

Головний редактор:

д-р техн. наук Олійник А. П.
Відповідальний секретар:
к. т. н. Незамай Б. С.

Редакційна колегія:

д-р ф.-мат. наук Бандура А. І.
к. техн. наук Воронич А. Р.
д-р техн. наук Горбійчук М. І.
д-р техн. наук Джала Р. М.
д-р техн. наук Древецький В. В.
д-р техн. наук Дьомін Д. О.
д-р техн. наук Заміховський Л. М.
д-р техн. наук Карпаш О. М.
д-р техн. наук Косач Н. І.
к. техн. наук Кучірка Ю. М.
д-р техн. наук Лежнюк П. Д.
д-р техн. наук Лопатін В. В.
д-р техн. наук Лужецький В. А.
д-р ф.-мат. наук Никифорчин О. Р.
д-р. техн. наук Осадчий С. І.
д-р. техн. наук Пасєка М. С.
д-р техн. наук Рудакова Г. В.
д-р техн. наук Семенцов Г. Н.
д-р техн. наук Середюк О. Є.
д-р техн. наук Ситник О. С.
д-р техн. наук Сучков Г. М.
д-р техн. наук Учанін В. М.
д-р техн. наук Шекета В. І.
д-р техн. наук Ячук В. О.
PhD, prof. Rzasa Mariusz
DrSc, prof. Wojcik Waldemar
Dr hab, prof. Gerhard Mook

Адреса редакції
76019, Україна, м. Івано-Франківськ,
вул. Карпатська, 15, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Тел.: (0342) 72-71-68
Факс: (03422) 547-139
E-mail: mmi@nung.edu.ua
<http://www.nung.edu.ua>

Редактори
Н. Р. Стецюк, О. О. Роспопа
Електронна верстка
Б. С. Незамай

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ №15834-4306
ПР від 16.10.2009

Журнал включено до переліку наукових фахових видань категорії "Б" на підставі наказу МОН України від 28 грудня 2019 р. № 1643

ЗМІСТ

МЕТОДИ І ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

- О. Г. Бондаренко* ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМІВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ, УТВОРЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ АНОМАЛІЙ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НЕСУЦІЛЬНОСТЕЙ ДИМОВОЇ ТРУБИ 5
- О. Г. Малько, А. О. Малько* ДІАГНОСТУВАННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ІЗ ЗАГАЛЬНОЮ ПАМ'ЯТТЮ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕРЕЖ ПЕТРІ 20

ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЧОВИН

- В. В. Ткачук, О. Є. Середюк* КОНЦЕПЦІЯ ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ВОЛОГИ НА РОБОТУ ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧНИХ СЕНСОРІВ 31

МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ РІДКОЇ І ГАЗОПОДІБНОЇ ФАЗ

- А. П. Олійник, О. М. Туць* ОЦІНКА ІНТЕНСИВНОСТІ ВИТОКУ РЕЧОВИНИ ПРИ ПОРУШЕННІ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ОБ'ЄКТА 41

АВТОМАТИЗАЦІЯ І КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

- Д. Р. Кропивницький, М. І. Горбійчук* ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ БУРОВОГО НАСОСНОГО АГРЕГАТУ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТИСКОМ НА ЙОГО ВИХОДІ 48
- В. С. Борин, Л. І. Фешанич, В. В. Мельничук* УДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ГІДРАТАЦІЇ ЕТИЛЕНУ З УРАХУВАННЯМ ЙОГО НЕСТАЦІОНАРНОСТІ 60
- Т. Є. Мохнаткіна, О. С. Царева* АДАПТАЦІЯ ЧИСЕЛЬНИХ МЕТОДІВ ДО ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРИКЛАДНИХ ТА ІНЖЕНЕРНИХ ЗАДАЧ В СФЕРІ UX/UI ДИЗАЙНУ 72

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ЗАДАЧАХ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

<i>О. В. Кучмистенко</i> МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТА МОНІТОРНІГУ ДІЛЯНКИ ТРУБОПРОВОДУ У ПРОГРАМІ ASPEN HYSYS.....	81
<i>Д. Ф. Тимків, А. В. Семенчук, О. С. Царева, Т. О. Ваврик</i> РЕАЛІЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РОЗРАХУНКУ НАДІЙНОСТІ КС ЗА ТИПОМ ТЕХНОЛОГІЧНИХ З'ЄДНАНЬ ГПА ЗАСОБАМИ БЛОЧНОГО ПРОГРАМУВАННЯ.....	93
<i>М. В. Кузь, Б. С. Незамай, В. А. Ровінський, Н. Д. Подубинська</i> ПРОГНОЗУВАННЯ ЯКОСТІ ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ЯКОСТІ ВИМОГ	101
ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ	113

METHODS AND DEVICES №1 (50) 2023 OF QUALITY CONTROL Published since 1997

Founder: Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

Publisher: Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

Editor-in-Chief:

A. P. Oliinyk, Dr. of Technical Sciences

Executive Secretary:

B. S. Nezamai, PhD

Editorial Board:

A. I. Bandura, Dr. of Phys. - math. Sc.
A. R. Voronych, PhD
M. I. Horbiichuk, Dr. of Technical Sc.
R. M. Dzhala, Dr. of Technical Sc.
V. V. Drevetskiy, Dr. of Technical Sc.
D. A. Domin, Dr. of Technical Sc.
L. M. Zamikhovskiy, Dr. of Technical Sc.
O. M. Karpash, Dr. of Technical Sc.
N. I. Kosach, Dr. of Technical Sc.
Y. M. Kuchirka, PhD.
P. D. Lezhniuk, Dr. of Technical Sc.
V. V. Lopatin, Dr. of Technical Sc.
V. A. Luzhetskiy, Dr. of Technical Sc.
O. R. Nykyforchyn, Dr. of Phys.-math Sc.
S. I. Osadchyi, Dr. of Technical Sc.
M. S. Pasieka, Dr. of Technical Sc.
A. V. Rudakhova, Dr. of Technical Sc.
G. N. Sementsov, Dr. of Technical Sc.
A. A. Sytnyk, Dr. of Technical Sc.
H. M. Suchkov, Dr. of Technical Sc.
V. M. Uchanin, Dr. of Technical Sc.
V. I. Sheketa, Dr. of Technical Sc.
V. A. Yatsiuk, Dr. of Technical Sc.
Rzasa Mariusz, PhD.
Wojcik Waldemar, Dr. Sc.
Gerhard Mook, Dr.hab.

Adress

Ivano-Frankivsk National Technical
University of Oil and Gas,
15 Carpathian str., 76019, Ivano-
Frankivsk, Ukraine
Tel.: (0342) 72-71-68,
Fax: (0342) 545826
E-mail: mmi@nung.edu.ua
<http://www.nung.edu.ua>

Editors

N.R. Stetsiuk, O.O. Rospopa
Electron galley
B.S. Nezamai

State Registration Certificate
KB № 15834 - 4306 Regions
Of 16.10.2009

The journal is included in the list of
scientific professional publications of
category "B" on the basis of the order
of the Ministry of Education and
Science of Ukraine dated December
28, 2019.
№ 1643

CONTENT

METHODS AND EQUIPMENT OF NON-DESTRUCTIVE CONTROL

O. G. Bondarenko STUDY FLUE PIPE LEAKS HEAT TRANSFER MECHANISMS, FORMATION OF TEMPERATURE ANOMALIES AND DETERMINATION OF GEOMETRIC..... 5

A. O. Malko, O. G. Malko DIAGNOSING COMPUTER SYSTEMS WITH SHARED MEMORY USING PETRI NETS 20

MEASUREMENT OF PHYSICAL AND MECHANICS PARAMETERS OF SUBSTANCES

V. V. Tkachuk, O. Ye. Serediuk THE CONCEPT OF SIMULATION OF THE INFLUENCE OF MOISTURE ON THE WORK OF THERMOANEMOMETRICAL SENSORS..... 31

METHODS AND DEVICES OF FLOW MEASUREMENT OF LIQUID AND GASEOUS PHASES

A. P. Oliinyk, O. M. Tyts THE LEAKAGE OF THE SUBSTANCE INTENSITY ASSESSMENT IN THE EVENT HERMETICITY OF THE OBJECT VIOLATIM..... 41

AUTOMATION AND COMPUTER-INTEGRATED NON-DESTRUCTIVE TESTING TECHNOLOGIES

D. R. Kropyvnytskyi, M. I. Gorbichuk CONSTRUCTION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE DRILL PUMP UNIT FOR THE AUTOMATIC PRESSURE CONTROL SYSTEM AT ITS OUTPUT 48

V. S. Boryn, L. I. Feshanich, V. V. Melnychuk DEVELOPMENT OF A MODEL OF THE ETHYLENE HYDRATION PROCESS TAKING INTO ACCOUNT ITS INSTABILITY 60

T. Ye. Mohnatkina, O. S. Tsareva NUMERICAL METHODS ADAPTATION TO THE SOFTWARE IMPLEMENTATION OF APPLIED AND ENGINEERING PROBLEMS IN THE SPERE OF UX/UI DESIGN 72

MATHEMATICAL MODELLING FOR THE UNDESTROYED CONTROL PROBLEMS

<i>O. V. Kuchmystenko</i> MODELING OF THE CONTROL AND MONITORING SSTEM OF THE PIPELINE SECTION IN THE ASPEN HYSYS	81
<i>D. F. Tymkiv, A. V. Semenchuk, O. S. Tsareva, T. O. Vavruk</i> THE MATHEMATICAL MODEL IMPLEMENTATION FOR THE CALCULATION OF THE CS RELIABILITY BY THE TYPE OF GPA TECHNOLOGICAL CONNECTIONS USING BLOCK PROGRAMMING TOOLS	93
<i>M. V. Kuz, B. S. Nezamai, V. A. Rovinskyi, N. D. Podubynska</i> SOFTWARE QUALITY FORECASTING BASED ON REQUIREMENTS QUALITY ANALYSIS	101
REQUIREMENTS FOR THE ARTICLE.....	113

МЕТОДИ І ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 697.85

DOI 10.31471/1993-9981-2023-1(50)-5-20

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМІВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ, УТВОРЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ АНОМАЛІЙ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НЕСУЦІЛЬНОСТЕЙ ДИМОВОЇ ТРУБИ

О. Г. Бондаренко

*Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України
вул. К. Малевича, 11, м. Київ-150, 03650, Україна, e-mail: usndt@ukr.net*

Виконано аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій, щодо причин утворення основних типів несутцільностей та ушкоджень у конструктивних шарах найбільш розповсюджених в Україні промислових димових труб, дистанційного діагностування їх технічного стану шляхом розробки теоретичних розрахункових моделей температурних полів та моделей температурних полів штучних несутцільностей у структурі димової труби та пасивного тепловізійного методу з застосуванням сучасних тепловізорів. На основі аналізу сутності процесу теплопередачі в тепловому неруйнівному контролі промислових об'єктів показано, що основним інформаційним параметром для пасивного тепловізійного методу є локальна різниця температур між дефектною та бездефектною зонами на поверхні контрольованого об'єкта.

Подано результати досліджень механізмів теплопередачі, визначено густини теплового потоку крізь одношарову однорідну та тришарову різношарову стінки димової труби й отримано повні термічні опори теплопровідності конструктивних шарів наведених циліндричних стінок труби. Обґрунтовано механізм визначення початкової температури на зовнішній поверхні димової труби в будь-якій її точці при введенні в експлуатацію та досягнення нею стандартного режиму для заданої температури димових газів. Наведено приклади виникнення несутцільностей в одному й у всіх конструктивних шарах тришарової структури димової труби (принцип «дефект над дефектом») і механізм утворення аномалій на зовнішній поверхні димової труби у вигляді гістограм температурного поля.

Розглянуто принцип реалізації способу термографування зовнішньої поверхні димової труби дистанційним пасивним тепловізійним методом і визначення за розмірами та формами гістограм аномалій температурного поля геометричних параметрів несутцільностей труби при діагностуванні її технічного стану.

Ключові слова: димова труба, механізм теплопередачі, механізм утворення аномалій, несутцільність, геометричні параметри.

An analysis of modern foreign and domestic research and publications related to the causes of the formation of the main types of discontinuities and damage in the structural layers of the most common industrial chimneys in Ukraine, remote diagnosis of their technical condition by developing theoretical calculation models of temperature fields and models of temperature fields of artificial discontinuities in the structure was performed smoke pipe and passive thermal imaging method using modern thermal imagers. Based on the analysis of the essence of the heat transfer process in thermal non-destructive testing of industrial objects, it is shown that the main information parameter for the passive thermal imaging method is the local temperature difference between defective and defect-free zones on the surface of the controlled object.

The results of studies of heat transfer mechanisms are presented and the heat flow densities through the single-layer homogeneous and three-layer heterogeneous walls of the smoke pipe are determined, and the complete thermal resistances of the thermal conductivity of the constructive layers of the given cylindrical walls of the pipe are obtained. The mechanism of determining the initial temperature on the outer surface of the flue at any point during commissioning and its achievement of the standard mode at a given flue gas temperature is justified. Examples of the occurrence of discontinuities in one and three structural layers of a three-layer chimney structure ("defect over defect" principle) and the mechanism of formation of anomalies on the outer surface of the chimney in the form of histograms of the temperature field are given.

