання до моменту часу t_1 з їхньою наступною екстраполяцією на інтервалі часу Δt .

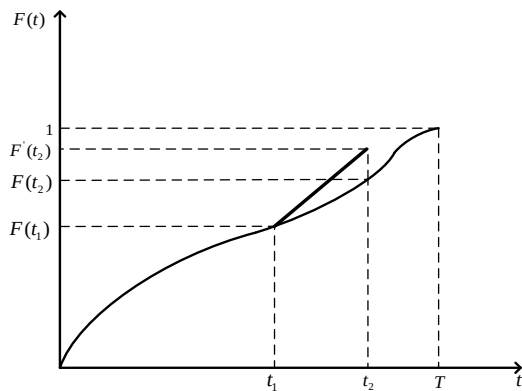


Рис. 2 – Модифікована функція $F(t)$, побудована за незмінного стану окремої одиниці обладнання протягом інтервалу часу Δt

В таких умовах доцільним є порівняння результатів, отриманих на різних інтервалах часу Δt , з урахуванням та без урахування зміни ТС об'єкту для визначення гранично припустимого інтервалу часу Δt за якого можна не враховувати зміну ТС об'єкту без суттєвого спотворення кінцевого результату.

Приклад 1. Необхідно визначити імовірність відмови обмотки статора (ОС) гідрогенератора №11 Дніпровської ГЕС-2 (тип СВ-1230/140-56М) на інтервалі часу $\Delta t = 18$ міс з урахуванням зміни її ТС протягом цього інтервалу часу. Також необхідно обґрунтувати максимально припустимий інтервал часу Δt на якому зміною ТС можна знехтувати.

Рік введення гідрогенератора в експлуатацію (після реконструкції) – 2013. Момент часу спостереження t_1 – 01.07.17 р. Таким чином $t_1 = 4$ р.

Згідно з інтегральною статистичною функцією розподілу імовірності відмови гідрогенераторів (рис. 3) $F(t_1) = 0,191$.

Розіб'ємо інтервал часу $\Delta t = 18$ міс на 6 інтервалів тривалістю $\delta t = 3$ міс, тоді границі цих інтервалів (у роках) визначаються як:

$$t_{1i} = t_{1(i-1)} + 0,25, \quad i = 1, \dots, 6. \quad (15)$$

Для кожного моменту часу t_{1i} за функцією $F(t)$ (рис. 3), визначаються значення $F(t_{1i})$. За виразами (10), (11) визначаються імовірності $p(H_{1i})$ та $p(H_{2i})$. Результати занесені в табл. 1.

Оцінювання стану ОС статора виконується за нечіткою моделлю, представленою в [9]. За ретроспективними даними, отриманими з архівної інформації станційної системи SCADA, визначені значення діагностичних ознак (температура обмотки T_{Cu} , температура осердя T_{Fe} , температура охолоджуючого повітря T_{Air} , віброшвидкість спинки статора V , віброприскорення спинки статора A , складова напруги зворотної послідовності, складова напруги нульової послідовності, складова струму зворотної послідовності) протягом попередніх 3-х років експлуатації. Результати приведені в табл. 2.

Для кожного вектору стану P , отриманого в результаті аналізу ретроспективних даних, за нечіткою моделлю визначено ТС S . Результати приведені в табл. 3.

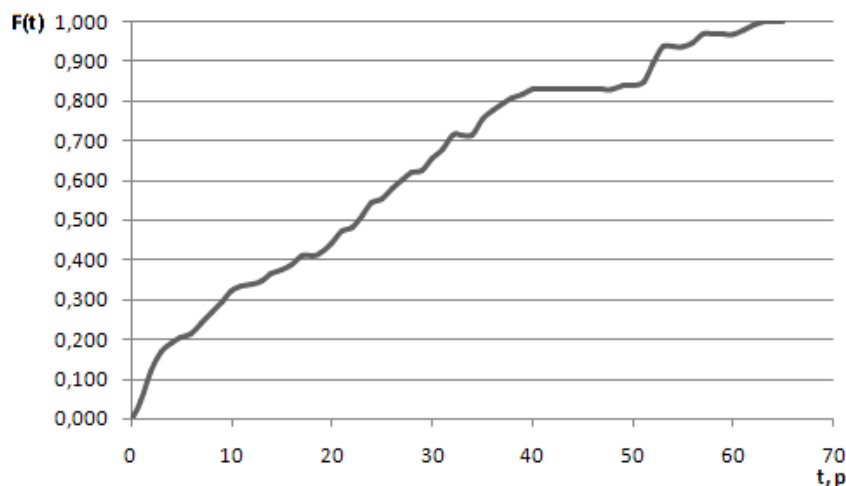


Рис. 3 – Інтегральна статистична функція розподілу імовірності відмови гідрогенераторів

Таблиця 1 – Імовірнісні характеристики обмотки статора на інтервалах часу δt

$F(t)$	$F(t_1)$	$F(t_{11})$	$F(t_{12})$	$F(t_{13})$	$F(t_{14})$	$F(t_{15})$	$F(t_{16})$
	0,191	0,194	0,197	0,2	0,203	0,206	0,209
$p(H_1)$	$p(H_{11})$	$p(H_{12})$	$p(H_{13})$	$p(H_{14})$	$p(H_{15})$	$p(H_{16})$	$p(H_1)$
	0,0037	0,0037	0,0037	0,0038	0,0038	0,0038	0,0222
$p(H_2)$	$p(H_{21})$	$p(H_{22})$	$p(H_{23})$	$p(H_{24})$	$p(H_{25})$	$p(H_{26})$	$p(H_2)$
	0,9963	0,9963	0,9963	0,9963	0,9962	0,9962	0,9778

Таблиця 2 – Значення діагностичних ознак стану ОС гідрогенератора до моменту часу спостереження t_1

Час, p Параметр	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5
$T_{Cu}, ^\circ C$	72	70	69	73	75	75	74	76	77	76	77	77	78	76	77
$T_{Fe}, ^\circ C$	66	66	68	67	67	68	69	68	69	70	70	71	70	71	70
$T_{Air}, ^\circ C$	47	48	48	47	46	47	46	47	45	46	46	46	45	44	45
$V, \text{мм/с}$	5,2	5,3	5,3	5,5	5,7	5,8	5,7	6,0	6,1	6,4	6,6	6,7	6,8	7,0	7,3
$A, \text{м/с}^2$	2,8	2,9	2,9	2,8	3,0	3,1	3,1	3,2	3,4	3,3	3,5	3,4	3,4	3,5	3,5
$U_2, \text{В}$	3,3	3,3	3,4	3,2	3,4	3,4	3,5	3,5	3,4	3,5	3,6	3,5	3,6	3,5	3,6
$3U_0, \text{В}$	2,1	2,2	2,2	2,1	2,3	2,2	2,2	2,3	2,4	2,3	2,4	2,4	2,3	2,3	2,3
$I_2, \text{А}$	0,28	0,28	0,29	0,28	0,29	0,3	0,3	0,29	0,3	0,3	0,31	0,3	0,31	0,31	0,3

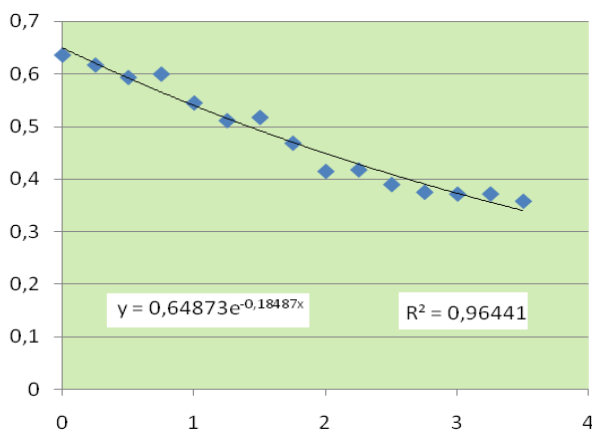
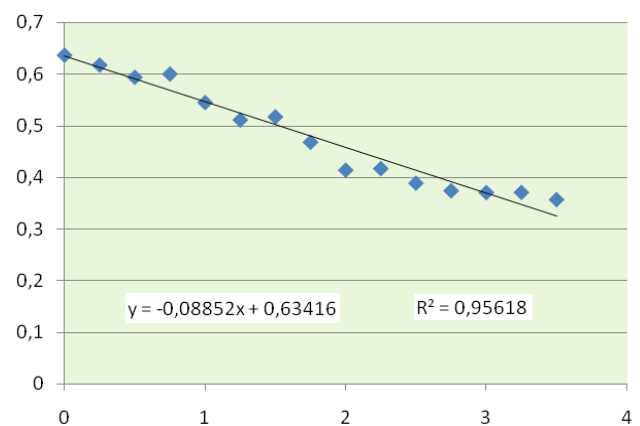
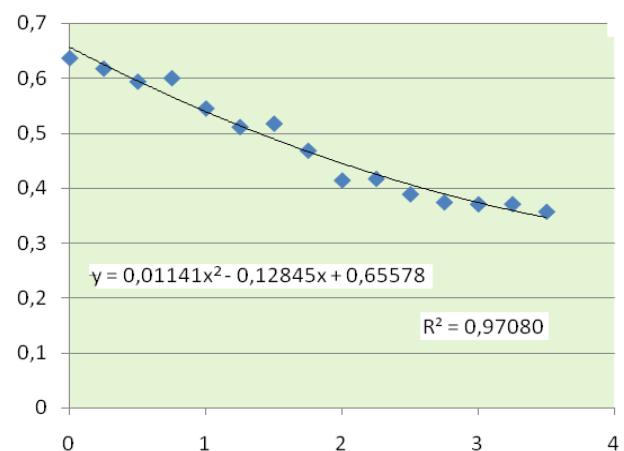
Таблиця 3 – ТС ОС на інтервалі часу $[0; t_1]$

t	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75
δt	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75
S	0,6365	0,6175	0,5939	0,6002	0,5452	0,5115	0,5176	0,4685
t	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	-
δt	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	-
S	0,4147	0,4176	0,3896	0,3749	0,3715	0,3717	0,3578	-

Отримані значення ТС S апроксимуються функціональною залежністю $S(t)$ на інтервалі часу спостереження $[0; t_1]$ [12].

Визначення апроксимаційної функції виконується шляхом висування гіпотез щодо відповідності даних спостереження типовим апроксимаційним функціям (лінійні, поліноміальні, степеневі, експоненційні, логарифмічні) в якості остаточної приймається гіпотеза для якої коефіцієнт кореляції R^2 апроксимаційної функції та вихідних даних буде найближчим до 1. Для апроксимації залежності S від t висуваються наступні гіпотези:

1. Апроксимація експоненціальною функцією (рис. 4);
2. Апроксимація лінійною функцією (рис. 5);
3. Апроксимація квадратичною функцією (рис. 6).

Рис. 4 – Апроксимація залежності $S(t)$ експоненціальною функцієюРис. 5 – Апроксимація залежності $S(t)$ лінійною функцієюРис. 6 – Апроксимація залежності $S(t)$ квадратичною функцією

Після порівняння отриманих результатів, в якості апроксимаційної приймається квадратична функція, яка має найвищий коефіцієнт кореляції з вихідними даними ($\delta t; S$):

$$S = 0,01141t^2 - 0,12845t + 0,65578. \quad (16)$$

За отриманою квадратичною функцією шляхом екстраполяції на інтервалі часу $\Delta t \in [t_1, t_2]$ прогнозуються значення технічного стану обмотки статора в моменти часу t_{1i} . Результати приведені в табл. 4.

Таблиця 4 – Прогностична оцінка стану обмотки статора на інтервалі Δt

t_{1i} , роки	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5
S_{1i} , в.о.	0,3345	0,3245	0,3159	0,3088	0,3031	0,2987

Таблиця 5 – Умовні імовірності $p(B_i / H_{1i})$ та $p(B_i / H_{2i})$

$p(B / H_1)$	$p(B_1 / H_{11})$	$p(B_2 / H_{12})$	$p(B_3 / H_{13})$	$p(B_4 / H_{14})$	$p(B_5 / H_{15})$	$p(B_6 / H_{16})$
0,532	0,532	0,533	0,534	0,535	0,538	0,743
$p(B / H_2)$	$p(B_1 / H_{21})$	$p(B_2 / H_{22})$	$p(B_3 / H_{23})$	$p(B_4 / H_{24})$	$p(B_5 / H_{25})$	$p(B_6 / H_{26})$
0,472	0,472	0,471	0,47	0,462	0,464	0,461

Таблиця 6 – Визначення імовірностей відмови ОС генератора на інтервалах часу δt та на інтервалі часу Δt

δt	$p(H_1)$	$p(H_2)$	$p(B / H_1)$	$p(B / H_2)$	$p(H_1 / B)$
3,5-3,75	0,0037	0,9963	0,532	0,472	0,00417
3,75-4	0,0037	0,9963	0,533	0,471	0,00419
4-4,25	0,0037	0,9963	0,534	0,47	0,00420
4,25-4,5	0,0038	0,9963	0,535	0,462	0,00440
4,5-4,75	0,0038	0,9962	0,538	0,464	0,00440
4,75-5	0,0038	0,9962	0,743	0,461	0,00611
3,5-5	0,0222	0,9778	0,532	0,472	0,02495

Імовірність відмови на інтервалі $\Delta t = 1,5 p$ з урахуванням зміни ТС визначається за виразом (14):

$$p'(H_1 / B) = \sum_{i=1}^6 p(H_{1i} / B_i) = 0,02747. \quad (17)$$

Для оцінки впливу зміни ТС об'єкту на інтервалі часу на імовірність його відмови розраховано похибку оцінки імовірності відмови на інтервалі часу без урахування зміни стану відносно імовірності відмови з урахуванням його зміни:

$$\delta p = \frac{p'(H_1 / B) - p(H_1 / B)}{p'(H_1 / B)} \cdot 100 = \frac{0,02747 - 0,02495}{0,02747} \cdot 100 = 9,2\% \quad (16)$$

Отримана похибка є значною, що свідчить про необхідність врахування зміни стану ОС при оцінці імовірності його відмови на $\Delta t = 1,5 p$. Для визначення граничних інтервалів на яких припустимо не враховувати зміну стану об'єкту, визначено умовні імовірності відмови обмотки генератора на інтервалах часу Δt менших за 1,5 року. Результати приведені в табл. 7.

Таблиця 7 – Порівняння значень імовірностей відмови

За отриманими значеннями S_i з використанням розроблених в [4] матриць Заде визначаються умовні імовірності $p(B_i / H_{1i})$ та $p(B_i / H_{2i})$. Результати приведені в табл.5.

За отриманими результатами по формулі Байєса (13) визначаються умовні імовірності відмови ОС генератора на інтервалах часу δt . Також визначається умовна імовірність відмови ОС генератора на інтервалі часу Δt без урахування зміни стану (1). Отримані результати приведені в табл. 6.

на різних інтервалах часу

Δt	$p(H_1 / B)$	$p'(H_1 / B)$	δp
0,25	0,004168	0,00417	0,048
0,5	0,00835	0,00836	0,112
0,75	0,0125	0,01256	0,478
1	0,01665	0,01696	1,784
1,25	0,02085	0,02136	2,388

За отриманими даними похибок оцінки імовірності відмови на інтервалі часу побудовано графік залежності $\delta p(\Delta t)$ (рис. 7).



Рис. 7 – Залежність похибки оцінки імовірності відмови від інтервалу часу

Отриманий результат показує, що граничним

інтервалом, на яких відхилення значень імовірностей, розрахованих з урахуванням та без урахування зміни ТС, є припустимим згідно правила трьох сігм (похибка не відхилиться від математичного очікування величини за абсолютним значенням більше ніж 2,2 % [13]), є 1 рік. Таким чином, при оцінюванні імовірності відмови об'єкту на інтервалі часу до 1 року нехтування зміною ТС є припустимим. При необхідності оцінки імовірності відмови елементу на більших інтервалах часу для отримання достовірного результату необхідно виконувати прогнозування зміни стану та враховувати його в розрахунках.

Приклад 2. Необхідно визначити імовірність відмови повітряного вимикача типу *ВВШ-150Б/2000/31,5*, який встановлено на підстанції «ВДГМК» Дніпровської ЕЕС на інтервалі часу $\Delta t = 12 \text{ міс}$ з урахуванням зміни його ТС протягом цього інтервалу часу. Також необхідно обґрунтувати максимально припустимий інтервал часу Δt на якому зміною ТС можна знехтувати. Вимикач знаходиться в експлуатації $t_1 = 31 \text{ р.}$

За аналогічним підходом з використанням інтегральної статистичної функції розподілу імовірності відмови повітряних вимикачів (рис. 8) та

нечіткої моделі оцінювання ТС повітряного вимикача, представленої в [4], визначено умовні імовірності відмови вимикача на інтервалах часу $\delta t = 3 \text{ міс}$. Також визначається умовна імовірність відмови повітряного вимикача на інтервалі часу $\Delta t = 12 \text{ міс}$ без урахування зміни ТС. Результати приведені в табл. 8.

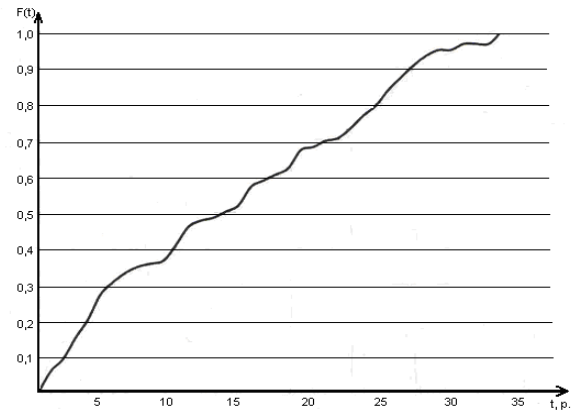


Рис. 8 – Інтегральна статистична функція розподілу імовірності відмови повітряних вимикачів

Таблиця 8 – Визначення імовірностей відмови повітряного вимикача на інтервалах часу δt та на інтервалі часу Δt

δt	$F(t_{1i})$	$F(t_{2i})$	$p(H_1)$	$p(H_2)$	$p(B/H_1)$	$p(B/H_2)$	$p(H_1/B)$
31-31,25	0,793	0,804	0,0110	0,9890	0,936	0,060	0,1479
31,25-31,5	0,894	0,815	0,0110	0,9890	0,937	0,059	0,1501
31,5-31,75	0,815	0,826	0,0110	0,9890	0,940	0,055	0,1597
31,75-32	0,826	0,837	0,0110	0,9890	0,944	0,052	0,1680
31-32	0,793	0,837	0,0440	0,9560	0,936	0,060	0,4179

Імовірність відмови на інтервалі часу $\Delta t = 12 \text{ міс}$ з урахуванням зміни ТС визначається за виразом (14):

$$p'(H_1/B) = \sum_{i=1}^4 p(H_{1i}/B_i) = 0,6257. \quad (19)$$

Для оцінки впливу зміни технічного стану об'єкту на інтервалі часу на імовірність його відмови розраховано похибку оцінки імовірності відмови на інтервалі часу без урахування зміни стану відносно імовірності відмови з урахуванням його зміни:

$$\delta p = \frac{p'(H_1/B) - p(H_1/B)}{p'(H_1/B)} \cdot 100 = \frac{0,6257 - 0,4179}{0,6257} \cdot 100 = 33,2\% \quad (20)$$

Отримана похибка є дуже великою, що свідчить про необхідність врахування зміни стану вимикача при оцінці імовірності його відмови на $\Delta t = 1 \text{ р.}$ Для визначення граничних інтервалів на яких припустимо не враховувати зміну стану об'єкту, визначено умовні імовірності відмови вимикача на інтервалах часу Δt менших за 1 рік. Результати приведені в табл. 9.

Таблиця 9 – Порівняння значень імовірностей відмови на різних інтервалах часу

Δt	$p(H_1/B)$	$p'(H_1/B)$	δp
0,25	0,14786	0,1479	0,027
0,5	0,25976	0,298	12,83
0,75	0,34742	0,4577	24,09

За отриманими даними похибок оцінки імовірності відмови на інтервалі часу побудовано графік залежності $\delta p(\Delta t)$ (рис. 9).

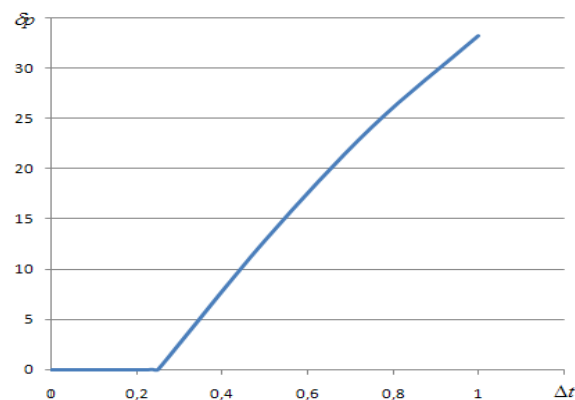


Рис. 9 – Залежність похибки оцінки імовірності відмови від інтервалу часу

Оскільки вимикач знаходиться в експлуатації тривалий час, то його ТС близький до критичного і, як наслідок, імовірність $p(B/H_1)$ близька до 1 і саме вона здійснює найбільший вплив на кінцевий результат, отриманий за формулою Байєса. При цьому граничний інтервал, на якому це відхилення є припустимим стає значно меншим і обмежується 3 місяцями. На більших інтервалах часу для повітряного вимикача з великим значенням імовірності $p(B/H_1)$ нехтування зміною ТС неприпустимо.

Висновки. Розроблено прогностичний підхід до оцінювання імовірності відмови об'єктів електроенергетики на інтервалі часу з врахуванням зміни їхнього ТС протягом цього інтервалу, який дає можливість отримувати більш достовірні оцінки імовірності відмови елементів ЕЕС на значних інтервалах часу, що, в свою чергу, підвищує ефективність ризик-орієнтованого

управління ЕЕС. Для реалізації запропонованого прогностичного підходу необхідна наявність ретроспективних даних параметрів оцінки стану обладнання, які зазвичай, фіксуються черговим персоналом енергокомпанії або регістраторами станційних систем управління та зберігаються протягом тривалого часу.

Визначено тенденції впливу зміни ТС об'єкту протягом інтервалу часу на імовірність відмови. В разі, якщо об'єкт має зношений ТС і, як наслідок, високу умовну імовірність $p(B/H_1)$, похибка зростає швидше ніж за малих значень $p(B/H_1)$, що обмежує інтервал часу на якому припустимою є оцінка імовірності відмови об'єкта з фіксуванням на момент часу спостереження ТС. Подальші дослідження передбачаються у розробленні аналітичних методів визначення гранично припустимих інтервалів часу на яких можливо не враховувати зміну стану об'єкту.

Список літератури:

1. Кобзар, К. О. Методи і засоби створення та комплексної повузлової модернізації турбогенераторів потужністю 150–300 МВт [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / К. О. Кобзар; Інститут електродинаміки. – К., 2015. – 22 с.
2. Бардик, Є. І. Прогнозування змінення ресурсних параметрів високовольтних вимикачів на основі теорії нечітких часових рядів [Текст] / Є. І. Бардик // Гідроенергетика України. – 2011. – № 3-4. – С. 63–66.
3. Костерев, М. В. Оцінка технічного стану і прогнозування ресурсу роботоздатності силових трансформаторів на основі теорії нечітких множин [Текст] / М. В. Костерев, Є. І. Бардик, Р. В. Вожаков, М. П. Болотний // Вісник ВПІ. – 2012. – № 2. – С. 83–87.
4. Литвінов, В. В. Оцінка ризику порушення стійкості двигунових навантажень при відмовах електрообладнання в підсистемі ЕЕС [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / В. В. Литвінов; НТУУ «КПІ». – К., 2012. – 234 с.
5. Костерев, М. В. Нечітко-статистичний підхід до оцінювання експлуатаційної та режимної надійності об'єктів підсистем електроенергетичної системи [Текст] / М. В. Костерев, Є. І. Бардик, В. В. Литвінов // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика. – 2013. – № 1 (14). – С. 122–128.
6. Ременников, В. Б. Управленческие решения [Текст] / В. Б. Ременников. – Минск: Юнити, 2005. – 144 с.
7. Штовба, С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB [Текст] / С. Д. Штовба. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.
8. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTECH [Текст] / А. В. Леоненков. – СПб.: БХВ – Петербург, 2005. – 736 с.
9. Litvinov, V. Fuzzy-Statistical Modeling of Hydrogenerator for its Reliability Appreciation [Text] / V. Litvinov, K. Manukian // The International Journal Of Engineering And Science. – 2014. – Vol. 3, Issue 1. – P. 85–95.
10. Костерев, М. В. Нечітке моделювання ЛЕП для оцінки ризику зниження надійності електропостачання [Текст] / М. В. Костерев, Є. І. Бардик, Р. В. Вожаков // Вісник ВПІ. – 2011. – № 6. – С. 159–163.
11. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей [Текст] / Е. С. Вентцель. – М.: Высшая школа, 1999. – 576 с.
12. Крисилов, В. А. Ускорение параметрического синтеза линейной регрессии на основе редукционного оценивания коэффициентов [Текст] / В. А. Крисилов, С. М. Побережник // Реєстрація, зберігання і оброблення даних. – 2002. – Т. 4, № 3. – С. 62–68.
13. Пискунов, Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисления для втузов. Т. 2 [Текст]: уч. пос. / Н. С. Пискунов. – М.: Наука, 1985. – 560 с.

Bibliography (transliterated):

1. Kobzar, K. O. (2015). Metody i zasoby stvorennia ta kompleksnoi povuzlovoi modernizatsiyi turbohenerativ potuzhnosti 150–300 MVt. Kyiv, 22.
2. Bardyk, Ye. I. (2011). Prohnozuvannia zminennia resursnykh parametriv vysokovoltnykh vymyachiv na osnovi teoriiy nechitkykh chasovykh riadiv. Hidroenerhetyka Ukrainy, 3-4, 63–66.
3. Kosteriev, M. V., Bardyk, Ye. I., Vozhakov, R. V., Bolotnyi, M. P. (2012). Otsinka tekhnichnoho stanu i prohnozuvannia resursu robotozdatnosti sylovykh transformatoriv na osnovi teoriiy nechitkykh mnozhyn. Visnyk VPI, 2, 83–87.
4. Litvinov, V. V. (2012). Otsinka ryzyku porushennia stiykosti dvihunovoho navantazhennia pry vidmovakh elektroobladnannia v pidsystemi EES. Kyiv, 234.
5. Kosteriev, M. V., Bardyk, Ye. I., Litvinov, V. V. (2013). Nechitko-statystychnyi pidkhid do otsiniuvannia ekspluatatsiinoi ta rezhymnoi nadiynosti ob'ektiv pidsystem elektroenerhetychnoi systemy. Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Seriya: Elektrotekhnika i enerhetyka, 1 (14), 122–128.
6. Remennikov, V. B. (2005). Upravlencheskie resheniya. Minsk: Yuniti, 144.
7. Shtovba, S. D. (2007). Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami MATLAB. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 288.
8. Leonenkov, A. V. (2005). Nchetkoe modelirovanie v srede MATLAB i FuzzyTECH. Sankt-Peterburg: BHV – Peterburg, 736.
9. Litvinov, V., Manukian, K. (2014). Fuzzy-Statistical Modeling of Hydrogenerator for its Reliability Appreciation. The International Journal Of Engineering And Science, 3 (1), 85–95.
10. Kosteriev, M. V., Bardyk, Ye. I., Vozhakov, R. V. (2011). Nechitke modeliuвання LEP dlia otsinky ryzyku znyzhennia nadiynosti elektropostachannia. Visnyk VPI, 6, 159–163.
11. Venttsel', E. S. (1999). Teoriya veroyatnostey. Moscow: Vysshaya shkola, 576.
12. Krisilov, V. A., Poberezhnik, S. M. (2002). Uskorenie parametricheskogo sinteza lineynoy regressiy na osnove reduktsionnogo otsenivaniya koeffitsientov. Reistratsiya, zberihannia i obrobлення danykh, 4 (3), 62–68.
13. Piskunov, N. S. (1985). Differentsial'noe i integral'noe ischisleniya dlya vtuzov. Vol. 2. Moscow: Nauka, 560.

Надійшла (received) 01.11.2017

Оцінка впливу зміни технічного стану обладнання електроенергетичної системи на імовірність його відмови на інтервалі часу/ Костерев М. В., Литвінов В. В., Кільова К. А. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 33(1255). – С. 85–93.– Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-5459.

Оценка влияния изменения технического состояния оборудования электроэнергетической системы на вероятность его отказа на интервале времени/ Костерев Н. В., Литвинов В. В., Килевая Е. А. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 33(1255). – С.85–93. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-5459.

Estimation of power system equipment technical state change influence on the its fault probability at the time interval/ Kosterev M. V., Litvinov V. V., Kilova K. A. //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 33 (1255).– P. 85–93.– Bibliogr.:13. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Костерев Микола Володимирович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» ім. І. Сікорського, професор кафедри електричних станцій, пр. Перемоги 37, м. Київ, Україна, 03056, e-mail: nicolcost@gmail.com

Литвінов Володимир Валерійович – кандидат технічних наук, Філія «Дніпровська ГЕС» ПрАТ «Укргідроенерго», начальник виробничо-технічного сектору, бул. Вінтера, 1, м. Запоріжжя, Україна, 69096, e-mail: v.v.litvinov1985@ukr.net

Кільова Катерина Андріївна – РДЦ Дніпровського регіону ДП «НЕК «Укренерго», інженер відділу перспективного розвитку, вул. Гребельна, 2, м. Запоріжжя, Україна, 69096, e-mail: kilevaya.e.a@gmail.com

Костерев Николай Владимирович – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт» им. И. Сикорского, профессор кафедры электрических станций, пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056, e-mail: nicolcost@gmail.com

Литвинов Владимир Валериевич – кандидат технических наук, Филиал «Днепровская ГЭС» ЧАО «Укргідроенерго», начальник производственно-технического сектора, бул. Винтера, 1, г. Запорожье, Украина, 69096, e-mail: v.v.litvinov1985@ukr.net

Килевая Екатерина Андреевна – РДЦ Днепровского региона ГП «НЭК «Укрэнерго», инженер отдела перспективного развития, ул. Плотинная, 2 г. Запорожье, Украина, 69096, e-mail: kilevaya.e.a@gmail.com

Kosterev Mykola – doctor of science, professor, National technical university of Ukraine “Kyiv polytechnic institute” named by I. Sikorsky, professor of power plant chair, Peremohy avenue, 37, Kyiv, Ukraine, 03056, e-mail: nicolcost@gmail.com

Litvinov Volodymyr – candidate of technical sciences, Branch “Dnipro HPP” PJSC “Ukrhydroenergo”, chief of technical department, Winter boulevard, 1, Zaporizhia, Ukraine, 69096, e-mail: v.v.litvinov1985@ukr.net

Kilova Kateryna – RDC of Dnipro region SC «NEC “Ukrenergo”, engineer of perspective development department, Grebelna street, 2, Zaporizhia, Ukraine, 69096, e-mail: kilevaya.e.a@gmail.com

О. В. МЕЛЬНИЧУК, В. С. ГРИШИН, О. П. МОРОЗЕНКО, Ю. М. ТРУНОВ

УСЛОВИЯ ЭФФЕКТИВНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ И РЕСУРСА ГИБОЧНЫХ ШТАМПОВ

На базі аналізу загальних підходів прогнозування, процесів критичного зносу поверхневих шарів навантажених деталей з урахуванням особливостей їх експлуатації, показана потреба проведення попередньо-підготовчих досліджень перед проектуванням, виготовленням, експлуатацією, ремонтом і утилізацією. З цією метою проведено розподіл поверхонь матриці на функціональні елементи за рівнями глибини технології виготовлення. Виявлено закономірності, які в значній мірі визначають вибір виду і можливого варіанту технологічного впливу на всіх рівнях розподілу, для кожного елемента відповідно до його функціонального призначення.