The principle of implementation of the method of thermography of the outer surface of the smoke pipe by the remote passive thermal imaging method and the determination of the sizes and shapes of histograms of anomalies of

the temperature field and the geometric parameters of pipe discontinuities when diagnosing its technical condition are considered.

Key words: smoke pipe, heat transfer mechanism, anomaly formation mechanism, discontinuity, geometric parameters.

Вступ

На сьогодні в різних галузях промисловості України в постійній експлуатації перебуває значна кількість промислових об'єктів, що класифікуються як важкодоступні та потенційно небезпечні. Найбільше таких об'єктів зосереджено в енергетичній, металургійній, машинобудівній хімічній та нафтохімічній галузях промисловості, а також в будівництві та комунальному господарстві. До таких промислових об'єктів в різних галузях промисловості відносяться лінії електропередач та їх ізолятори, металургійні печі та ливарні ковші, печі випалу, хімічні реактори різного призначення, огорожувальні конструкції тощо.

Серед важкодоступних і потенційно небезпечних промислових об'єктів у різних галузях промисловості найширшого розповсюдження набули димові труби та інші технологічні газоходи, в тому числі й вентиляційні, які є невід'ємною частиною технічних схем котлоагрегатів промислових підприємств, теплоелектроцентралей (ТЕЦ) та теплових електростанцій (ТЕС) тощо. Димові труби, що обслуговують різні за типом котлоагрегати, є складними та високовартісними висотними спорудами баштового типу, основною функцією яких є відведення шкідливих димових газів та розсіювання їх в атмосфері. В процесі експлуатації димові труби зазнають не лише значних вітрових та зовнішніх температурних впливів, а також й жорстких температурно-силових та корозійних впливів агресивних газів, що рухаються димовим каналом труби. В результаті таких умов експлуатації в структурних елементах димових труб виникають різноманітні несучільності та ушкодження. Останні будуть суттєво впливати на безпеку

експлуатації та зменшувати термін служби та надійність роботи структурних елементів.

Проблема продовження термінів експлуатації різноманітних промислових димових труб є загальносвітовою. Необхідність вирішення цієї проблеми спонукає науковців розробляти методи і технічні засоби саме дистанційного діагностування технічного стану таких промислових об'єктів, без виведення з експлуатації. В останні десятиліття хоча б частково здійснити вирішення цієї проблеми вдається завдяки застосуванню дистанційного тепловізійного методу діагностування об'єктів.

Мета роботи – охарактеризувати основні засади застосування пасивного тепловізійного методу для діагностування технічного стану димової труби; дослідити механізми теплопередачі через конструктивні шари димової труби; оцінити вплив несучільностей зовнішньої поверхні труби на закономірності виникнення надлишкової температури в процесі експлуатації.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

На даний час в Україні в довготривалій експлуатації знаходяться понад 2500 димових труб різного призначення. Однак з різних причин порушення суцільності та поява ушкоджень у конструктивних шарах димових труб у ході експлуатації майже не досліджувалась. Грунтовний аналіз причин виникнення основних типів несучільностей димових труб наведено в роботі [1].

У роботі [2] розглядається можливість діагностування технічного стану димових труб шляхом аналізу розроблених теоретичних розрахункових моделей температурних полів та моделей

температурних полів штучних несучільностей у структурі димової труби.

Можливості дистанційного обстеження та діагностування технічного стану димових труб значно розширилися з розвитком тепловізійних систем та пов'язаного з ними обладнання, яке використовується у неруйнівному тепловому контролі [3].

Основним інформаційним параметром теплового неруйнівного контролю, як вже зазначалось, є локальна різниця температур між дефектною T_a та бездефектною T_b областями контрольованого об'єкта [4]:

$$\Delta T = T_a - T_b. \quad (1)$$

Процес теплопередачі, як будь-яке фізичне явище, відбувається у просторі та часі. Тому аналітичне дослідження теплопровідності зводиться до вивчення просторово-часової зміни температури, характерної для даного явища, тобто до знаходження залежності [5]:

$$T = f(x, y, z, \tau), \quad (2)$$

де x, y, z – просторові координати в декартовій системі координат; τ – час.

Сукупність миттєвих значень температури в усіх точках простору поверхні об'єкта, що вивчається, називається температурним полем. Враховуючи, що температура є величиною скалярною, то і температурне поле є скалярним полем.

Розрізняють стаціонарне та нестаціонарне температурне поле. Нестаціонарним температурним полем називають поле, температура якого змінюється не лише в просторі, а й у часі. Саме рівняння (2) є математичним виразом такого поля.

Стаціонарним температурним полем називають поле, температура якого в будь-якій точці не змінюється в часі, тобто є функцією лише координат:

$$T = f(x, y, z), \partial T / \partial \tau = 0. \quad (3)$$

У деяких задачах нестаціонарне температурне поле переходить асимптотично в стаціонарне, коли $\tau > \infty$.

Температурне поле відповідно до рівняння (2) або (3) є просторовим (тривимірним), тому що температура є функцією трьох координат. У випадку, коли температура є функцією лише двох координат, то поле є двовимірним:

$$T = f(x, y, \tau), \partial T / \partial z = 0. \quad (4)$$

Якщо температура є функцією однієї координати, то поле називається одновимірним:

$$T = f(x, \tau), \partial T / \partial y = \partial T / \partial z = 0. \quad (5)$$

Прикладом одновимірного температурного поля може слугувати поле необмеженої пластини (пластина, ширина та довжина якої набагато більші ніж її товщина) при розповсюдженні тепла перпендикулярно до її поверхні. Методи аналізу просторового та часового розподілу тепла у фізичних тілах розробляються в галузі науки і техніки, що одержала назву термографії [5].

Формування цілей статті

Цілями статті є визначення механізму теплопередачі крізь одношарову та тришарову стінки димової труби; дослідження механізму визначення температури на її зовнішній поверхні; обґрунтування механізму утворення аномалій температурного поля на поверхні димової труби в процесі зміни термічного опору конструктивних шарів та розробка способу кількісної оцінки геометричних параметрів названих аномалій в процесі термографування зовнішньої поверхні димової труби пасивним тепловізійним методом.

Висвітлення основного матеріалу статті

Висвітлення основного матеріалу статті згідно наведених цілей розпочнемо з аналізу механізмів теплопередачі крізь одношарову однорідну та тришарову різнорідну стінки димової труби за відсутності в її конструктивних шарах несучільностей та різних ушкоджень. В димових трубах механізм теплопередачі включає в себе стадії

тепловіддачі від більш гарячого газу до внутрішньої поверхні стінки труби, теплопровідність в стінці та тепловіддачу від зовнішньої поверхні стінки до більш холодного рухомого середовища довкілля. Передача тепла від одного рухомого середовища до іншого може здійснюватись як крізь розділяючі їх однорідну одношарову циліндричну стінку труби, так і крізь різнорідну багатошарову.

На рис. 1 наведена схема механізму передачі тепла крізь одношарову однорідну циліндричну стінку димової труби з постійним коефіцієнтом теплопередачі λ .

Вважатимемо, що температура димових газів T_e та температура

навколишнього середовища T_c , а також коефіцієнти тепловіддачі на внутрішній та зовнішній поверхнях труби α_1 та α_2 постійні. Також вважатимемо, що висота труби набагато більша за товщину її стінки. Тоді втратами тепла з торців труби можна знехтувати, і при стаціонарному тепловому режимі кількість тепла, що передається від внутрішнього гарячого середовища до поверхні стінки труби, проходить крізь товщу однорідної стінки та віддається навколишньому середовищу, буде незмінною та сталою.

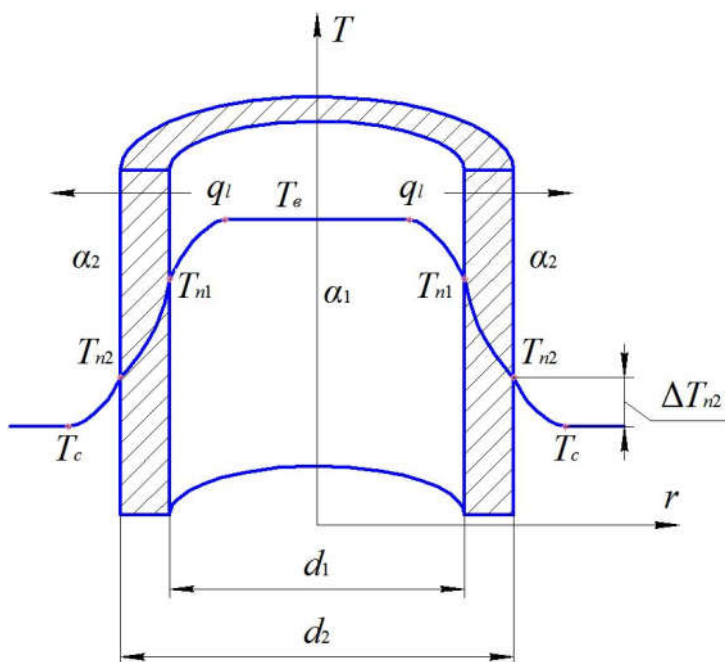


Рисунок 1 – Схема передачі тепла крізь однорідну одношарову циліндричну стінку димової труби

Рівняння теплопередачі крізь однорідну циліндричну стінку димової труби можна записати у вигляді системи рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} q_l = \alpha_1 \pi d_1 (T_e - T_{n1}); \\ q_l = \frac{2\pi\lambda(T_{n1} - T_{n2})}{\ln \frac{d_2}{d_1}}; \\ q_l = \alpha_2 \pi d_2 (T_{n2} - T_c) \end{array} \right\}, \quad (6)$$

де q_l – густина теплового потоку; T_{n_1} та T_{n_2} – температури, відповідно, на внутрішній та зовнішній поверхнях димової труби; d_1, d_2 – відповідно внутрішній та зовнішній діаметри димової труби; λ – коефіцієнт теплопровідності стінки труби.

Рівняння (6) можна записати наступним чином:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_g - T_{n_1} = \frac{q_l}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha_1 d_1}; \\ T_{n_1} - T_{n_2} = \frac{q_l}{\pi} \cdot \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}; \\ T_{n_2} - T_c = \frac{q_l}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha_2 d_2} \end{array} \right\}. \quad (7)$$

Склавши рівняння, що входять до системи (7), отримаємо вираз для визначення температурного напору:

$$T_g - T_c = \frac{q_l}{\pi} \left(\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2} \right). \quad (8)$$

Звідси густина теплового потоку крізь однорідну циліндричну стінку труби буде визначатися за виразом:

$$q_l = \frac{\pi(T_g - T_c)}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}}. \quad (9)$$

Позначимо:

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}}. \quad (10)$$

З урахуванням (10) рівняння (9) набуває вигляду:

$$q_l = k_l \pi (T_g - T_c). \quad (11)$$

Величина k_l називається лінійним коефіцієнтом теплопровідності, що характеризує інтенсивність теплопередачі від рухомого газового середовища всередині димової труби до навколишнього середовища крізь товщу однорідної циліндричної стінки. Значення k_l чисельно дорівнює кількості теплоти, яка проходить

крізь стінку довжиною 1 м за одиницю часу від одного середовища до іншого при різниці температур між ними в один градус.

Величина $R = 1/k_l$, обернена мінімальному коефіцієнту теплопередачі, називається лінійним термічним опором теплопередачі. Вираз для його визначення має вигляд:

$$R = 1/k_l = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}. \quad (12)$$

Окремі складові повного термічного опору являють собою: $\frac{1}{\alpha_1 d_1}$ та $\frac{1}{\alpha_2 d_2}$ – термічні опори теплопередачі на відповідних поверхнях циліндричної стінки труби; $\frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}$ – термічний опір теплопровідності циліндричної стінки труби.

При розподілі механізму передачі тепла крізь різношарову багатшарову циліндричну стінку димової труби необхідно враховувати опір теплопровідності всіх її шарів.

На рис. 2 наведено схему механізму передачі тепла крізь різношарову тришарову циліндричну стінку труби з різними значеннями коефіцієнтів теплопровідності, де $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ – відповідно товщини шарів футерівки, теплоізоляції та стовбура труби. При стаціонарному тепловому режимі, що встановився в тришаровій стінці димової труби, систему рівнянь (6) з урахуванням опору теплопровідності всіх наявних шарів стінки можна записати в наступному вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} q_l = \alpha_1 \pi d_1 (T_e - T_{n1}); \\ q_l = \frac{2\pi(T_{n1} - T_{n2})}{\frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1}}; \\ q_l = \frac{2\pi(T_{n2} - T_{n3})}{\frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2}}; \\ q_l = \frac{2\pi(T_{n3} - T_{n4})}{\frac{1}{2\lambda_3} \ln \frac{d_4}{d_3}}; \\ q_l = \alpha_2 \pi d_4 (T_{n4} - T_c) \end{array} \right\}, \quad (13)$$

де T_{n1}, T_{n2}, T_{n3} та T_{n4} – температури відповідно на внутрішній, другому і третьому шарах стінки, та на зовнішній поверхні стінки труби; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – коефіцієнти теплопровідності шарів стінки, d_1, d_2, d_3, d_4 – відповідні діаметри конструктивних шарів стовбура труби. Для визначення окремих температурних напорів, систему рівнянь (13) запишемо у наступному вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_e - T_{n1} = \frac{q_l}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha_1 d_1}; \\ T_{n1} - T_{n2} = \frac{q_l}{\pi} \cdot \frac{1}{2\lambda_1} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}; \\ T_{n2} - T_{n3} = \frac{q_l}{\pi} \cdot \frac{1}{2\lambda_2} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2}; \\ T_{n3} - T_{n4} = \frac{q_l}{\pi} \cdot \frac{1}{2\lambda_3} \cdot \ln \frac{d_4}{d_3}; \\ T_{n4} - T_c = \frac{q_l}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha_2 d_4} \end{array} \right\}. \quad (14)$$

Після складання рівнянь (14) та рішення відносно значення лінійної густини теплового потоку q_l , отримаємо:

$$q_l = \frac{\pi(T_e - T_c)}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^{i=3} \frac{1}{2\lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_4}} \quad (15)$$

або

$$q_l = k_i \pi (T_e - T_c). \quad (16)$$

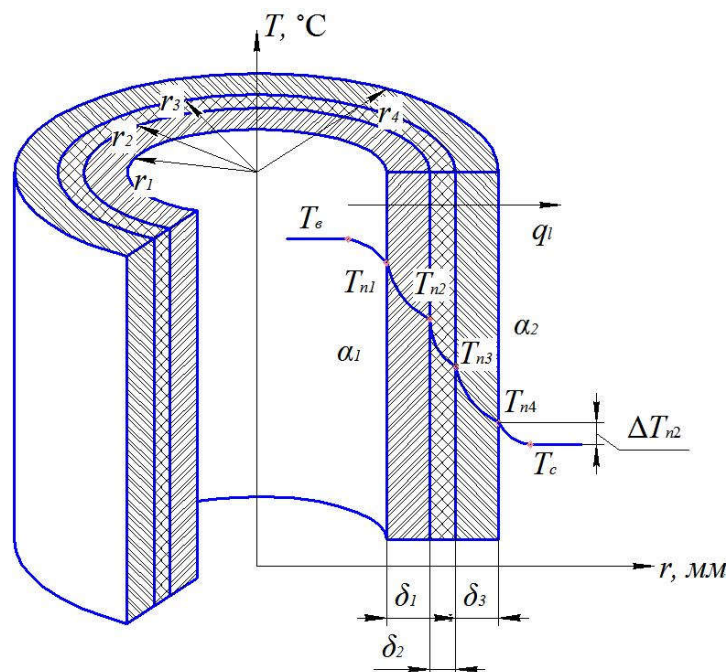


Рисунок 2 – Схема теплопередачі крізь різношарову тришарову циліндричну стінку димової труби

Величину $\frac{1}{k_i}$, яка називається повним термічним опором тришарової циліндричної стінки труби, можна представити наступним чином:

$$\frac{1}{k_i} = R_i = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^{i=3} \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_4}. \quad (17)$$

Температура на межі двох сусідніх шарів i та $i+1$ багат шарової димової труби може бути визначена з рівняння:

$$T_{n(i+1)} = T_B - \frac{q_l}{\pi} \left(\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^i \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} \right). \quad (18)$$

Проте фахівців теплового неруйнівного контролю, які займаються оцінкою технічного стану димових труб, в першу чергу цікавить значення температури на їх зовнішній поверхні. Можна вважати, що з введенням димових труб в експлуатацію температура її зовнішньої поверхні буде рівномірною й сталою.

Виходячи з наведеного, визначимо вираз для оцінки температури зовнішньої поверхні димової труби у випадку однорідної одношарової циліндричної стінки труби (рис. 1). Для цього прийемо, що внутрішній діаметр однорідної одношарової циліндричної стінки труби дорівнює 4000 мм, а товщина стінки – 200 мм. Тоді зовнішній діаметр труби становитиме 4400 мм. Якщо віднести значення зовнішнього діаметру труби до її внутрішнього, то отриманий результат можна прийняти близьким до одиниці. В цьому випадку циліндричну стінку труби вважатимемо пласкою.

Тоді систему рівнянь (6) для передачі теплової енергії крізь однорідну одношарову вже пласку стінку димової труби можна записати у вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} q = \alpha_1 (T_e - T_{n_1}); \\ q = \frac{\lambda}{\delta} (T_{n_1} - T_{n_2}); \\ q = \alpha_2 (T_{n_2} - T_c) \end{array} \right\}; \quad (19)$$

де δ – товщина стінки димової труби.

Склавши між собою члени рівняння (19), отримаємо:

$$q \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right) = T_e - T_c. \quad (20)$$

Вираз для повного термічного опору R_0 однорідної одношарової стінки труби запишемо у вигляді:

$$R_0 = R_e + R_i + R_c, \quad (21)$$

$$\text{де } R_e = \frac{1}{\alpha_1}; \quad R_i = \frac{\delta}{\lambda}; \quad R_c = \frac{1}{\alpha_2}.$$

З урахуванням виразу (21) формулу (20) для визначення густини теплового потоку q для повного термічного опору однорідної пласкої стінки запишемо у вигляді:

$$q = \frac{\tau_e - \tau_c}{R_0}. \quad (22)$$

Тоді густина теплового потоку q на зовнішній поверхні димової труби дорівнюватиме:

$$q = \frac{T_{n_2} - T_c}{R_c}. \quad (23)$$

Прирівнявши вирази (22) та (23), отримаємо формулу для визначення температури аномалії температурного поля на зовнішній поверхні однорідної одношарової пласкої стінки труби:

$$T_{n_2} = T_c + (T_e - T_c) \frac{R_c}{R_0}. \quad (24)$$

Для наведеної на рис. 2 тришарової циліндричної конструкції димової труби, прийнявши елемент пласким, температуру на її зовнішній поверхні можна рахувати за тією ж формулою (24). При цьому сумарний опір теплопередачі всіх конструктивних шарів приймається:

$$R_0 = R_e + \sum R_i + R_c,$$

де $\sum R_i = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}$ – сума термічних опорів окремих шарів труби.

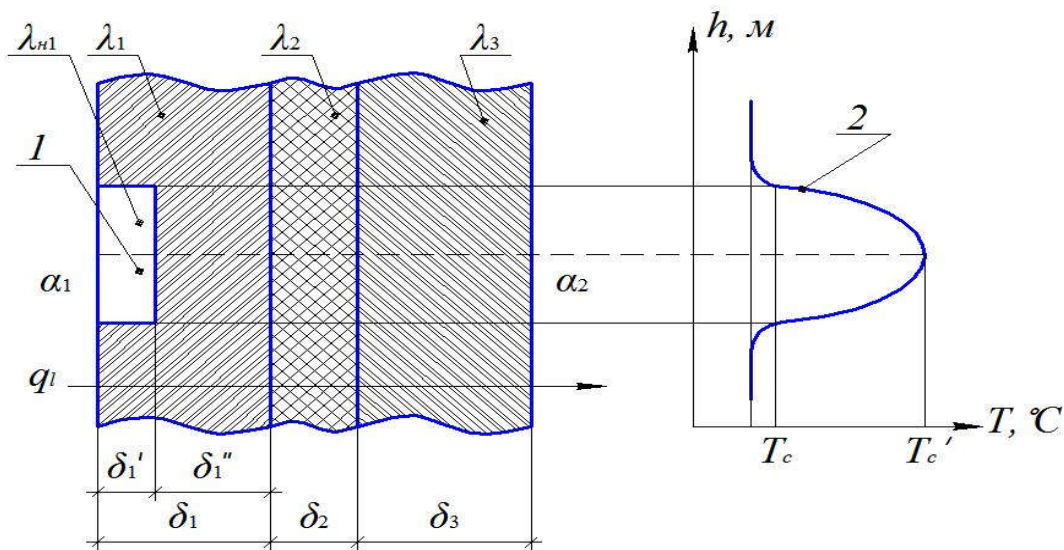


Рисунок 3 – Схема тришарової структури димової труби з несучільністю в її першому шарі та можлива гістограма розподілення температури аномалії на її зовнішній поверхні: 1 – несучільність у першому шарі; 2 – гістограма розподілення температури на зовнішній поверхні контрольованого об'єкту

Такі контрольні теоретичні розрахунки температури на зовнішній поверхні димової труби при досягненню нею стаціонарного режиму можна виконати для різних зон труби за її висотою та у будь-яку пору року: зимою, весною, літом, восени.

На рис. 3 наведено схему тришарової структури димової труби з несучільністю у її першому шарі та можливу гістограму розподілення температури аномалії на її зовнішній поверхні.

Розглянемо крайній випадок, коли несучільність димової труби представлена випадінням частини шару футерівки товщиною δ_1' .

У цьому випадку повний термічний опір конструктивних шарів стовбура труби визначатиметься за виразом:

$$R_0' = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1''}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2}, \quad (25)$$

де δ_1'' – залишкова товщина першого шару димової труби.

Тоді значення температури на зовнішній поверхні труби буде визначатися формулою:

$$T_{n_2} = T_c + (T_e - T_c) \frac{R_c}{R_0'} \quad (26)$$

Якщо відняти вираз (24) від виразу (26), отримаємо надлишкову температуру зовнішньої поверхні об'єкту у його дефектному перерізі в порівнянні з нормальним станом, яка визначається наступним чином:

$$\Delta T_{n_2} = \frac{\Delta t \cdot \Delta R \cdot R_c}{R_0 (R_0 - \Delta R)}, \quad (27)$$

де $\Delta t = T_e - T_c$; $\Delta R = R_0 - R_0'$ – термічний опір несучільності, що характеризує ступінь дефектності у першому шарі стовбура димової труби.

В процесі довготривалої експлуатації дефекти можуть виникати і в трьох конструктивних шарах стовбура димової труби.

На рис. 4 наведено схему тришарової структури стовбура труби з несучільностями у кожному з його шарів (принцип «дефект над дефектом») та можливу гістограму розподілення температури аномалії на його зовнішній поверхні.

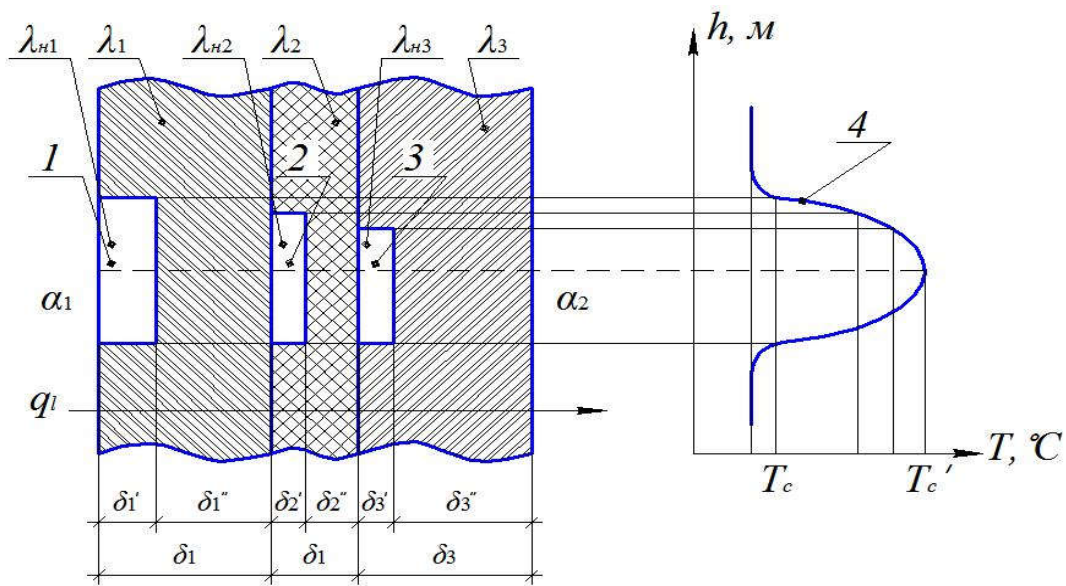


Рисунок 4 – Схема тришарової конструкції димової труби з несучільностями у кожному конструкційному шарі (принцип «дефект над дефектом») та можлива гістограма розподілення температури аномалії на її зовнішній поверхні: 1 – несучільність у першому шарі; 2 – несучільність у другому шарі; 3 – несучільність у третьому зовнішньому шарі; 4 – гістограма розподілення температури над дефектом

Також розглянемо випадок несучільності у всіх шарах. Опрацюємо ситуацію випадання частини шарів димової труби вибрані у вигляді повного випадіння частини шарів товщинами відповідно $\delta_1'', \delta_2'', \delta_3''$.

У цьому випадку повний термічний опір конструктивних шарів труби визначатиметься наступним чином:

$$R_0' = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1''}{\lambda_1} + \frac{\delta_2''}{\lambda_2} + \frac{\delta_3''}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2}, \quad (28)$$

де $\delta_1'', \delta_2'', \delta_3''$ – відповідно залишкові товщини першого, другого та третього шарів труби за наявності несучільностей.

Різниця температури ΔT_{n_2} на зовнішній поверхні димової труби визначатиметься також виразом (27).