Ключові слова: штампи згинальні, формотворчі деталі, знос, функціональні елементи, прогнозування, ресурс.

На базе анализа общих подходов прогнозирования, процессов критического износа поверхностных слоев нагруженных деталей с учётом особенностей их эксплуатации, показана потребность проведения предварительно-подготовительных исследований перед проектированием, изготовлением, эксплуатацией, ремонтом и утилизацией. С этой целью проведено деление поверхностей матрицы на функциональные элементы по уровням глубины технологии изготовления. Выявлены закономерности, которые в значительной степени определяют выбор вида и возможного варианта технологического воздействия на всех уровнях деления, для каждого элемента в соответствии с его функциональным назначением.

Ключевые слова: штампы гибочные, формообразующие детали, износ, функциональные элементы, прогнозирование, ресурс.

In this article, we show the need of preliminary research before designing, manufacturing, operation activity, repairing and utilization. Our research is based on general approach of critical worn prediction of top layers of loaded parts with consideration of their operational features. There was held dividing of matrix surface to functional elements according to the level of their manufacturing technology. Providing of prespecified functional parameters of quality and bending stamps resource are important tasks of toolroom manufacture. These parameters are influenced by stamps forming parts – matrixes and stamping punches, which functional parameters have to be provided on stage of new part producing and repairing of produced parts. Technology of realized researches could be used in manufacture conditions for worn prediction of stamp forming parts. Results are applicable not only for considered type of die stamp, but for all types of bending stamps in manufacture, because of bending stamps elements conformity.

Keywords: bending die stamps, forming parts, deterioration, functional elements, wearing, prediction, service life.

Введение. Обеспечение заданных функциональных параметров надежности и ресурса гибочных штампов является важной задачей инструментального производства [1, 2]. В основном на эти параметры влияют эксплуатационные показатели формообразующих деталей штампов – матрицы и пуансоны, функциональные параметры которых необходимо обеспечивать на этапе изготовления новых и на уровне восстановления изношенных.

Известно, что в процессе эксплуатации гибочных штампов формообразующие поверхности матриц и пуансонов работают при высоких контактных нагрузках с сильной и концентрацией напряжений [3]. Поэтому процессу проектирования, изготовления и упрочнения матрицы и пуансона гибочного штампа должны предшествовать исследование особенностей их эксплуатации в условиях заданных параметров. Прогнозирование процессов критического износа поверхностных слоев деталей гибочных штампов, разрушения элементов штампа является актуальной задачей.

Цель работы. Обеспечение функциональных параметров надежности и ресурса гибочных штампов на основе особенностей эксплуатации матрицы, учета воздействий нагрузок на формообразующие элементы рабочих поверхностей.

Прогнозирование износа с помощью функциональных элементов. От надежности работы и ресурса гибочных штампов зависит качество изготовления штампуемых изделий и их конкурентоспособность. В процессе работы на матрицу гибочного штампа для изготовления скобы трубного хомута действует множество эксплуатационных функций [3].

Проведенные исследования по выявлению наиболее нагруженных участков рабочих поверхностей матрицы штампа указывают на то, что в детали «Матрица» глобально существуют две зоны критиче-

ских напряжений, приводящих к износу штампа, первая - на формообразующей поверхности пуклевки и выемки скобы, вторая - на скруглениях детали. Напряжения на скруглениях матрицы приводят к интенсивному износу этих поверхностей, так как они контактируют с поверхностями других деталей штампа более длительное время в цикле напряжения, а потому воспринимают гораздо большую нагрузку, чем другие элементы матрицы и штампа в целом, что доказывает практический опыт эксплуатации рассматриваемой оснастки, рис. 1.

На рис. 2 представлен граф функциональных элементов матрицы для уровня части изделия. Здесь показано, что на 2-м уровне деления изделие 000010 делится на 3 части, а именно: 00001, 00002, 00003. В описательном виде их можно представить следующим образом: поверхность фиксации левая, формообразующая поверхность, поверхность фиксации правая, рисунок 3. В свою очередь рассматривается часть изделия 00002 поверхность фиксации правая, которая делится на 3 части 00001, 00002, 00003. В описательном виде их можно представить следующим образом: поверхность радиуса левая, поверхность радиуса сгиба, поверхность радиуса правая.

Технологические воздействия для преобразования заготовки в изделие на этих уровнях деления предусматривают разработку технологических процессов, обеспечивающих геометрические параметры гибочного штампа.

Аналогично проводится деление матрицы на функциональные элементы по уровням функциональных зон, составляющих части матрицы.

На рис. 3 приведена функциональная зона матрицы гибочного штампа на формообразующий поверхности и места контактных напряжений.

© О. В. Мельничук, В. С. Гришин, О. П. Морозенко, Ю. М. Трунов. 2017

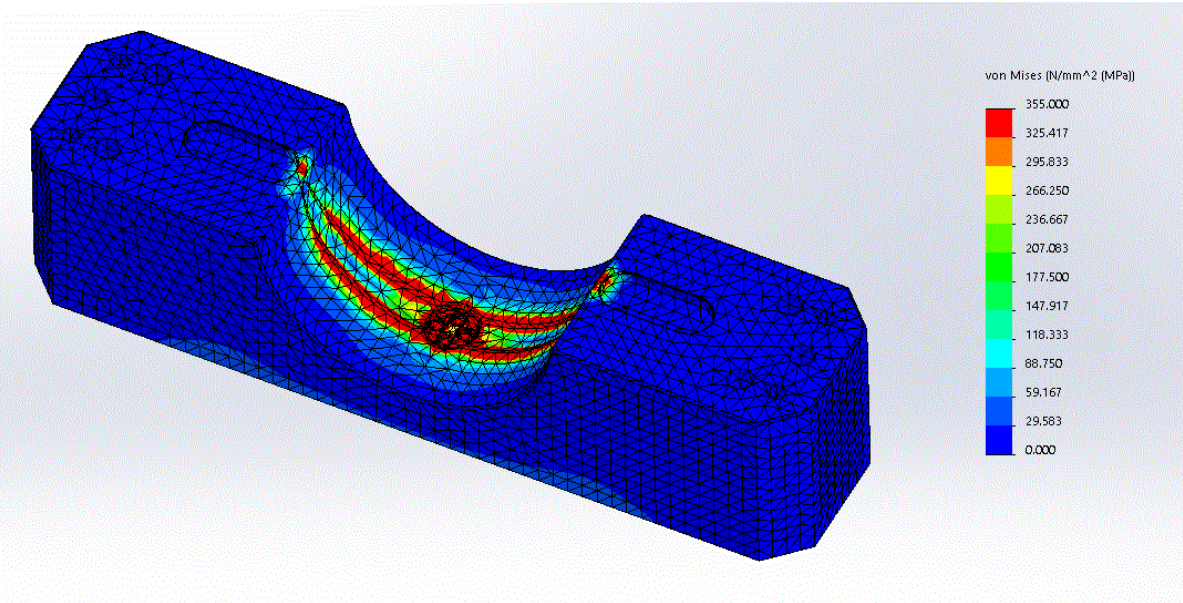


Рис. 1 – Зоны критических напряжений матрицы, выявленные в результате моделирования реальных условий работы штампа

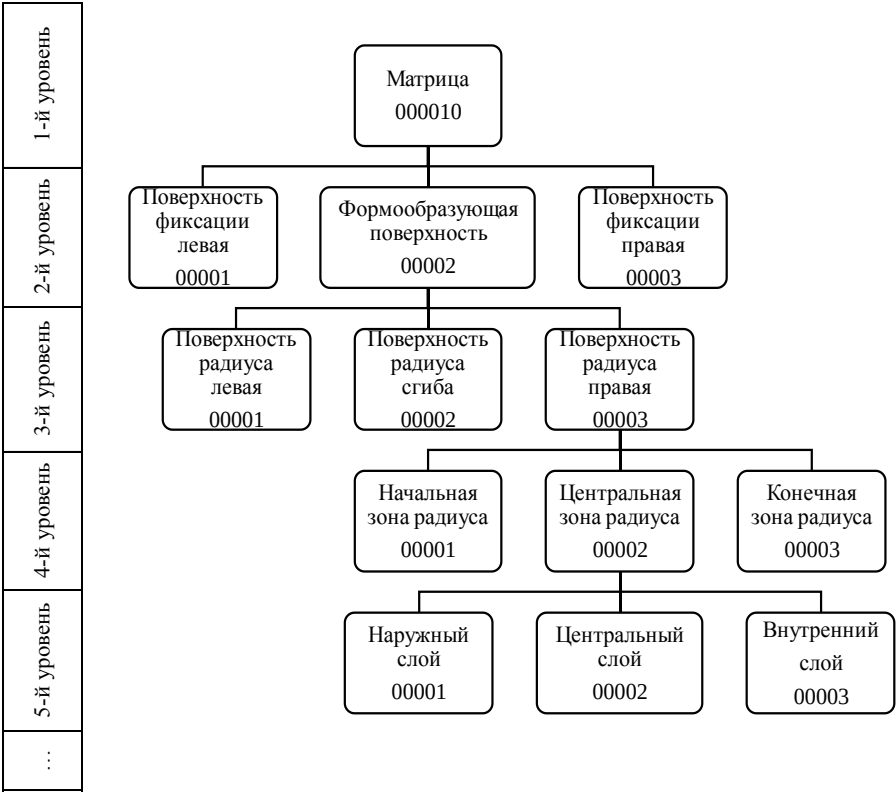


Рис. 2 – Граф функциональных элементов матрицы гибочного штампа

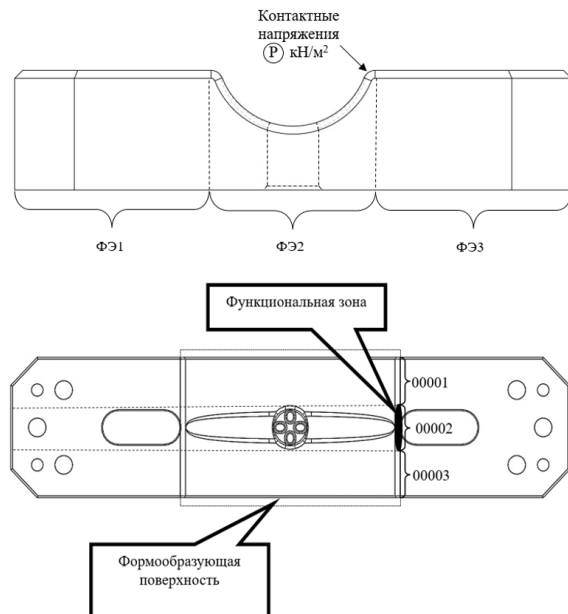


Рис. 3 – Схема расположения функциональных элементов матрицы

Уровень частей изделия представлен на рис. 4.

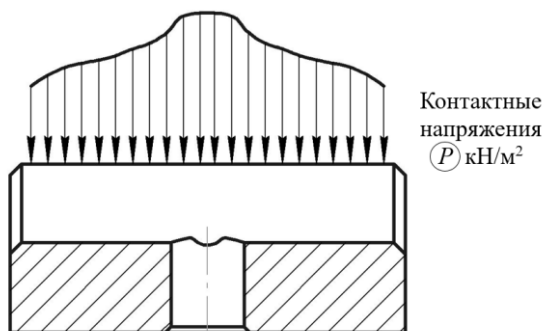


Рис. 4 – Уровень частей изделия (функциональный элемент 00003 поверхность радиуса правая)

На рис. 5 показано, что функциональный элемент 00002 (центральная зона радиуса) для дальнейшего обеспечения свойств делится на зоны 00001 – наружный слой, 00002 – центральный слой, 00003 – внутренний слой. Для обеспечения эксплуатационных свойств формообразующих поверхностей матрицы на этих уровнях деления реализуются специальные схемы тех-

нологического воздействия и операции, причём в зависимости от особенностей эксплуатации матрицы.

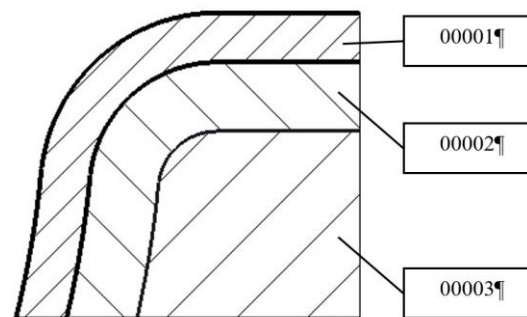


Рис. 5 – Расположение слоев центральной зоны радиуса

В связи с необходимостью придать поверхности “центральная зона радиуса 00002” оптимальные физико-механические свойства, зональные функциональные микрзоны делятся до нанозон. Это деление поверхности матрицы зависит от глубины и прецизионности реализации технологических воздействий средств обработки на функциональные элементы матрицы в целом.

При этом деление матрицы штампа на функциональные элементы по уровням глубин технологии должно обеспечивает стратегию наивысшей экономичности на всех уровнях.

Выводы. При конструировании новых штампов целесообразно использовать предварительно подготовительные исследования с учетом всех этапов жизненного цикла – проектирования, конструирования, производства, эксплуатации, ремонта и утилизации. Для этого было проведено деление поверхностей матрицы на функциональные элементы, которые в свою очередь делили на элементарные части, имеющие простую геометрическую форму. Это в значительной степени определяет выбор вида и возможного варианта технологического воздействия на всех уровнях деления, для каждого элемента в соответствии с его функциональным назначением.

Результаты проведенных исследований могут быть использованные в производственных условиях для прогнозирования износа формообразующих деталей штампов.

Список литературы:

1. Долматов, А. И. Повышение жизненного цикла оснастки на основе защитных технологий [Текст] / А. И. Долматов, А. В. Богуслаев. – Запорожье: ОАО «Мотор-Сич», 2000. – 296 с.
2. Палей, М. М. Технология производства приспособлений прессформ и штампов [Текст] / М. М. Палей. – М.: Машиностроение, 1981. – 344 с.
3. Мельничук, А. Розробка математичної моделі оцінки зон критичних внутрішніх напружень в формувальних деталях сигнального штампа [Текст] / А. Мельничук, В. Гришин, Е. Морозенко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – 2016. – № 50 (1222). – С. 133–136. – Режим доступу: <http://mtsc.khpi.edu.ua/article/view/99936/95110>
4. Александров, И. Влияние трения на выдавливание пружной основы из штампа с плоской подошвой [Текст] / И. Александров, А. Приварников // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 4, № 7 (76). – С. 53–56. doi: [10.15587/1729-4061.2015.47782](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.47782)
5. Ткачук, Н. Н. К вопросу о контактном взаимодействии плоского штампа с полупространством [Текст] / Н. Н. Ткачук, А. Н. Ткачук // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – Т. 3, № 9 (45). – С. 50–53. – Режим доступа: <http://journals.urau.ru/eejet/article/view/2895/2698>
6. Ramezani, M. Forming of shallow parts using rubber tools [Text] / M. Ramezani, Z. M. Ripin // Rubber-Pad Forming Processes. – 2012. – P. 65–102. doi: [10.1533/9780857095497.65](https://doi.org/10.1533/9780857095497.65)

7. Мельничук, О. В. Виявлення зон критичних напруг у технологічному оснащенні [Текст]: матер. Шістнадцятої міжнар. молодіжної науково-технічної конф. / О. В. Мельничук, В. С. Гришин // *Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво*. – 2016. – С. 44–46.
8. Kukhar, V. Development of alternative technology of dual forming of profiled workpiece obtained by buckling [Text] / V. Kukhar, V. Burko, A. Prisyazhnyi, E. Balalayeva, M. Nyhnibeda // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – Vol. 3, Issue 7 (81). – P. 53–61. doi: [10.15587/1729-4061.2016.72063](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.72063)
9. Тытюк, В. Влияние износа электромеханического оборудования на показатели процесса запуска [Текст] / В. Тытюк // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2015. – Т. 6, № 2 (78). – С. 23–30. doi: [10.15587/1729-4061.2015.55924](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.55924)
10. Алямовский, А. А. Solid Works. Компьютерное моделирование в инженерной практике [Текст] / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов, А. Е. Харитонович, Н. Б. Пономарев. – СПб.: БХВ – Петербург, 2005. – 800 с.

Bibliography (transliterated):

1. Dolmatov, A. I., Boguslaev, A. V. (2000). Povyshenie zhiznennogo tsikla osnastki na osnove zashchitnykh tekhnologiy. Zaporozh'e: OAO «Motor-Sich», 296.
2. Paley, M. M. (1981). Tekhnologiya proizvodstva prispособleniy pressform i shtampov. Moscow: Mashinostroenie, 344.
3. Melnychuk, A., Hryshyn, V., Morozenko, E. (2016). Rozrobka matematychnoi modeli otsinky zon krytychnykh vnutrishnykh napruzhen v formatvorchyykh detaliakh shynalnoho shtampa. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Mekhaniko-tekhnologichni systemy ta komplekxy, 50 (1222), 133–136. Available at: <http://mtsc.khpi.edu.ua/article/view/99936/95110>
4. Aleksandrov, I., Pryvarnykov, A. (2015). The effect of friction on the stamp's flat sole coming off the sole base. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (7 (76)), 53–56. doi: [10.15587/1729-4061.2015.47782](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.47782)
5. Tkachuk, N. N., Tkachuk, A. N. (2010). To the question on contact interaction of the flat stamp with semispace. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (9 (45)), 50–53. Available at: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/2895/2698>
6. Ramezani, M., Ripin, Z. M. (2012). Forming of shallow parts using rubber tools. Rubber-Pad Forming Processes, 65–102. doi: [10.1533/9780857095497.65](https://doi.org/10.1533/9780857095497.65)
7. Melnychuk, O. V., Hryshyn, V. S. (2016). Vyiavleniia zon krytychnykh napruh u tekhnologichnomu osnashchenni. Mashynobuduvannia ochyma molodykh: prohresyivni idei – nauka – vyrobnytstvo, 44–46.
8. Kukhar, V., Burko, V., Prisyazhnyi, A., Balalayeva, E., Nyhnibeda, M. (2016). Development of alternative technology of dual forming of profiled workpiece obtained by buckling. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (7 (81)), 53–61. doi: [10.15587/1729-4061.2016.72063](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.72063)
9. Tytyuk, V. (2015). Effect of electromechanical equipment wear on startup process indicators. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (2 (78)), 23–30. doi: [10.15587/1729-4061.2015.55924](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.55924)
10. Alyamovskiy, A. A., Sobachkin, A. A., Odintsov, E. V., Haritonovich, A. E., Ponomarev, N. B. (2005). Solid Works. Komp'yuternoe modelirovaniye v inzhenernoy praktike. Sankt-Peterburg: BHV – Peterburg, 800.

*Поступила (received) 04.10.2017**Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

Умови ефективного забезпечення параметрів надійності і ресурсу сгибального штампу/ Мельничук О. В., Гришин В. С., Морозенко О. П., Трунов Ю. М. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 33(1255). – С.94–98. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Условия эффективного обеспечения параметров надежности и ресурса гибочных штампов/ Мельничук А. В., Гришин В. С., Морозенко Е. П., Трунов Ю. Н. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 33(1255). – С. 94–98. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Effective maintenance conditions of reliability parameters and resource of bending dies/ Melnychuk O., Gryshyn V., Morozenko O., Trunov Y. //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 33 (1255). – P. 94–98. – Bibliogr.:10. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Мельничук Олександр Володимирович – аспірант, Національна Металургійна Академія України; вул. Гагаріна, 4, м. Дніпро, Україна, 49000; e-mail: oleksandr.melnichuk.92@gmail.com.

Гришин Володимир Сергійович – кандидат технічних наук, Національна Металургійна Академія України, доцент кафедри "Технології машинобудування"; вул. Гагаріна, 4, м. Дніпро, Україна, 49000; e-mail: texmash@ua.fm.

Морозенко Олена Петрівна – кандидат технічних наук, Національна Металургійна Академія України, доцент кафедри "Нарисної геометрії та інженерної графіки"; вул. Гагаріна, 4, м. Дніпро, Україна, 49000; e-mail: elenamorozenko@gmail.com.

Трунов Юрій Миколаєвич – студент, кафедра технології машинобудування, Національна Металургійна Академія України; вул. Гагаріна, 4, г. Дніпро, Україна, 49000; e-mail: yurintrunov@gmail.com.

Мельничук Александр Владимирович – аспирант, Национальная Металлургическая Академия Украины; ул. Гагарина, 4, г. Днепр, Украина, 49000; e-mail: oleksandr.melnychuk.92@gmail.com.

Гришин Владимир Сергеевич – кандидат технических наук, Национальная Металлургическая Академия Украины, доцент кафедры "Технологии машиностроения"; ул. Гагарина, 4, г. Днепр, Украина, 49000; e-mail: texmash@ua.fm.

Морозенко Елена Петровна – кандидат технических наук, Национальная Металлургическая Академия Украины, доцент кафедры "Начертательной геометрии и инженерной графики"; ул. Гагарина, 4, г. Днепр, Украина, 49000; e-mail: elenamorozenko@gmail.com.

Трунов Юрий Николаевич – студент, кафедра технологии машиностроения, Национальная Металлургическая Академия Украины; ул. Гагарина, 4, г. Днепр, Украина, 49000; e-mail: yurintrunov@gmail.com.

Melnychuk Oleksandr – PhD student, National Metallurgical Academy of Ukraine; Gagarina street, 4, city Dnipro, Ukraine, 49000, Ukraine; e-mail: oleksandr.melnychuk.92@gmail.com.

Gryshyn Volodymyr – candidate of technical sciences, National Metallurgical Academy of Ukraine, associate professor at the department of "Technology of machinebuilding"; Gagarina street, 4, city Dnipro, Ukraine, 49000; e-mail: texmash@ua.fm.

Morozenko Olena – candidate of technical sciences, National Metallurgical Academy of Ukraine; associate professor at the department of "Descriptive geometry and engineering graphics "; Gagarina street, 4, city Dnipro, Ukraine, 49000; e-mail: texmash@ua.fm.

Trunov Yurii – student, National Metallurgical Academy of Ukraine; Gagarina street, 4, city Dnipro, Ukraine, 49000; e-mail: yurintrunov@gmail.com.

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

УДК 664.844

Д. О. БІДЮК, Л. М. ПОНОМАРЬОВА, Ф. В. ПЕРЦЕВОЙ, Т. І. МАРЕНКОВА

АНАЛІТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ СУШЕНОЇ ХАРЧОВОЇ ПРОДУКЦІЇ З ОРГАНІЧНОЇ ОВОЧЕВОЇ ТА ПЛОДОВО-ЯГІДНОЇ СИРОВИНИ

В статті розглянуто стан та перспективи розвитку світового та вітчизняного органічного виробництва, у тому числі овочевої та плодово-ягідної сировини. Проведено аналіз досліджень щодо виробництва сушеної харчової продукції з овочевої та плодово-ягідної сировини, у тому числі органічної. Досліджено асортимент вітчизняної органічної овочевої та плодово-ягідної сировини. Розроблено моделі інноваційної стратегії та технологічної системи отримання сушеної харчової продукції з органічної овочевої та плодово-ягідної сировини.

Ключові слова: органічне виробництво, сушена харчова продукція, органічна овочева та плодово-ягідна сировина, моделювання технології, модель інноваційної стратегії

В статье рассмотрены состояние и перспективы развития мирового и отечественного органического производства, в том числе овощного и плодово-ягодного сырья. Проведен анализ исследований по производству сушеной пищевой продукции из овощного и плодово-ягодного сырья, в том числе органического. Исследован ассортимент отечественной органической овощного и плодово-ягодного сырья. Разработаны модели инновационной стратегии и технологической системы получения сушеной пищевой продукции из органического овощного и плодово-ягодного сырья.

Ключевые слова: органическое производство, сушеная пищевая продукция, органическая овощная и плодово-ягодное сырье, моделирование технологии, модель инновационной стратегии

The article considers the state and trends in the modern world and Ukrainian markets of the cultivation, production, and processing of vegetable and fruit-berry raw materials of organic origin. Established base indices in the organic agriculture in the world and specified the geography of organic farms in Ukraine. The range of primary vegetable and fruit-berry raw materials of organic origin, which are zoned on the territory of Ukraine, is viewed. Relevance of vegetable and fruit and berry raw materials in dried form in the form of semi-finished products is justified. The analysis of recent researches of foreign and local scientists concerning the production of dried food products from vegetable and fruit and berry raw materials, including organic, is given. On the basis of theoretical preconditions, an analytical substantiation of the developed technologies is carried out. Parametric model "Black box" was developed. Given the systematic approach proposed of the model innovation strategies and technological system to obtain the dried food from organic vegetable and fruit-berry raw materials. Determined that the next step should be experimental studies both within each of the subsystems and the system as a whole.

Keywords: organic production, dried food products, organic vegetable and fruit-berry raw material, technology modeling, the innovation strategy.

Вступ. В даний час в умовах складної екологічної ситуації пріоритетним напрямком державної політики в області здорового харчування населення України та країн світу взагалі є розробка технологій безпечних харчових продуктів, які дозволяють знизити негативний вплив техногенного середовища на організм людини. Одним із важливих шляхів створення таких харчових продуктів є використання органічної сировини.

За даними експертів Міжнародної федерації органічного сільського господарства IFOAM і науково-дослідного Інституту біоземлеробства FiBL нині виробництво екологічно чистої сільськогосподарської продукції розвивається у 172 країнах світу, а обсяг ринку досягає 80 млрд. доларів США [1, 2].

Це є поштовхом до розвитку органічного землеробства в Україні, стимулом до вирощування екологічно чистої продукції українськими аграріями. Виробництво органічної продукції є практичною реалізацією концепції сталого розвитку аграрного виробництва, що передбачає поєднання захисту довкілля, економічного зростання й соціального розвитку як взаємозалежних і взаємодоповнювальних елементів стратегічного розвитку держави, що гарантуватиме населенню високу якість продовольства як важливої складової продовольчої безпеки [3].

Згідно офіційних даних [4] українські споживачі віддають перевагу товарам більш безпечним для здоров'я та довкілля, при цьому 82 % з опитаних свідомо готові обирати продукцію з покращеними екологічними характеристиками і готові платити за неї доро-

жче. В Україні спостерігається зацікавленість як малих, так і великих сільгосппідприємств виробництвом саме органічної продукції, створюються науково виробничі центри з цього напрямку, формується інфраструктура органічного виробництва.

Останніми роками в країні відбувається збільшення обсягу внутрішнього ринку споживання органічної продукції, зростає попит на органічні продукти харчування. При цьому все більшої популярності у світі, у т.ч. в Україні набуває органічна овочева та плодово-ягідна сировина. Це пов'язано із зростаючою різницею між якістю та рівнем безпеки продуктів, що виробляються сьогодні, і сертифікованими органічними продуктами.

Мета та завдання досліджень. Метою досліджень є аналітичне обґрунтування та моделювання технологій сушеної харчової продукції із органічної овочевої та плодово-ягідної сировини для використання її в різних галузях харчової, перероблюваної промисловості, ресторанному господарстві, домашній кулінарії.

Завданнями досліджень є:

- аналіз стану та тенденцій розвитку сучасного світового та вітчизняного ринку по вирощуванню, виробництву і переробці овочевої та плодово-ягідної сировини органічного походження;

- дослідження асортименту овочевої та плодово-ягідної сировини органічного походження, що районані на території України;

© Д. О. Бідюк, Л. М. Пономарьова, Ф. В. Перцевой, Т. І. Маренкова. 2017

– вивчення світового та вітчизняного досвіду виробництва сушеної харчової продукції з органічної рослинної продукції;

– аналітичне обґрунтування та моделювання технологій сушеної харчової продукції з органічної овочевої та плодово-ягідної сировини.

Стан та перспективи розвитку світового та вітчизняного органічного виробництва. Згідно Закону України «Про виробництво та обіг органічної сільськогосподарської продукції та сировини» [5] до органічної сировини відноситься сировина, що отримана в результаті сертифікованого виробництва відповідно до вимог цього Закону та яка спрямовується на подальше використання для отримання нової продукції.

Україна розпочала усвідомлено займатись органічним виробництвом наприкінці 1990-х. За даними Федерації органічного руху України, споживання органічних продуктів в Україні в 2015 році сягнуло 17 млн.євро, споживання на душу населення – 3 євро. При цьому більше половини органічних продуктів на ринку України – вітчизняного виробництва. На початку 2016 року сертифікованих органічних сільськогосподарських підприємств нараховувалося близько 210, які ефективно ведуть діяльність на сертифікованій органічній площі понад 410 тис. га, що складає близько 1 % серед загального об'єму сільськогосподарських угідь України. Варто зазначити, що площа органічних сільськогосподарських земель під плодово-ягідну сировину складає близько 0,6 %, під овочеву – 2,0 % від загальної площі органічних земель. Основними країнами-споживачами української органічної сировини є Німеччина, Австрія, Польща, Італія, Франція, Нідерланди, Данія, Швейцарія, США, Канада [6].

Більшість українських органічних господарств розташовані на Півдні України (в Одеській та Херсонській областях), центрі (Київська обл., Полтавська обл., Вінницька обл., Житомирська обл.), на Заході (Закарпатській, Львівській, Тернопільській та Хмельницькій областях), а також на Сході (Запорізька обл., Харківська обл.) (рис. 1). Українські сертифіковані органічні господарства – різного розміру – від кількох десятків гектарів, як і в більшості країн Європи, до кількох тисяч гектарів ріллі. Однак середній розмір сертифікованого органічного господарства в Україні все ще залишається одним з найбільших у світі і складає понад 2000 га.

У процесі зростання числа дрібних органічних господарств, що спеціалізуються, в першу чергу, на вирощуванні плодовоовочевої продукції, зменшується середній розмір господарства з поступовим наближенням до середньосвітових показників.

Тому відслідковується тенденція постійного зростання кількості сільськогосподарських виробників в Україні, й особливо невеликих та середніх фермерських господарств, що дає надію кінцевим споживачам очікувати на збільшення асортименту та кількості органічних продуктів на внутрішньому ринку.

Відповідно, в останні три роки спостерігається стабільна тенденція наповнення українського ринку власною органічною продукцією за рахунок налагодження власної переробки органічної сировини. Зокрема, це крупи, м'ясні та молочні вироби, соки, повидло, мед, овочі та фрукти.

Що стосується динаміки розвитку органічного виробництва в світі, згідно даних [9] станом на 2014 р. у світі нараховується 172 країни з даними про сертифіковане органічне сільське господарство (табл. 1).



Рис. 1 – Органічна карта України (станом на 01.06.2016 р.) [7]: розроблено в рамках проекту «Розвиток органічного ринку в Україні» (2012-2016), що впроваджується Дослідним інститутом органічного сільського господарства (FiBL, Швейцарія) за фінансової підтримки Швейцарської конфедерації [8]

Таблиця 1 – Ключові показники світового органічного сільського господарства станом на 2014 р. (згідно з дослідженнями 2016 р.) [9]

Показник	Значення
Країни з даними про сертифіковане органічне сільське господарство	172 країни
Загальна площа земель, зайнятих під органічне сільське господарство	43,7 млн. га
Частка земель органічного сільського господарства від загальної площі земель сільськогосподарського призначення	0,99 %
Виробники	2,3 млн. виробників
Розмір органічного ринку	80 млрд. доларів США
Споживання на душу населення	11 доларів США
Кількість країн з законодавством щодо органічного виробництва	87 країн

Слід зазначити, що Кабінет міністрів України затвердив порядок ведення реєстру виробників органічної продукції [10]. У зв'язку з тим, що кількість компаній, які займаються виробництвом органічної продукції, зростає, для забезпечення інтересів споживачів Міністерство аграрної політики і продовольства на даний час розробляє нормативні акти щодо створення єдиного реєстру українських виробників органічної продукції. Єдиний реєстр буде у вільному доступі в мережі Інтернет. На думку багатьох фахівців в області виробництва органічних харчових продуктів, такі зміни інтенсифікують роботу галузі органічного виробництва та сприятимуть наповненню внутрішнього ринку високоякісними продуктами харчування.

Згідно даних, наведених на сайті української компанії Органік Стандарт [11], яка є єдиним українським органом з сертифікації органічного виробництва, станом на 01.11.2017 в Україні налічується 578 операторів органічного виробництва. Аналізом асортименту встановлено, що основною органічною овочевою сировиною є морква, цибуля, картопля, баклажани, помідори, перець, капуста, буряк, огірок, часник, капуста білоголова, огірок, салат, редиска, кабачок, цибуля, капуста цвітна, пастернак, хрін, селера, гарбуз твердокорий, редька дайкон тощо, серед плодово-ягідної сировини налічується яблука, груша, малина, суниця садова, кавун столовий, диня, виноград, смородина, полуниця, ожина, черешня та ін.

Постановка проблеми. Ринок органічної харчової продукції стрімко розвивається у всьому світі, а також стабільно зростає та завойовує все більше визнання серед різних верств населення України. Серед представленого асортименту органічної продукції на Україні посідають важливе місце й користуються попитом овочі, плоди та ягоди, які є джерелом незамінних біологічно активних речовин. Згідно статистичних даних частка цієї групи органічної продукції складає близько 20–25 %.

Як відомо, в технологічному процесі виробництва органічної рослинної сировини, зокрема, овочів, плодів та ягід, не використовуються мінеральні добрива та отрутохімікати. Так, згідно даних [6] органічна овочева сировина містить залишків пестицидів в середньому у 700 разів менше, плодово-ягідна – у 550 разів менше, нітратів в овочевій сировині на 10–40 % нижче в порівнянні з традиційним продуктом. Це обумовлює, з одного боку, їх свіжість, збільшення вмісту сухих речовин, покращення смакових якостей, харчової та біологічної цінності, а з іншого – зниження терміну придатності, втрати під час зберігання, транспортування та реалізації. У кінцевому результаті

це підвищує собівартість виробленої органічної продукції. Вітчизняними виробниками останнім часом пропонуються лише не органічні свіжі, заморожені, сушені овочеві та плодово-ягідні напівфабрикати, що призначені для різних галузей харчової промисловості.

Сучасний ритм життя обумовлює доцільність використання овочевої та плодово-ягідної сировини саме в сушеному вигляді як напівфабрикати, основними перевагами яких є швидкість і простота приготування, висока концентрація поживних речовин при малому об'ємі та масі, висока засвоюваність поживних речовин, здатність тривалий час зберігатися без втрати якості.

Розробка технології органічної сушеної харчової продукції з овочевої та плодово-ягідної сировини, використання її у складі інших продуктів харчування відкриває великі можливості для розвитку напрямку виробництва органічної продукції тривалого зберігання на Україні та за її межами.

В даний час в літературі не знайдено систематизованих наукових даних щодо розробки органічної сушеної овочевої та плодово-ягідної харчової продукції. Головною проблемою розробки та впровадження зазначених технологій є недостатній рівень фундаментальних та прикладних досліджень, пов'язаних з вирішенням різних технологічних питань, зокрема, вивченням показників якості, втрат поживних та біологічно-активних речовин під час сушіння тощо. Отже, розробка науково обґрунтованих технологій органічної сушеної овочевої та плодово-ягідної харчової продукції є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень. Аналізом даних встановлено, що розробкою технологій отримання сушених напівфабрикатів з органічної рослинної сировини займалися ряд зарубіжних вчених, а в Україні ці дослідження знаходяться лише на початковій стадії. В рядах робіт автором [12] виявлено перспективи розвитку органічного виробництва овочів, плодів і ягід в Україні, визначено особливості розвитку даної галузі в господарствах населення та агрохолдингах, проаналізовано [13] динаміку виробництва не органічної сушеної плодовоовочевої продукції, розглянуто наявний асортимент сушених плодів і овочів, обґрунтовано доцільність його розширення, охарактеризовано основні тенденції споживання сушеної плодовоовочевої продукції. В матеріалі [14] авторами проаналізовано сучасний стан техніки та технології сушіння плодово-ягідної сировини, описано особливості тепло- і масообміну під час сушіння плодово-ягідної сировини способом змішаного теплопідводу. Вченими [15] приведено результати дослідження впливу попередньої

обробки плодів яблук та температури сушильного агента на тривалість та інтенсивність процесу сушіння. Автором [16] розроблено спосіб НВЧ-концентрування та НВЧ-сушіння овочевих концентратів та спроектовано установку для концентрування (сушіння) харчових систем із використанням НВЧ-нагрівання та вакуумування. В роботі науковцями [17] описано новий метод фільтраційної сушки в тепло-масообмінному модулі під дією підвищеного тиску, який призводить до зниження питомих енерговитрат на процес сушіння в 1,5...2 рази. За результатами аналітичних досліджень вітчизняними вченими [18] встановлено, що перспективними способами сушіння овочевої та фруктові сировини, з точки зору збереження харчової цінності, забезпечення відповідних відновлювальних властивостей сушених овочів та фруктів та енергоємності, є способи сублімаційного сушіння із криодеструкцією, зі змішаним теплопідведенням та холодного розпилювального сушіння. В роботі авторів [19] досліджено кінетику сушіння кісточкових плодів в камерних конвективних сушарках, встановлено залежності швидкості сушіння кісточкової плодової сировини та зміну абсолютної вологості сировини в процесі сушіння. У роботі вченими [20] досліджено кінетику сушіння капусти способом зі змішаним теплопідведенням. Науковцями [21] представлено результати експериментальних досліджень процесів сушіння плодовоовочевої сировини з метою інтенсифікації процесу та розробки енергоефективної технології. В роботі авторами [22] проведено аналіз існуючих способів сушіння рослинної сировини, запропоновано математичну модель, що дозволяє прогнозувати зміну якості продукту в процесі сушіння. В роботі науковцями [23] було теоретично досліджено кінетику випарювання вільної вологи з поверхні овочевої сировини залежно від параметрів сушіння. Вченими [24] запропоновано конструкцію циліндричної ІЧ-сушарки для сушіння органічної рослинної сировини, що дозволяє зменшити енерго- та металоємність існуючих сушарок та розширити асортимент органічної висушеної рослинної продукції високої біологічної якості, зберегти показники харчової цінності органічної сировини при її переробці та згладити сезонність її споживання.

У дослідженні зарубіжними авторами [25] була проведена оцінка якості дитячого харчування з використанням свіжої, замороженої і консервованої органічної моркви. Зарубіжними науковцями [26] було досліджено ефективність NIR-спектроскопії для контролю фізико-хімічних змін під час конвективного сушіння органічних морквяних слайсів протягом 8 годин за температури повітря 40°C. Було оцінено вплив попередньої обробки бланшуванням гарячою водою за температури 95°C протягом 1,45 хв. для інактивації ферментів. Зарубіжними авторами [27] розглянуто нову нетрадиційну технологію спреї-сублімаційного сушіння виморожуванням, що дозволяє отримувати порошкоподібні продукти, у тому числі органічні, при збереженні переваг традиційних сухих продуктів. Згідно даних, спреї-сублімаційне сушіння має потенційне застосування у цінних продуктах, зокрема, органічних, через його істотні переваги у порівнянні з іншими методами сушіння з точки зору структури продукту, якості та утримання летких речовин і біологічно активних спо-

лук. У роботі зарубіжними авторами [28] було досліджено процес сушіння картопляних слайсів на відкритому сонці та модифікованій тепличній сушарці, що працює в активному і пасивному режимі. Виявлено, що сушарка в активному режимі більш ефективна для сушіння картопляних слайсів в порівнянні з пасивним режимом і відкритим сушінням на сонці. Було встановлено, що картопляні слайси, висушені в сушильних камерах, володіли високим вмістом поживних речовин в порівнянні зі слайсами, висушеними на сонці.

Аналітичне обґрунтування розроблюваних технологій. З технологічної точки зору нами планується створення органічної сушеної овочевої та плодово-ягідної продукції, яку можна буде використовувати в різних галузях харчової і переробної промисловості, закладах ресторанного господарства, домашньої кулінарії для виробництва різних груп продуктів харчування. Продукція пропонується для використання як самостійно (снекова продукція – чіпси, палички та ін.), яка може передбачати додаткову обробку (бланшування) для інактивації ферментів або прискорення подальшого сушіння (осмотичне зневоднення в розчинах солі або цукру), так і у вигляді напівфабрикатів різного ступеня готовності (шматочки різної форми, порошкоподібні продукти).

Таким чином, отримання сушених напівфабрикатів і готової продукції з органічної овочевої і плодово-ягідної сировини відкриває великі можливості для розвитку напрямку виробництва органічної продукції тривалого зберігання.

Розроблення технологій зазначеної продукції дозволить своєчасно переробляти рослинну сировину органічного походження для максимального збереження природного потенціалу її харчової та біологічної цінності, скоротити час приготування, знизити енерго- та трудовитрати під час переробки сировини рослинної органічної сировини, істотно збільшити, спростити та здешевити умов їх зберігання і транспортування, цілорічно забезпечувати споживачів переробленою органічною продукцією, підвищити продуктивність та ефективність роботи при отриманні харчової продукції з розробленими напівфабрикатами, розширити існуючий асортимент органічної харчової продукції тривалого зберігання з використанням сушених напівфабрикатів з органічної овочевої і плодово-ягідної сировини, яка відповідає сучасним вимогам нутриціології, знизити її собівартість.

Головна ідея, яку передбачається реалізувати в даному проекті, полягає у вирішенні питання раціональної переробки вітчизняної органічної овочевої та плодово-ягідної сировини шляхом її сушіння з одночасним збереженням харчової та біологічної цінності розроблених сушених органічних напівфабрикатів та готової продукції, підвищенні ефективності технологічного процесу виробництва харчової продукції з використанням сушеної органічної овочевої та плодово-ягідної сировини, покращенні техніко-економічних показників підприємств, що вирощують чи переробляють органічну овочеву та плодово-ягідну сировину, поліпшенні екологічної обстановки.

Робочі гіпотези полягають у:

– використанні вітчизняної органічної овочевої та плодово-ягідної сировини з метою отримання су-

шених напівфабрикатів та готової продукції для використання їх у різних галузях харчової та переробної промисловості, закладах ресторанного господарства, домашній кулінарії;

- забезпеченні ефективного процесу сушіння з метою концентрування та максимального збереження поживних та біологічно-активних речовин в органічній овочевій та плодово-ягідній сировині;

- підвищенні ефективності технологічного процесу виробництва харчової продукції з використанням сушеної органічної овочевій та плодово-ягідній сировини за рахунок істотного збільшення терміну її зберігання, спрощення та здешевлення умов зберігання та транспортування, скорочення часу приготування, енерго- та трудовитрат, зниження собівартості.

- забезпеченні високих органолептичних показників, споживних властивостей, заданих фізико-хімічних, структурно-механічних, функціонально-технологічних та органолептичних показників нових органічних сушених напівфабрикатів;

- регулювання харчової та біологічної цінності шляхом комбінування сушених напівфабрикатів з метою створення їх сумішей для використання у складі харчової продукції, розширення асортименту органічних овочевих та плодово-ягідних напівфабрикатів, зокрема, сушених;

- забезпечення безпечності нової харчової продукції з використанням сушених органічних овочевих напівфабрикатів.

Моделювання технологій сушеної харчової продукції з органічної овочевій та плодово-ягідній сировини. Найбільш ефективне рішення завдань з розробки та удосконалення технологічних процесів і нових видів продукції можливо здійснити на основі системного підходу до проблеми. Обґрунтування і оптимізація технологічних параметрів у межах кожної підсистеми, з одного боку, забезпечує одержання кінцевого продукту з гарантованим планованим рівнем якості, а з іншого – обов'язковою умовою проекту-

вання окремих ділянок, цехів загального технологічного процесу у межах системи.

З метою визначення взаємопов'язаних технологічних параметрів виробництва з показниками якості сушених напівфабрикатів та готової продукції з органічної овочевій та плодово-ягідній сировини, а також встановлення можливості регулювання та оптимізації параметрів технологічного процесу нами було проведено моделювання технологічної системи виробництва сушеної харчової продукції із органічної сировини. Моделювання дозволяє значно спростити складність реальних технологічних процесів, деталізувати та конкретизувати їх. Воно є теоретичним методом, який дозволяє намітити план та вирішувати технологічні завдання найбільш економічним способом, звести до мінімуму прийняття помилкових рішень щодо реальних технологічних систем.

Нами було розроблено модель «чорний ящик» (рис. 2), до вхідних параметрів якої можна віднести: вид та якість органічної овочевій та плодово-ягідній сировини, технологічні параметри попередньої підготовки органічної сировини, вид додаткових рецептурних компонентів, вид сушіння, технологічний режим сушіння, стан та ступінь автоматизації обладнання. Виходи системи в даній графічній моделі відповідають меті системи, тобто тим параметрам, за якими буде оцінюватись ефективність розроблюваної технології. До вихідних параметрів розглядуваної моделі належать: органолептичні, фізико-хімічні, структурно-механічні, функціонально-технологічні показники, показники безпечності, поживна та біологічна цінність, вихід готової продукції, собівартість.

З урахуванням наведених вище робочих гіпотез нами було розроблено модель технологічної системи (рис. 3) та інноваційної стратегії (рис. 4) створення сушених напівфабрикатів різного ступеня готовності або готової продукції з органічної овочевій та плодово-ягідній сировини. Характеристику підсистем прогнозованої технологічної системи наведено у табл. 2.

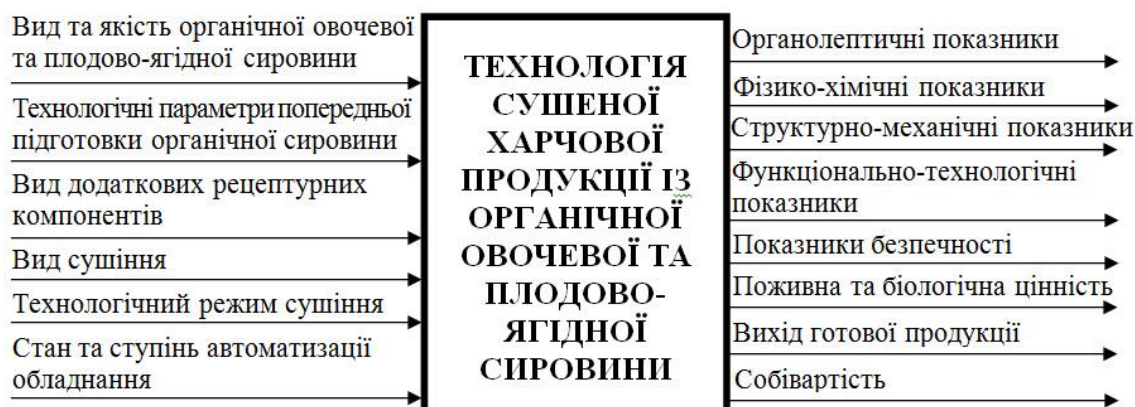


Рис. 2 – Параметрична модель «Чорний ящик»

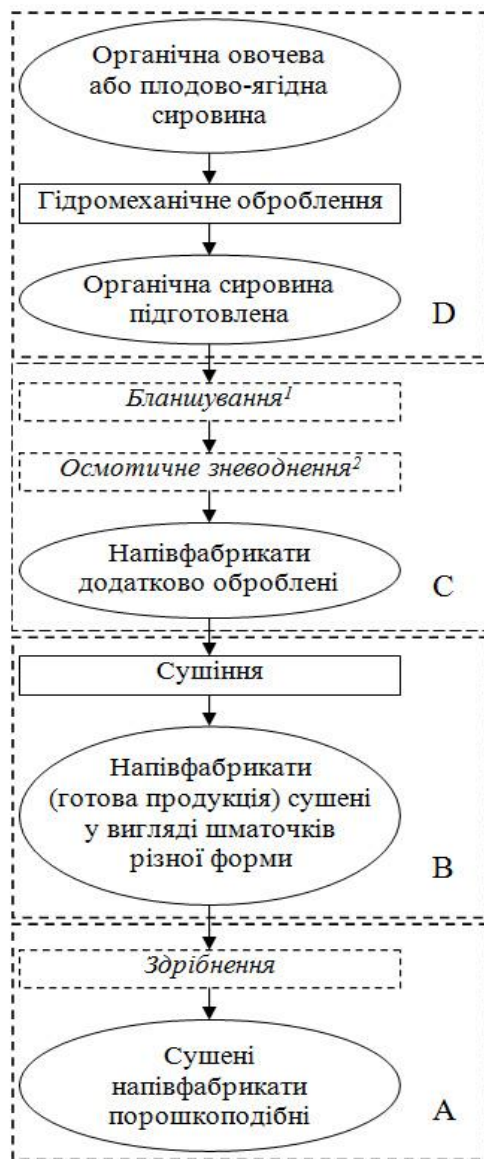


Рис. 3 – Модель технологічної системи отримання сушених напівфабрикатів різного ступеня готовності або готової продукції з органічної овочевої або плодово-ягідної сировини: А, В, С, D – підсистеми, 1, 2 – можливі операції, що виконуються для певних видів сировини

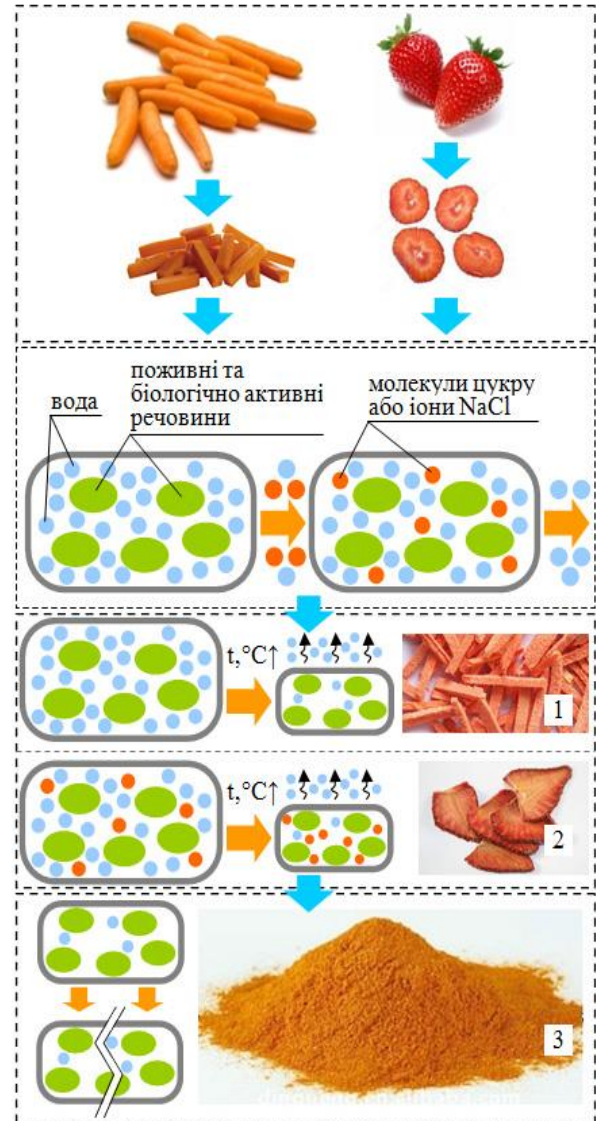


Рис. 4 – Модель інноваційної стратегії розробки сушених напівфабрикатів різного ступеня готовності або готової продукції з органічної овочевої або плодово-ягідної сировини (на прикладі органічної моркви та полуниці): 1 – сушені морквяні брускочки (напівфабрикат), 2 – слайди (чіпси) з полуниці (готова продукція), 3 – порошок з моркви (напівфабрикат)

Таблиця 2 – Характеристика підсистем технологічної системи виробництва сушеної харчової продукції із органічної овочевої та плодово-ягідної сировини

Позначення підсистеми	Найменування підсистеми	Мета функціонування підсистеми
A	Утворення сушених напівфабрикатів порошкоподібних	Отримання сушених напівфабрикатів високого ступеня готовності у здрібненому вигляді з високими органолептичними, заданими фізико-хімічними, функціонально-технологічними та мікробіологічними показниками для подальшого їх використання у складі різної харчової продукції
B	Утворення напівфабрикатів або готової продукції сушених у вигляді шматочків різної форми	Отримання сушених напівфабрикатів або готової продукції у вигляді шматочків різної форми з високими органолептичними, заданими фізико-хімічними, функціонально-технологічними та мікробіологічними показниками для подальшого їх використання у складі різної харчової продукції або як самостійна страва
C	Утворення напівфабрикатів додатково оброблених	Проведення додаткової обробки підготовлених напівфабрикатів для інактивації ферментів (бланшування) або прискорення подальшого сушіння (осмотичне зневоднення)
D	Підготовка органічної сировини	Здійснення гідромеханічної обробки органічної сировини, видалення неїстівної частини, зниження мікробіологічного обсіменіння, надання заданих геометричних розмірів

З використанням методів системного аналізу модель представлено як цілісну технологічну систему, яку згідно з асортиментом, що прогнозується, деталізовано до підсистем А, В, С, D (рис. 3).

Вирішення науково-технологічних завдань та встановлення закономірностей функціонування в межах окреслених підсистем дозволить отримати напівфабрикати різного ступеня готовності (А, В) та готову до споживання харчову продукцію (В), які можуть бути використані у складі різних продуктів харчування.

Стратегічним є те, що нова продукція буде вироблятися з вітчизняної органічної овочевої та плодово-ягідної сировини, що, безперечно, є економічно обґрунтованим. За цих умов обґрунтування технологічних параметрів переробки сировини в межах підсистеми D з отримання підготовленої органічної сировини, додаткове оброблення напівфабрикатів (С), сушіння (В) та здрібнення (А) є важливою умовою, що забезпечує функціонування технологічної системи в цілому.

Незважаючи на те, що моделювання вважається основним методом дослідження технологічних систем, воно все ж є теоретичним методом. Тому наступним етапом має бути проведення експериментальних досліджень як в межах кожних підсистем, так і системи в цілому, які спрямовано на обґрунтування рецептурного складу та технологічних параметрів виробництва харчової продукції з органічної овочевої та плодово-ягідної сировини, визначення закономірностей впливу вищезначених вхідних параметрів моделі (рис. 2) на форму-

вання показників якості готової продукції (вихідних параметрів).

Висновки. Органічні продукти харчування є сучасним напрямком в області здорового харчування та розробки технологій безпечної харчової продукції. Проведеним аналітичним оглядом встановлено, що в Україні дослідження з розробки сушеної продукції з органічної овочевої та плодово-ягідної сировини майже відсутні. З огляду на необхідність зміцнення експортного потенціалу аграрного сектору держави, охорони навколишнього середовища, збереження здоров'я нації шляхом насичення внутрішнього ринку України здоровими сертифікованими органічними продуктами, стратегічно важливим є подальший розвиток ринку органічної продукції України, у тому числі у переробленому вигляді. В цьому напрямку актуальним є розробка технологій напівфабрикатів різного ступеня готовності та готової продукції з органічної овочевої та плодово-ягідної сировини.

Розроблено моделі технологічної системи та інноваційної стратегії отримання напівфабрикатів різного ступеня готовності та готової продукції з органічної овочевої та плодово-ягідної сировини, які дозволяють у загальному вигляді визначити технології нової продукції та її рецептурний склад. Наступним етапом має бути проведення наукових досліджень в межах кожної підсистеми та технологічної системи в цілому.

Список літератури:

1. International Federation of Organic Agriculture Movements [Electronic resource]. – Available at: <https://www.ifoam.bio/>
2. The World of Organic Agriculture. Statistics and Emerging Trends 2017 [Text] / H. Willer, J. Lernoud (Eds.). – Bonn: Research Institute of Organic Agriculture (FiBL), Frick and IFOAM – Organic International, 2017. – 340 p.
3. Славгородська, Ю. В. Виробництво органічної продукції в Україні: стан та перспективи [Текст] / Ю. В. Славгородська // Вісник Полтавської державної аграрної академії. – 2016. – № 4. – С. 49–54.
4. Бузан, Г. Український потребитель стремится выбирать экопродукцию! [Текст] / Г. Бузан // Напитки. Технологии и инновации. – 2016. – № 3 (56). – С. 62–64. – Режим доступа: <http://www.gpp.in.ua/images/news/2016-04-15-nti-4-1-sertifikaciya-62.pdf>
5. Закон України «Про виробництво та обіг органічної сільськогосподарської продукції та сировини» [Текст]. – Верховна Рада України, 2014. – № 20-21. – Режим доступу: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/425-18>
6. Органічне виробництво в Україні: реалії та перспективи [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://minagro.gov.ua/node/23346>
7. Органічна карта України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.ukraine.fibl.org/fileadmin/documents-ukraine/Booklets/Ukrainian_Organic_Map_2016-compressed.pdf
8. Проект «Розвиток органічного ринку в Україні» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ukraine.fibl.org/ua/ua-a-p.html>
9. Настанова щодо розвитку ринку органічної та екологічної продукції [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://cci.dp.ua/tl_files/data/curier/Events/2016/september/Organic-Guide-2016.pdf
10. Постанова «Про затвердження Порядку ведення Реєстру виробників органічної продукції (сировини)» [Текст]. – Верховна Рада України, 2016. – № 505. – Режим доступу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/505-2016-%D0%BF#n8>
11. Компанія Органік Стандарт [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.organicstandard.com.ua/>
12. Самойлик, Ю. В. Особливості органічного виробництва овочів, плодів і ягід в агроструктурах різного типу [Текст] / Ю. В. Самойлик // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Економіка і менеджмент. – 2016. – Вип. 4. – С. 22–26.
13. Дякова, Ю. В. Тенденції розвитку ринку сушеної плодовоовочевої продукції України [Текст] / Ю. В. Дякова // SWorld. – 2013. – Режим доступу: <http://www.sworld.com.ua/index.php/uk/technical-sciences-213/technology-of-food-products-213/17881-213-833>
14. Погужих, М. І. Енергоэффективные способы переработки пищевой сировини: сушіння плодово-ягідної сировини [Текст]: навч. посіб. / М. І. Погужих, А. О. Пак; Харк. держ. ун-т харч. та торгівлі. – Харків: ХДУХТ, 2015. – 159 с.
15. Панасюк, С. Г. Дослідження впливу температури та методів попередньої обробки сировини на процес сушіння [Текст] / С. Г. Панасюк, О. В. Лисик // Сільськогосподарські машини. – 2014. – Вип. 27. – С. 85–89.
16. Михайлова, С. В. Використання мікрохвильової вакуумної обробки в процесах виробництва овочевих концентратів [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С. О. Михайлова; Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. – Х., 2014. – 23 с.
17. Потапов, В. А. Фильтрационная сушка при повышенном давлении [Текст] / В. А. Потапов, Е. Н. Якушенко, О. Ю. Грищенко // Наукові праці ОНАХТ. – 2015. – Т. 1, № 47. – Режим доступу: <http://journals.gsjp.eu/index.php/swonaf/article/view/418>
18. Тарасенко, Т. А. Теоретичне дослідження способів сушіння овочів та фруктів [Текст] / Т. А. Тарасенко, В. В. Євлаш, О. В. Неміріч, О. М. Вашиха, А. В. Гавриш, О. І. Кравченко // Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького. – 2015. – Т. 17, № 4. – С. 148–158.
19. Снівак, О. Ю. Кінетика сушіння кісточкових плодів в конвективних сушарках [Текст] / О. Ю. Снівак, В. К. Павлюк // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2013. – № 1. – С. 57–60.
20. Євлаш, В. В. Установлення раціональних режимів сушіння капусти [Текст] / В. В. Євлаш, О. В. Неміріч, Т. А. Тарасенко // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі. – 2012. – Вип. 2 (16). – С. 3–7.