З виразу (27) випливає, що надлишкова температура ΔT_{n_2} на зовнішній поверхні димової труби визначається температурними умовами всередині та ззовні в момент тепловізійної зйомки (T_g, R_g' та R_c, T_c), її загальним термічним опором

теплопередачі R_0' та технічним станом димової труби (величиною ΔR). При відсутності несучільностей у димовій трубі, коли $\Delta R = 0$, надлишкова температура також дорівнюватиме 0.

Щоб зменшити температуру на зовнішній поверхні труби, необхідно збільшувати її термічний опір. Для цього достатньо збільшити будь-який з окремих термічних опорів в структурі димової труби. В більшості випадків це досягається шляхом теплової ізоляції з низьким коефіцієнтом теплопровідності.

Варто зазначити, що розміри аномалії температурного поля на зовнішній поверхні димової труби змінюють свої розміри в міру поширення несучільностей у конструктивних шарах труби. Це приводить до зміни коефіцієнтів теплопровідності $\lambda_{н1}, \lambda_{н2}, \lambda_{н3}$ відповідно у тих шарах, де поступово починають формуватися несучільності. На даний час універсальних теоретичних моделей, які б дозволяли розраховувати теплофізичні характеристики (ТФХ)

реальних матеріалів, виходячи з особливостей їх будови, не існує. Тому основним методом їх визначення на даний час є експериментальний. Це стосується ТФХ матеріалів димових труб у місцях зародження несучільностей, включаючи й коефіцієнти теплопровідності.

Але важливим у цьому плані є те, що методи вимірювання ТФХ ґрунтуються на аналізі температурного відгуку об'єкта $T(x, y, z, \tau)$ на тепловий вплив у спеціально оговорених умовах для активного режиму та на температурний відгук $T(x, y, z)$ для пасивного режиму дослідження об'єкта. Як впливає із наведеного дослідження саме температурний відгук $T(x, y, z)$ у пасивному режимі експлуатації димової труби характеризує наявність в її структурі несучільностей, які впливають на розміри та амплітуду гістограм аномалій температурного поля на зовнішній поверхні труби.

Таким чином, гістограми аномалій температурного поля на зовнішній поверхні димової труби враховують зміну коефіцієнтів теплопровідностей λ матеріалу в будь-якому із шарів труби (футерівці, тепловій ізоляції та стовбурі труби) при формуванні в них несучільностей й тому проводити додаткові експериментальні дослідження з визначення коефіцієнтів теплопровідності, які постійно змінюються, дуже вартісно й недоцільно.

Варто зазначити, що проблема визначення геометричних параметрів дефектів по координатах x, y за розмірами гістограм аномалій температурного поля стосується не тільки димових труб, а й інших наведених у вступі статті важкодоступних та потенційно небезпечних промислових об'єктів при термографуванні

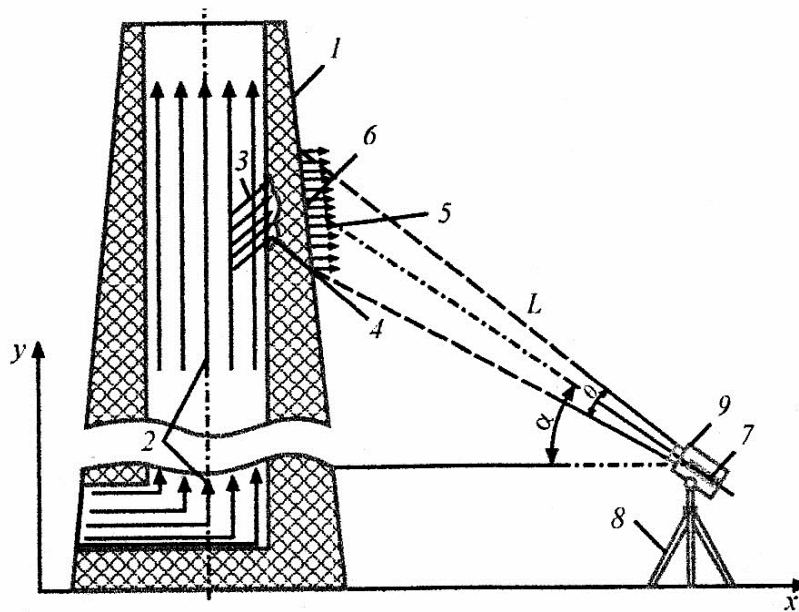
їх поверхні дистанційним пасивним тепловізійним методом.

Для отримання кількісної інформації про геометричні параметри несучільностей та ушкоджень у структурах названих об'єктів за розмірами гістограм аномалій температурного поля на їх зовнішніх поверхнях було розроблено спосіб дистанційної пасивної теплової діагностики важкодоступних та потенційно небезпечних промислових об'єктів [6]. Стосовно промислових димових труб особливості способу наведені в роботі [7].

Суть способу полягає в тому, що процес термографування зовнішньої поверхні димової труби доповнено пристроєм для дистанційного вимірювання відстані, за допомогою якого фіксується значення дистанції термографування та кут візування локальної температурної аномалії. Одночасно фіксуються кути поля зору тепловізора, яким здійснюється процедура термографування зазначеної температурної аномалії на поверхні труби. У якості пристрою для вимірювання відстані використовується лазерний далекомір.

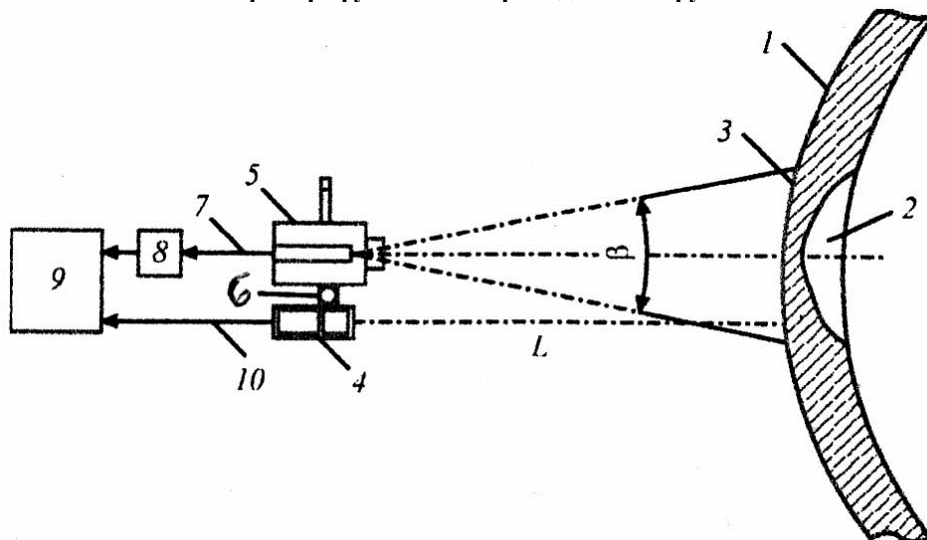
Принцип застосування способу з наведенням тепловізора і далекоміра на зону термографування зовнішньої поверхні димової труби з локальною аномалією температурного поля наведена на рис. 5.

На основі запропонованого способу дистанційної пасивної теплової діагностики промислових об'єктів тепловізійним методом розроблена лазерно-термографічна система, блок-схема якої на прикладі однієї реєстрації локальних температурних аномалій на зовнішній поверхні димової труби наведена на рис. 6.



1 – стовбур димової труби; 2 – напрямок високотемпературного потоку газів, що рухається каналом димової труби; 3 – напрямок високотемпературного потоку газів, що взаємодіє з поверхнею стовбура димової труби; 4 – внутрішній дефект стінки стовбура димової труби (зменшення товщини стінки труби внаслідок впливу агресивного середовища); 5 – теплове випромінювання; 6 – зона формування локальних температурних аномалій на зовнішній поверхні труби; 7 – далекомір; 8 – фотографічний штатив; 9 – тепловізор; L – відстань до локальної температурної аномалії; α – кут візування; θ – кут поля зору тепловізора за координатою y .

Рисунок 5 – Принцип застосування способу з наведенням тепловізора і далекоміра на зону термографування поверхні димової труби



1 – стінка димової труби; 2 – несучільність стінки; 3 – температурна аномалія над несучільністю; 4 – лазерний далекомір; 5 – тепловізор; 6 – жорстка основа; 7 – канал передачі інформації з тепловізора; 8 – блок обробки тепловізійної інформації; 9 – персональний комп'ютер; 10 – канал передачі інформації від лазерного далекоміра; β – кут поля зору тепловізора за координатою x .

Рисунок 6 – Блок-схема лазерно-термографічної системи на прикладі однієї реєстрації локальних температурних аномалій на зовнішній поверхні димової труби

Для виконання процесу термографування кожної температурної аномалії з димової труби тепловізор 5 та лазерний далекомір 4 закріплюють на жорсткій основі (платформі) 6. Інформація про локальну температурну аномалію 3 з тепловізора 5 каналом 7 передачі інформації крізь блок 8 обробки тепловізійної інформації потрапляє до персонального комп'ютера 9. Інформація про відстань до димової труби з далекоміра 4 потрапляє до персонального комп'ютера 9 напряму.

Для зручності наведення тепловізора та лазерного далекоміра на контрольовану поверхню та надійної фіксації необхідної інформації платформа з тепловізором та лазерним далекоміром закріплюється на вузлі просторової орієнтації фотографічного штативу (рис. 1), який дає змогу рухатись у різних просторових напрямках відносно центральної, нерухомої точки. У процесі термографування локальної температурної аномалії інформація про кути θ та β поля зору тепловізора визначається параметрами його оптичного блоку, а відстань L до неї та кут відхилення α від нормалі, відповідно, вимірами лазерного далекоміра. Із зафіксованого тепловізором термографічного зображення температурної аномалії на зовнішній поверхні димової труби персональний комп'ютер за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення формує термограму температурного поля аномалії над несучільністю димової труби.

Отримана термограма температурного поля аномалії над несучільністю труби у вигляді гістограми відповідного розміру і форми дозволяє шляхом уявлення її у вигляді кадру термограми прямокутної форми визначити геометричні параметри несучільності димової труби.

Схема отримання інформації в процесі термографування та уявлення аномалії температурного поля у вигляді кадру термограми прямокутної форми наведена на рис. 7.

На рис. 7 показано: P – точка встановлення тепловізора та далекоміра; a , b – геометричні параметри кадру термограми; S – площа контрольованої ділянки аномалії.

Наведені на рис. 7 зв'язки дозволяють обґрунтувати алгоритм вирішення оберненої задачі пасивної термографії шляхом розрахунку площі S аномалії температурного поля над несучільністю, що буде відповідати її розмірам (a , b) відповідно за координатами (x , y). Для реалізації алгоритму застосовується спеціалізоване програмне забезпечення, яке входить до складу персонального комп'ютера.

Алгоритм розрахунку геометричних параметрів (a , b) несучільності викладемо в наступній послідовності [7]:

Прийmemo:

$$\begin{aligned} a &= DE; \\ b &= AC; \\ L &= BP; \\ b/2 &= AB = BC. \end{aligned} \quad (29)$$

Тоді відстань від місця встановлення тепловізора да далекоміра до поверхні димової труби за координатою x визначається за виразом:

$$OP = BP \cdot \cos \alpha = L \cdot \cos \alpha. \quad (30)$$

Вираз для розрахунку параметра a кадру термограми за координатою x можна записати наступним чином:

$$a = DE = 2PB \cdot \operatorname{tg} \beta / 2. \quad (31)$$

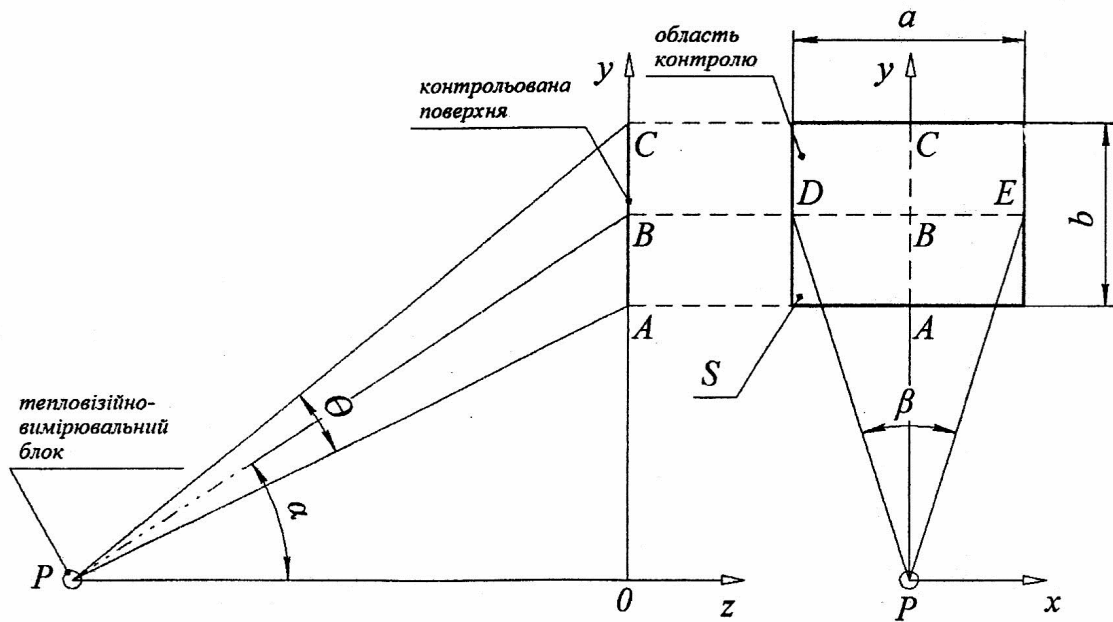


Рисунок 7 – Схема отримання інформації в процесі термографування та уявлення аномалії температурного поля у вигляді кадру термограми прямокутної форми

Остаточно значення параметра α буде дорівнювати:

$$\alpha = 2L \cdot \operatorname{tg} \beta / 2. \quad (32)$$

Вираз для визначення параметра b кадру термограми за координатою y можна записати у вигляді:

$$b = AC = CO - AO. \quad (33)$$

Запишемо значення CO та AO з використанням тригонометричних функцій:

$$CO = OP \cdot \operatorname{tg} \left(\alpha \frac{\theta}{2} \right) = BP \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \left(\alpha + \frac{\theta}{2} \right),$$

$$AO = OP \cdot \operatorname{tg} \left(\alpha \frac{\theta}{2} \right) = BP \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \left(\alpha - \frac{\theta}{2} \right)$$

(34)

Підставивши значення CO та AO виразів (34) до виразу (33), отримаємо остаточну формулу для розрахунку параметру b кадру термограми:

$$b = L \cdot \cos \alpha \left[\operatorname{tg} \left(\alpha \frac{\theta}{2} \right) - \operatorname{tg} \left(\alpha - \frac{\theta}{2} \right) \right]. \quad (35)$$

За значеннями лінійних параметрів α та b кадру термограми та за кількістю пік

селів балометричної матриці тепловізора відповідно за горизонталлю (k_a) та вертикаллю (k_b) розміри пікселів будуть дорівнювати за горизонталлю та за вертикаллю, відповідно:

$$\alpha_1 = \frac{\alpha}{k_a}, \quad (36)$$

$$b_1 = \frac{b}{k_b}.$$

Тоді площа одного пікселя для кожної температурної аномалії буде визначатись за виразом:

$$S_n = \alpha_1 \cdot b_1 = \frac{\alpha \cdot b}{k_a \cdot k_b}. \quad (37)$$

У залежності від кількості N пікселів тепловізора, задіяних за розмірами (α, b) кадру термограми, площу аномалії температурного поля можна розрахувати таким чином:

$$\delta = \sum_1^N \frac{\alpha \cdot b}{k_a \cdot k_b}. \quad (38)$$

Обґрунтування та розробка алгоритму оберненої задачі шляхом визначення геометричних параметрів несучільностей димової труби вирішує задачу теплової дефектометрії в пасивній термографії. Збільшення розмірів несучільностей у зв'язку зі зростанням амплітуди розподілення аномалії температурного поля в пасивній термографії дозволяє підвищити достовірність дистанційної оцінки технічного стану димових труб, інших важкодоступних та потенційно небезпечних об'єктів пасивним тепловізійним методом без виявлення їх з експлуатації.

Під час термографування аномалії температурного поля над несучільністю на зовнішній поверхні димової труби тепловізор та далекомір встановлюються у вибраній точці.

Висновки

1. Досліджено механізм передачі теплової енергії крізь одношарову однорідну і тришарову різнорідну циліндричні стінки димової труби та визначено термічні опори теплопередачі конструктивних шарів наведених стінок труби.

2. Обґрунтовано механізм визначення температури на зовнішній поверхні одношарової та тришарової димової труби, що дозволяє після запуску труби в експлуатацію визначити початкову температуру на її поверхні улюбій зоні при досягненні нею стаціонарного режиму.

3. Наведено механізми утворення температурних аномалій на зовнішній поверхні тришарової стінки димової труби при наявності несучільностей в одному або трьох її шарах з урахуванням термічних опорів залишкових частин конструктивних шарів труби та отримано вираз для визначення надлишкової температури аномалій на зовнішній поверхні труби.

4. Розроблено спосіб термографування зовнішньої поверхні димової труби дистанційним пасивним тепловізійним

методом та алгоритм рішення оберненої задачі пасивної дефектометрії, в результаті чого досягається можливість визначення геометричних параметрів (a, b) несучільностей труби за розмірами і формами гістограм аномалій температурного поля на її зовнішній поверхні.

Список використаних джерел

1. Глуховський В.Ю., Бондаренко О.Г. Особливості діагностування технічного стану промислових димових труб пасивним тепловізійним методом. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*. 3. 2019. С. 36-45.

2. Бондаренко О.Г., Глуховський В.Ю. Аналіз способів діагностування технічного стану димових труб пасивним тепловізійним методом. Збірник доповідей 9-ї Національної науково-технічної конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика». Київ. 2019. С. 199-205.

3. International standart ISO/FDIS 18251-1:2016(E). Non-destructive testing – infrared thermography. – Part. 1: Characteristics of system and equipment. 17 p.

4. Стороженко В.О., Вавілов В.П., Волчек А.Д. Неруйнівний контроль якості промислової продукції активним тепловим методом. К.: Техніка 1988. 87с.

5. Маслова В.О., Стороженко В.О. Термографія в діагностиці і неруйнівному контролі. Харків. Вид-во «Компанія СМІТ». 2004. 120 с.

6. Троїцький В.О., Бондаренко О.Г., Глуховський В.Ю. Спосіб дистанційної пасивної теплової діагностики важкодоступних та потенційно небезпечних промислових об'єктів. Україна. Патент на винахід № 122355. МКП G 01 N 25/72. Заявл. 27.06.2018. Опубл. 26.10.2020. Бюл. № 20.

7. Бондаренко О.Г., Глуховський В.Ю. Спосіб термографування зовнішньої поверхні димових труб дистанційним пасивним тепловізійним методом. Технічна діагностика та неруйнівним контроль. 2022. 3. С. 19-21.

7. Bondarenko O.H., Hlukhovskiy V.Iu. Sposib termohrafuvannia zovnishnoi poverkhni dymovykh trub dystantsiinym pasyvnym teploviziinym metodom. *Tekhnichna diahnostyka ta neruinivnym kontrol.* 2022 3. 19-21. [in Ukrainian]

References

1. Hlukhovskiy V.Iu., Bondarenko O.H. Osoblyvosti diahnostuvannia tekhnichnoho stanu promyslovykh dymovykh trub pasyvnym teploviziinym metodom. *Tekhnichna diahnostyka ta neruinivnyi kontrol.* 2019. №3. P.36-45. [in Ukrainian]

2. Bondarenko O.H., Hlukhovskiy V.Iu. Analiz sposobiv diahnostuvannia tekhnichnoho stanu dymovykh trub pasyvnym teploviziinym metodom. Zbirnyk dopovidei 9-yi Natsionalnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Neruinivnyi kontrol ta tekhnichna diahnostyka». Kyiv. 2019. 199-205. [in Ukrainian]

3. International standart ISO/FDIS 18251-1:2016(E). Non-destructive testing – infrared thermography. – Part. 1: Characteristics of system and equipment. 17 p.

4. Storozhenko V.O., Vavilov V.P., Volchek A.D. Neruinivnyi kontrol yakosti promyslovoi produktsii aktyvnym teplovym metodom. K.: Tekhnika. 1988. 87p [in Ukrainian]

5. Maslova V.O., Storozhenko V.O. (2004) Termohrafiia v diahnostytsi i neruinivnomu kontroli. Kharkiv. Vyd-vo «Kompaniia SMIT». 2004. 120с. [in Ukrainian]

6. Troitskiy V.O., Bondarenko O.H., Hlukhovskiy V.Iu. Sposib dystantsiinoi pasyvnoi teplovoi diahnostyky vazhkodostupnykh ta potentsiino nebezpechnykh promyslovykh ob'ektiv. Ukraina. Patent na vynakhid № 122355. MKP G 01 N 25/72. Zaiavl. 27.06.2018. Opubl. 26.10.2020. Biul. № 20. [in Ukrainian]

УДК 537.322.2

DOI 10.31471/1993-9981-2023-1(50)-20-30

ДІАГНОСТУВАННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ІЗ ЗАГАЛЬНОЮ ПАМ'ЯТТЮ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕРЕЖ ПЕТРІ

О. Г. Малько, А. О. Малько

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019, E-mail: malko.pochta@gmail.com*

З розробкою швидкодіючих ЕОМ застосовність і корисність моделювання значно зросли. Подання системи математичною моделлю, перетворення цієї моделі в команди для ЕОМ і виконання програми уможливили моделювання більших і складніших систем, ніж раніше. Це призвело, в результаті, до значних досліджень методів моделювання на ЕОМ та самих ЕОМ, оскільки вони беруть участь у моделюванні у двох ролях: як обчислювальні засоби та як об'єкт моделювання. Одним із найпоширеніших сучасних методів формалізації моделювання та аналізу обчислювальних систем є мережі Петрі. Сьогодні існує велика кількість як теоретичних досліджень у цій галузі, так і реалізацій практичних інструментаріїв для розробки розподілених алгоритмів, заснованих на мережах Петрі. Розробляється міжнародний стандарт мереж Петрі. Разом із тим, відчувається необхідність розвитку формалізму для більш адекватного та зручного представлення систем зі складною структурою. Сучасні системи часто є мультиагентними і мають ієрархічну, багаторівневу структуру. У зв'язку з цим останнім часом проводяться дослідження щодо розширення формалізму мереж Петрі за рахунок ідей об'єктно-орієнтованого підходу з метою отримання моделей, що явно відображають ієрархічну та мультиагентну структуру системи. Класичне послідовне програмування не може забезпечити створення програм, які ефективно використовують ресурси сучасних обчислювальних систем. Багатопотокові програми, що працюють з даними у спільній пам'яті, часто недостатньо ефективні, оскільки надмірно використовують примітиви синхронізації. При недостатньому використанні примітивів є ризик отримати програму, яка має проблеми із синхронізацією. Засоби динамічного аналізу паралельних програм не завжди можуть вирішити ці проблеми. Для низки програм потрібен статичний аналіз паралельних алгоритмів. Найбільш складною проблемою є діагностування можливості тупиків. У даній роботі розглядаються аспекти, пов'язані із застосуванням мереж Петрі для виявлення проблем синхронізації у програмах з спільною пам'яттю. Наводяться схеми перетворення основних примітивів синхронізації у модель мережі Петрі, і зведення розв'язання задач про відсутність тупиків у мережі Петрі до задачі математичного програмування.

Ключові слова: паралельне програмування, мережі Петрі, примітиви синхронізації, тупики, математичне програмування.

With the development of high-speed computers, the using and usefulness of simulations has increased significantly. Representing a system as a mathematical model, converting this model into commands for a computer, and executing a program on a computer made it possible to simulate larger and more complex systems than before. This has resulted in considerable research into computer simulation methods and computers themselves, as they participate in simulation in two roles: as computational tools and as the object of simulation. Petri nets are one of the most common modern methods of formalization of modeling and analysis of computer systems. Currently, there is a large amount of both theoretical research in this field and the implementation of practical tools for the development of distributed algorithms based on Petri nets. An international standard for Petri nets is being developed. At the same time, there is a need to develop formalism in order to more adequately and conveniently present systems with a complex structure. Modern systems are often multi-agent and have a hierarchical, multi-level structure. In this regard, research has recently been conducted on extending the formalism of Petri nets due to the ideas of an object-oriented approach in order to obtain models that clearly reflect the hierarchical and multi-agent structure of the system. Classical sequential programming no longer leads to the creation of programs that efficiently use the resources of modern computer systems. Multi-threaded programs working with data in shared memory are often inefficient because they overuse synchronization primitives. If you don't use synchronization primitives enough, you run the risk of getting a program that has some kind of synchronization problem. Means of dynamic analysis of parallel programs cannot always solve these problems. A number of applications require static analysis of parallel algorithms. The most difficult problem is diagnosing the possibility of dead ends. This paper considers the aspects related to the use of Petri

nets to detect synchronization problems in parallel programs that use shared memory. Schemes for converting the main primitives of synchronization into a Petri net model are presented, the mechanism of siphons for determining the activity of the Petri net is considered, and even the reduction of solving the problem of the absence of dead ends in the Petri net to the problem of mathematical programming.

Keywords: parallel programming, Petri nets, synchronization primitives, dead ends, mathematical programming.

1. Вступ

Обчислювальні системи є складними, часто великими і включають багато взаємодіючих компонент. Кожна компонента також може бути складною, оскільки взаємодіє з іншими компонентами системи. Це справедливо і для багатьох інших систем. Економічні системи, юридичні системи, системи управління дорожнім рухом, хімічні системи, біологічні системи складаються з багатьох окремих компонент, що взаємодіють один з одним великою кількістю зв'язків.