21. Снежкін, Ю. Ф. Переробка плодоовочевої сировини на сушену продукцію [Текст] / Ю. Ф. Снежкін, Р. О. Шапар, Ж. О. Петрова, Д. М. Чалаєв, В. С. Шаврін, Г. К. Воспитанніков // Наукові доповіді НАУ. – 2006. – Режим доступу: <http://base.dnsgb.com.ua/files/journal/Naukovi-dopovidi-NAU/2006-2/snezhkin.pdf>
22. Потапов, В. А. Анализ способов сушки и оценка качества сушеной виноградной выжимки [Текст] / В. А. Потапов, Е. Н. Якушенко, М. В. Жеребкин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 6, № 11 (66). – С. 38–41. – Режим доступа: <http://journals.urau.ru/eejet/article/view/19170/17021>
23. Слѣзов, В. В. К теории термовакуумной сушки [Текст] / В. В. Слѣзов, В. А. Кутовой, Л. И. Николайчук // Вопросы атомной науки и техники. – 2003. – № 5. – С. 7–13.
24. Пат. № 106461 UA. ІЧ-сушарка для сушіння органічної рослинної сировини. МПК А23N 12/08 [Текст] / Черевко О. І., Кіптєла Л. В., Загорулко А. М.; заявник та патентовласник Харківський державний університет харчування та торгівлі. – № а201314949; заявл. 20.12.2013; опубл. 26.08.2014, Бюл. № 16. – 6 с.
25. Seidel, K. Quality assessment of baby food made of different pre-processed organic raw materials under industrial processing conditions [Text] / K. Seidel, J. Kahl, F. Paoletti, I. Birlouez, N. Busscher, U. Kretschmar et. al. // Journal of Food Science and Technology. – 2013. – Vol. 52, Issue 2. – P. 803–812. doi: [10.1007/s13197-013-1109-5](https://doi.org/10.1007/s13197-013-1109-5)
26. Moscetti, R. Real-Time Monitoring of Organic Carrot (var. Romance) During Hot-Air Drying Using Near-Infrared Spectroscopy [Text] / R. Moscetti, R. P. Haff, S. Ferri, F. Raponi, D. Monarca, P. Liang, R. Massantini // Food and Bioprocess Technology. – 2017. – Vol. 10, Issue 11. – P. 2046–2059. doi: [10.1007/s11947-017-1975-3](https://doi.org/10.1007/s11947-017-1975-3)
27. Ishwarya, S. P. Spray-freeze-drying: A novel process for the drying of foods and bioproducts [Text] / S. P. Ishwarya, C. Anandharamakrishnan, A. G. F. Stapley // Trends in Food Science & Technology. – 2015. – Vol. 41, Issue 2. – P. 161–181. doi: [10.1016/j.tifs.2014.10.008](https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.10.008)
28. Prakash, O. Environmental analysis and mathematical modelling of potato chips drying in modified solar greenhouse dryer [Text] / O. Prakash, A. Kumar, P. Tekasakul, A. M. Abdel-Ghany, I. M. Al-Helal // Heat Transfer Research. – 2017. – Vol. 48, Issue 16. – P. 1497–1514. doi: [10.1615/heattransres.2017012421](https://doi.org/10.1615/heattransres.2017012421)

Bibliography (transliterated):

1. International Federation of Organic Agriculture Movements. Available at: <https://www.ifoam.bio/>
2. Willer, H., Lernoud, J. (Eds.) (2017). The World of Organic Agriculture. Statistics and Emerging Trends 2017. Bonn: Research Institute of Organic Agriculture (FiBL), Frick and IFOAM – Organic International, 340.
3. Slavhorodska, Yu. V. (2016). Vyrobnystvo orhanichnoi produktsiy v Ukraini: stan ta perspektyvy. Visnyk Poltavskoi derzhavnoi ahrarnoi akademiyi, 4, 49–54.
4. Buzan, G. (2016). Ukrainskiy potrebitel' stremitsya vybirat' ekoproduktsiyu! Napitki. Tekhnologii i innovatsii, 3 (56), 62–64. Available at: <http://www.gpp.in.ua/images/news/2016-04-15-nti-4-1-sertifikatsiya-62.pdf>
5. Zakon Ukrainy «Pro vyrobnystvo ta obih orhanichnoi silskohospodarskoi produktsiy ta syrovyny» (2014). Verkhovna Rada Ukrainy, No. 20-21. Available at: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/425-18>
6. Orhanichne vyrobnystvo v Ukraini: realiy ta perspektyvy. Available at: <http://minagro.gov.ua/node/23346>
7. Orhanichna karta Ukrainy. Available at: http://www.ukraine.fibl.org/fileadmin/documents-ukraine/Booklets/Ukrainian_Organic_Map_2016-compressed.pdf
8. Proekt «Rozvytok orhanichnoho rynku v Ukraini». Available at: <http://www.ukraine.fibl.org/ua/ua-a-p.html>
9. Nastanova shchodo rozvytku rynku orhanichnoi ta ekolohichnoi produktsiy. Available at: http://cci.dp.ua/tl_files/data/curier/Events/2016/september/Organic-Guide-2016.pdf
10. Postanova «Pro zatverdzhennia Poriadku vedennia Reiestru vyrobnikov orhanichnoi produktsiy (syrovyny)» (2016). Verkhovna Rada Ukrainy, No. 505. Available at: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/505-2016-%D0%BF#n8>
11. Kompaniia Orhanich Standard. Available at: <http://www.organicstandard.com.ua/>
12. Samoilyk, Yu. V. (2016). Osoblyvosti orhanichnoho vyrobnystva ovochiv, plodiv i yahid v ahrostrukturakh riznoho typu. Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Seriya: Ekonomika i menedzhment, 4, 22–26.
13. Diakova, Yu. V. (2013). Tendentsiy rozvytku rynku sushenoi plodoovochевой produktsii Ukrainy. SWorld. Available at: <http://www.sworld.com.ua/index.php/uk/technical-sciences-213/technology-of-food-products-213/17881-213-833>
14. Pohozhykh, M. I., Pak, A. O. (2015). Enerhoefektyvni sposoby pererobky kharchovoi syrovyny: sushinnia plodovo-yahidnoi syrovyny. Kharkiv: KhDUKht, 159.
15. Panasiuk, S. H., Lysyk, O. V. (2014). Doslidzhennia vplyvu temperatury ta metodiv poperednoi obrobky syrovyny na protses sushinnia. Silskohospodarski mashyny, 27, 85–89.
16. Mykhailova, S. V. (2014). Vykorystannia mikrohvylovoi vakuumnoi obrobky v protsesakh vyrobnystva ovochevykh kontsentrativ. Kharkiv, 23.
17. Potapov, V. A., Yakushenko, E. N., Gritsenko, O. Yu. (2015). Fil'tratsionnaya sushka pri povyshennom davlenii. Naukovi pratsi ONAKhT, 1 (47). Available at: <http://journals.gsjp.eu/index.php/swonft/article/view/418>
18. Tarasenko, T. A., Yevlash, V. V., Niemirich, O. V., Vasheka, O. M., Havrysh, A. V., Kravchenko, O. I. (2015). Teoretychne doslidzhennia sposobiv sushinnia ovochiv ta fruktiv. Naukovyi visnyk Lvivskoho natsionalnoho universytetu vetrynarnoi medytsyny ta biotekhnologii imeni S. Z. Gzhytskoho, 17 (4), 148–158.
19. Spivak, O. Yu., Pavliuk, V. K. (2013). Kinetyka sushinnia kistochkovykh plodiv v konvektivnykh susharkakh. Suchasni tekhnologii, materialy i konstruktsii v budivnytstvi, 1, 57–60.
20. Yevlash, V. V., Niemirich, O. V., Tarasenko, T. A. (2012). Ustanovlennia ratsionalnykh rezhymiv sushinnia kapusty. Prohresyvnii tekhnika ta tekhnologii kharchovykh vyrobnystv restorannoho hospodarstva i torhivli, 2 (16), 3–7.
21. Sniezhkin, Yu. F., Shapar, R. O., Petrova, Zh. O., Chalaiev, D. M., Shavrin, V. S., Vospitannikov, H. K. (2006). Pererobka plodoovochевой syrovyny na sushenу produktsiyu. Naukovi dopovidi NAU. Available at: <http://base.dnsgb.com.ua/files/journal/Naukovi-dopovidi-NAU/2006-2/snezhkin.pdf>
22. Potapov, V. A., Yakushenko, E. N., Zherebkin, M. V. (2013). Analysis of the drying methods and evaluation of the quality of dried grape pomace. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (11 (66)), 38–41. Available at: <http://journals.urau.ru/eejet/article/view/19170/17021>
23. Slyozov, V. V., Kutovoy, V. A., Nikolaychuk, L. I. (2003). K teorii termovakuumnoy sushki. Voprosy atomnoy nauki i tekhniki, 5, 7–13.
24. Cherevko, O. I., Kiptela, L. V., Zahorulko, A. M. (2013). Pat. No. 106461 UA. ІЧ-сушарка для сушіння органічної рослинної сировини. МПК А23N 12/08. No. а201314949; declared: 20.12.2013; published: 26.08.2014, Bul. No. 16, 6.
25. Seidel, K., Kahl, J., Paoletti, F., Birlouez, I., Busscher, N., Kretschmar, U. et. al. (2013). Quality assessment of baby food made of different pre-processed organic raw materials under industrial processing conditions. Journal of Food Science and Technology, 52 (2), 803–812. doi: [10.1007/s13197-013-1109-5](https://doi.org/10.1007/s13197-013-1109-5)
26. Moscetti, R., Haff, R. P., Ferri, S., Raponi, F., Monarca, D., Liang, P., Massantini, R. (2017). Real-Time Monitoring of Organic Carrot (var. Romance) During Hot-Air Drying Using Near-Infrared Spectroscopy. Food and Bioprocess Technology, 10 (11), 2046–2059. doi: [10.1007/s11947-017-1975-3](https://doi.org/10.1007/s11947-017-1975-3)
27. Ishwarya, S. P., Anandharamakrishnan, C., Stapley, A. G. F. (2015). Spray-freeze-drying: A novel process for the drying of foods and bioproducts. Trends in Food Science & Technology, 41 (2), 161–181. doi: [10.1016/j.tifs.2014.10.008](https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.10.008)
28. Prakash, O., Kumar, A., Tekasakul, P., Abdel-Ghany, A. M., Al-Helal, I. M. (2017). Environmental analysis and mathematical modelling of potato chips drying in modified solar greenhouse dryer. Heat Transfer Research, 48 (16), 1497–1514. doi: [10.1615/heattransres.2017012421](https://doi.org/10.1615/heattransres.2017012421)

Поступила (received) 16.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Аналітичне обґрунтування та моделювання технологій сушеної харчової продукції з органічної овочевої та плодово-ягідної сировини/ Бідюк Д. О., Пономарьова Л. М., Перцевой Ф. В., Маренкова Т. І. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 33(1255). – С. 99–107.– Бібліогр.: 28 назв. – ISSN 2079-5459.

Аналитическое обоснование и моделирование технологий сушеной пищевой продукции с органического овощного и плодово-ягодного сырья/ Бидюк Д. О., Пономарёва Л. Н., Маренкова Т. И., Перцевой Ф. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 33(1255). – С. 99–107.– Бібліогр.: 28 назв. – ISSN 2079-5459.

Analytical substantiation and modeling of technologies for dried food products from organic vegetable and fruit-berry raw materials/ Bidyuk D., Ponomarova L., Pertsevoi F., Marenkova T. //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 33 (1255).– P. 99–107.– Bibliogr.:28. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бідюк Дмитро Олегович – кандидат технічних наук, Сумський національний аграрний університет, доцент кафедри технології харчування, вул. Герасима Кондратьєва, 160, м. Суми, Україна, 40021, e-mail: dumang25@gmail.com.

Бидюк Дмитрий Олегович – кандидат технических наук, доцент, кафедра технологии питания, Сумской национальной аграрный университет, ул. Герасима Кондратьева, 160, г. Сумы, Украина, 40021, e-mail: du-mang25@gmail.com

Bidyuk Dmytro – PhD, Sumy National Agrarian University, Associate Professor of Food Technology Department, Gerasim Kondratyev Str., 160, Sumy, Ukraine, 40021, e-mail: dumang25@gmail.com

Пономарьова Людмила Миколаївна – кандидат хімічних наук, Сумський національний аграрний університет, доцент кафедри терапії, фармакології, клінічної діагностики та хімії, вул. Герасима Кондратьєва, 160, м. Суми, Україна, 40021, e-mail: ponomarova.ln@gmail.com

Пономарева Людмила Николаевна – кандидат химических наук, Сумской национальной аграрный университет, доцент кафедры терапии, фармакологии, клинической диагностики и химии, ул. Герасима Кондратьева, 160, г. Сумы, Украина, 40021, e-mail: ponomarova.ln@gmail.com

Ponomarova Lyudmila – PhD of Chemistry Sciences, Sumy National Agrarian University, Associate Professor of Therapy, Pharmacology, Clinical Diagnostics and Chemistry Department, Gerasim Kondratyev str., 160, Sumy, Ukraine, 40021, e-mail: ponomarova.ln@gmail.com

Перцевой Федір Всеволодович – доктор технічних наук, Сумський національний аграрний університет, професор кафедри технології харчування, вул. Герасима Кондратьєва, 160, м. Суми, Україна, 40021, e-mail: pertsevov.f@gmail.com

Перцевой Федор Всеволодович – доктор технических наук, Сумской национальной аграрный университет, профессор кафедры технологии питания, ул. Герасима Кондратьева, 160, г. Сумы, Украина, 40021, e-mail: pertsevov.f@gmail.com

Pertsevoi Fedir – Doctor of Technical Sciences, Sumy National Agrarian University, Professor of Food Technology Department, Gerasim Kondratyev Str., 160, Sumy, Ukraine, 40021, e-mail: pertsevov.f@gmail.com

Маренкова Тетяна Іванівна – Сумський національний аграрний університет, старший викладач кафедри технології харчування, вул. Герасима Кондратьєва, 160, м. Суми, Україна, 40021, e-mail: tanya_201@ukr.net

Маренкова Татьяна Ивановна – Сумской национальной аграрный университет, старший преподаватель кафедры технологии питания, ул. Герасима Кондратьева, 160, г. Сумы, Украина, 40021, e-mail: tanya_201@ukr.net

Marenkova Tatyana – Sumy National Agrarian University, Senior Lecturer of Food Technology Department, Gerasim Kondratyev Str., 160, Sumy, Ukraine, 40021, e-mail: tanya_201@ukr.net

В. Н. ВАЩЕНКО, И. Б. КОРДУБА, Е. А. ЛОЗА, Ю. М. КРИЗСКАЯ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СИНХРОННОГО ВЛИЯНИЯ СМЕРЧА И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА ВОДОЕМ-ОХЛАДИТЕЛЬ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС В ПРОЦЕССЕ ЕГО ОСУШЕНИЯ

Масштабная авария на АЭС Фукусима-1 подчеркнула актуальность моделирования воздействия относительно маловероятных природных экстремальных явлений на радиационно-загрязненные природно-техногенные водные комплексы, каким является и частично осушенный водоем-охладитель ЧАЭС. Чернобыльская зона отчуждения является регионом с вероятностью возникновения смерча $6 \cdot 10^{-3}$ 1/год. Не изученное явление синхронного воздействия смерча и землетрясения на водоем-охладитель может привести к затоплению ограждающей его дамбы. В настоящей работе выполняется моделирование возможного затопления оградительной дамбы водоема-охладителя в случае синхронного влияния смерча и землетрясения на основе метода профессора В. И. Скалозубова.

Ключевые слова: водоем-охладитель, осушение, маловероятные внешние воздействия, смерч, землетрясение, синхронное воздействие, моделирование, волна затопления.

Велика аварія на АЕС Фукусима-1 підкреслила актуальність моделювання впливу малоймовірних природних екстремальних явищ на радіаційно-забруднені природно-техногенні водні комплекси, яким є і частково осушена водойма-охолоджувач ЧАЕС. Чорнобильська зона відчуження є регіоном з ймовірністю виникнення смерчу $6 \cdot 10^{-3}$ 1/рік. Не досліджене явище синхронного впливу смерчу і землетрусу на водойму-охолоджувач здатне призвести до затоплення його огорожувальної дамби. У даній роботі виконується моделювання можливого затоплення огорожувальної дамби водойми-охолоджувача у разі синхронного впливу смерчу і землетрусу на основі гідродинамічного методу професора В. І. Скалозубова.

Ключові слова: водойма-охолоджувач, осушення, малоймовірні зовнішні впливи, смерч, землетрус, синхронний вплив, моделювання, хвиля затоплення.

One of the main lessons of radioecological disaster at Fukushima-Daiichi NPP is inexcusability to exclude modeling and analysis of relatively low-frequency extreme natural phenomenon (such as tornadoes and earthquakes) impact at radioactive contaminated natural and industrial water bodies from research programs. One of such water bodies is partially-dried Chernobyl NPP coolant pool. In paper [1] published in 1989 the Chernobyl Alienation Zone was shown to be located in an increased tornado hazard area with tornado probability of $6 \cdot 10^{-3}$ per year. Therefore an underexplored problem of possible radioecological risks caused by possible synchronous tornado and earthquake impact at partially dried Chernobyl coolant pool is of high importance. Such impact can amplify formation process and scale of the flooding wave, which height can overflow barrier dam of the pool.

In the present paper the analysis of Chernobyl NPP coolant pool barrier dam flooding is made based on V.I.Skalozubov hydrodynamic method, earlier successfully used to model possible Zaporizhska NPP industrial site flooding.

Keywords: coolant pool, drying, low probable external impacts, tornado, earthquake, synchronous impact, modeling, flood wave.

Введение. Опыт первых лет выведения из эксплуатации водоема-охладителя Чернобыльской АЭС предопределил необходимость решения задач, связанных с опасными радиологическими последствиями, которые могут возникнуть в результате внешних экстремальных природных влияний на ВО ЧАЭС. Среди таких экстремальных явлений – смерчи и землетрясения [1]. Актуальной задачей является обеспечение экологической безопасности на протяжении всего жизненного цикла водоема и предотвращения негативных радиологических последствий при любых комбинациях природных и техногенных внутренних и внешних воздействий с учетом уроков большой Фукусимской катастрофы [2–4]. Анализ главных уроков большой аварии на АЭС Fukushima-Daiichi также определил необходимость пересмотра и усовершенствования детерминистского анализа влияния на ВО ЧАЭС подобных маловероятных природных явлений [5].

Многолетние сейсмические наблюдения показали, что ВО ЧАЭС расположен на территории повышенной смерче- и сейсмоактивности [6–11]. К тому же в работе [9] был выявлен механизм значительного усиления сейсмических низкочастотных колебаний, которые возникают в результате влияния грунтовых и гидрогеологических условий в районе промышленной площадки и ВО ЧАЭС. Существует также вероятность синхронного влияния смерча и землетрясения на частично осушенную чашу ВО ЧАЭС, способного содействовать образованию волны затопления его оградительной дамбы.

В работе [1], опубликованной еще в 1989 году, было показано, что вероятностью возникновения

смерча в пределах Чернобыльской зоны отчуждения равна $6 \cdot 10^{-3}$ 1/год. Аналогичные выводы также были получены и в работе [10] на основании анализа многочисленных данных, которые частично приведены в работах [12–16].

В настоящей работе в основу моделирования возможного затопления дамбы ВО ЧАЭС при синхронном воздействии на чашу водоема смерча и землетрясения положен гидродинамический метод, предложенный В. И. Скалозубовым [2, 17]. Ранее этот метод успешно применялся для моделирования рисков затопления промплощадки Запорожской АЭС в результате воздействия смерча на ее водоем-охладитель и на Каховское водохранилище.

Материалы, методы и эксперименты. В стратегии обеспечения абсолютной радиационно-экологической безопасности осушения ВО ЧАЭС на длительных масштабах времени необходимо обеспечить поддержание оптимальной высоты уровня поверхности экранирующей водной толщ в чаше водоема-охладителя. При этом особое внимание следует уделить изучению процессов возможного быстрого перераспределения концентраций радиоактивных загрязнений в системе «вода–донные отложения». Такие процессы возникают в результате интенсивного подъема и перемешивания с водой донных отложений в результате воздействия на водоем смерчей и землетрясений.

Зарубежный опыт по обеспечению долговременной экологической безопасности радиоактивных водоемов показывает, что эта задача решается путем создания условий и средств для быстрой смены уровня водной поверхности в чаше водоема.

© В. Н. Ващенко, И. Б. Кордуба, Е. А. Лоза, Ю. М. Кризская.
2017

Объем, глубина и качество водной толщ должны обеспечить полное экранирование радиоактивных загрязнений накопленных в чаше водоема. При этом корректирование соотношения высот ограждающей водоем дамбы и уровня воды в водоеме должно обеспечить невозможность затопления дамбы в результате воздействия на водоем смерчей и землетрясений.

Результаты исследований. Главные особенности используемого в настоящей работе метода связаны с усовершенствованием моделирования диссипации гидродинамики волны затопления и специфическими краевыми условиями затопления дамбы ВО ЧАЭС.

Основные положения модели затопления дамбы ВО ЧАЭС следующие:

1) формирование волны затопления в общем случае происходит в результате действия подъемной силы смерча и сейсмического толчка, а также сил внутренней диссипации и гравитации водяного столба;

2) форма волны затопления моделируется в виде цилиндра с площадью пересечения S_c и высотой $h + h_{no}$ (где h_{no} – уровень воды в ВО);

3) консервативно полагается, что максимальное влияние смерча над поверхностью ВО происходит вблизи оградительной дамбы;

4) условно допускается, что процесс формирования волны затопления протекает в два этапа:

Этап I – начальный этап общего влияния смерча и землетрясения на протяжении временного масштаба $t < \Delta t_3$;

Этап II – заключительный этап влияния смерча на сквозняке временного масштаба $t > \Delta t_3$.

5) Образование волны затопления полагается изотермическим, а скорость звука в воде значительно больше скорости изменения высоты волны затопления.

Гидродинамическая модель затопления дамбы ВО при общем влиянии смерча и землетрясения с учетом принятых допущений будет иметь вид:

$$H \frac{d^2 H}{dT^2} + (1 + \xi_r) \left(\frac{dH}{dT} \right)^2 + H = K_p, \quad (1)$$

при следующих начальных условиях:

$$H(T=0) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{dH}{dT}(T=0) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{d^2 H}{dT^2}(t=0) = K_3, \quad (4)$$

$$\frac{d^2 H}{dT^2}(0 < t \leq \Delta t_3) = \frac{d^2 H}{dT^2}(T) + K_3, \quad (5)$$

где

$$T = \frac{t}{t_M};$$

$$t_M = \begin{cases} \Delta t_3 & (t \leq \Delta t_3), \\ \sqrt{h_{d0} / g} & (t > \Delta t_3); \end{cases}$$

$$H = h / h_{d0};$$

$$K_p = \frac{\Delta P}{\rho g h_{d0}};$$

$$K_3 = \frac{a_3 \Delta t_3^2}{h_{d0}},$$

где t – текущее время формирования волны затопления; h_{d0} – начальная высота дамбы над поверхностью уровня ВО; g – гравитационное ускорение; Δt_3 – длительность толчков землетрясения; a_3 – отклик ускорения землетрясения на поверхности почвы ВО; $\xi_r = 0,2$ – приведенный коэффициент гидродинамической диссипации при формировании волны затопления в ВО.

Уравнение (1) при начальных условиях (2)–(5) является нелинейным дифференциальным уравнением 2-го порядка, которое не имеет аналитических решений. Поэтому решение выполнялось с помощью метода Рунге-Кутты с точностью $\pm 10\%$.

Исходя из главных результатов численного моделирования представленных на рис. 1 и 2, можно сделать следующие утверждения:

В случае влияния лишь одного землетрясения на почву чаши ВО ($K_p = 0$) предельные условия незатопления дамбы имеют следующий вид

$$K_3 = \frac{a_3 \Delta t_3^2}{h_{d0}} < 10^3. \quad (6)$$

При этом, в отличие от традиционных подходов, условия затопления зависят не только от откликов ускорения землетрясения на поверхности почвы чаши ВО ($K_3 \sim a_3$), но еще в большей мере от длительности сейсмических толчков ($K_3 \sim \Delta t_3^2$).

При минимальной интенсивности смерчей и (F1.0) и совместном влиянии землетрясения условия незатопления дамбы ВО имеет вид:

$$K_3 < 0,3 \cdot 10^3. \quad (7)$$

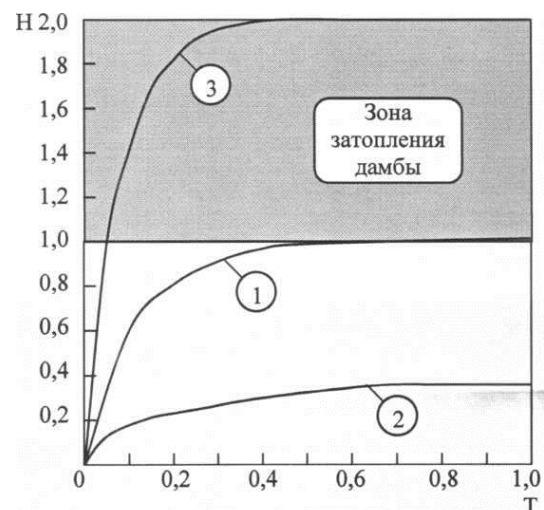


Рис. 1 – Динамика высоты волны в ВО под действием землетрясения ($K_p = 0$): 1 – $K_3 = 10^3$; 2 – $K_3 = 0,3 \cdot 10^3$; 3 – $K_3 = 3,0 \cdot 10^3$.

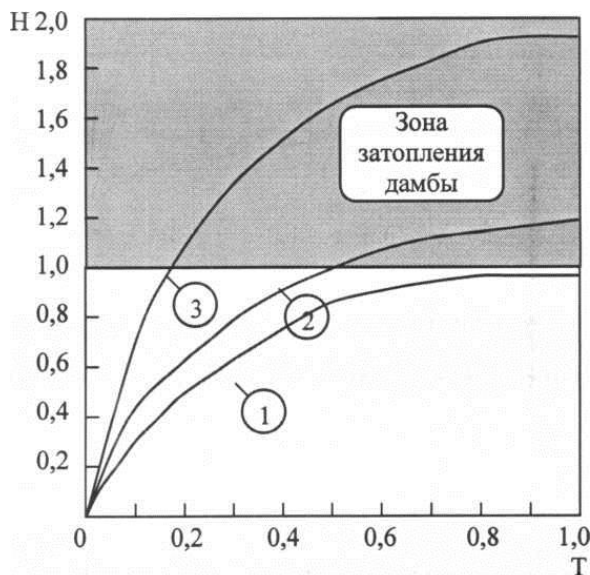


Рис. 2 – Динаміка висоти волни в ВО під совместним впливом смерча F 1.0 і землетрясіння:
1 – $K_3 = 0$; 2 – $K_3 = 0,3 \cdot 10^3$; 3 – $K_3 = 10^3$.

Аналіз відомих досліджень і експериментальних даних, а також уроки аварії на АЕС Фукусима-Даїчі визначають необхідність додаткового вивчення можливості затоплення дамби водоема-охолоджувача Чорнобильської АЕС при загальному впливі (в загальному випадку) смерча і землетрясіння, яке може призвести до катастрофічних екологічних наслідків.

Висновки

1. Аналіз результатів відомих досліджень і експериментальних даних, а також уроки аварії на АЕС Фукусима-Даїчі в Японії визначили необхідність додаткового вивчення питання можливості затоплення дамби водоема-охолоджувача Чорнобильської АЕС при загальному впливі (в загальному випадку) смерча і землетрясіння, яке може призвести до небажаних екологічних наслідків.

2. Результати розрахункового моделювання показують, що консервативне затоплення дамби при проектному рівні води в ВО ЧАЕС, в результаті впливу на нього смерча 1-го (F 1.0) класу інтенсивності, не виникає.

3. В результаті впливу смерчів 2-го (F 2.0) і 3-го (F 3.0) класів інтенсивності (і більше) відбувається затоплення дамби ВО ЧАЕС уже на початкових етапах формування хвилі від смерча ($T < 0,3$).

4. В результаті зняття з експлуатації ВО ЧАЕС шляхом його поступової сушки за рахунок інфільтрації води крізь огорожувальну дамбу, забезпечити зниження проектного рівня води приблизно до 6–7 м, тобто до рівня води в річці Прип'ять.

При таких умовах консервативне затоплення дамби від смерчів класу F 3.0 (і нижче класом), згідно отриманих результатів, не виникає.

5. Визначені граничні умови незатоплення дамби ВО при загальному впливі смерчів і землетрясіння показують, що в разі впливу тільки землетрясіння на ВО ($K_p = 0$) граничні умови незатоплення дамби мають наступний вигляд:

$$K_3 = a_3 \Delta t_3^2 / h_{d0} < 10^3$$

При цьому, в відмінність від традиційних підходів, умови затоплення залежать від відгуків прискорення на поверхні ґрунту ВО ($K_3 \sim a_3$) і, в ще більшій мірі, від тривалості сейсмічних толчок ($K_3 \sim \Delta t_3^2$).

6. При мінімальній інтенсивності смерчів класу F 1.0 і при умові синхронного виникнення землетрясіння умова незатоплення дамби ВО має наступний вигляд: $K_3 < 0,3 \cdot 10^3$.

7. Ввиду того, що Чорнобильська зона відчуження відноситься до 3-го класу інтенсивності смерчів, слід зробити однозначний висновок про необхідність підтримання рівня води в чаші ВО ЧАЕС з урахуванням умов можливого затоплення її огорожувальною дамбою.

Список літератури:

1. Брюхань, Ф. Ф. Смерчопасні зони в СРСР і розміщення атомних станцій [Текст] / Ф. Ф. Брюхань, М. Е. Ляхов, В. Н. Погребняк // Изв. АН СССР. Сер.: Географія. – 1989. – № 1. – С. 40–48.
2. Скалозубов, В. І. Комплекс методів переоцінки безпеки атомної енергетики України з урахуванням уроків екологічних катастроф в Чорнобиль і Фукусиме [Текст] / В. І. Скалозубов, Г. А. Оборський, І. Л. Козлов і др. – Одеса: Астропринт, 2013. – 244 с.
3. Громов, Г. В. Результати експертної оцінки стресс-тестів діючих енергоблоків АЕС України з урахуванням уроків аварії на АЕС «Фукусима-1» в Японії [Текст] / Г. В. Громов, А. М. Дыбач, О. В. Зелений, В. В. Іношєв і др. // Ядерна та радіаційна безпека. – 2012. – № 1 (53). – С. 3–9.
4. IAEA International Fact Finding Expert Mission Of The Fukushima Daiichi NPP Accident Following the Great East Japan Earthquake and Tsunami: IAEA Mission Report [Text]. – IAEA, 2011. – 160 p.
5. Постанова Колегії Держатомрегулювання № 2 від 19 травня 2011 року [Електронний ресурс] // Державна інспекція ядерного регулювання України. – Режим доступу: <http://www.snrc.gov.ua/nuclear/uk/publish/article/155446;jsessionid=2EFF7086EE5419DD76E7B8F86C1DF563>
6. Ващенко, В. М. Аналіз смерчонебезпеки для вдосконалення технології екологічно безпечного виведення з експлуатації вододимоохолоджувача Чорнобильської АЕС [Текст] / В. М. Ващенко, І. Б. Кордуба // Екологічна безпека. – 2016. – Вип. 2. – С. 128–135.
7. Волеваха, В. А. Шквали і смерчі на Україні в 1984–1985 гг. [Текст] / В. А. Волеваха, Н. Ф. Токарь // Труды Украинского регионального научно-исследовательского института. – 1987. – Вип. 225. – С. 46–55.
8. Ромов, А. І. Смерчі на Україні 30 мая 1985 г. [Текст] / А. І. Ромов, Н. С. Шишкин, Р. П. Сосновская, О. М. Железняк // Метеорологія і гідрологія. – 1987. – № 2. – С. 27–36.
9. Страхов, В. Н. Сейсмічні явища в районі Чорнобильської АЕС / В. Н. Страхов, В. І. Старостенко, О. М. Харитонов і др. // Геофізический журнал. – 1997. – Т. 19, № 3. – С. 3–15.
10. Старостенко, В. І. Сейсмічні дослідження для безпеки ЧАЕС [Електронний ресурс] / В. І. Старостенко та ін. // Національна академія наук України – Чорнобілю. – 2006. – Режим доступу: <http://nbuv.gov.ua/sites/default/files/msd/0604sta.pdf>
11. Кензера, О. В. Сейсмічна небезпека і захист від землетрусів [Текст] / О. В. Кензера // Вісник НАН України. – 2015. – № 2. – С. 44–57.

12. Скалозубов, В. И. Повышение экологической безопасности атомной энергетики Украины в постфокусимский период [Текст] / В. И. Скалозубов, Т. В. Габлая; ред. В. И. Скалозубов. – Киев, 2013. – 120 с.
13. Пояснительная записка к Техническому решению «Про визначення критичних подій, які мають бути розглянуті при розробці проектної документації на виведення з експлуатації водоймища-охолоджувача Чорнобильської АЕС і вимог щодо радіаційних критеріїв кінцевого стану території» [Текст]. – 2012.
14. Талерко, Н. Н. Прогнозная оценка трансграничного переноса радионуклидов вследствие прохождения смерча над водоемом-охладителем ЧАЭС [Текст] / Н. Н. Талерко, Е. К. Гаргер, А. Г. Кузьменко // Проблемы безопасности атомных электростанций в Чернобыле. – 2013. – Вып. 20.
15. Каталог смерчей, которые наблюдались на территории Украины в 1987–2003 гг [Текст]. – ВМП Укр ГМЦ.
16. Снитковский, А. И. Смерчи на территории СССР [Текст] / А. И. Снитковский // Метеорология и гидрология. – 1987. – № 9. – С. 12–25.
17. Наказ Держбуду України № 64 від 21.10.2002 «Основні нормативні вимоги та розрахункові характеристики смерчів майданчика Чорнобильської АЕС» [Текст]. – Державний Комітет України з Будівництва та Архітектури, 2002.

Bibliography (transliterated):

1. Briukhan, F. F., Liakhov, M. E., Pogrieniak, V. N. (1989). Smierchieopasnyie zony v SSSR i razmieschchenie atomnykh stantsiy [Tornado hazard areas of USSR and location of nuclear powerplants]. Bulletin of Academy of Sciences of USSR. Series: Geography, 1, 40–48.
2. Skalozubov, V. I., Oborskiy, G. A., Kozlov, I. L. et. al. (2013). Kompleks mietodov pierieotsenki bieзопасnosti atomnoy eniergetiki Ukrainy s uchietom urokov ekologichieskikh katastrof v Chornobyle i Fukusimie [Method complex for re-estimate of Ukraine nuclear power safety considering lessons of Chernobyl and Fukushima nuclear disasters]. Odessa: Astroprint, 244.
3. Gromov, G. V., Dybach, A. M., Zielienny, O. V., Iniushiev, V. V. et. al. (2012). Riezultaty ekspiertnoy otsienki striess-tiestov dieystviuiushchikh energoblokov AES Ukrainy s uchietom urokov avarii na AES “Fukusima-1” v Yaponii [Result of expert estimate of stress-tests of Ukraine NPP power units operation considering lessons of NPP “Fukushima-1” emergency in Japan]. Nuclear and radiation safety, 1 (53), 3–9.
4. IAEA International Fact Finding Expert Mission Of The Fukushima Daiichi NPP Accident Following the Great East Japan Earthquake and Tsunami: IAEA Mission Report (2011). IAEA, 160.
5. Postanova Kolehii Derzhatomrehulivannia No. 2 vid 19 travnia 2011 roku (2011). Derzhavna inspektsiia yadernoho rehulivannia Ukrainy. Available at: <http://www.snrc.gov.ua/nuclear/uk/publish/article/155446;jsessionid=2EFF7086EE5419DD76E7B8F86C1DF563>
6. Vashchenko, V. M., Korduba, I. B. (2016). Analiz smerchonebezpeky dlia vdoskonalennia tekhnologii ekolohichno bezpechnoho vyvedennia z ekspluatatsii vodoymy-okholodzhuvacha Chornobylskoi AES [Analysis of tornado hazard for improvement of environmentally safe decommissioning technology of coolant pool of Chernobyl NPP]. Ecological Safety, 2, 128–135.
7. Volievakha, V. A., Tokar, N. F. (1987). Shkvaly i smierchi na Ukrainie v 1984–1985 gg [Storms and tornadoes in Ukraine in 1984–1985]. Proceedings of Ukraine Regional Science and Research Institute, 225, 46–55.
8. Romov, A. I., Shishkin, N. S., Sosnovskaia, R. P., Zhieliezniak, O. M. (1987). Smierchi na Ukraine 30 maia 1985 g [Tornadoes in Ukraine 30 May 1985]. Meteorology and Hydrology, 2, 27–36.
9. Strakhov, V. N., Starostienko, V. I., Kharitonov, O. M. et. al. (1997). Seysmicheskie yavleniya v rayone Chernobyl'skoy AES [Seismic events in Chernobyl NPP region]. Geophysical journal, 19 (3), 3–15.
10. Starostenko, V. I. et. al. (2006). Seysmologichni doslidzhennia dlia bezpeky ChAES [Seismic research for Chernobyl NPP safety]. Natsionalna akademiya nauk Ukrainy – Chornobyliu. Available at: <http://nbuv.gov.ua/sites/default/files/msd/0604sta.pdf>
11. Kienzera, O. V. (2015). Seysmichna nebezpeka i zakhyst vid zemletrusiv [Seismic safety and protection from earthquakes]. Bulletin of National Academy of Sciences of Ukraine, 2, 44–57.
12. Skalozubov, V. I., Gablaya, T. V.; Skalozubov, V. I. (Ed.) (2013). Povyszenie ekologicheskoy bezопасnosti atomnoy energetiki Ukrainy v postfokusimskiy period. Kyiv, 120.
13. Poiasnitelnaya zapiska k Tekhnicheskomu rieshieniyu “Pro vyznachennia krytychnykh podiy, yaki maiut buty rozglianuti pry rozrobtci proektnoiy dokumentatsiy na vyvedennia z ekspluatatsiy vodoymyshcha-okholodzhuvacha Chornobylskoiy AES i vymog schodo radiatsiynykh kryteryiv kintsevogo stanu teritoryi” [Explanatory note on Technical decision “On determination of critical events that must be considered during project documents development for decommissioning of Chernobyl NPP coolant pool and requirements for radiation criterion of the final area state”] (2012).
14. Talierko, N. N., Gargier, Ye. K., Kuzmienko, A. G. (2013). Prognoznaya otsienka transgranichnogo pierienosa radionuklidov vsledstviye prokhozhdieniya smiercha nat vodoiemom-okhladieliem ChAES [Forecast of transboundary transport of radionuclides due to a tornado over Chernobyl NPP coolant pool]. Problems of Nuclear Powerplants safety and Chernobyl, 20.
15. Katalog smierchey, kotoryie nabliudalis na teritoryi Ukrainy v 1987–2003. [Catalogue of tornadoes observed in Ukraine in 1987–2003]. VMP Ukr GMTs.
16. Snitkovskiy, A. I. (1987). Smierchi na teritoryi SSSR [Tornadoes in USSR territory]. Meteorology and Hydrology, 9, 12–25.
17. Nakaz Derzhbudu Ukrainy No. 64 vid 21.10.2002 “Osnovni normatyvni vymogy ta rozrakhunkovi kharakterystyky smerchiv maydanchyka Chornobylskoiy AES” [The Decree of Ministry for Regional Development, Building and Housing of Ukraine No. 64 dated 21.10.2002 “Main regulations and estimate paramters of tornadoes for Chernobyl NPP site”] (2002). Derzhavnyi Komitet Ukrainy z Budivnytstva ta Arkhitektury.

Поступила (received) 18.09.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Моделирование процесса синхронного влияния смерча и землетрясения на водоем-охладитель Чернобыльской АЭС в процессе его осушения/ Ващенко В. Н., Кордуба И. Б., Лоза Е. А., Кризская Ю. М. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 33(1255). – С. 108–112.– Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2079-5459.

Моделирование процесса синхронного влияния смерча и землетрясения на водоем-охладитель Чернобыльской АЭС в процессе его осушения/ Ващенко В. М., Кордуба И. Б., Лоза Е. А., Кризская Ю. М. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 33(1255). – С. 108–112.– Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2079-5459.

Modeling of synchronous tornado and earthquake impact at Chernobyl NPP coolant pool during its drying/ Vashchenko V. M., Korduba I. B., Loza Ye. A., Kryzskaya Yu. M. // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 33 (1255).– P.108–112. – Bibliogr.:17. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ващенко Володимир Миколайович – доктор фізико-математичних наук, професор, Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління, вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корпус 2, м. Київ, Україна, 03035.

Ващенко Владимир Николаевич – доктор физико-математических наук, профессор, Государственная экологическая академия последипломного образования и управления, ул. Митрополита Василия Липковского, 35, корпус 2, г. Киев, Украина, 03035.

Vashchenko Volodymyr Mykolayovych – Dr. of Sci., professor, State Ecological Academy of Post-Graduate Education and Management, V.Lypkivskogo str., 35, bldg.2, Kyiv, Ukraine, 03035.

Кордуба Ірина Богданівна – аспірант, Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління, вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корпус 2, м. Київ, Україна, 03035.

Кордуба Ирина Богдановна – аспирант, Государственная экологическая академия последипломного образования и управления, ул. Митрополита Василия Липковского, 35, корпус 2, г. Киев, Украина, 03035.

Korduba Irina Bogdanivna – graduate student, State Ecological Academy of Post-Graduate Education and Management, V.Lypkivskogo str., 35, bldg.2, Kyiv, Ukraine, 03035.

Лоца Євген Анатолійович – доцент кафедри, Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління, вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корпус 2, м. Київ, Україна, 03035.

Лоца Евгений Анатольевич – доцент кафедры, Государственная экологическая академия последипломного образования и управления, ул. Митрополита Василия Липковского, 35, корпус 2, г. Киев, Украина, 03035.

Loza Yevhen Anatoliyovych – assistant professor, State Ecological Academy of Post-Graduate Education and Management, V.Lypkivskogo str., 35, bldg.2, Kyiv, Ukraine, 03035.

Кризська Юлія Михайлівна – аспірант, Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління, вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корпус 2, м. Київ, Україна, 03035.

Кризская Юлия Михайловна – аспирант, Государственная экологическая академия последипломного образования и управления, ул. Митрополита Василия Липковского, 35, корпус 2, г. Киев, Украина, 03035.

Kryzska Yuliia Mykhaylivna – graduate student, State Ecological Academy of Post-Graduate Education and Management, V.Lypkivskogo str., 35, bldg.2, Kyiv, Ukraine, 03035.

УДК 621.375:621.396.62

Т. Д. ГУЦОЛ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КРОВОТОКА ЖИВОТНЫХ ПРИ НАЛИЧИИ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ

Рассмотрена теоретическая модель кровотока в крупных кровеносных сосудах животных, учитывающая периодические пульсации давления в них, связанные с работой сердца, а также изменения просвета в них. Кровеносные сосуды представлены в виде однородных цилиндрических каналов с жесткими стенками, а кровь – в виде ньютоновской жидкости. Решение уравнений Навье-Стокса проведено в предположении, что пульсации давления имеют форму прямоугольных импульсов.

Ключевые слова: кровоток, кровеносный сосуд, переменное давление, составляющая скорости, уравнения Навье-Стокса, дифференциальные уравнения, ряд Фурье.

Розглянуто теоретичну модель течії крові у великих кровеносних судинах тварин, що враховує періодичні пульсації тиску в них, пов'язані з роботою серця, а також зміни просвіту в них. Кровеносні судини представлені у вигляді однорідних циліндричних каналів з жорсткими стінками, а кров – у вигляді ньютонівської рідини. Рішення рівнянь Нав'є-Стокса проведено в припущенні, що пульсації тиску мають форму прямокутних імпульсів.

Ключові слова: течія крові, кровеносна судина, змінний тиск, складова швидкості, рівняння Нав'є-Стокса, диференціальні рівняння, ряд Фур'є.

The subject of this article is a theoretical model of blood flow in large blood vessels of animals. Periodic pulsations of pressure, associated with the work of the heart, as well as changes in the lumen in the vessels are taken into account. Blood vessels are represented as uniform cylindrical channels with rigid walls, and blood – in the form of a Newtonian fluid. The solution of the Navier-Stokes equations is carried out on the assumption that pressure pulsations have the form of rectangular pulses. A longitudinal component of the blood flow velocity is obtained, which reflect the state of both the vessel and the possible deviations in the periodicity of pulsations.

A theoretical analysis shows possibility of the appearance of whole spectrum speeds in the pulsating blood stream. Accordingly, depending on the parameters of vessel such as diameter, presence of obstacles, blood clots, inflamed areas, one or another speeds and consequently, different levels of electromagnetic radiation will prevail. The results were used for realization of external thermal mapping of organism with the purpose of exposure of diseases and also research of the phenomena, related to affecting of external periodically changing factors, for example, electromagnetic fields on the bloodstream.

Keywords: blood flow, blood vessel, variable pressure, velocity component, Navier-Stokes equations, differential equations, Fourier series.

Введение. Вопросы динамики крови весьма существенны при составлении физиологического портрета животного. Изменения в кровотоке сопровождают практически любые патологии организма. Это

обусловило появление достаточного количества работ, посвященных данной проблеме. Однако их существенным недостатком является рассмотрение лишь

© Т. Д. Гуцол. 2017

стационарного случая. Это значительно ограничивает применение полученных результатов для проведения внешнего термокартирования организма с целью выявления заболеваний, а также исследования явлений, связанных с воздействием на кровоток внешних периодически изменяющихся факторов, например, электромагнитных полей.

Литературный обзор. Из литературных источников известно, что любые изменения факторов внутренней и внешней среды организма, в том числе и любые заболевания, немедленно сказываются на параметрах крови и кровеносной системы [1, 2]. В связи с этим данный вопрос подробно исследуется в целом ряде публикаций [3–5].

Однако существенным недостатком, на наш взгляд, является то, что здесь и в других работах получены результаты для стационарной задачи, то есть для кровотока, не зависящего от времени. Это значительно ограничивает применение полученных результатов в упомянутых работах. В частности, они не применимы для оценки явлений, связанных с воздействием на кровоток внешних периодически изменяющихся факторов, а также для дистанционного измерения температуры внутренних органов животных. Отсутствует в существующих публикациях и анализ спектрального состава пульсирующей крови в зависимости от деятельности сердечнососудистой системы.

Объект, цель и задачи исследований. Объект исследования. Процесс движения крови по сосудам животных под действием переменного давления.

Цель работы. Определение спектрального состава пульсирующей крови в зависимости от геометрических и ветеринарных характеристик сосудов, а также параметров пульсаций давления.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Решить уравнение кровотока с учетом пульсирующего давления в сосудах.
2. Проанализировать характер продольной составляющей скорости в зависимости от характеристик сосуда и параметров пульсаций.

Решение уравнения движения крови с учетом пульсаций давления в сосуде. Пусть имеется однородный цилиндрический канал с жесткими стенками радиуса R и длины L . Канал заполнен кровью, которую мы будем рассматривать как ньютоновскую жидкость [6]. На входе канала действует периодический источник давления.

В этом случае движение ньютоновской жидкости может быть описано с помощью уравнения Навье-Стокса [7]:

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\text{grad } P + \eta \Delta \vec{v}, \quad (1)$$

где $\vec{v}$ – скорость кровотока; P – приложенное на входе канала давление; ρ – плотность крови; η – вязкость крови.

Уравнение (1) является нелинейным, поскольку:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \text{div} \vec{v}.$$

Однако тот факт, что движение крови в сосудах является ламинарным, дает право считать слагаемое $\vec{v} \text{div} \vec{v} = 0$ и тем самым линеаризовать задачу. Кроме того, ламинарность потока приводит к тому, что скорость $\vec{v}$ имеет лишь одну компоненту v_z .

С учетом сказанного выше уравнение Навье-Стокса в цилиндрической системе координат приобретает вид:

$$\begin{cases} \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} = 0; \\ \frac{1}{\rho} \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \varphi} = 0; \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right], \end{cases} \quad (2)$$

где ν – кинетическая вязкость, равная $\frac{\eta}{\rho}$.

Принимая во внимание, что течение крови является соленоидальным, то есть $\text{div} \vec{v} = 0$, приходим к выводу, что:

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (3)$$

Используя выражение (3) совместно с системой (2), а также учитывая осесимметричность задачи $\left(\frac{\partial v_z}{\partial \varphi} = 0 \right)$ и абсолютную упругость жидкости, в связи

с чем $\frac{\partial P}{\partial z} = -\frac{\Delta P}{L}$, где ΔP – перепад давления в кровотоке между концом и началом кровеносного сосуда заданной длины L , получим окончательно уравнение для v_z в виде:

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} - \nu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{L}. \quad (4)$$

По своему характеру выражение (4) является неоднородным дифференциальным уравнением с однородными начальными и граничными условиями:

$$v_z(r, 0) = 0; \quad v_z(R, t) = 0. \quad (5)$$

Правая часть уравнения (4) содержит величину ΔP , представляющую собой перепад давления ΔP_0 в кровеносном сосуде. В реальной ситуации изменение этой величины во времени носит импульсный характер.

С достаточной степенью точности можно считать, что эти импульсы имеют крутой фронт и могут рассматриваться как прямоугольные импульсы с длительностью t_2 и периодом повторения t_1 . При этом отношение:

$$t_2/t_1 = \theta,$$

с одной стороны, является величиной, обратной скважности следования импульсов перепада давления, а с другой стороны учитывает эластичность кровеносных сосудов.

Для решения уравнения (4) разложим функцию $\Delta P(t)$ в ряд Фурье [8] по косинусам:

$$\Delta P(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_1^{\infty} a_k \cos \frac{2k\pi}{t_1} t. \quad (6)$$

Здесь

$$a_0 = \frac{2}{t_1} \int_{-\frac{t_1}{2}}^{\frac{t_1}{2}} \Delta P(t) dt = 2 \frac{t_2}{t_1} \Delta P_0, \quad (7)$$

$$a_k = \frac{2}{t_1} \int_{-\frac{t_1}{2}}^{\frac{t_1}{2}} \Delta P(t) \cos \left(\frac{2k\pi}{t_1} t \right) dt = \frac{2\Delta P_0}{k\pi} \sin \left(k\pi \frac{t_2}{t_1} \right). \quad (8)$$

С учетом того, что $\frac{t_2}{t_1} = \theta$, а $\frac{2\pi}{t_1} = l$, окончательно получим:

$$\Delta P(t) = \Delta P_0 \left(\theta + \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(k\pi\theta)}{k} \cos(klt) \right) \quad (9)$$

Для решения уравнения (4) воспользуемся методом разделения переменных [9]. Для этого положим:

$$v_z = \sum_{n=1}^{\infty} R_n(r) T_n(t), \quad (10)$$

а правую часть (4) разложим по собственным функциям $R_n(r)$:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{L} = \frac{1}{\rho L} \sum_{n=1}^{\infty} \Delta P_n(t) R_n(r) \quad (11)$$

Подставляя (10) и (11) в (4) и учитывая свойство ортогональности собственных функций, получим для n -ой гармоники выражение:

$$\frac{T'_n(t)}{T_n(t)} - \frac{1}{\rho L} \frac{\Delta P_n(t)}{T_n(t)} = \nu \left(\frac{R''_n(r)}{R_n(r)} + \frac{1}{r} \frac{R'_n(r)}{R_n(r)} \right), \quad (12)$$

что приводит к системе:

$$R''_n(r) + \frac{1}{r} R'_n(r) + \frac{1}{\nu} \lambda_n R_n(r) = 0, \quad (13)$$

$$T'_n(t) + \lambda_n T_n(t) = \frac{1}{\rho L} \Delta P_n(t), \quad (14)$$

где λ_n – собственные значения уравнения (13).

$$\text{Полагая } x = \sqrt{\frac{\lambda_n}{\nu}} r, \text{ а } y_n(x) = R_n(r) = R_n \left(\sqrt{\frac{\nu}{\lambda_n}} x \right),$$

приведем (13) к уравнению Бесселя первого порядка:

$$y''_n(x) + \frac{1}{x} y'_n(x) + y_n(x) = 0. \quad (15)$$

Решением этого уравнения будет линейная комбинация цилиндрических функций первого и второго рода:

$$y_n(x) = A_1 J_0(x) + A_2 N_0(x). \quad (16)$$

Из условия ограниченности решения на оси, то есть $y_n(0) \neq \infty$, имеем $A_2 = 0$. Кроме того, из граничного условия $v_z(R, t) = 0$ получаем:

$$J_0 \left(\sqrt{\frac{\lambda_n}{\nu}} R \right) = 0.$$

Корнем этого уравнения является $\mu_n^{(0)} = \sqrt{\frac{\lambda_n}{\nu}} R$.

Отсюда собственные значения:

$$\lambda_n = \nu \left(\frac{\mu_n^{(0)}}{R} \right)^2$$

или, обозначая $\frac{\mu_n^{(0)}}{R} = \alpha_n^{(0)}$, получим:

$$\lambda_n = \nu \left(\alpha_n^{(0)} \right)^2. \quad (17)$$

Решим уравнение (14). С учетом (17) оно примет вид:

$$T'_n(t) + \nu \left(\alpha_n^{(0)} \right)^2 T_n(t) = \frac{1}{\rho L} \Delta P_n(t), \quad (18)$$

причем из начального условия $v_z(r, 0) = 0$ следует, что $T_n(0) = 0$.

Будем искать решение в виде:

$$T_n(t) = \int_0^t e^{-\nu \left(\alpha_n^{(0)} \right)^2 (t-\tau)} \frac{1}{\rho L} \Delta P_n(\tau) d\tau, \quad (19)$$

при этом $\Delta P_n(t)$ с учетом (11) имеет вид:

$$\Delta P_n(t) = \frac{2\Delta P(t)}{\mu_n^{(0)} J_1(\mu_n^{(0)})}. \quad (20)$$

Подставляя (20) в (19) и учитывая (9), получим:

$$T_n(t) = \frac{2}{\rho L \mu_n^{(0)} J_1(\mu_n^{(0)})} \int_0^t e^{-\nu \left(\alpha_n^{(0)} \right)^2 (t-\tau)} \Delta P_0 \left(\theta + \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin k\pi\theta}{k} \cos klt \right) d\tau. \quad (21)$$

Вычисление интеграла дает окончательное выражение для $T_n(t)$:

$$T_n(t) = \frac{2\Delta P_0}{\rho L \mu_n^{(0)} J_1(\mu_n^{(0)})} \left\{ \frac{\theta}{\nu \left(\alpha_n^{(0)} \right)^2} \left[1 - e^{-\nu \left(\alpha_n^{(0)} \right)^2 t} \right] + \right. \\ \left. + \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(k\pi\theta)}{k} \left[\frac{\sin(klt) + \frac{\nu \left(\alpha_n^{(0)} \right)^2}{kl} \left[\cos(klt) - e^{-\nu \left(\alpha_n^{(0)} \right)^2 t} \right]}{1 + \left[\frac{\nu \left(\alpha_n^{(0)} \right)^2}{kl} \right]^2} \right] \right\}. \quad (22)$$

Поскольку рассматриваются процессы при $t \rightarrow \infty$, то переходные процессы в расчет не принимаются, поэтому:

$$T_n(t) = \frac{2\Delta P_0}{\rho L \mu_n^{(0)} J_1(\mu_n^{(0)})} \left\{ \frac{\theta}{v(\alpha_n^{(0)})^2} + \frac{1}{kl} \left[\sin(klt) + \frac{v(\alpha_n^{(0)})^2}{kl} \cos(klt) \right] \right\} + \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(k\pi\theta)}{k} \frac{1}{1 + \left[\frac{v(\alpha_n^{(0)})^2}{kl} \right]^2} \cdot (23)$$

Ряд в (23) является быстро сходящимся, поэтому для описания процессов, происходящих при движении крови, можно ограничиться первыми двумя-тремя гармониками разложения $\Delta P(t)$. Что касается разложения по собственным функциям, то здесь достаточно взять $n=1$. При $n>1$ непосредственная подстановка корней функции Бесселя нулевого порядка и наиболее характерных размеров кровеносных сосудов в (23) показывает пренебрежимо малость $T_2(t)$, $T_3(t)$ и т.д. по сравнению с $T_1(t)$.

Учитывая вышесказанное, получаем выражение для продольной составляющей скорости кровотока v_z [10]:

$$v_z = \frac{2\pi\Delta P_0}{\rho L} \frac{J_0(\alpha_1^{(0)} r)}{\mu_1^{(0)} J_1(\mu_1^{(0)})} \left\{ \frac{\theta}{v(\alpha_1^{(0)})^2} + \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^3 \frac{\sin(k\pi\theta)}{k} \frac{1}{1 + \left[\frac{v(\alpha_1^{(0)})^2}{kl} \right]^2} \frac{\sin(klt) + \left(\frac{1}{kl} \right)^2 v(\alpha_1^{(0)})^2 \cos(klt)}{1 + \left[\frac{v(\alpha_1^{(0)})^2}{kl} \right]^2} \right\}. \quad (24)$$

Первое слагаемое в фигурных скобках соответствует движению крови при постоянном давлении на входе кровеносного сосуда. Оно дает результат, сходный с решением задачи Пуазейля о течении вязкой жидкости в цилиндрическом канале под влиянием постоянного перепада давлений, то есть параболический профиль скоростей в поперечном сечении сосуда. Второе слагаемое дает поправку, связанную с пульсацией крови. Его появление означает, что профиль скоростей кровотока будет совершать периодические колебания около среднего значения с некоторой частотой.

Выводы. При воздействии внешнего механического возмущения, связанного с собственным электромагнитным полем, промодулированным с частотой пульсации давления, возникает резонансный процесс и одним из следствий этого явления будет увеличение скорости кровотока и возможность столкновения форменных элементов крови, несущих электрический заряд.

Список литературы:

1. Педли, Т. Гидродинамика крупных кровеносных сосудов [Текст] / Т. Педли. – М.: Мир, 1983. – 400 с.
2. Каро, К. Механика кровообращения [Текст] / К. Каро, Т. Педли. – М.: Мир, 1981. – 624 с.
3. Ремизов, А. Н. Медицинская и биологическая физика [Текст]: учеб. / А. Н. Ремизов, А. Г. Максина, А. Я. Потапенко. – М.: Дрофа, 2003. – 560 с.
4. Ивахненко, Е. В. Динамика электролитов плазмы крови и мочи на этапах наблюдений при различных типах инфузионной терапии у пациентов с инфекционно-токсическим шоком [Текст] / Е. В. Ивахненко // Медицина неотложных состояний. – 2015. – № 4. – С. 28–31.
5. Гемостаз. Физиологические механизмы, принципы диагностики основных форм геморрагических заболеваний [Текст] / под ред. Н. Н. Петрищева, Л. П. Папаян. – СПб.: Изд-во СПбГМУ, 1999. – 115 с.
6. Бейер, В. А. Краткое пособие по гематологии [Текст] / В. А. Бейер. – Л.: Медицина, 1973. – 231 с.
7. Бэтчелор, Дж. Введение в динамику жидкостей [Текст] / Дж. Бэтчелор. – М.: Мир, 1973. – 760 с.
8. Привалов, И. И. Ряды Фурье [Текст]: учеб. / И. И. Привалов. – М.: Юрайт, 2016. – 164 с.
9. Никольский, В. В. Электродинамика и распространение радиоволн [Текст] / В. В. Никольский, Т. И. Никольская. – М.: Либроком, 2012. – 544 с.
10. Березовский, В. А. Биофизические характеристики тканей человека [Текст] / В. А. Березовский, Н. Н. Колотило. – К.: Наукова думка, 1990. – 224 с.

Bibliography

1. Pedli, T. (1983). *Gidrodinamika krupnykh krovenosnykh sosudov* [Hydrodynamics of large blood vessels]. Moscow: Mir, 400.
2. Karo, K., Pedli, T. (1981). *Mekhanika krovoobrashcheniya* [Mechanics of blood circulation]. Moscow: Mir, 624.
3. Remizov, A. N., Maksina, A. G., Potapenko, A. Ya. (2003). *Meditinskaya i biologicheskaya fizika* [Medical and Biological Physics]. Moscow: Drofa, 560.
4. Ivakhnenko, Ye. V. (2015). *Dinamika elektrolitov plazmy krovi i mochi na etapakh nablyudeniy pri razlichnykh tipakh infuzionnoy terapii u patsientov s infektsionno-toksicheskim shokom* [Dynamics of plasma and urine electrolytes at the observation stages for various types of infusion therapy in patients with infectious-toxic shock]. *Emergency medicine*, 4, 10–14.
5. Petrishchev, N. N., Papayan, L. P. (Eds.) (1999). *Gemostaz. Fiziologicheskie mekhanizmy, printsipy diagnostiki osnovnykh form gemorragicheskikh zabolevaniy* [Hemostasis. Physiological mechanisms, principles of diagnostics of the main forms of hemorrhagic diseases]. Saint Petersburg: State Medical University, 115.
6. Beyer, V. A. (1973). *Kratkoe posobie po gematologii* [Short manual on hematology]. Leningrad: Meditsina, 231.
7. Batchelor, G. (1973). *Vvedenie v dinamiku zhidkostey* [Introduction to the dynamics of liquids]. Moscow: Mir, 760.
8. Privalov, I. I. (2016). *Ryady Fure* [Fourier series]. Moscow: Yurayt, 164.
9. Nikolskiy, V. V., Nikolskaya, T. I. (2012). *Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln* [Electrodynamics and propagation of radio waves]. Moscow: Librokom, 544.
10. Berezovskiy, V. A., Kolotilov, N. N. (1990). *Biofizicheskie kharakteristiki tkaney cheloveka* [Biophysical characteristics of human tissues]. Kyiv: Naukova dumka, 224.

Поступила (received) 16.09.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Теоретичний аналіз кровотоку тварин за наявності пульсацій тиску/ Гуцол Т. Д. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 33(1255). – С. 112–116. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Теоретический анализ кровотока животных при наличии пульсаций давления/ Гуцол Т. Д. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 33(1255). – С. 112–116. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Theoretical analysis of blood stream of animals at presence of pulsations of pressure/ Hutsol T. // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 33 (1255). – P.112–116. – Bibliogr.:10. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гуцол Тарас Дмитрович – кандидат технічних наук, доцент, Подольський державний аграрно-технічний університет, ул. Шевченко, 13, г. Каменец-Подольський, Хмельницька обл., Україна, 32300, e-mail: tte.nniekt@ukr.net.

Гуцол Тарас Дмитриевич – кандидат технічних наук, доцент, Подольський державний аграрно-технічний університет, вул. Шевченко, 13, г. Каменец-Подольський, Хмельницька обл., Україна, 32300, e-mail: tte.nniekt@ukr.net.

Hutsol Taras – PhD, associate professor, Podolsky state agrarian and technical university, st. Shevchenko, 13, Kamyanets-Podolsky, Khmelnytsky region, Ukraine, 32300, e-mail: tte.nniekt@ukr.net.

УДК 504.054

С. А. ГРИНЬ, А. С. БОСЮК, О. А. ЛАПТИЙ

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ МЕТОДОВ ДОБЫЧИ СЛАНЦЕВОГО ГАЗА В ХАРЬКОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Рассматриваются экологические проблемы методов добычи сланцевого газа в Харьковской области. Для выявления проблем было рассмотрено виды добычи газа на Слобожанщине и в странах с развитой экономикой. Фрекинг имеет ряд недостатков: загрязнение подземных горизонтов, воздействие на поверхностные водоемы, сейсмические риски, выбросы. В ходе исследования и сравнительного анализа методов извлечения залежей сланцевого газа, установлено ряд преимуществ инновационных и модернизированных способов над методом гидроразрыва пласта. Были предложены пути решения выявленных проблем, которые заключаются в оптимизации процессов добычи.

Ключевые слова: сланцевый газ, фрекинг, гидроразрыв пласта, окружающая природная среда, плес, недра.