Отже, незважаючи на різноманітність модельованих систем, виділяється декілька загальних рис, які мають бути представлені в особливостях використовуваної моделі цих систем. Основна ідея полягає в тому, що системи складаються з окремих взаємодіючих компонент. Кожна компонента багатокомпонентної системи сама може бути системою, але її поведінку можна описати незалежно від інших компонент системи, за винятком точно визначених взаємодій з іншими компонентами. Кожна компонента має свій стан. Стан компоненти - це абстракція відповідної інформації, необхідної для опису її (майбутніх) дій. Стан компоненти зазвичай залежить від передісторії цієї компоненти, і може з часом змінюватися. Поняття "стан" дуже важливий при моделюванні компоненти. Наприклад, в моделі системи черг банку можуть бути присутніми декілька касирів і декілька клієнтів. Касири можуть бути вільні (чекаючи клієнта) або зайняті (обслуговуючи клієнта). Аналогічно клієнти можуть бути вільні (чекаючи, коли касир звільниться для обслуговування їх) або зайняті (при обслуговуванні їх касиром). У

клінічній моделі стан пацієнта може бути критичним, серйозним, задовільним, хорошим або чудовим.

Діям компонент системи властиві сумісність або паралелізм. Дії однієї компоненти системи можуть виконуватися одночасно з діями інших компонент. У обчислювальній системі, наприклад, під управлінням ЕОМ можуть паралельно діяти багато периферійних пристроїв. В економічній системі одночасно виробники поставляють одну продукцію, тоді як продавці збувають іншу, а покупці використовують третю.

Поєднання природи дій в системі створює певні труднощі при моделюванні. Оскільки компоненти системи взаємодіють, потрібна синхронізація. Передавання інформації від однієї компоненти до іншої вимагає, щоб дії включених в обмін компонент були під час взаємодії синхронізовані. Це може привести до того, що одна компонента чекатиме іншу компоненту. Узгодження в часі дій різних компонент може бути дуже складним, а взаємодії між компонентами, що виходять в результат, важко описувати.

Класичне послідовне програмування вже не забезпечує створення програм, які ефективно використовують ресурси сучасних обчислювальних систем. Багатопотокові програми, що працюють з даними з спільною пам'яттю, часто недостатньо ефективні, оскільки надмірно використовують примітиви синхронізації. При недостатньому використанні примітивів синхронізації є ризик отримати програму, яка має проблеми із синхронізацією. Засоби динамічного аналізу паралельних програм не завжди можуть вирішити ці проблеми. Для низки програм потрібен статичний аналіз паралельних

алгоритмів. Найбільш складною проблемою є діагностування можливих тупиків.

Метою даної роботи є розробка методики діагностування тупиків шляхом відображення алгоритму у еквівалентну мережу Петрі з подальшим її аналізом.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій блеми.

Основні положення використання мереж Петрі для моделювання причиново наслідкових зв'язків у системах представлені у роботах [1], [2].

У роботі [3] досліджується застосування мереж Петрі для моделювання обчислювальних систем з пам'яттю, що розділяється. Досить багато уваги приділяється розширеним мережам Петрі шляхом введення дуг, що забороняють, переходам з ненульовим часом. Пропонується так звана система SOM, заснована мовою ADA для моделювання та верифікації паралельних процесів.

У роботі [4] пропонується оригінальний математичний апарат для ефективного виявлення відсутності тупиків у мережах Петрі. Використовується механізм сифонів та пасток.

Ряд робіт присвячено моделюванню багатопотокових додатків з використанням мереж Петрі. Це, наприклад, робота [5], де розглядається оптимізація багатопоточних додатків на багатопроцесорних обчислювальних системах (використовуються мережі Петрі з ненульовим часом переходу).

У роботі [6] розглядається верифікація паралельних програм із використанням мереж Петрі як графа доказів.

Робота [7] розглядає підмножину мереж Петрі — СТ-мережі (Casual–Time nets) — для моделювання автоматів паралельного виконання та пропонує засоби для побудови паралельних додатків та контрольованим потоком виконання.

Робота [8] використовує механізм інваріантів моделі мережі Петрі для

визначення помилок синхронізації в програмах, а саме: тупиків, нескінченних внутрішніх циклів і втрати повідомлень при передчасному завершенні. У [9] також пропонується використати механізм інваріантів.

Роботи [10] і [11] пропонують моделі мереж Петрі для основних примітивів синхронізації, але не пропонують методів доказу відсутності помилок синхронізації в програмах, що моделюються.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми.

На теперішній час значний інтерес викликають засоби моделювання та аналізу складних паралельних та розподілених систем. Такими системами є, наприклад, обчислювальні машини та комплекси з паралельною та розподіленою архітектурою, паралельні програми та алгоритми, протоколи взаємодії (комунікаційні, верифікуючі), моделі обчислювальних процесів. При дослідженні обчислювальних системи нас можуть цікавити її різні властивості. Математичні методи у багатьох випадках дозволяють отримати однозначну відповідь на такі питання. Тут велике значення має початковий вибір використовуваного формалізму, тобто способу моделювання реальної системи. Для вирішення завдань аналізу та верифікації в теорії паралельних та розподілених обчислень на даний час пропонуються різні способи моделювання реальних систем. До найбільш відомих формалізмів можна віднести кінцеві автомати, алгебри процесів, CCS Р.Мілнера, мови трас, а також різні їх модифікації, у тому числі з додаванням конструкцій часу та ймовірності [2]. Різні класи моделей мають різні властивості виразності та алгоритмічної розв'язуваності. Причому ці два параметри моделі, як правило, суперечать один одному: обраний формалізм може виявитися або дуже виразним і не піддаватися аналізу, або дозволяти ефективно вирішувати всі

необхідні проблеми, але при цьому бути занадто слабким, і недостатньо повно описувати модельовану систему. Для формалізації процесів у обчислювальних системах необхідно звернутися до абстракцій умов, подій, причинно-наслідкових зв'язків тощо. Якщо ж цим абстракціям поставити у відповідність певні графічні примітиви і пов'язати їх лініями, що несуть певну логіку, то вийде якась мережа, тобто. графічний образ процесу. Переагою мережевих методів опису та аналізу процесів є те, що абстракції, що використовуються в них, близькі до інтуїтивних уявлень про процеси. Мережі Петрі - математичний апарат для моделювання динамічних дискретних систем[8]. Вперше описаний Карлом Петрі. Популярність мереж Петрі викликана вдалим уявленням різних типів об'єктів, присутніх у багатьох системах, що моделюються, і «подійним» підходом до моделювання. Вони мають найкращі можливості для опису взаємозв'язків і взаємодій паралельно працюючих процесів. Мережі Петрі є потужним інструментом дослідження систем, що моделюються, завдяки їх можливості опису багатьох класів дискретних, асинхронних, паралельних, розподілених, недетермінованих систем, завдяки наочності представлення їх роботи, розвиненому математичному та програмному апарату аналізу. Мережі Петрі розроблялися спеціально для моделювання тих систем, що містять взаємодіючі паралельні компоненти, наприклад, апаратне та програмне забезпечення ЕОМ. Існують певні області, де мережі Петрі є ідеальним інструментом для моделювання. Це області, у яких події відбуваються синхронно і незалежно. Однією з таких областей є апаратне та програмне забезпечення ЕОМ.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Багато-потоківі програми, що працюють з даними у спільній пам'яті, часто

недостатньо ефективні, оскільки надмірно використовують примітиви синхронізації. При недостатньому використанні примітивів синхронізації є ризик отримати програму, яка має в якомусь вигляді проблеми із синхронізацією. Засоби динамічного аналізу паралельних програм не завжди можуть вирішити ці проблеми.

Для ряду програм потрібен статичний аналіз паралельних алгоритмів. Найбільш складною проблемою є діагностування можливості тупиків. **Метою даної роботи є вирішення задачі діагностування тупиків у алгоритмах шляхом застосування перетворення алгоритму в еквівалентну мережу Петрі з подальшим її аналізом.**

Структура мережі Петрі визначається її позиціями, переходами, вхідними та вихідними функціями (відображеннями) [1], тобто кортежем множин $C = (P, T, F, I, O, \mu_0)$. Для структурного опису математичної моделі мережею Петрі застосовуються такі позначення і відповідності.

Звичайна мережа Петрі, де:

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ - множина позицій (умов);

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ - множина переходів (подій);

$\mu : P \rightarrow N$ - відображення множини позицій у множину невід'ємних цілих чисел;

$I : T \rightarrow P$ - вхідна функція переходів - відображення переходів (подій) у комплект їхніх вхідних позицій (передумови);

$O : T \rightarrow P$ - вихідна функція переходів - відображення переходів (подій) у комплект їхніх вихідних позицій (післяумов);

$I : P \rightarrow T$ - вхідна функція позицій - відображення позицій (умов) у комплекти їхніх вхідних переходів (перед подій);

$O : P \rightarrow T$ - вихідна функція переходу - відображення позицій у комплекти їхніх вихідних переходів (післяподій).

$I(p_i)$ - множина вхідних переходів позиції p_i (передподії умові p_i);

$O(p_i)$ - множина вихідних переходів позиції p_i (післяподії умови p_i);

$I(t_i)$ - множина вхідних позицій переходу t_i (передумови події t_i);

$O(t_i)$ - множина вихідних позицій переходу t_i (післяумови події t_i);

$\#(p_i, I(t_j))$ - кратність вхідної позиції p_i для переходу $t_j \in T$ є число появ позиції у вхідному комплекті переходу;

$\#(p_i, O(t_j))$ - кратність вихідної позиції p_i для переходу $t_j \in T$ є число появ позиції у вихідному комплекті переходу.

Граф мережі Петрі відповідає її структурі і може бути представлений кортежем $G = (P, T, F, \mu)$, де $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ - множина спрямованих дуг $P \cap T = \emptyset$. В графах мереж Петрі використовують такі позначення: коло \circ є позицією, а планка $|$ - переходом.

Початковий стан мережі Петрі задається за допомогою маркування її позицій $\mu_0 : P \rightarrow N$, яке полягає у наданні кожній позиції мережі деякого числа маркерів. Присутність маркера у позиції трактується як виконання деякої умови. Спрацювання переходів змінює розмітку сітки у відповідності до правил спрацювання переходів. Отже, розмітку μ_0 можна представити вектором з $|P|$ пронумерованих елементів, у якому i -тий елемент дорівнює кількості маркерів у i -тій позиції. У загальному випадку кількість маркерів у вузлі може бути більшою за одиницю.

Перехід дозволений якщо кількість маркерів у його вхідних позиціях не менше кількості дуг які йдуть від кожної вхідної позиції до переходу.

Нове маркування μ' здійснюється шляхом видалення маркерів з вхідних позицій переходу з наступним розміщення маркерів у кожній вихідній позиції (по одному маркеру на кожен дугу). Це можна представити як функцію наступного стану $\mu' = \delta(\mu, t_j)$ з маркуванням μ і переходом $t_j \in T$, який можливий тоді і тільки тоді, коли $\mu(p_i) \geq \#(p_i, I(t_j))$ для всіх $p_i \in I(t_j)$. Тоді якщо $\delta(\mu, t_j)$ визначена, то $\mu' = \delta(\mu, t_j)$ де $\mu'(p_i) = \mu(p_i) - \#(p_i, I(t_j)) + \#(p_i, O(t_j))$ для всіх $p_i \in I(t_j)$.

Розширення запуску позначається як $\mu'(\sigma)$, де σ - послідовність переходів, що переводять μ у μ' . Множина усіх маркувань, досяжних з μ_0 , позначається як $R(\mu_0)$.

Мережа Петрі також може задаватися за допомогою матриці інцидентності $C = [c_{ij}]$ для якої

$$c_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } t_j \in I(p_i) \cap O(p_i); \\ -1, & \text{якщо } t_j \in I(p_j) \cap O(p_i) \wedge i \neq j; \\ 0, & \text{у іншому випадку.} \end{cases}$$

Аналіз моделей систем на базі мереж Петрі зводиться до аналізу наступних властивостей [2].

Безпека. Одна з найважливіших властивостей мереж Петрі, яка повинна моделювати реальний пристрій, — безпека. Позиція $p_i \in P$ мережі Петрі $C = (P, T, I, O)$ з початковим маркуванням μ є безпечною, якщо $\mu'(p_i) \leq 1$ для будь-якої $\mu' \in R(C, \mu)$. Мережа Петрі безпечна, якщо безпечна кожна її позиція. Якщо інтерпретувати мережі як умови і події, маркування кожної позиції повинна бути безпечною. Безпека дозволяє реалізувати позицію тригером, але в більш загальному випадку можна використовувати лічильник. Проте будь-який апаратно-реалізований лічильник

обмежений за максимальним числом, яке він може представити.

Обмеженість. Обмеженість є узагальненням властивості безпеки. Позиція є k -безпечною або k -обмеженою, якщо кількість маркерів в ній не може перевищувати ціле число k . Зауважимо, що межа k' за числом маркерів, які можуть знаходитися в позиції, може бути функцією від позиції (наприклад, позиція p_i може бути 3-безпечною, тоді як позиція p_j — 8-безпечною).

Збережуваність. При моделювання мережами Петрі систем розподілу ресурсів важливою властивістю є збережуваність. Тут необхідно щоб маркери які представляють ресурси, ніколи не створювались і не знищувались. Простий спосіб зробити це - задати, щоб загальне число маркерів у мережі залишалось сталим.