Розглядаються екологічні проблеми методів видобутку сланцевого газу в Харківській області. Для виявлення проблем було розглянуто способи видобутку газу на Слобожанщині та в країнах з розвинутою економікою. Фрекінг має ряд недоліків: забруднення підземних горизонтів, вплив на поверхневі води, сейсмічні ризики, викиди. Шляхом дослідів та порівняльного аналізу методів видобутку покладів сланцевого газу, встановлено ряд переваг інноваційних та модернізованих методів над способом гідророзриву пласта. Було запропоновано шляхи вирішення існуючих проблем, які полягають в оптимізації процесу видобутку.

Ключові слова: сланцевий газ, фрекінг, гідророзрив пласта, навколишнє природне середовище, плес, надра.

The ecological problems of the methods of extraction of shale gas in the Kharkov region are considered. To identify problems, the types of gas production in Slobozhanshchina and in advanced economies were considered. Frecking has a number of shortcomings: pollution of underground horizons, impact on surface water bodies, seismic risks, emissions. In the course of the study and a comparative analysis of the methods of extraction of shale gas deposits, a number of advantages of innovative and modernized methods over the hydraulic fracturing method have been established. Ways were proposed to solve the identified problems, which are to optimize the production processes. Ecological problems of methods of extraction of shale gas in the Kharkov region consist in: pollution of underground horizons, impact on surface water bodies, seismic risks, emissions.

The extraction methods in the region are undeveloped and are a threat to the natural environment. To optimize production processes and to avoid anthropogenic catastrophe, it is necessary to take into account the experience of solving similar problems by other countries, such as Japan, China, Saudi Arabia and the United States. Ukraine has a reserve of minerals and needs to rationalize their extraction and further use.

It is necessary to realize that environmental problems always accompany the sectors of heavy metallurgy, mining, oil refining and gas production. These problems have a solution, but are accompanied by serious economic costs.

Keywords: shale gas, frecking, hydraulic fracturing of the reservoir, surrounding natural environment, shattering, subsoil.

Введение. Актуальность данной проблемы заключается в том, что современная технология добычи сланцевого газа в Харьковской области может привести к пагубному воздействию на состояние окружающей природной среды. Угрозой для Слобожанщины являются методы извлечения полезного ископаемого из земных недр, такие как фрекинг. Данный способ представляет собой технологию добычи газа, которая

позволяет увеличить количество добываемого сырья путём гидравлического разрыва пласта (ГРП). Эффект гидроудара осуществляется за счет закачивания в скважину воды, песка, химикатов, после чего происходит разрыв «карманов», в которых хранится сырьё. В результате чего, целевой продукт поднимается на поверхность.

© С. А. Гринь, А. С. Босюк, О. А. Лаптий. 2017

Добыча сланцевого газа путем фрекинга. Рассмотрим определение понятия сланцевый газ. Сланцевый газ – это природный газ, который добывается из сланцевых пород и состоит в основном из метана. Горючие сланцы образуют на территории Украины мощные залежи около 600 млрд тонн, на территории Черкасской, Волынской и Харьковской области. Вышеупомянутый метод добычи газа является наиболее распространенным.

Для получения газа необходимо провести бурение вертикальной скважины с системой горизонтальных разветвлений по глубине, а также гидроразрыв пласта и продвинутое сейсмическое моделирование. Глубина залегания газоносных сланцев, как и традиционных месторождений нефти и газа, находится в очень широком диапазоне от 150 до 4 100 м, при этом мощности пластов находятся в диапазоне от 6 до 600 м. Высокая плотность породы и как следствие низкие фильтрационно-емкостные свойства предопределяют необходимость бурения большого количества горизонтальных скважин и применение технологии гидро-

разрыва пласта (ГРП). На разрабатываемых полях применяется от 5 до 12 стадий ГРП. Длина горизонтального ствола варьируется от 700 до 3 000 м. Данные факторы существенно влияют на стоимость скважины и себестоимость добываемого газа.

При гидроразрыве расходуется очень большое количество воды – от 4 до 12 тысяч тонн (на один гидроудар). Вода может использоваться вторично, но этот факт не уменьшает негативное влияние на прилегающие территории и акватории. Состав раствора для гидроудара может включать до 600 наименований различных химических соединений. Конечно, в растворе содержатся и обычные соли, но в список входят и сильные яды, в том числе кислоты, тяжелые металлы, мышьяк, толуол, бензол и т.д.

Фрекинг сопряжен с возможным ущербом для окружающей среды: загрязнение подземных питьевых вод, применение химикатов для гидроразрыва, уничтожение существующего почвенного слоя, нарушение гидродинамического режима в недрах, что может вызвать землетрясение.

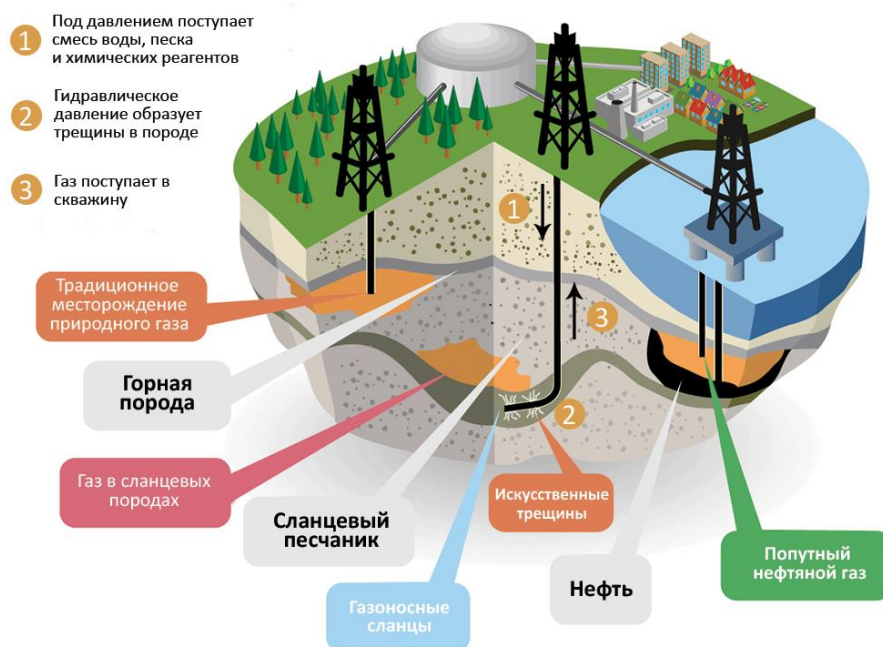


Рис. 1 – Способ добычи сланцевого газа – гидроразрыв пласта

Есть мнение, что технология совершенно безопасна, однако, результаты мониторинга окружающей природной среды свидетельствуют об обратном. Со слов экологов, в результате гидроразрывов вода под большим давлением вместе со всеми содержащимися в ней вредными химическими веществами попадает в грунтовые воды и может быть использована не только в домашнем водопроводе, но и как источник питьевой воды. Помимо загрязнения подземных вод существует такая проблема как явные загрязнения территорий вокруг буровых вышек (отстойники с ядовитой водой).

Исследования показывают, что вблизи газовых скважин в районах активной добычи сланцевого газа концентрация метана в подпочвенных водах значительно выше, чем в районах, где нет деятельности по бурению и гидроразрыву пласта. Были даже известны случаи, когда вода, взятая из источников с высокой

концентрацией в Пенсильвании, могла «гореть» [7]. Помимо метана в подпочвенных водах были обнаружены также этан, пропан и другие углеводороды, которые не могут иметь биогенную природу.

Преимущества добычи сланцевого газа в отличие от крупнейших традиционных месторождений – близость к центрам потребления. Но этот же фактор накладывает дополнительные ограничения по экологии. Добыча сланцевого газа сталкивается и с серьезными экологическими ограничениями ввиду большого охвата площадей и значительного и интенсивного нарушения целостности недр.

Среди основных экологических проблем, приписываемых разработке газосланцевых пластов, можно выделить следующие:

- загрязнение подземных горизонтов;
- воздействие на поверхностные водоемы;

- сейсмические риски;
- выбросы.

Загрязнение подземных горизонтов. Загрязнение может происходить не только углеводородами сланцевого газа, но и другими веществами, содержащимися, в частности, в жидкости гидроразрыва. Так, по данным Массачусетского технологического института, в 43 случаях загрязнения воды в 2010 г. в США в ходе бурения 20 000 скважин и гидроразрыва пласта 48 % случаев были связаны с загрязнением подземных вод компонентами жидкости гидроразрыва пласта или сланцевым газом, 33 % — с разливом загрязненных вод на буровой площадке, 10 % — с утечками при транспортировке сточных вод и аварийными выбросами вод обратного притока, 9 % — с последующими операциями с удаленными сточными водами [9].

Геологи подсчитали, что в диапазоне между питьевыми водоносными горизонтами и газонасыщенными сланцами находятся по меньшей мере 9 слоев непроницаемых пород, каждый из которых выступает в качестве барьера для вертикального распространения любых веществ, как газа, так и жидкостей. Поскольку прямое загрязнение подземных источников питьевой воды через трещины, образовавшиеся в результате проведения ГРП, потребуют распространения жидкости для ГРП через сотни метров вверх за границы целевого формирования через многие слои других пород, такое загрязнение весьма маловероятно [1].

Воздействие на поверхностные водоемы. Экологические проблемы методов добычи сланцевого газа в Харьковской области заключаются в заборе из водоемов или других источников водоснабжения больших объемов воды, а также, с загрязнением поверхностных вод веществами, содержащимися в жидкости обратного притока, даже если эта жидкость подвергается предварительной очистке [8].

Существенной проблемой для экологического состояния региона является время закачки жидкости в пласт и процесс гидроразрыва, в результате которого происходит разрушение горных пород и вымывание из них различных химических веществ. Исходные компоненты жидкости гидроразрыва и растворенные, взвешенные вещества оказываются на поверхности. Жидкость обратного притока со временем откачивается с места разработки и направляется на очистку. В ходе процесса откачки при транспортировке по трубопроводам возможны проливы жидкости, что влечет за собой загрязнение почвы или поверхностных водоемов. Так как жидкость обратного притока содержит органические и неорганические вещества, многие из которых обладают токсичностью или мутагенным действием, попадание смеси данных веществ в почву или водоемы неизбежно приводит к гибели или деградации природных экосистем [11].

Состав жидкостей для ГРП в каждом случае будет индивидуален по составу химических реагентов. Эти вещества могут быть опасными при достаточной концентрации и, исходя из этого, необходимо позволить регулирующим органам и специалистам по здравоохранению производить тестирование воды и почвы. В настоящее время, ряд сервисных компаний проводят исследования по улучшению состава жидкостей

для ГРП, что способствует снижению экологических рисков. С этой же целью, для хранения и очистки жидкостей, необходимо использование закрытых резервуаров с постоянной проверкой герметичности всех соединений и целостности самих резервуаров для избегания разливов вредных веществ на поверхность.

Сейсмические риски. Не менее серьезным риском, связанным с добычей сланцевого газа, является возможность того, что бурение скважин и проведение ГРП может привести к возникновению низкомagnitudeных землетрясений [1].

В 2008 и 2009 годах в городе Клебурн, штат Техас, произошли несколько землетрясений, магнитудой до 3,3 баллов по шкале Рихтера. За всю историю существования, в этом городе никогда не были зарегистрированы землетрясения, исходя из этого, некоторые жители предположили, что это напрямую связано с методами добычи сланцевого газа. Исследования, проведенные сейсмологами, не нашли убедительной связи между проведением ГРП и этими землетрясениями. В то время как процесс ГРП сопровождается большим количеством микросейсмических событий (микроземлетрясениями), обнаружить их следы на поверхности практически невозможно. От проведения столь частых операций ГРП и способности сланцев легко расщепляться на отдельные пластины, могут возникнуть техногенные катастрофы [1].

Выбросы. Выбросы, связанные с бурением скважин в зоне высоких давлений и с закачкой под давлением жидкостей для ГРП, можно рассмотреть на примере скважин в Пенсильвании и Западной Вирджинии, где во время буровых работ на газосланцевом плее Marcellus оправдались общественные и экологические риски. Операторы сообщили, что выброс произошел, по причине неисправности оборудования, не рассчитанного на столь высокое давление. На глубине порядка 300 м, в заброшенной угольной шахте, буровики столкнулись с карманом метана, а противоподающее оборудование еще не было установлено. Такие катастрофы, подчеркивают потребность в высоком уровне профессионализма рабочего персонала в любых ситуациях [10].

Министерство экологии и природных ресурсов Украины осуществляет наблюдение за состоянием поверхностных и подземных вод, атмосферного воздуха, ландшафтов. По данным мониторинга, в Харьковской области одним из наиболее серьезных загрязнителей атмосферного воздуха является ПАО «Укргаздобыча» филиал ГПУ «Шебелинкагаздобыча». По сводке статистических данных, в 2015 году выбросы предприятия (диоксидов серы, оксидов азота, оксидов и диоксидов углерода, метана, неметановых легких органических соединений и веществ в виде суспензированных твердых частиц) составил 4,58 тыс. тонн.

Модернизация гидроразрыва пласта. Появление новых технологий подстегнуло и усовершенствование традиционного фрекинга. Разные страны и компании находят свои технологические решения в усовершенствовании гидроразрыва пласта (ГРП). Например, в Японии исследовательская команда из Киотского университета предложила вместо воды использовать углекислый газ. Это не только экологично

(позволяет бороться с глобальным потеплением), но и экономно – происходит увеличение коэффициента извлечения газа благодаря разрыву породы газом на более мелкие части [12].

В Канаде компания GasFrac предложила рынку свой метод осуществления гидроразрыва пласта. Его суть заключается в замене воды гелием, содержащим пропан. Этот элемент уже содержится в грунте и действует намного мягче на окружающую среду, чем другие химические вещества, используемые в ГРП.

В США энергоконцерн Halliburton сосредоточился на системе очистки воды CleanWave. Она удаляет вредные вещества из использованной в ГРП воды путем положительно заряженных ионов. Еще одно предложение от Halliburton – система мембранной дистилляции – повторного использования воды в гидроразрыве пласта без смешивания с пресной водой.

В Китае корпорация Reconn Technology сообщила о создании усовершенствованной технологии ГРП, позволяющей работать в более сложных геологических условиях и снизить затраты на гидроразрыв.

В течение нескольких лет в ГРП используется инновационный способ подачи керамического пропанта в пласт. Он непрерывно подается во время осуществления гидроразрыва и полностью заполняет образовавшуюся от ГРП трещину. В случае с использованием кластерной технологии пропант подается в скважину попеременно со специальным синтетическим волокном. Это дает возможность создавать каналы внутри трещины и, в свою очередь, сокращать на 40–50 % количество пропанта для гидроразрывов. При этом стоимость ГРП удешевляется в два–три раза, а производственная и экономическая активность значительно повышается.

Основным полигоном для новой технологии является Саудовская Аравия. Учитывая, что в Саудовской Аравии вода – один из самых дефицитных товаров, новый метод рассчитан именно на нее. В этой стране главным вызовом для специалистов–модернизаторов ГРП является добыча углеводородов из резервуаров трещинного типа, так называемых карбонатных пластов. В подобных условиях, по некоторым данным, находится около 60 % мировых нефтяных залежей и около 40 % газовых.

Ранее добыча углеводородов в карбонатных пластах велась при помощи интенсификации – закачки в скважину раствора соляной кислоты (85 %), который просачивался вглубь пласта и разветвлялся, оставляя заметные следы. Часто при таком подходе раствор не добирался до нужных резервуаров с углеводородами. При этом проблемы в Саудовской Аравии с ГРП в целом идентичны с теми, перед которыми стоят и другие страны. Подчеркнем, что стоимость применения технологии гидроразрыва пласта становится малорентабельной при нынешних ценах на нефть.

Суть метода добычи углеводородов компанией Fishbones состоит в установлении труб со встроенными иглами в горизонтальные и вертикальные скважины и соединение их в единую систему. Когда начинается закачивание раствора кислоты в скважину, давление жидкости толкает иглы вглубь породы. Глубина прохода игл составляет около 12 м практически во

всех направлениях от основной скважины. Таким способом в породе создаются небольшие туннели, которые называют боковыми стволами. Именно эти боковые стволы в сумме с основной скважиной создают подобие «рыбьего скелета». Именно по этим туннелям, столь похожим на рыбы кости, позже и происходит выкачка углеводородов.

Проталкивая специальную жидкость внутрь карбонатного пласта с помощью боковых туннелей, технология Fishbones создает контакт кислоты с большим количеством естественных трещин в самой породе. Именно целенаправленное создание боковых стволов и является инновацией. Она позволяет уменьшить затраты и усилия для достижения нужных пластов. Важным является полный контроль направления и давления при подаче жидкости в скважину.

Подход Fishbones к модернизации технологии ГРП фундаментально отличается от вышеупомянутых методов. Эффективный и точечный гидроразрыв пласта, в случае успеха технологии Fishbones, основанный на радикальном уменьшении затрат жидкости и себестоимости самого ГРП, вполне может стать новой основой для запуска следующих волн «сланцевой революции» [2].

По состоянию на конец 2011 г. МЭА оценивает ресурсы технически извлекаемого нетрадиционного газа в мире в 328 трлн.куб.м, включая 200 трлн.куб.м сланцевого газа [5].

Предотвращение экологических рисков. Для предотвращения экологических рисков, в первую очередь необходимо выделить основные проблемы методов добычи сланцевого газа не только в Харьковской области, но и во всех странах, в целом [6].

Во–вторых, следует учесть опыт решения подобных проблем в странах с развитой экономикой.

Использование углекислого газа вместо воды является усовершенствованным методом фрекинга. Он не только безопасен для экологического состояния окружающей природной среды (позволяет бороться с глобальным потеплением), но и экономически оправдан.

Метод осуществления гидроразрыва пласта, суть которого заключается в замене воды гелием, содержащим пропан, действует намного мягче на окружающую среду, чем другие химические вещества, используемые в ГРП [3].

Существует решение, сосредоточенное на системе очистки воды. Она удаляет вредные вещества из использованной в ГРП воды путем положительно заряженных ионов. Еще одно предложение – система мембранной дистилляции – повторного использования воды в гидроразрыве пласта без смешивания с пресной водой.

Выводы. Экологические проблемы методов добычи сланцевого газа в Харьковской области заключаются в: загрязнении подземных горизонтов, воздействии на поверхностные водоемы, сейсмических рисках, выбросах. Методы добычи в регионе являются неусовершенствованными и несут угрозу для окружающей природной среды.

Для оптимизации процессов добычи и во избежание техногенной катастрофы необходимо учесть

опыт решения подобных проблем другими странами, такими как Япония, Китай, Саудовская Аравия и США.

Украина имеет запас полезных ископаемых и нуждается в рационализации их извлечения и дальнейшего использования.

Необходимо осознание того, что экологические проблемы всегда сопутствуют отраслям тяжелой металлургии, добычи полезных ископаемых, нефтепере-

рабатывающим и газодобываемым производствам. Эти проблемы имеют решение, но сопровождаются серьезными экономическими затратами.

Население Украины, в целом, и правительство, в частности, должны взять на себя ответственность за будущее страны и ввести экологическую стандартизацию и ответственность в области добычи газа, чтобы не допустить глобальных последствий для экологии и экономики [4].

Список литературы:

1. Сорокин, С. Н. Основные проблемы и перспективы добычи сланцевого газа [Электронный ресурс] / С. Н. Сорокин, А. А. Горячев // Режим доступа: https://www.eriras.ru/files/Sorokin_Goryachev_OEPEE_slanec.pdf
2. Рукомед, Р. Сланцевая революция: второе дыхание [Электронный ресурс] / Р. Рукомед // Терминал. – 2015. – Режим доступа: <http://oilreview.kiev.ua/2015/11/01/slancevaya-revoluciya-vtoroe-dyhanie/>
3. Мельникова, С. Первые 5 лет «сланцевой революции»: что мы теперь знаем наверняка? [Текст] / С. Мельникова, С. Сорокин, А. Горячева, А. Галкина. – Москва, 2012. – 48 с. – Режим доступа: https://www.eriras.ru/files/slancjevyj_gaz_5_ljet_nojabr_2012.pdf
4. Белов, С. В. Охрана окружающей среды [Текст] / С. В. Белов, Ф. А. Барбинов, А. Ф. Козьяков; ред. С. В. Белов. – М.: Высшая школа, 1991. – 320 с.
5. Буктышнов, А. Д. Природа мира: леса [Текст] / А. Д. Буктышнов, Б. И. Грошев, Г. В. Крылов. – М.: Мысль, 1981. – 316 с.
6. Никаноров, А. М. Глобальная экология [Текст]: уч. пос. / А. М. Никаноров, Т. А. Хоружая. – М.: Изд. ПРИОР, 2000. – С. 85–90.
7. Somova, Y. Investigation of surface water quality in magnitogorsk industrial area for the environmental estimation of technogenic watercourse state [Text] / Y. Somova, E. Degodia, E. Kasatkina, A. Peryatinskiy, A. Kudryashov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 3, Issue 10 (87). – P. 74–81. doi: [10.15587/1729-4061.2017.102374](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.102374)
8. Osborn, S. G. Methane contamination of drinking water accompanying gas-well drilling and hydraulic fracturing [Text] / S. G. Osborn, A. Vengosh, N. R. Warner, R. B. Jackson // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2011. – Vol. 108, Issue 20. – P. 8172–8176. doi: [10.1073/pnas.1100682108](https://doi.org/10.1073/pnas.1100682108)
9. Lechtenbohmer, S. Impacts of shale gas and shale oil extraction on the environment and on human health [Text] / S. Lechtenbohmer et. al. – ENVI, 2011. – 91 p.
10. Schein, G. Ultra Lightweight Proppants: Their Use and Application in the Barnett Shale [Text] / G. Schein, P. Carr, P. Canan, R. Ray // Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – 2004. doi: [10.2523/90838-ms](https://doi.org/10.2523/90838-ms)
11. Lustgarten, A. Buried Secrets: Is Natural Gas Drilling Endangering U.S. Water Supplies? [Text] / A. Lustgarten. – New York: Pro Publica, 2008.
12. Ineson, R. Changing Geography of North American Natural Gas [Text] / R. Ineson. – INGAA Foundation, 2008.

Bibliography (transliterated):

1. Sorokin, S. N., Goryachev, A. A. Osnovnye problemy i perspektivy dobychi slantsevogo gaza. Available at: https://www.eriras.ru/files/Sorokin_Goryachev_OEPEE_slanec.pdf
2. Rukomeda, R. (2015). Slantsevaya revolyutsiya: vtoroe dyhanie. Terminal. Available at: <http://oilreview.kiev.ua/2015/11/01/slancevaya-revoluciya-vtoroe-dyhanie/>
3. Mel'nikova, S., Sorokin, S., Goryacheva, A., Galkina, A. (2012). Pervye 5 let «slantsevoy revolyutsii»: chto my teper' znaem navernyaka? Moscow, 48. Available at: https://www.eriras.ru/files/slancjevyj_gaz_5_ljet_nojabr_2012.pdf
4. Belov, S. V., Barbinov, F. A., Koz'yakov, A. F.; Belov, S. V. (Ed.) (1991). Ohrana okruzhayushchey sredy. Moscow: Vysshaya shkola, 320.
5. Buktyshnov, A. D., Groshev, B. I., Krylov, G. V. (1981). Priroda mira: lesa. Moscow: Mysl', 316.
6. Nikanorov, A. M., Horuzhaya, T. A. (2000). Global'naya ekologiya. Moscow: Izd. PRIOR, 85–90.
7. Somova, Y., Degodia, E., Kasatkina, E., Peryatinskiy, A., Kudryashov, A. (2017). Investigation of surface water quality in magnitogorsk industrial area for the environmental estimation of technogenic watercourse state. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (10 (87)), 74–81. doi: [10.15587/1729-4061.2017.102374](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.102374)
8. Osborn, S. G., Vengosh, A., Warner, N. R., Jackson, R. B. (2011). Methane contamination of drinking water accompanying gas-well drilling and hydraulic fracturing. Proceedings of the National Academy of Sciences, 108 (20), 8172–8176. doi: [10.1073/pnas.1100682108](https://doi.org/10.1073/pnas.1100682108)
9. Lechtenbohmer, S. et. al. (2011). Impacts of shale gas and shale oil extraction on the environment and on human health. ENVI, 91.
10. Schein, G., Carr, P., Canan, P., Ray, R. (2004). Ultra Lightweight Proppants: Their Use and Application in the Barnett Shale. Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition. doi: [10.2523/90838-ms](https://doi.org/10.2523/90838-ms)
11. Lustgarten, A. (2008). Buried Secrets: Is Natural Gas Drilling Endangering U.S. Water Supplies? New York: Pro Publica.
12. Ineson, R. (2008). Changing Geography of North American Natural Gas. INGAA Foundation.

Поступила (received) 16.09.2017

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Екологічні проблеми методів видобутку сланцевого газу в Харківській області/ Гринь С. А., Босюк А. С., Лаптий О. А. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 33(1255). – С. 116–121. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.

Екологічні проблеми методів видобутку сланцевого газу в Харківській області/ Гринь С. О., Босюк А. С., Лаптий О. О. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 33(1255). – С. 116–121. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.

Ecological problems of methods of extraction of shale gas in the Kharkov region/ Gryn S., Bosyuk A., Laptii O. // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 33 (1255). – P. 116–121. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-5459

Сведения об авторах / Відомості про авторів / About the Authors

Гринь Светлана Александровна – Кандидат технических наук, доцент, Кафедра химической техники и промышленной экологии, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичева, 2, г. Харьков, Украина, 61002.

Гринь Світлана Олександрівна – Кандидат технічних наук, доцент, Кафедра хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002.

Gryn Svetlana – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Chair of Chemical Engineering and Industrial Ecology, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», st. Kirpicheva, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002.

Босюк Алена Сергеевна – студентка, Кафедра химической техники и промышленной экологии, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичева, 2, г. Харьков, Украина, 61002; e-mail: bosyuk0614@ukr.net.

Босюк Альона Сергіївна – студентка, Кафедра хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002;

Bosyuk Alyona – student, Department of Chemical Engineering and Industrial Ecology, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», st. Kirpicheva, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002;

Лаптий Ольга Александровна – студентка, Кафедра химической техники и промышленной экологии, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичева, 2, г. Харьков, Украина, 61002; e-mail: olya.laptiy@gmail.com.

Лаптий Ольга Олександрівна – студентка, Кафедра хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002; e-mail: olya.laptiy@gmail.com.

Lapty Olga – student, Department of Chemical Engineering and Industrial Ecology, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», st. Kirpicheva, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002

УДК 614.8.084

Н. В. РАШКЕВИЧ**АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СПОСОБІВ ЗАПОБІГАННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ НА ПОЛІГОНАХ ДЕПОНУВАННЯ ВІДХОДІВ**

У роботі проведений аналіз ефективності застосування способів раннього виявлення мікро джерел надзвичайних ситуацій (пожеж) на полігонах депонування відходів. Обґрунтована доцільність використання дистанційних методів контролю ступеня забруднення атмосферного повітря, визначення первинних ознак пожежі (підвищенні температури, наявність токсичних речовин). Встановлені потреби підвищення достовірності результатів досліджень шляхом врахування значного числа змінних факторів при математичному моделюванні фізико-хімічних процесів на території полігонів. Результати досліджень представляють практичний інтерес при забезпеченні техногенно-екологічній безпеці у сфері поводження з відходами.

Ключові слова: відходи, безпека, надзвичайні ситуації, засоби контролю, моніторинг, ГІС-технології, лазерний комплекс.

В работе проведен анализ эффективности применения способов раннего выявления микро источников чрезвычайных ситуаций (пожаров) на полигонах депонирования отходов. Обоснована целесообразность использования дистанционных методов контроля степени загрязнения атмосферного воздуха, определения первичных признаков пожара (повышенные температуры, наличие токсических веществ). Установлена необходимость повышения достоверности результатов исследований путем учета значительного числа переменных факторов при математическом моделировании физико-химических процессов на территории полигонов. Результаты исследований представляют практический интерес при обеспечении техногенно-экологической безопасности в сфере обращения с отходами.

Ключевые слова: отходы, безопасность, чрезвычайные ситуации, средства контроля, мониторинг, ГИС-технологии, лазерный комплекс.

In the work the analysis of scientific studies that are associated with using contact, remote and biological methods for pollution control and early detection of micro fire sources in the body of the landfill with waste. Found that control air quality primarily is based on laboratory chemical sampling and analysis of samples to obtain statistical information without identifying the specific contribution of contaminants from disposal sites. Remote monitoring tools (GIS-technology, laser system) are an effective way of detecting contamination, as well as the origin of the primary signs of fire. Indicators of the initial stage of the emergency there may be toxic substances or the increase in air temperature above the surface of the landfill. Need of increase of reliability of research results by taking into account the significant number of variables in the mathematical modeling of physicochemical processes on the territory of polygons. The research results are of practical interest in ensuring technogenic-ecological safety in the sphere of waste management.

Keywords: waste, safety, emergency situations, danger, means of control, monitoring, GIS-technology, laser.

Вступ. Природоохоронні зусилля та заходи щодо оздоровлення навколишнього природного середовища часом виявляються марними внаслідок виникнення надзвичайних ситуацій (НС), які у більшості випадках супроводжуються пожежами, вибухами, викидом

небезпечних токсичних, хімічних, радіоактивних, біологічних речовин. Це становить загрозу для існування живих організмів, життя та здоров'я населення.

© Н. В. Рашкевич. 2017

Постійний зріст потреб населення призводить до накопичення в екосистемі твердих побутових відходів (ТПВ), компонентний склад яких постійно ускладнюється, змінюється відповідно до рівня життя, кліматичних умов, пори року. Найбільш поширеним способом утилізації відходів є захоронення (депонування) на полігонах (звалищах) [1].

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Полігони ТПВ виступають потужним об'єктом з підвищеною небезпекою. У зв'язку з утворенням екологічно-небезпечних речовин, внаслідок постійного протікання фізико-хімічних та біохімічних процесів, полігони потребують кількісного та якісного контролю стану компонентів довкілля прилеглих територій з метою зниження рівня навантаження та своєчасного виявлення й попередження НС.

При вирішенні проблем у сфері поводження з відходами актуальним є аналіз впливу полігонів ТПВ на компоненти навколишнього середовища (повітря, ґрунту, воду) [2–6]. До негативних факторів впливу належать продукти горіння (тління) під час пожеж. Основні причини НС [6–8] безпосередньо пов'язані з неконтрольним накопиченням біогазу, питання утворення та розсіювання (забруднення) якого вирішуються за допомогою розрахунків та прогнозів [5, 9–12]. Ряд науковців [5, 7, 8, 11–13] розглядають проблеми з підвищення пожежної безпеки полігонів ТПВ. Таким чином, утворюється база з удосконалення системи моніторингу.

Процеси забруднення атмосферного повітря розглядаються здебільшого за допомогою контактних методів спостереження та контролю за станом безпеки (пости спостереження [14,15]), а також біологічних засобів [16]. Серед перспективних – дистанційні методи з використанням геоінформаційних систем (ГІС) [17, 18] та лазерних моніторів [19, 21], які мають істотні переваги, що полягають в безпечній, оперативній та надійній ідентифікації речовин, що забруднюють атмосферу, а також можуть застосовуватись в умовах НС.