Мережа Петрі $C = (P, T, I, O)$ з початковою маркуванням μ називається збереженою, якщо для всіх $\mu' \in R(C, \mu) : \sum_{p_i \in P} \mu'(p_i) = \sum_{p_i \in P} \mu(p_i)$.

Активність. Іншою властивістю при моделюванні мережами Петрі систем розподілу ресурсів є безвихідь. Перехід називається *активним*, якщо він не заблокований (не безвихідний). Перехід t_j мережі Петрі C називається *потенційно запуслим* у маркуванні μ якщо існує маркування $\mu' \in R(C, \mu)$, у якому перехід t_j дозволений. Перехід є *активним* з маркуванням μ , якщо він може бути потенційно запущеним всякому маркуванні з $R(C, \mu)$. Отже, якщо перехід активний, то завжди можливо перевести мережу Петрі з її поточного маркування в маркування, у якому запуск переходу стане дозволеним.

Виявлення тупиків у багатопотоковому обчислювальному середовищі із спільними ресурсами. Отже,

необхідним є визначення однієї характеристики — активності (liveness).

Якщо перехід у мережі Петрі ніколи не може бути запущений, такий стан називається тупиком. Можливість настання стану тупика в мережі Петрі вказує на можливість стану тупика і в модельованому обчислювальному середовищі.

Для аналізу тупиків у мережі з маркуванням застосовується наступна класифікація:

- активність рівня 0 має перехід t_j , який ніколи не може бути запущений;
- активність рівня 1 має перехід t_j , якщо він може бути потенційно запущеним, тобто існує таке допустиме і досяжне маркування $\mu' \in R(C, \mu)$, у якому цей перехід дозволено;
- активність рівня 2 має перехід t_j якщо для будь-якого цілого n існує послідовність запусків t_j , у якій t_j присутнє принаймні n разів.
- активність рівня 3 має перехід t_j , якщо існує нескінченна послідовність запусків, у якій t_j присуне необмежену кількість разів;
- активність рівня 4 має перехід t_j , якщо для будь-якого $\mu' \in R(C, \mu)$, існує така послідовність σ запусків, що t_j дозволений у $\delta(\mu', \sigma)$.

Перехід, що володіє активністю рівня 0, називається пасивним. Перехід, що володіє активністю рівня 4, називається активним. Мережа Петрі володіє активністю рівня i , якщо кожен її перехід володіє активністю рівня i .

Наявність у мережі переходів з активністю 0 з впевненістю підтверджує наявність тупиків у модельованій системі.

Мережа Петрі не містить тупиків, якщо для будь-якого досяжного маркування є принаймні один дозволений перехід. Позиція p обмежена, якщо існує така

константа k , що $\mu(p) \leq k$ для всіх $\mu \in R(\mu_0)$. Мережа Петрі називається обмеженою, якщо всі позиції мережі обмежені.

Підмножина позицій $S \subseteq P$ називається сифоном (syphon), якщо будь-який вхідний перехід в S є також вихідним переходом у S , тобто $O(S) \subseteq I(S)$. Відповідно є пастка S (trap), якщо $I(S) \subseteq O(S)$. Сифон (пастка) називається мінімальним, якщо він не містить інших сифонів (пасток).

Існує кілька основних підходів до аналізу активності мереж Петрі – метод дерева досяжності, метод матричних рівнянь та метод сифонів та пасток. Однак ці методи можуть показати необхідність, але не можуть показати достатність для доказу існування тупиків у моделі. У цій роботі використовується перетворення рівнянь мережі Петрі у рівняння для методу математичного моделювання.

Процес формування коректного алгоритму паралельної обробки та верифікації складається з низки кроків, які можуть бути описані таким чином:

1. Розробка моделі алгоритму.
2. Представлення моделі алгоритму мовою мереж Петрі.
3. Верифікація побудованої моделі Петрі та повернення до першого пункту для уточнення моделі алгоритму.

Моделювання багатопотокової обробки та синхронізації за допомогою мереж Петрі. Для представлення моделі мовою мереж Петрі потрібно відобразити основні конструкції вхідної моделі на вихідній мові. У цій роботі застосовуються примітиви синхронізації двох типів: Mutex та Event.

Примітив *mutex* Mutex є засобом взаємовиключення обчислювальних потоків і включає наступні методи:

- WaitAndLock — очікувати на звільнення з негайним захопленням
- Release – звільнення.

Mutex має атрибут власності, тобто, властивість належності обчислювальному потоку, що його захопив. Цей примітив потребує підтримки операційною системою, може призвести до контекстного перемикання потоків і не переводить обчислювальне ядро у стан активного очікування. Примітив Mutex можна подати у вигляді моделі мережі Петрі (рис.1).

Наявність маркера у позиції p_1 показує, що Mutex знаходиться у вільному стані. Ця позиція повинна використовуватися кількома обчислювальними потоками. З появою маркера в позиції p_0 та наявності маркера в позиції p_1 стає можливим перехід t_0 , маркер у позиції p_1 тепер відсутній, що унеможливує здійснення переходів, які залежать від наявності маркера в позиції p_1 .

Після захоплення маркера обчислювальний потік виконує код критичної секції (позиція p_2), виконується перехід t_1 , який передає маркер у позицію p_1 , уможливаючи здійснення операцій, пов'язаних з наявністю маркера у цій позиції переходів.

Примітив *mutex* Event використовується для встановлення факту виникнення будь-якої події, може перебувати у двох станах — сигнальному та несигнальному і включає наступні методи:

- Set - встановити об'єкт у сигнальний стан;
- Reset – встановити об'єкт у несигнальний стан;
- Wait – очікувати настання сигнального стану.

На відміну від об'єктів типу Mutex, об'єкти типу Event не мають атрибуту приналежності. Тут розглядається варіант об'єктів типу Event, що потребує ручного переведення стану в несигнальний після того, як рівно один з числових потоків отримав доступ до нього.

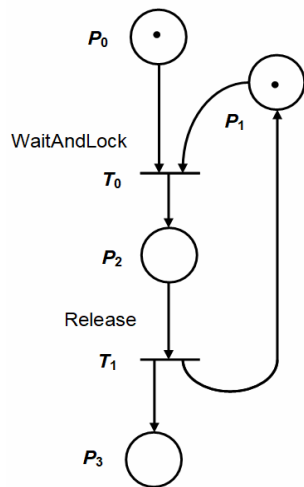


Рисунок 1 – Схема мережі Петрі примітиву Mutex

Примітив Event поряд з примітивом Mutex вимагає підтримки операційною системою, що може призвести до перемикання контексту обчислювальних потоків і не переводить обчислювальне ядро в стан активного очікування.

Тут враховується наступний факт: якщо примітив Event знаходиться у сигнальному стані, то наступні виклики методів Set не чинять на цей стан впливу. Якщо примітив Event знаходиться в несигнальному стані, то наступні виклики методу Reset не впливають на цей стан. Дані умови призводять до більш точної та більш складної моделі, ніж у роботах [10] та [11].

Мережа Петрі для примітиву Event представлена на рис. 2. Позиція p_0 є входом методу Set. Якщо примітив Event вже знаходиться у стані «сигнал» (що визначається наявністю маркера в позиції p_1), то операція розміщення маркера у позицію p_0 буде еквівалентна порожній операції. Якщо ж цей примітив не перебуває в стані сигналу, то операція розміщення маркера у позицію p_0 переводить примітив у стан сигнал.

Позиція p_5 являє собою вхід методу Reset. Розміщення маркера у даній позиції переводить примітив Event в стан «сигнал не встановлений» незалежно від первісного стану примітиву.

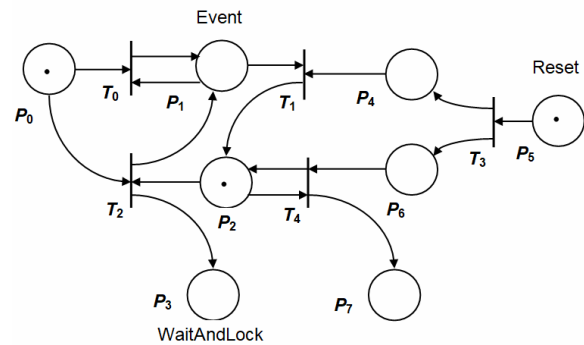


Рисунок 2 – Схема мережі Петрі примітиву Event

Виходом методу Reset є позиція p_7 - поява маркера у даній позиції сигналізує про завершення роботи методу.

Якщо у позиції p_3 вже є маркер, то метод Wait завершується успіхом.

Сукупна мережа Петрі обчислювальної моделі може формуватися як вручну, так і автоматизованим способом. Автоматизований спосіб передбачає, або повний аналіз тексту на вихідній мові програмування, що можливо, але технічно трудомістко, або синтез мережі Петрі за описом на спрощеній мові, що містить тільки конструкції, пов'язані з керуванням обчислювальними потоками та механізмами синхронізації. Синтаксичний та семантичний аналіз подібної мови можна реалізувати за допомогою загальнодоступних засобів побудови компіляторів.

Після синтезу сукупної моделі мережею Петрі необхідно визначити, чи можливі у ній тупики. Є три основні підходи до виявлення даної властивості:

- побудова дерева досяжності,
- метод матричних рівнянь
- метод сифонів та пасток.

Перші два методи достатньо досліджені, тому тут розглядається метод сифонів та пасток [1], [2].

Введемо дві функції від сифона S :

$$f(S) = \min \{ \mu(S) \mid \mu \in R(p_0) \}, \quad (1)$$

де $\mu(S)$ загальна кількість маркерів у S ,
тобто $\mu(S) = \sum_{p \in S} \mu(p)$;

$$f(S) = \min\{S \mid \mu = \mu_0 + CY, \mu \geq 0, Y \geq 0\}, \quad (2)$$

де C - матриця інцидентності мережі Петрі, μ - вектор маркування мережі.

Вираз $\mu = \mu_0 + CY$ і є рівнянням стану мережі. З базової теорії мереж Петрі випливає, що будь-яке досяжне маркування задовольняє рівняння стану, але зворотне невірно.

Сифон S є потенційним тупиком тоді і тільки тоді, коли $f(S) = 0$. Під цим розуміється, що $F(S) \geq f(S)$. Отже, будь-який сифон S , такий, що $F(S) > 0$ не є потенційним тупиком. Таким чином, мережа Петрі не містить тупиків, якщо кожен сифон S цієї мережі або містить марковану пастку, або $F(S) > 0$.

Для перевірки відсутності тупиків мережі Петрі з використанням даної властивості проблема повинна бути вирішена для кожного мінімального сифона, що не містить маркованої пастки. Цього можна уникнути, перетворюючи ці проблеми на еквівалентне завдання квадратичного програмування, що впливає з наступного.

Нехай $\{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ є множина мінімальних сифонів, які не містять маркованих пасток. Мережа Петрі не містить тупиків, якщо $F > 0$, де

$$F = \min\left\{\sum_{i=1}^n z_i \mu(S_i) \mid \mu = \mu_0 + CY, \sum_{i=1}^n z_i = 1, \mu \geq 0, Y \geq 0, z_i \geq 0\right\}$$

Щоб уникнути перерахування, краще використовувати вираз $F(S)$, що визначається наступним чином:

$$F(S) = \min\{\mu(S_i) \mid \mu = \mu_0 + CY, \mu \geq 0, Y \geq 0\},$$

де C матриця інцидентності мережі Петрі,

Будь-який сифон, такий, що $F(S) > 0$, не є потенційним тупиком, а μ і Y чисельні вектори. Вираз $\mu = \mu_0 + CY$ суть рівняння стану мережі. Любий сифон S такий, що $F(S) > 0$ не є потенційним тупиком.

Ця проблема зводиться до задачі лінійного програмування. Використання лінійного програмування вимагає перевірки всіх мінімальних сифонів, і ефективність цього методу залежить від їх кількості. Відомо [12], що загальна кількість мінімальних сифонів (пасток) швидко виходить за межі практичного застосування і що, у гіршому випадку, це експоненційне зростання.

У цьому випадку замість використання поліноміальних за обчислювальною складністю алгоритмів розв'язувалося задача математичного програмування. Методи розв'язування задач математичного програмування викладено у [13].

Даний метод був застосований для визначення відсутності тупиків у моделі статичного пулу обчислювальних потоків, що застосовується для реалізації модифікованого захищеного середовища [14]. За алгоритмом, представленим на внутрішній мові опису моделі, була синтезована мережа Петрі, зображена на рис. 3, за якою було сформовано завдання математичного програмування. Вирішення цього завдання показало, що умови відсутності тупиків задовольняються і, отже, мережа Петрі не містить тупиків.