Ціль та задачі дослідження. Метою роботи є дослідження ефективності застосування сучасних способів запобігання НС на території полігону для раннього виявлення мікро джерел пожежі в тілі полігону з відходами.

Об'єктом дослідження – фізико-хімічних процеси, які протікають на території полігону ТПВ та їх вплив на довкілля. Предмет дослідження – встановлення ефективності застосування сучасних способів запобігання НС на цих об'єктах для раннього виявлення мікро джерел пожежі в тілі полігону.

Матеріали та методи дослідження ефективності застосування способів запобігання НС на території полігону для раннього виявлення мікро джерел пожежі. З урахуванням статистичних даних утворення та утилізації відходів в Україні за кате-

горією «побутові та подібні відходи» відповідно до періоду 2011–2016 роки [22], можна відмітити існування тенденції (рис.1) зі зберігання (захоронення) відходів у спеціально відведених місцях. Незважаючи на наявність, актуальність та перспективність застосування технологій з перероблення відходів, що сприяють техногенно-екологічній безпеці довкілля, їх частка не перевищує 5 % від загального обсягу робіт у сфері поводження з відходами.

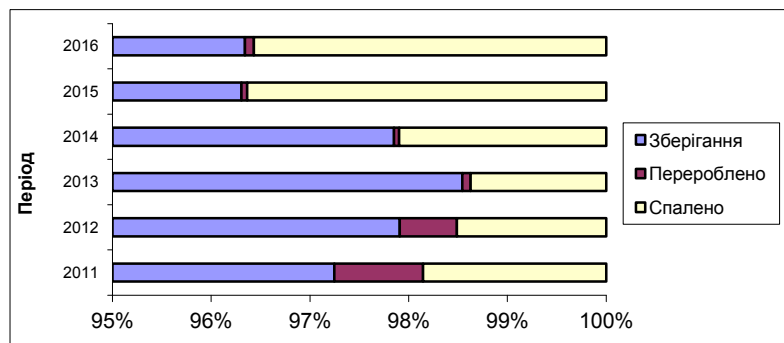


Рисунок 1 – Співвідношення робіт у сфері поводження з відходами, %

Таким чином, побутові відходи з кожним роком накопичуються на полігонах, охоплюють значні площі в просторовому відношенні. Виникають потреби в забезпеченні безпеки при зберіганні. Полігони ТПВ, окрім прояву реальної небезпеки під час утворення газоподібних, рідких, та твердих екологічно-небезпечних речовин, несуть в собі потенційну (скриту) небезпеку, яка може проявитись раптово і не відомо в якому місці та представляти найбільш небезпечний варіант прояву загрози. Тому встановлення небезпеки на початковій стадії (виявлення мікро джерел) зменшує ризик виникнення й розповсюдження НС, що пов'язані з горінням відходів або звалищного газу.

На протікання фізико-хімічних й біологічних процесів у тілі полігону, а, отже, на ймовірність виникнення пожежі впливають склад відходів, їх щільність й ступінь вологості. Збільшення щільності відходів, за рахунок подрібнення, знижує ризик можливих загорянь. З часом, під впливом природних факторів, непередбачуваних фізико-хімічних, біологічних процесів у товщі сміття утворюється звалищний газ до складу якого входить пожеже- та вибухонебезпечний парниковий газ метан (понад 50 % від загального об'єму), вуглекислий газ, а також в малих частках водень, сірководень (придає різкий неприємний запах), аміак та на рівні слідів ароматичні та хлоровані вуглеводні.

Робота [5] з математичного обчислення виходу біогазу у газоповітряній суміші, окремих небезпечних компонентів враховують стабільні умови газоутворення. Однак, в процесі життєвого циклу полігону існують невизначеності (сезонна зміна морфологічного складу, умови зберігання). Встановлення часу, місця та виду небезпеки потребує врахування додаткових умов експлуатації полігонів.

Теплові процеси в тілі полігону шляхом моделювання досліджені в роботах [9] з урахуванням

зміни висоти захоронення відходів та часу зберігання та [13] – різних природо-кліматичних режимів формування поверхневого шару полігонів. За результатами досліджень встановлені залежності розподілу температур в тілі полігону та виділення небезпечних речовин (метану). Моделювання теплових процесів показує закономірності тління, самозаймання, умови виникнення техногенної небезпеки. Автори вважають, що розроблена математична модель дає змогу ефективно підійти до питання ідентифікації початкової стадії пожежі (вибуху). Високі температури, що утворюються під час розкладання відходів, вказують на процес утворення метану та появи ймовірних ознак пожежі. Однак, потрібно враховувати показник відтоку тепла з товщі звалища (щільність, теплопровідність відходів, рельєф місцевості, кліматичні умови: температура, вітер, вологість) при подальшому переміщенні в тілі та розсіюванні у навколишньому середовищі.

Авторами [12] проведено моделювання двовимірних нестационарних потоків газу на сміттєзвалищах, які самозаймаються. Запропоновано використовувати методи механіки суцільних гетерогенних середовищ. Звалище представляється пористим об'єктом з джерелами виділення тепла. Модель будується в припущенні двох взаємодіючих та проникаючих континуумів та включає в себе рівняння енергії руху, нерозривності стану для кожного компонента (твердої і газоподібної).

Постійний контроль розігріву тіла полігону, встановлення закономірностей руху небезпечних речовин, розгляд умов виходу їх на поверхню (через який час, під яким тиском) у вигляді пожежі або вибуху виступає базою для ідентифікації потенційної небезпеки.

Біогаз утворюється нерівномірно в залежності від пори року. Відомо, що стабілізація процесу газовиділення настає в середньому через два роки після поховання відходів. Період активного виходу біогазу становить в середньому двадцять років. За цей час генерується близько 80% від загальної кількості біогазу, одержуваного з однієї тонни відходів. Можна зробити висновки щодо часу утворення максимальної небезпеки – спекотна пора року та в середньому до 20 років після захоронення відходів.

Оскільки органічні речовини та полімерні матеріали беруть активну участь в утворенні звалищного газу, то автори в роботі [10] дослідили залежність розмірів санітарно-захисної зони від питомої ваги органічної складової, а саме для 5, 10, 25, 35, 45 і 55 % органічних речовин у загальній кількості відходів. При цьому в реальних умовах більшість полігонів вже має незначну відстань від населених пунктів, що не відповідає нормативам їх розташування. А накопичення відходів на полігоні відбувається без попереднього вилучення органічної складової. Тобто ймовірність виникнення НС буде тільки зростати, також як і актуальність пошуку шляхів їх попередження.

Морфологічний склад відходів важкопрогнозований й містить папір, харчові відходи, текстиль, скло, полімерні та будівельні матеріали, гуму, шкіру, відсів (менше 15 мм) та ін. Залежно від умов процесу

горіння (тління), можуть утворюватись різні вихідні продукти, які різняться за хімічним складом та токсичністю з'єднань. На процес утворення небезпечних речовин впливає наявність або відсутність кисню (достатньої кількості окисника). При повному окисленні метану утворюється вуглекислий газ та вода: $\text{CH}_4 + 3\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$; при неповному – чадний газ та вода: $2\text{CH}_4 + 6\text{O}_2 = 2\text{CO} + 4\text{H}_2\text{O}$ або дрібнодисперсний вуглець (сажа): $\text{CH}_4 + \text{O}_2 = \text{C} + 2\text{H}_2\text{O}$. Так в роботі [23] експериментально встановлено, при горінні (тлінні) полімерних матеріалів на основі поліакрилонітрила (нітрон), який широко застосовується у споживчих товарах, утворюються газоподібні продукти горіння: водень, синильна кислота, аміак, окис і двоокис вуглецю. Об'єм викидів цих речовин залежать від наявності окислювача. Кисень бере активну участь в утворенні окису і двоокису вуглецю, а також ціаністого водню у вигляді бромціану. Процес піролізу призводить до більшого масоутворення водню (після 300 °C) і аміаку (до 350 °C). Вихід вихідних газоподібних продуктів пропорційно збільшується з температурою нагріву, однак для аміаку це не характерно. Отже, названі речовини можуть виступати як ідентифікатори початку розвитку НС. Постає питання їх своєчасного виявлення.

Система спостережень, що існує на об'єктах які створюють небезпеку, переважно заснована на неавтоматизованому зборі та обробленні інформації здебільшого для статистичного аналізу на основі лабораторно-хімічних методів відбору та аналізу проб. При проведенні досліджень утворюється великий обсяг інформації, який потрібно обробити та подати в конкретній і зрозумілій формі, пояснити цифрові дані і взаємозв'язок між ними, відобразити закономірності. На обробку даних потрібен час, з впливом якого, може початися розвиток НС.

Регулярний відбір проб повітря у фіксованих точках місцевості, який проводять на стаціонарних постах спостережень, як правило, передбачає вимірювання вмісту в повітрі пилу, діоксиду сірки, оксиду вуглецю та оксидів азоту, а також тих речовин, концентрації яких перевищують гранично допустимі значення. На кожному етапі слід враховувати систематичні похибки, які зумовлені недосконалістю кожної з ланок багатоланкового ланцюжка методу пробвідбору. У одержаних результатах похибка визначення концентрації речовин може сягати 25 %, а визначення деяких речовин може продовжуватись декілька діб [20].

Авторами робіт [14, 15] досліджені питання модернізації Державної системи моніторингу довкілля в частині технічного забезпечення для підвищення ефективності її функціонування, оптимізації мережі моніторингу забруднення атмосфери й адекватності діючої мережі стаціонарних постів спостереження. Однак, запропоновані системи спрямовані для контролю атмосферного повітря всього населеного пункту, а не окремої території, як полігон депонування відходів.

Автором [16] при визначенні стану екологічної небезпеки в зоні впливу звалища ТПВ було адаптовано та використано біоіндикатори (пластинки листка

берези повислої *Betula pendula* та ліхеноіндикації). Однак, біологічний метод базується на більш тривалих спостереженнях за станом навколишнього середовища і не дозволяє виявити «скриті» джерела небезпеки та чітко вказати на них. Відсутня оперативність в отриманні інформації про початок прояву ознак НС, які за короткий час можуть нанести докільно непоправної шкоди. При цьому не всі види живих організмів можуть бути застосовані як біоіндикатори. Один і той же природний індикатор проявляє свою реакцію на певний забруднювач по різному.

Проблему забруднення повітря й моделі поширення забруднювальних речовин в атмосфері за допомогою геоінформаційних технологій (ГІС-технологій) досліджено у роботах [17, 18]. Вони містять аналіз можливості й наукове обґрунтування шляхів створення регіональної моніторингової системи забруднення атмосферного повітря на базі ГІС-технологій. Дослідження та забезпечення якості атмосферного повітря шляхом дистанційних методів є перспективним. Супутникові системи спостереження спроможні вловити різницю між температурою поверхні Землі та температурою джерела загоряння, а також визначити місце розташування. Однак, при цьому потрібно враховувати вплив метеорологічних умов (підвищена вологість, сильний вітер), низька оперативність передачі даних знижують показник правдивості реальної оцінки стану небезпеки. Космічні (супутникові) знімки для подальшого аналізу та ідентифікації джерел формування небезпеки підлягають дешифровці. Обробка та інтерпретація знімків потребує часу, а також застосування спеціальних програмних комплексів.

Існує ряд приладів і методів аналізу стану атмосфери на базі оптичних властивостей, що мають високу інформативність. Дослідження у роботі [20, 21] спрямоване саме на вивчення теоретичних основ лазерного моніторингу атмосфери в зоні виникнення НС для ідентифікації газового складу й аерозолів. Надаються пропозиції щодо застосування лазерного комплексу в умовах НС. Однак, відсутні пропозиції щодо виявлення первинних ознак НС. Слід відзначити й дуже суттєву перевагу цього методу дії в режимі реального часу – з високою мобільністю проводити дослідження атмосфери, а саме проводити газоаналіз та визначати температуру й вологість повітря. Наявність таких даних може бути корисною для попередження НС на полігонах ТПВ.

Правдивість результатів лазерного зондування залежить від:

– точного рішення прямих задач атмосферної оптики, вивчення впливу атмосфери на лазерний промінь з заданими характеристиками (спектр, енергія, потужність, форма імпульсу, поляризація, когерентність, кут розходження тощо);

– однозначності розв'язання зворотних задач, що дозволяють відновити за даними лазерного зондування параметри атмосфери;

– лазерних локаторів (лідарів) [19].

Застосування лідарів передбачає наявність адекватної математичної моделі для інтерпретації отриманих даних. При цьому, якщо прагнути покращення оптичних властивостей апаратури, то це може виявитися економічно недоцільним.

Результати дослідження ефективності застосування способів запобігання НС на території полігону для раннього виявлення мікро джерел пожежі. В результаті проведених досліджень необхідно відмітити, що для раннього виявлення первинних ознак пожежі доцільно застосовувати дистанційні методи контролю стану атмосферного повітря на території полігонів, а також проводити моделювання небезпеки з врахуванням особливостей умов та способів депонування відходів з метою прогнозу НС.

Обговорення результатів ефективності застосування способів запобігання НС на території полігону для раннього виявлення мікро джерел пожежі. Поєднання сучасних ефективних засобів контролю (ГІС-технології або оптичної апаратури) з математичним моделюванням фізико-хімічних процесів може виступати надійним та оперативним способом виявлення індикаторів НС.

Висновки. Індикаторами початку розвитку НС можуть виступати токсичні речовини, які утворюються при розкладанні відходів, або підвищення температури повітря над поверхнею полігона. Такі способи як хімічний аналіз проб повітря та біологічні індикатори погіршення стану повітря потребують певного часу для отримання результатів і спрямовані на визначення фонових рівнів забруднення. Прогнозування із застосуванням математичних моделей потребує врахування значної кількості змінних факторів. Серед перспективних способів раннього виявлення залишаються оптичні методи та ГІС-технології.

Список літератури:

1. Проект структури Національної доповіді про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2016 році [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://menr.gov.ua/news/31445.html>
2. Трофімов, І. Л. Оцінка впливу відходів побутового походження на екологічний стан України [Текст] / І. Л. Трофімов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Т. 2, № 10 (68). – С. 25–29. doi: [10.15587/1729-4061.2014.22427](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.22427)
3. Годовська, Т. Б. Еколого-гігієнічний аналіз впливу полігону твердих побутових відходів на підземну гідросферу [Текст] / Т. Б. Годовська, В. П. Феценко // Меліорація і водне господарство. – 2010. – Вип. 98. – С. 198–208.
4. Коцюба, І. Г. Аналіз забруднення ґрунтів навколо міського сміттєзвалища міста Житомира [Текст] / І. Г. Коцюба // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2016. – № 3. – С. 90–94.
5. Краснянский, М. Е. Загрязнение свалками ТБО природной среды [Текст] / М. Е. Краснянский, А. Бельгасем // Проблемы экологии. – 2004. – С. 95–102. – Режим доступу: <http://ea.donntu.org:8080/jspui/handle/123456789/13351>
6. Шарова, О. А. Экологический мониторинг на полигонах твердых бытовых и промышленных отходов [Текст] / О. А. Шарова, А. Н. Бармин // Научные ведомости. Сер.: Естественные науки. – 2013. – № 3 (146). – С. 166–169.
7. Алешина, Т. А. Причины возгораний на свалках ТБО [Текст] / Т. А. Алешина // Безопасность строительных систем. Экологические проблемы в строительстве. Геоэкология. – 2014. – № 1. – С. 119–124.
8. Ашихмина, Т. В. Проблемы обеспечения пожарной и экологической безопасности на полигонах ТБО [Текст] / Т. В. Ашихмина, Т. В. Овчинникова, Е. С. Полковникова, Е. Н. Меркулова // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2015. – С. 56–58. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemny-obespecheniya>

- [pozharnoy-i-ekologicheskoy-bezopasnosti-na-poligonah-tbo](#)
9. Осіпова, Т. А. Прогнозування виходу біогазу і температури полігону твердих побутових відходів на основі математичного моделювання [Текст] / Т. А. Осіпова, Н. С. Ремез // Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського. – 2015. – Вип. 3 (92). – С. 144–149.
 10. Годовська, Т. Б. Екологічний аналіз та моделювання розсіювання забруднюючих речовин з полігону твердих побутових відходів [Текст] / Т. Б. Годовська, В. В. Гуреля // Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського. – 2012. – Вип. 5 (76). – С. 115–118.
 11. Комаров, А. В. Мониторинг тепловых полей и оценка миграции свалочных газов на полигоне твердых бытовых отходов «Хметьево» (Московская область) [Текст] / А. В. Комаров, В. В. Лопатин, В. В. Жуков // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2013. – Вып. 3. – С. 73–77.
 12. Левин, В. А. Математическое моделирование в задачах механики неоднородных сред и динамики природных процессов [Текст] / В. А. Левин, Н. А. Луценко, Л. В. Надкриничный и др. // Вестник ДВО РАН. – 2016. – № 4. – С. 70–77.
 13. Соболев, А. Н. Расчет тепловых полей полигонов твердых бытовых отходов как одна из базовых составляющих в решении задачи повышения техногенной безопасности объектов данного класса [Текст] / А. Н. Соболев, Ю. А. Оленченко, Т. В. Марусенко // Системи озброєння і військова техніка. – 2013. – Вип. 2 (30). – С. 231–235.
 14. Бахарев, В. С. Адекватність діючої мережі та обґрунтування пропозицій щодо розміщення стаціонарних постів спостереження за станом атмосферного повітря у м. Кременчуці [Текст] / В. С. Бахарев, А. В. Маренич, М. К. Журавська // Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського. – 2016. – Вип. 4 (99). – С. 80–87.
 15. Ночвай, Р. В. Використання ГІС у задачах управління якістю повітря [Текст] / Р. В. Ночвай, Р. Криваківська, О. Ішук // Електроніка та інформаційні технології. – 2012. – Вип. 2. – С. 154–163.
 16. Корбут, М. Б. Забезпечення екологічної безпеки звалищ твердих побутових відходів [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / М. Б. Корбут; КрНУ ім. Михайла Остроградського. – Кременчук, 2015. – 23 с.
 17. Каменева, І. П. Комплексний аналіз екологічної безпеки міста на основі сучасних ГІС-технологій [Текст] / І. П. Каменева, Я. В. Яцишин, Д. О. Полішко, О. О. Попов // Екологія довкілля та безпека життєдіяльності. – 2008. – № 5. – С. 41–46.
 18. Крета, Д. Л. Оцінка стану складових довкілля з використанням технологій дистанційного зондування землі та геоінформаційних систем [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д. Л. Крета; Київський національний університет будівництва і архітектури. – Київ, 2017. – 20 с.
 19. Зуев, В. Е. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы [Текст] / В. Е. Зуев, В. В. Зуев // Современные проблемы атмосферной оптики. – СПб.: Гидрометеоздат, 1992. – 212 с.
 20. Вамболь, В. В. Анализ особенностей экологического мониторинга атмосферного воздуха в зоне чрезвычайных ситуаций техногенного характера [Текст] / В. В. Вамболь, А. С. Рашкевич, Н. В. Рашкевич // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2016. – № 49 (1221). – С. 85–89.
 21. Черногор, Л. Ф. Возможности применения лазерных исследований атмосферы зоны чрезвычайной ситуации [Текст] / Л. Ф. Черногор, А. С. Рашкевич // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – Т. 5, № 9 (53). – С. 10–14. – Режим доступа: <http://journals.urau.ru/eejet/article/view/1282/1183>
 22. Державна служба статистики України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ukrstat.gov.ua>
 23. Рашкевич, Н. В. Исследование состава продуктов горения синтетического волокна [Текст] / Н. В. Рашкевич // East journal of security studies. – 2017. – Т. 1. – С. 194–201.

Bibliography (transliterated):

1. Projekt struktury Natsionalnoi dopovidi pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyscha v Ukraini u 2016 rotsi. Available at: <https://menr.gov.ua/news/31445.html>
2. Trofimov, I. L. (2014). Impact assessment of municipal wastes on the ecological state of Ukraine. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (10 (68)), 25–29. doi: [10.15587/1729-4061.2014.22427](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.22427)
3. Hodovska, T. B., Feshchenko, V. P. (2010). Ekolo-ho-hihienichniy analiz vplyvu polihonu tverdykh pobutovykh vidkhodiv na pidzemnu hidrosferu. Melioratsiya i vodne hospodarstvo, 98, 198–208.
4. Kotsiuba, I. H. (2016). Analiz zabrudnennia gruntiv navkolo miskoho smittiezvalyshcha mista Zhytomyra. Visnyk Cherkaskoho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu, 3, 90–94.
5. Krasnyanskiy, M. E., Bel'gasem, A. (2004). Zagryaznenie svalkami TBO prirodnoy sredy. Problemy ekolohiyi, 95–102. Available at: <http://ea.donntu.org:8080/jspui/handle/123456789/13351>
6. Sharova, O. A., Barmin, A. N. (2013). Ekologicheskyy monitoring na poligonah tverdykh bytovykh i promyshlennykh othodov. Nauchnye vedomosti. Ser.: Estestvennye nauki, 3 (146), 166–169.
7. Aleshina, T. A. (2014). Prichiny vozgoraniya na svalkah TBO. Bezopasnost' stroitel'nykh sistem. Ekologicheskie problemy v stroitel'stve. Geoekologiya, 1, 119–124.
8. Ashihmina, T. V., Ovchinnikova, T. V., Polkovnikova, E. S., Merkulova, E. N. (2015). Problemy obespecheniya pozharnoy i ekologicheskoy bezopasnosti na poligonah TBO. Sovremennyye tekhnologii obespecheniya grazhdanskoj oborony i likvidatsii posledstviy chrezvychaynykh situatsiy, 56–58. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-obespecheniya-pozharnoy-i-ekologicheskoy-bezopasnosti-na-poligonah-tbo>
9. Osipova, T. A., Remez, N. S. (2015). Prohnozuvannya vykhodu biohazu i temperatury polihonu tverdykh pobutovykh vidkhodiv na osnovi matematychnoho modeliyuvannya. Visnyk KrNU im. Mykhaila Ostrohradskoho, 3 (92), 144–149.
10. Hodovska, T. B., Hurelia, V. V. (2012). Ekolohichniy analiz ta modeliyuvannya rozsiuvannya zabrudniuiuchykh rechovin z polihonu tverdykh pobutovykh vidkhodiv. Visnyk KrNU im. Mykhaila Ostrohradskoho, 5 (76), 115–118.
11. Komarov, A. V., Lopatin, V. V., Zhukov, V. V. (2013). Monitoring teplovykh poley i otsenka migratsiy svalochnykh gazov na poligone tvorydykh bytovykh othodov «Hmet'ev» (Moskovskaya oblast'). Nauchnye i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoj zashchity, 3, 73–77.
12. Levin, V. A., Lutsenko, N. A., Nadkrinichnyy, L. V. et. al. (2016). Matematicheskoe modelirovanie v zadachah mekhaniki neodnorodnykh sred i dinamiki prirodnnykh protsessov. Vestnik DVO RAN, 4, 70–77.
13. Sobol', A. N., Olenichenko, Yu. A., Marusenko, T. V. (2013). Raschet teplovykh poley polygonov tverdykh bytovykh othodov kak odna iz bazovykh sostavlyayushchih v reshenii zadachi povysheniya tekhnogennoy bezopasnosti ob'ektov dannogo klassa. Systemy ozbroeniya i viyskova tekhnika, 2 (30), 231–235.
14. Bakhariev, V. S., Marenich, A. V., Zhuravska, M. K. (2016). Adekvatnist diiuchoi merezhi ta obgruntuvannya propozytsii shchodo rozmishchennia statsionarnykh postiv sposterezheniya za stanom atmosfernoho povitria u m. Kremenchutsi. Visnyk KrNU im. Mykhaila Ostrohradskoho, 4 (99), 80–87.
15. Nochvai, R. V., Kryvakivska, R., Ishchuk, O. (2012). Vykorystannya HIS u zadachakh upravlinnia yakistiu povitria. Elektronika ta informatsiini tekhnolohiyi, 2, 154–163.
16. Korbut, M. B. (2015). Zabezpechennia ekolohichnoi bezpeky zvalyshch tverdykh pobutovykh vidkhodiv. Kremenchuk, 23.
17. Kameneva, I. P., Yatsyshyn, Ya. V., Polishko, D. O., Popov, O. O. (2008). Kompleksnyi analiz ekolohichnoi bezpeky mista na osnovi suchasnykh HIS-tekhnolohiy. Ekolohiya dovkillia ta bezpeka zhyttiediyalnosti, 5, 41–46.
18. Kreta, D. L. (2017). Otsinka stanu skladovykh dovkillia z vykorystanniam tekhnolohiy dystantsiynoho zonduvannya zemli ta heoinformatsiynykh system. Kyiv, 20.
19. Zuev, V. E., Zuev, V. V. (1992). Distantionnoe opticheskoe zondirovanie atmosfery. Sovremennyye problemy atmosfery optiki. Sankt-

- Peterburg: Gidrometeoizdat, 212.
20. Vambol', V. V., Rashkevich, A. S., Rashkevich, N. V. (2016). Analiz osobennostey ekologicheskogo monitoringa atmosfernogo vozduha v zone chrezvychaynykh situatsiy tekhnogennoho haraktera. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI», 49 (1221), 85–89.
 21. Chernogor, L. F., Rashkevich, A. S. (2011). Application of laser beams studies of the atmosphere of emergency. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5 (9 (53)), 10–14. Available at: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/1282/1183>
 22. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy. Available at: <http://www.ukrstat.gov.ua>
 23. Rashkevich, N. V. (2017). Issledovanie sostava produktov gorennya sinteticheskogo volokna. East journal of security studies, 1, 194–201.

Надійшла (received) 21.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Аналіз ефективності застосування способів запобігання надзвичайних ситуацій на полігонах депонування відходів/ Рашкевич Н. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 33(1255). – С. 121–126. – Бібліогр.: 23 назв. – ISSN 2079-5459.

Анализ эффективности применения способов предотвращения чрезвычайных ситуаций на полигоне депонирования отходов/ Рашкевич Н. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 33(1255). – С. 121–126. – Бібліогр.: 23 назв. – ISSN 2079-5459.

Analysis of the effectiveness of methods of prevent emergencies at the landfill depositing waste/ Rashkevich N. // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 33 (1255). – P. 121–126. – Bibliogr.: 23. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Рашкевич Ніна Владиславівна – Національний університет цивільного захисту України, аспірант кафедри прикладної механіки; вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023; e-mail: nine291085@gmail.com

Рашкевич Нина Владиславовна – Национальный университет гражданской защиты Украины, аспирант кафедры прикладной механики; ул. Чернышевского, 94, м. Харьков, Украина, 61023; e-mail: nine291085@gmail.com

Rashkevich Nina – National University of Civil Protection of Ukraine, Graduate Student, Department of Applied Mechanics; Chernichevskaya str., 94, Kharkiv, Ukraine, 61023; e-mail: nine291085@gmail.com

УДК 504.064.2:628.472

В. Ю. КОЛОСКОВ

ВДОСКОНАЛЕННЯ КРИТЕРІЮ ОЦІНЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ТЕРИТОРІЇ, ПРИЛЕГЛОЇ ДО МІСЦЯ ЗБЕРІГАННЯ ВІДХОДІВ

Вдосконалено інтегральний критерій оцінювання екологічного стану території за показником рівня її екологічного резерву. Новизна отриманого результату полягає у використанні в якості відгуків довкілля на дію факторів негативного впливу величин, які характеризують деградаційні процеси в екосистемах. Формалізоване представлення показників рівня екологічного резерву надає можливість використовувати їх для оцінювання екологічного стану території у імітаційних числових експериментах з дослідження станів місця зберігання відходів, що відповідають реалізації в ньому надзвичайних ситуацій різного походження. Використання вдосконаленого критерію екологічного резерву дозволяє формувати комплексну оцінку екологічного стану території у короткотерміновій перспективі, а також надавати прогноз розвитку процесу деградації в ній.

Ключові слова: екологічний стан, інтегральний критерій, екологічний резерв, ступінь деградації, відходи.

Усовершенствован интегральный критерий оценивания экологического состояния территории по показателю уровня ее экологического резерва. Новизна полученного результата состоит в использовании в качестве откликов окружающей среды на влияние факторов негативного воздействия величин, характеризующих процессы деградации в экосистемах. Формализованное представление показателей уровня экологического резерва предоставляет возможность использовать их для оценивания экологического состояния территории в имитационных числовых экспериментах, касающихся исследования состояний места хранения отходов, которые соответствуют реализации в нем чрезвычайных ситуаций различного происхождения. Применение усовершенствованного критерия экологического резерва позволяет формировать комплексную оценку экологического состояния территории в краткосрочной перспективе, а также прогнозировать развитие процесса деградации в ней.

Ключевые слова: экологическое состояние, интегральный критерий, экологический резерв, степень деградации, отходы.

The purpose of the article is to improve the integral criterion of assessment of environmental condition of the territory with the index of its environmental reserve level. Originality of the achieved result is in application of the indicators characterizing ecosystem degradation process for quantitative description of the territory' environmental response on negative impact factors influence. The advantage of the proposed integral criterion is in formalized representation of environmental reserve level indexes. It allows to apply achieved values for assessment of environmental condition of the territory in simulation quantitative experiments for investigation of the object states concerning to occurrence of extreme situations of different kind at the wastes storage place. Usage of the improved environmental reserve criterion allows forming of complex assessment of environmental condition of the territory in short-term perspective, and at the same time to forecast degradation process development in it.

Keywords: environmental condition, integral criterion, environmental reserve, degradation degree, wastes.

© В. Ю. Колосков. 2017

Вступ. 8 листопада 2017 року Кабінетом Міністрів України було схвалено Національну стратегію управління відходами на період до 2030 року, яка запроваджує в Україні ряд нових підходів стосовно поводження із усіма видами відходів. Основною тезою запропонованого плану дій є системне впровадження принципу замкнутого циклу, що має дозволити суттєво зменшити обсяги відходів, що утворюються, та відповідно кількість місць їхнього захоронення за рахунок досягнення максимального рівня їхньої переробки. Такий підхід є, безумовно, прогресивним, а реалізація положень Стратегії становить нагальне завдання для усіх галузей економіки держави. Однак, під час її впровадження слід пам'ятати про необхідність забезпечення потрібного рівня екологічної безпеки на усіх етапах поводження з відходами, оскільки накопичення та зберігання, нехай й тимчасове, є невід'ємною його частиною. При цьому, місця зберігання усіх видів відходів, не лише небезпечних, а й побутових, включені до «Переліку видів діяльності та об'єктів, що становлять підвищену екологічну небезпеку», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 28.08.2013 р. № 808.

У лютому 2015 року до Закону України від 19.06.2003 р. № 964-IV «Про основи національної безпеки України» було внесено ряд суттєвих доповнень щодо визначення загроз та напрямів державної політики у сфері цивільного захисту, зокрема, до переліку загроз національним інтересам та національній безпеці держави у сфері цивільного захисту включено значне антропогенне і техногенне перевантаження території України, а також зростання ризиків виникнення надзвичайних ситуацій (НС) техногенного та природного характеру. Як можна бачити, чинне законодавство визначає правові засади переходу до комплексного вирішення питань забезпечення екологічної безпеки та зменшення ризиків виникнення НС на об'єктах, які є джерелом негативного впливу на довкілля, зокрема, у місцях зберігання відходів.

Брахування сукупної дії факторів негативного впливу, накопичення ефектів їхньої дії, наявність взаємозв'язків між показниками рівня екологічної безпеки місця зберігання відходів та факторами ризику виникнення НС, тощо, вимагає переходу від методів прямого оцінювання результатів впливів до методів прогнозування цих результатів у майбутньому, що дозволить не лише виконати завдання забезпечення необхідного рівня безпеки, а й підвищити ефективність захисних заходів, які впроваджуються для його вирішення.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Основи концепції комплексного екологічного оцінювання природно-техногенних об'єктів, покладеної в основу представлених досліджень, викладено у роботах з питань екологічної безпеки [1–6]. Викладені підходи застосовані у роботах автора [7, 8] для оцінювання екологічного стану території у наступному визначенні: «процес порівняння сукупності екологічних станів об'єктів з певними нормами з урахуванням потенційно можливих впливів зовнішніх факторів, зокрема, факторів ризику НС».

Оскільки умови протікання природних процесів у довкіллі характеризуються впливом складного ком-

плексу факторів негативного впливу, оцінювання результату їхньої дії має базуватися на сформованих динамічних моделях виникнення відгуків екосистеми під їхнім впливом. При цьому екологічні процеси слід розглядати як інтегральну сукупність хімічних, біологічних, геологічних, техногенних та інших процесів, які відбуваються на різних її рівнях.

Аналіз літературних джерел продемонстрував відсутність єдиного підходу до визначення типів екологічного станів територій за рівнем негативних змін в них. Загалом, екологічні стани прийнято розподіляти на п'ять типів, однак, подальше їх визначення у різних джерелах істотно відрізняється. Наприклад, у Водній Рамковій Директиві ЄС [9] запропоновано розподіл на відмінний, добрий, задовільний, поганий та дуже поганий стани. У вітчизняній практиці [10] прийнято використовувати при оцінюванні визначення умовно сприятливого (благополучного), задовільного, напруженого (передкризового), критичного (або кризового) та катастрофічного станів. У [11] більш визначено, що територія послідовно проходить критичний та кризовий стан, останній при цьому має зіставлятися з умовами настання екологічної НС. Катастрофічний же стан відповідає настанню глибоких незворотних змін в екосистемі. У такому сенсі індикатором негативного впливу буде ступінь деградації екосистеми території, що оцінюється.

Сучасні розробки з питань створення методології оцінювання екологічного стану територій базуються загалом на двох підходах. Експертний підхід [12, 13] базується на збиранні та вивченні великих обсягів даних групами експертів, які формують узагальнені висновки. При цьому, зазвичай, у отриманих результатах практично відсутні кількісні значення, які характеризують перехід від одного екологічного стану до іншого. Подолати ці труднощі дозволяє застосування розрахункового підходу [14, 15] з визначенням певних узагальнюючих індексів шляхом сумування оцінок за окремими показниками з використанням вагових коефіцієнтів чи без них. Втім, отримані результати у більшості випадків є придатними скоріше для порівняння територій між собою, аніж для визначення абсолютних показників їхніх екологічних станів.

Виходячи з вищесказаного, актуальною проблемою є розробка критеріїв узагальненого оцінювання екологічного стану територій, прилеглих до місць зберігання відходів, як об'єктів техногенної діяльності людства.

Ціль та задачі дослідження. Метою представленої роботи є розробка вдосконаленого критерію оцінювання екологічного стану територій, прилеглих до місць зберігання відходів. Для досягнення поставленої мети було поставлено та вирішено задачу визначити значущі показники екологічного стану території, прилеглої до місця зберігання відходів.

Матеріали та методи дослідження впливу місця зберігання відходів на навколишнє природне середовище. Об'єктом дослідження є вплив місця зберігання відходів на екосистему прилеглої території.

Предметом дослідження є критерії оцінювання екологічного стану території, прилеглої до місця зберігання відходів.

Виходячи із загальних особливостей функціонування екосистем, інтегральний критерій оцінювання екологічного стану території має, з одного боку, дозволити враховувати комплекс усіх діючих факторів негативного впливу на екосистему незалежно від їхнього походження, а з іншого – підходити до оцінювання індивідуально, з урахуванням умов функціонування екосистеми як під час негативного впливу, так і після його завершення. Вочевидь, він має представити у формалізованому вигляді комплекс окремих критеріїв, які визначають рівень безпеки окремих факторів за їхнім впливом на окремі елементи екосистеми. Основним підходом до побудови критеріїв оцінювання безпеки, що використовуються сьогодні, є нормативний, за якого поточне значення діючого фактору F порівнюють з його граничним припустимим значенням $[F]$, яке визначають за відповідними нормативними документами. У формалізованому вигляді цей підхід можна представити наступним чином:

$$\chi = \bar{F} = \frac{F}{[F]} \leq 1. \quad (1)$$

Якщо на систему діє водночас декілька факторів негативного впливу, найпростішим способом побудови інтегрального критерію оцінювання екологічного стану території є застосування суперпозиції окремих критеріїв, обрахованих за (1) для кожного з діючих факторів, у наступному вигляді:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n \chi_i^2} \leq 1, \quad i=1 \dots n, \quad (2)$$

де n – кількість діючих факторів.

У навколишньому природному середовищі практично немає обмежень стосовно переміщення хімічних речовин між окремими його елементами, тому використання критеріїв, які визначають рівень негативного впливу на атмосферу, гідросферу та літосферу окремо, не дозволяють провести повноцінне комплексне оцінювання екологічного стану території, оскільки при цьому не враховується наявність їхніх взаємозв'язків.

Вказаних вище недоліків позбавлений запропонований автором у роботі [7] критерій наявності у території достатньої здатності сприймати зовнішні фактори негативного впливу без переходу у катастрофічний стан, представлений у наступному формалізованому вигляді:

$$\chi^p = \rho(\bar{F}): \chi^p \geq 0, \quad (3)$$

де ρ – показник рівня екологічного резерву, який визначається за формулою:

$$\rho = 1 - \bar{\varepsilon}, \quad (4)$$

де $\bar{\varepsilon}$ – зведене значення відгуку екосистеми на негативний вплив:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{[\varepsilon]}, \quad (5)$$

де ε та $[\varepsilon]$ – відповідно відгук екосистеми на негативний вплив та його граничне припустиме значення.

Неважко побачити, що за умови встановлення значення $[\varepsilon]$ таким, що відповідає досягненню екосистемою катастрофічного стану, критерій екологічного резерву є відображенням нормативного (рис. 1).

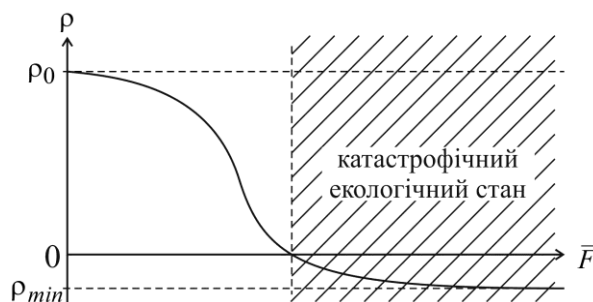


Рис. 1 – Принцип застосування критерію екологічного резерву при оцінюванні екологічного стану території

Суттєвою перешкодою для широкого застосування запропонованого критерію є велика різноманітність відгуків, які застосовуються у практиці оцінювання екологічного стану території, а також складність методів їхнього прямого вимірювання. Набір критеріальних показників має визначатися із застосуванням екологічного підходу, який полягає у дослідженні взаємозв'язків та взаємозалежностей екосистем з їх функціональним середовищем за допомогою екологічних індикаторів, екологічних показників та екологічних факторів [5]. Наприклад, у Керівництві з використання екологічних показників ЄЕК ООН [16] викладений загальний перелік таких індикаторів, використовуваних для підготовки екологічної звітності та прогнозування рівня екологічної безпеки, однак вони спрямовані на встановлення зведених висновків щодо екологічного стану території, тому використовувати їх для обчислення критерію екологічного резерву неможливо.

У практиці проведення оцінювання впливу техногенних об'єктів на довкілля ступінь деградації екосистем визначають за критеріями, які характеризують зміни, що відбуваються у їх структурі та процесі функціонування [6]. При цьому необхідно враховувати загальну величину площі деградаційних процесів, локальну диференційованість ділянок території за ступенем деградації, а також швидкість деградації. Використовуючи підхід, викладений у роботі [8], для розрахунку критерію екологічного резерву було обрано площу деградаційних процесів S_o та швидкість її зміни v_o , які можна із достатньою точністю розрахувати на основі аналізу матеріалів дистанційного зондування Землі. Встановивши граничні допустимі значення $[S_o]$ та $[v_o]$, значення відгуків екосистеми визначимо у зведеному вигляді за формулами

$$\bar{\varepsilon}_s = \frac{S_o}{[S_o]}; \quad (6)$$

$$\bar{\varepsilon}_v = \frac{v_o}{[v_o]}. \quad (7)$$

Оцінювання локальної диференційованості окремих ділянок території проводиться на основі ви-

вчення показників функціонування спеціально відібраних видів-індикаторів її екосистеми. Популяції окремих видів формують угруповання досліджуваної території, утворюючи трофічну структуру екосистеми, що складається з чотирьох трофічних рівнів [17]:

1. рівня продуцентів (*I* – рослини);
2. рівня первинних консументів (*II* – травоядні тварини);
3. рівня вторинних консументів (*III* – первинні хижаки);
4. рівень третинних консументів (*IV* – вищі хижаки).

Деякі види можуть водночас займати позицію на декількох рівнях структури, наприклад, до раціону всеїдних тварин можуть одночасно входити як рослини (відповідає *II* рівню), так і тварини (відповідно *III* та *IV* рівні). Для кожного трофічного рівня в екосистемі можна визначити величину потоку енергії та встановити ряд кількісних показників:

- поглинену енергію *I*;
- невикористану енергію *NU*;
- асимільовану енергію *A*;
- продукцію *P*;
- величину енергії, витраченої на дихання *R*;
- накопичену енергію *S*;
- виділену енергію *E*;
- обсягу зростання *G*;
- кількість біомаси *B*.

Зв'язок між цими показниками можна визначити за універсальною моделлю екологічного потоку енергії, запропонованою Ю. Одумом [17], та представити у наступному формалізованому вигляді:

$$\phi_I : B \rightarrow \{I \rightarrow A \rightarrow P\}; \quad (8)$$

$$\phi_P : \begin{cases} A = I - NU, \\ P = A - R, \\ P = G + S + E. \end{cases} \quad (9)$$

Таким чином, процес функціонування екосистеми можна описати множиною з 36 показників, використовуючи у якості відгуків на негативний вплив відхилення їх величин від рівноважних значень, що відповідають задовільному стану. Однак, експериментальне визначення більшості з показників є суттєво ускладненим. Натомість урахування специфіки наповнення та функціонування трофічних рівнів дозволяє визначити найбільш значущі та водночас доступні до вимірювання показники, а саме:

- продуктивність видів-індикаторів *I* рівня P^I ;
- кількість біомаси видів-індикаторів *IV* трофічного рівня B^{IV} , яку можна спростити до кількості тварин у популяції N^{IV} .

Встановивши рівноважні значення цих показників $[P^I]$ та $[N^{IV}]$ відповідно, отримаємо значення відгуків у зведеному вигляді:

$$\bar{\varepsilon}_P = \frac{|P^I - [P^I]|}{[P^I]}; \quad (10)$$

$$\bar{\varepsilon}_N = \frac{|N^{IV} - [N^{IV}]|}{[N^{IV}]}. \quad (11)$$

Використовуючи значущі показники відгуку екосистеми (6), (7), (10), (11), з урахуванням (3), (4) визначаємо критерій екологічного резерву у вдосконаленому формалізованому вигляді

$$\chi_P : \begin{cases} \rho_S(\bar{F}) \geq 0; \\ \rho_V(\bar{F}) \geq 0; \\ \rho_P(\bar{F}) \geq 0; \\ \rho_N(\bar{F}) \geq 0. \end{cases} \quad (12)$$

Результати дослідження впливу місця зберігання відходів на навколишнє природне середовище. В результаті проведених досліджень розроблено вдосконалений інтегральний критерій оцінювання екологічного стану території за показником рівня її екологічного резерву у формалізованому вигляді (12). Новизна отриманого результату полягає у використанні в якості відгуків довкілля на дію факторів негативного впливу величин, які характеризують деградаційні процеси в екосистемах.

Обговорення результатів дослідження впливу місця зберігання відходів на навколишнє природне середовище. Перевагою запропонованого інтегрального критерію екологічного резерву є формалізоване представлення показників рівня екологічного резерву $\rho = \{\rho_S, \rho_V, \rho_P, \rho_N\}$, що у свою чергу забезпечує можливість використовувати його для оцінювання екологічного стану території у імітаційних числових експериментах з дослідження станів об'єкту, що відповідають реалізації на ньому техногенних чи природних НС.

Відгуки екосистеми території на дію факторів негативного впливу місця зберігання відходів, покладені в основу вдосконаленого критерію, визначено в результаті аналізу особливостей її функціонування та кількісно відображають комплекс процесів різного характеру, що відбуваються в довкіллі. Запропоновані критеріальні показники можна розділити на дві групи:

- значення показника екологічного резерву за площею деградації ρ_S та продуктивністю видів-індикаторів *I* трофічного рівня ρ_P , які дозволяють оцінювати ефекти прямої дії негативного впливу у короткотерміновій перспективі;
- значення показника екологічного резерву за швидкістю зміни площі деградації ρ_V та чисельністю популяції видів-індикаторів *IV* трофічного рівня ρ_N , які дозволяють прогнозувати ефекти пролонгованої дії негативного впливу у середньо- та довготерміновій перспективі.

Таким чином, критерій екологічного резерву, формалізований на основі наведених відгуків за формулами (12), є цілком придатним для оперативного визначення екологічних небезпек та ризиків виникнення НС для місць зберігання відходів.

Висновки. Основним результатом представленої роботи є вдосконалення інтегрального критерію оціню-

вання екологічного стану території, прилеглої до місця зберігання відходів, на основі критерію екологічного резерву шляхом визначення значущих відгуків її екосистеми, які характеризують деградаційні процеси в ній.

Використання вдосконаленого критерію екологічного резерву дозволяє формувати комплексну оцінку у короткотерміновій перспективі за показниками ρ_s та ρ_p , а також надавати прогноз розвитку процесу де-

градації на середній та довгий термін за показниками ρ_v та ρ_N .

Для практичної реалізації інтегрального критерію екологічного резерву необхідним є проведення системних досліджень, направлених на визначення гранично допустимих значень відгуків екосистем територій, прилеглих до місць зберігання відходів, за умови дії факторів негативного впливу різної природи.

Список літератури:

1. Пляцук, Л. Д. Синергетика: экосистемные процессы [Текст] / Л. Д. Пляцук, Е. Ю. Черныш, Д. Л. Пляцук // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2014. – № 6 (89), Ч. 1. – С. 137–142.
2. Лисиченко, Г. В. Природний, техногенний та екологічний ризики: аналіз, оцінка, управління [Текст] / Г. В. Лисиченко, Ю. Л. Забулон, Г. А. Хміль. – К.: Наукова думка, 2008. – 543 с.
3. Харламова, Е. В. Теоретические основы управления экологической безопасностью техногенно нагруженного региона [Текст] / Е. В. Харламова, М. С. Малеваный, Л. Д. Пляцук // Екологічна безпека. – 2012. – № 1 (13). – С. 9–12.
4. Шевчук, В. Я. Екологічне управління [Текст] / В. Я. Шевчук, Ю. М. Сатанкін, Г. А. Білявський та ін.; ред. Г. А. Білявський. – К.: Лебідь, 2004. – 432 с.
5. Приходько, М. М. Теоретико-методологічні основи екологічної безпеки геосистем [Текст] / М. М. Приходько // Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: Географія. – 2012. – № 1 (31). – С. 179–191.
6. Бобровський, А. Л. Питання оцінки впливу на навколишнє середовище [Текст]: монографія / А. Л. Бобровський. – Рівне: Принт Хауз, 2014. – 543 с.
7. Вамболь, С. О. Вдосконалення методу оцінювання екологічного стану території, прилеглої до місця зберігання відходів, на основі критерію екологічного резерву [Текст] / С. О. Вамболь, В. Ю. Колосков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси – 2016. – № 49 (1221). – С. 101–105.
8. Прогнозування рівня безпеки несанкціонованого сміттєзвалища з використанням імітаційного моделювання [Текст] / С. О. Вамболь, В. В. Вамболь, В. Ю. Колосков, Ю. Ф. Деркач // Екологічна безпека. – 2016. – № 2/2016 (22). – С. 51–58.
9. Водна рамкова директива ЄС 2000/60/ЄС. Основні терміни та їх визначення [Текст] / Європейський парламент та Рада Європейського Союзу. – Київ, 2006. – 240 с. Режим доступу: <http://dbuwr.com.ua/docs/Waterdirect.pdf>
10. Зеркалов, Д. В. Екологічна безпека та охорона довкілля [Електронний ресурс]: монографія / Д. В. Зеркалов. – Київ: Основа, 2012. – 514 с. – Режим доступу: <http://zerkalov.kiev.ua/sites/default/files/ebod-mz.pdf>
11. Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия [Електронний ресурс]. – 1992. – Режим доступа: <https://www.ecolur.org/files/uploads/pdf/metodika.pdf>
12. Leung, W. Disparate perceptions about uncertainty consideration and disclosure practices in environmental assessment and opportunities for improvement [Text] / W. Leung, B. F. Noble, J. A. G. Jaeger, J. A. E. Gunn / Environmental Impact Assessment Review. – 2016. – No. 57. – P. 89–100. doi: [10.1016/j.eiar.2015.11.001](https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.11.001)
13. Living Planet Report 2006 [Electronic resource]. – 2006. – Available at: http://wwf.panda.org/about_our_earth/all_publications/living_planet_report_timeline/lpr_2006/
14. Ji, C. Comparative analysis of methods for integrating various environmental impacts as a single index in life cycle assessment [Text] / C. Ji, T. Hong // Environmental Impact Assessment Review. – 2016. – Vol. 57. – P. 123–133. doi: [10.1016/j.eiar.2015.11.013](https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.11.013)
15. Aydi, A. Minimization of environmental risk of landfill site using fuzzy logic, analytical hierarchy process, and weighted linear combination methodology in a geographic information system environment [Text] / A. Aydi, M. Zairi, H. B. Dhia // Environmental Earth Sciences. – 2013. – Vol. 68, Issue 5. – P. 1375–1389. doi: [10.1007/s12665-012-1836-3](https://doi.org/10.1007/s12665-012-1836-3)
16. Мониторинг окружающей среды: руководство по применению экологических показателей в странах Восточной Европы, Кавказа и центральной Азии [Электронный ресурс] / Европейская экономическая комиссия. – 2007. – 108 с. – Режим доступа: https://www.unec.org/fileadmin/DAM/env/europe/monitoring/Belgrade/CRP1_Indicators.Ru.MK.pdf
17. Одум, Ю. Экология [Текст] / Ю. Одум. – Т. 1. – Москва: Мир, 1986. – 328 с.

Bibliography (transliterated):

1. Plyatsuk, L. D., Chernish, E. Yu., Plyatsuk, D. L. (2014). Synergetics: ecosystem processes. Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 6 (89), 1, 137–142.
2. Lysychenko, H. V., Zabulonov, Yu. L., Khmil, H. A. (2008). Pryrodnyi, tekhnohennyi ta ekolohichnyi ryzyky: analiz, otsinka, upravlinnia. Kyiv: Naukova dumka, 543.
3. Harlamova, E. V., Malevanyj, M. S., Pljacuk, L. D. (2012). Theoretical bases managements by ecological safety of the technogenic loaded region. Ecological Safety, 1 (13), 9–12.
4. Shevchuk, V. Ya., Satankin, Yu. M., Biliavskiy, H. A. et al.; Biliavskiy, H. A. (2004). Ekolohichne upravlinnia. Kyiv: Lebid, 430.
5. Prykhodko, M. M. (2012). Theoretical and methodological fundamentals of geosystems' ecological safety. The scientific issues of Ternopil Volodymyr Hnatiuk National pedagogical university. Series: geography, 1 (31), 179–191.
6. Bobrovskiy, A. L. (2014). Pytannja ocinky vplyvu na navkolyshnje seredovyshhe. Rivne : Prynt Hauz, 543.
7. Vambol, S. O., Koloskov, V. Yu. (2016). Improvement of the method of assessment of environmental condition of territory adjoined to wastes storage place based on environmental reserve criterion. Bulletin of NTU "KhPI". Series: Mechanical-technological systems and complexes, 49 (1221), 101–105.
8. Vambol, S. O., Vambol, V. V., Koloskov, V. Yu., Derkach, Yu. F. (2016). Forecasting of safety level of unauthorized landfill based on simulation modelling. Environmental safety, 2/2016 (22), 51–58.
9. Jevropejs'kyj parlament ta Rada Jevropejs'kogo Sojuzu (2006). Vodna ramkova dyrektyva EC 2000/60/EC. Osnovni terminy ta i'h vyznachennja. Kyiv, 240. Available at: <http://dbuwr.com.ua/docs/Waterdirect.pdf>
10. Zerkalov, D. V. (2012). Ekologichna bezpeka ta ohorona dovkillja: monografija. Kyiv, Osnova, 514. Available at: <http://zerkalov.kiev.ua/sites/default/files/ebod-mz.pdf>
11. Kriterii ocenki jekologicheskoy obstanovki teritorij dlja vyvjavlenija zon chrezvychajnoj jekologicheskoy situacii i zon jekologicheskogo bedstvija (1992). Available at: <https://www.ecolur.org/files/uploads/pdf/metodika.pdf>
12. Leung, W., Noble, B. F., Jaeger, J. A. G., Gunn, J. A. E. (2016). Disparate perceptions about uncertainty consideration and disclosure practices in environmental assessment and opportunities for improvement. Environmental Impact Assessment Review, 57, 89–100. doi: [10.1016/j.eiar.2015.11.001](https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.11.001)
13. Living Planet Report 2006 (2006). Available at: http://wwf.panda.org/about_our_earth/all_publications/living_planet_report_timeline/lpr_2006/

14. Ji, C., Hong, T. (2016). Comparative analysis of methods for integrating various environmental impacts as a single index in life cycle assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 57, 123–133. doi: [10.1016/j.eiar.2015.11.013](https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.11.013)
15. Aydi, A., Zairi, M., Dhia, H. B. (2012). Minimization of environmental risk of landfill site using fuzzy logic, analytical hierarchy process, and weighted linear combination methodology in a geographic information system environment. *Environmental Earth Sciences*, 68 (5), 1375–1389. doi: [10.1007/s12665-012-1836-3](https://doi.org/10.1007/s12665-012-1836-3)
16. European economic commission (2007). Monitoring okruzhajushhej sredy: rukovodstvo po primeneniju jekologicheskikh pokazatelej v stranah Vostochnoj Evropy, Kavkaza i central'noj Azii. 108. Available at: <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/europe/monitoring/Belgrade/CRP1.Indicators.Ru.MK.pdf>
17. Odum, Ju., (1986). *Jekologija*. 1, Moscow: Mir, 328.

Надійшла (received) 20.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Вдосконалення критерію оцінювання екологічного стану території, прилеглої до місця зберігання відходів/ В. Ю. Колосков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 33(1255). – С.126–131. – Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2079-5459.

Усовершенствование критерия оценивания экологического состояния территории, прилегающей к месту захоронения отходов/ В. Ю. Колосков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 33(1255). – С.126–131. – Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2079-5459.

Improvement of the criterion of assessment of environmental condition of territory adjoined to wastes storage place/ V. Koloskov //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 33 (1255).– P. 126–131.– Bibliogr.:17. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Колосков Володимир Юрійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет цивільного захисту України, доцент кафедри прикладної механіки; вул. Чернишевська, 94, м. Харків, 61023, Україна; e-mail: koloskov@nuczu.edu.ua.

Колосков Владимир Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный университет гражданской защиты Украины, доцент кафедры прикладной механики; ул. Чернышевская, 94, г. Харьков, 61023, Украина; e-mail: koloskov@nuczu.edu.ua.

Koloskov Volodymyr – candidate of technical sciences, associate professor, National University of Civil Protection of Ukraine, associate professor of the Applied Mechanics Department; Chernishevsk str., 94, Kharkiv, 61023, Ukraine; e-mail: koloskov@nuczu.edu.ua.

ЗМІСТ

Колоскова А. Н. Моделирование разрушения сварных швов многослойных комбинированных структур на полимерной основе	3
Савченко С. В. Математическая модель определения координат дефектов как источников акустической эмиссии	8
Адоньєв Є. О., Верещага В. М. Розробка та дослідження властивостей геометричних матриць	13
Ащепкова Н. С., Кулагін А. Д. Виявлення цільових груп для підвищення конверсії інтернет-магазину	18
Гасымов Г. Г., Гасымов С. Ю. Подход к автоматизации численного расчета состояния процессов теплообмена в замкнутых аппаратах	21
Гладковська В. В. Проектування конфігурації складської мережі	29
Шлыков В. В., Данилова В. А. Клиническое применение термографического метода контроля температуры сердца	35
Дейнеко Н. В. Аналіз напівпровідникових сенсорів сучасних газоаналізаторів	39
Дорогий Я. Ю. Порівняльний аналіз методів представлення та обґрунтування архітектури критичної ІТ-інфраструктури	42
Мурад'ян А. О. Обґрунтування узгодженого управління процесом перевалки вантажів у транспортних вузлах	55
Островерхов М. Я., Сільвестров А. М., Боряк Б. Р. Компенсація запізнення в контурі керування процесом нанесення ізоляції на струмопровідну жилу кабелю	61
Безсмертная А. В., Шостак И. В., Собчак А. П., Попова О. И. Логистические риски этапов жизненного цикла продукции виртуального производственного предприятия	68
Радов Д. Г., Маслов В. П., Дорожинский Г. В., Дорожинська Г. В. Виявлення сірки в нафтопродуктах методом поверхневого плазмонного резонансу	75
Круглов А. И. Классификация наземных мобильных роботов	80
Костерев М. В., Літвінов В. В., Кільова К. А. Оцінка впливу зміни технічного стану обладнання електроенергетичної системи на імовірність його відмови на інтервалі часу	85
Мельничук А. В., Гришин В. С., Морозенко Е. П., Трунов Ю. Н. Условия эффективного обеспечения параметров надежности и ресурса гибочных штампов	94
Бідюк Д. О., Пономарьова Л. М., Перцевой Ф. В., Маренкова Т. І. Аналітичне обґрунтування та моделювання технологій сушеної харчової продукції з органічної овочевої та плодово-ягідної сировини	99
Ващенко В. Н., Кордуба И. Б., Лоза Е. А., Кризская Ю. М. Моделирование процесса синхронного влияния смерча и землетрясения на водоем-охладитель Чернобыльской АЭС в процессе его осушения	108
Гуцол Т. Д. Теоретический анализ кровотока животных при наличии пульсаций давления	112
Гринь С. А., Босюк А. С., Лаптий О. А. Экологические проблемы методов добычи сланцевого газа в Харьковской области	116
Рашкевич Н. В. Аналіз ефективності застосування способів запобігання надзвичайних ситуацій на полігонах депонування відходів	121
Колосков В. Ю. Вдосконалення критерію оцінювання екологічного стану території, прилеглої до місця зберігання відходів	126

CONTENTS

Koloskova G. Simulation of destruction of weld joints of multi-layer combined structures made on polymeric basis	3
Savchenko S. Mathematical model of definition of coordinates of defects as sources of acoustic emission	8
Adoniev Y., Vereshchaga V. Development and study of properties of geometric matrices	13
Ashhepkova N., Kulagin A. Revealing of target groups for increase conversion of the internet- shop	18
Qasimov Q. Q., Qasimov S. Yu. Approach to the automation of numerical calculation of the state of heat exchange processes in closed devices	21
Gladkovska V. Designing the configuration of the warehouse network	29
Shlykov V., Danilova V. Clinical application of the thermographic method of monitoring heart temperature	35
Deyneko N. Analysis of semiconductor sensors of modern gas analyzers	39
Dorogy Ya. A comparative analysis of the methods for presenting and substantiating the architecture of a critical IT infrastructure	42
Muradian A. Modelling and optimization of cargo transfer process in transport hubs	55
Ostroverkhov M., Silvestrov A., Boryak B. Delay Compensation in the Control Circuit for the Insulation Process on the Conductor Cable	61
Bezsmertnaya A., Shostak I., Sobchak A., Popova O. Logistic risks of stages of the life cycle of production of virtual industrial enterprise	68
Radov D., Maslov V., Dorozinsky G., Dorozinska H. Identification of sulfur in petroleum products using surface plasmon resonance	75
Kruglov A. Ground mobile robots classification	80
Kosterev M. V., Litvinov V. V., Kilova K. A. Estimation of power system equipment technical state change influence on the its fault probability at the time interval	85
Melnychuk O., Gryshyn V., Morozenko O., Trunov Y. Effective maintenance conditions of reliability parameters and resource of bending dies	94
Bidyuk D., Ponomarova L., Pertsevoi F., Marenkova T. Analytical substantiation and modeling of technologies for dried food products from organic vegetable and fruit-berry raw materials	99
Vashchenko V. M., Korduba I. B., Loza Ye. A., Kryzskaya Yu. M. Modeling of synchronous tornado and earthquake impact at Chernobyl NPP coolant pond during its drying	108
Hutsol T. Theoretical analysis of blood stream of animals at presence of pulsations of pressure	112
Gryn S., Bosyuk A., Laptii O. Ecological problems of methods of extraction of shale gas in the Kharkov region	116
Rashkevich N. Analysis of the effectiveness of methods of prevent emergencies at the landfill depositing waste	121
Koloskov V. Improvement of the criterion of assessment of environmental condition of territory adjoined to wastes storage place	126

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХПІ"**

Збірник наукових праць

Серія:

Механіко-технологічні системи та комплекси

№ 33(1255) 2017

Наукові редактори: д-р техн. наук, проф. Д. О. Дьомін
д-р техн. наук, проф. О. В. Акімов
Технічний редактор П. С. Пензев

Відповідальний за випуск канд. техн. наук Г. Б. Обухова

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».
Кафедра ливарного виробництва.
Тел. (057) 707-68-54; e-mail: c7508990@gmail.com

Підп. до друку 26.11.2017р. Формат 60x84/16. Надруковано на різнографі
Gestetner 6123CP. Ум.-друк. арк. 16,75. Облік.вид.арк. 17,68
Наклад 100 прим. Зам. № 45-17. Ціна договірна

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію суб'єкта видавничої справи
ДК №3657 від 24.12.2009
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Друкарня "Технологічний Центр"
Свідоцтво про державну реєстрацію №1 480 120 0000 021055 від 02.04.2002
Адреса: 61145, м. Харків, вул. Шатилова дача,4, тел. (057)750-89-90