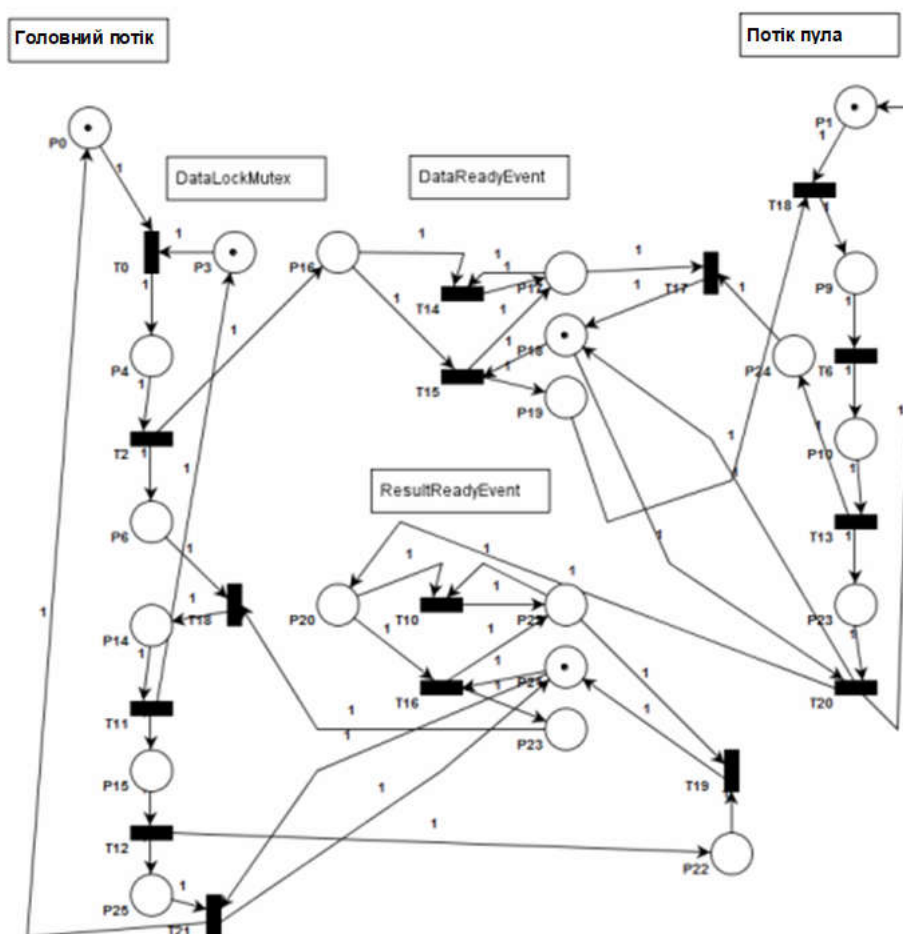


Рисунок 3 – Синтезована мережа Петрі

Висновки

У роботі розглянуто можливість застосування алгоритму діагностування обчислювальних потоків шляхом використання механізму моделювання мереж Петрі.

За мовою опису моделі була синтезована еквівалентна мережа Петрі. Аналіз еквівалентної мережі Петрі методом математичного програмування дозволив встановити, що ця мережа, а отже й оригінальний алгоритм не має тупиків.

Дуже цікавим та перспективним завданням є автоматизація побудови мереж Петрі за заданими специфікаціями обчислювальних потоків та розширення числа моделей синхронізуючих примітивів.

Другим цікавим завданням може бути автоматична побудова найефективнішої моделі багатопоточних обчислень з використанням найменшої кількості примітивів синхронізації.

Список використаних джерел / References

1. Peterson J. Petri net theory and the modeling of systems, Prentice Hall; 1st Edition, 1981, 290 p.
2. Murata T. Petri Nets: Properties, Analysis and Applications. Proceedings of the IEEE. 1989. Vol. 77, No 4. P. 109-118.
3. Vallejo F., Gregorio J, Gonzalez Harbour M., Drake J. Shared Memory Multiprocessor operating System with Extended Petri Net Model *IEEE transactions on parallel and distributing systems*. 1994. Vol. 5, No 7. P. 88-94.

4. Feng Chu, Xiao-lan Xie D. Analysis of Petri Nets За допомогою Siphons і Mathematical Programming. *IEEE Transactions of Robotics and Automation*. 1997. Vol. 13, No. 6, P. 105-112.
5. Govindarajan F., Suci W. Timed Petri NetModels з Multithreaded Multiprocessor Architectures, IEEE Preceedings if the 7-th International Workshop на Petri Nets and Performance Models. 1998 Vol. 12, No. 6, P. 125-130.
6. Takaoka T. A Systematic Approach Parallel Verification, Department of Computer Science of University of Ibaraki. 1995. Vol. 10, No. 6, P. 125-130.
7. Pommereua F. Petri Nets Executable Specifications of High-Level Timed Parallel Systems. *Science of University of Ibaraki*. 2005. Vol. 7, No. 5, P. 25-30.
8. Bruce P. Detection of Control Flow Errors in parallel Programs at Compile Time. *International Journal of Distributed and parallel Systems (IJDPS)*. 2010. Vol. 1, N 2, 115-123.
9. Padidar S. Parallel Program verification: A Brief Introduction. *International Journal of Parallel Programming* 2010. Vol. 30, No 5. P. 1-23,
10. Kavi K, Moshtaghi A., Deng-Jyi C. Modeling Multithreaded application using Petri nets. *International Journal of Parallel Programming*. 2002. Vol. 30, No 5. P. 1-23,
11. Kavi K, Bukhles P., Bhat U. Isomorphism Between Petri net and Dataflow Graphs. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 1987. Vol. 13, № 10. P. 36-42.
12. Stetsenko V., Dorosh V., Dyfuchyn Anton Petri-object simulation: sofware package and complexity. Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Sysytems: Technology and Applications (IDAACS), 2015 IEEE 8th International Conference. IEEE, 2015. Vol.1. N 10. P. 56-44.
13. Minoux M. Programmation Mathematique: Theorie and Algorithms. - Dunod, Paris, France, 1983. 313 p.
14. Dietsch D., Heizmann M., Klumpp D., Naouar M., Podelski A.. Verification, Model Checking, and Abstract Interpretation: 22nd International Conference, VMCAI 2021, Copenhagen, Denmark, January 17–19, 2021. P. 112-120.

ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЧОВИНИ

УДК 681.121.833:543.275.1

DOI: 10.31471/1993-9981-2023-1(50)-31-40

КОНЦЕПЦІЯ ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ВОЛОГИ НА РОБОТУ ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧНИХ СЕНСОРІВ

В. В. Ткачук, О. Є. Середюк*

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15,
м.Івано-Франківськ, 76019, mivt@nung.edu.ua*

Розглянуто актуальність врахування впливу вологи у сфері витратометрії й обліку природного газу. Наведено результати аналізу відомих технічних рішень і концепцій щодо можливості створення установок і лабораторних стендів, які б реалізували фізичне моделювання впливу вологи на первинні вимірювальні перетворювачі та лічильники газу. Розкрито фізичний вплив вологості робочого середовища на функціонування термоанемометричних сенсорів шляхом зміни теплофізичних параметрів газового середовища, насамперед теплопровідності і теплоємності. Обґрунтовано можливість практичної реалізації лабораторної установки на базі пристрою з генеруванням вологи як компонента газового потоку лабораторної установки. При цьому для реалізації фізичного моделювання використано принцип масового вимірювання генерованої вологи і алгоритмічну залежність балансу масових витрат потоку газу на вході і виході розробленої установки. Розглянуто схему функціонування лабораторної установки, алгоритм її роботи з наведенням призначення і особливостей конструктивної реалізації окремих вузлів. Розроблений алгоритм функціонування лабораторної установки з наведенням розробленої методології розрахунку вологості, масової і об'ємної витрати генерованого робочого середовища відповідно до вибраних параметрів роботи установки. Здійснено математичне моделювання режимів роботи лабораторної установки і встановлено граничні режими її функціонування, які визначаються максимально можливим насиченням вихідного потоку водяною парою. Змодельовано вплив вологості вхідного потоку на вологість вихідного потоку з урахуванням генерованої витрати газу і генерованої масової витрати вологи. Наведено технічні характеристики розробленої лабораторної установки, які забезпечують відтворення робочих витрат повітря в діапазоні від 0,016 до 5 м³/год, генерування вологи в діапазоні від 0,1·10⁻⁵ до 1·10⁻⁴ кг/с, чим досягається можливість відтворення вологості вихідних потоків в діапазоні від реальної вологості навколишнього середовища до досягнення нею стовідсоткового значення відносної вологості. Розроблена установка дозволяє здійснити фізичне моделювання впливу вологи на роботу сенсорів опосередкованого вимірювання витрати, насамперед, термоанемометричних.

Ключові слова: волога, газ, повітря, масова витрата, об'ємна витрата, фізичне моделювання, лічильник, витратомір, лабораторна установка, термоанемометричний сенсор.

The relevance of taking into account the moisture influence in the field of flow measurement and accounting of natural gas was considered. The results of the analysis of known technical solutions and concepts regarding the possibility of creating installations and laboratory stands that would implement physical modeling of the effect of moisture on primary measuring transducers and gas meters. The physical influence of the humidity of the working environment on the functioning of thermo-anemometric sensors by changing the thermophysical parameters of the gaseous environment, primarily thermal conductivity and heat capacity. The possibility of practical implementation of a laboratory installation based on a device with moisture generation as a component of the gas flow of a laboratory installation was substantiated. At the same time, the principle of mass measurement of generated moisture and the algorithmic dependence of the mass flow balance of the gas flow at the entrance and exit of the developed installation were used to implement physical modeling. The diagram of the functioning of the laboratory installation, the algorithm of its work with the indication of the purpose and features of the constructive implementation of individual nodes have been considered. The algorithm of the functioning of the laboratory installation was developed with the guidance of the developed methodology for calculating humidity, mass and volume flow of the generated working

environment in accordance with the selected parameters of the installation. Mathematical modeling of the modes of operation of the laboratory installation was carried out and the limit modes of its functioning were established, which are determined by the maximum possible saturation of the output flow with water vapor. The influence of the humidity of the input flow on the humidity of the output flow was simulated, taking into account the generated gas flow rate and the generated mass flow rate of moisture. The technical characteristics of the developed laboratory installation were given, which ensure the reproduction of working air flows in the range from 0,016 to 5 m³/h, the generation of moisture in the range from 0,1·10⁻⁵ to 1·10⁻⁴ kg/s. This achieves the possibility of reproducing humidity output flows in the range from the real humidity of the environment until it reaches one hundred percent value of relative humidity. The developed installation allows physical modeling of the effect of moisture on the operation of indirect measurement flow sensors, primarily thermo-anemometric ones.

Key words: moisture, gas, air, mass flow, volume flow, physical modeling, meter, flow meter, laboratory installation, thermo-anemometric sensor.

Вступ. На сьогодні в питаннях енергетичного обліку промислового і побутового сектору України важливого значення набуває контроль якості, в тому числі природного газу. Одним із основних параметрів при цьому виступають його якісні характеристики як енергоносія, наприклад, теплота згорання (вища та нижча) та вологість. В свою чергу, вологість, як правило, не визначається на нормативному рівні в абсолютних або відносних одиницях для споживачів. Інформативним параметром в цьому випадку виступає температура точки роси при відповідних значеннях тиску та температури газу.

Щоб відповідати вимогам до чистого, сухого, повністю газоподібного палива, придатного для транспортування по трубопроводах і подачі до споживачів, газ повинен пройти через кілька етапів обробки, включаючи видалення рідин з газу, а саме осушення для зменшення вмісту водяної пари. Дегідратація природного газу має суттєве значення для ефективної економічної діяльності споживачів.

Також термін служби трубопроводу залежить від швидкості корозії, яка безпосередньо пов'язана з наявною вологістю в газі та сприяє окисленню металу і його руйнуванню. З цих причин стандартною практикою на підприємствах з видобутку і транспортуванню природного газу є безперервне вимірювання вмісту вологи в природному газі в критичних

точках, щоб забезпечити надійне та правильне його транспортування до споживачів.

Водночас внаслідок пошкоджень трубопроводів або порушенню їх герметичності, в тому числі підземних, можливе попадання вологи в газопроводи. Це може призвести до зміни точності функціонування засобів обліку природного газу після точок контролю його вологості. Аналіз напрямків наукових досліджень показує, що практично відсутні результати досліджень впливу вологи на роботу лічильників газу, наприклад, турбінних, роторних, вихрових, термоанемометричних та інших.

Таким чином, актуальним є дослідження впливу вологи на функціонування засобів обліку природного газу, зокрема лічильників або витратомірів різних типів та принципів дії.

Метою роботи є розроблення методології експериментального дослідження впливу вологи на роботу засобів вимірювання витрати газу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомими є нормативні документи, які регламентують вплив вологи на роботу засобів обліку газу, які використовують при вимірюванні метод змінного перепаду тиску [1]. Для їх функціонування необхідно знати вміст вологи, який визначається за допомогою відповідних вологомірів [2]. Тому практично вплив вологості враховується

при вимірюванні витрати методом змінного перепаду тиску з використанням звукувальних пристроїв. Стосовно впливу вологи на інші методи вимірювання, наприклад, турбінними чи роторними лічильниками, таких досліджень немає.

Нами було теоретично досліджено вплив вологи на роботу термоанемометричних перетворювачів. Результати, які нами викладені в роботі [3], показали, що волога суттєво впливає на результати вимірювання з використанням термоанемометричних перетворювачів, при їх роботі на середовищах природного газу і вологого повітря.

Відомі також дослідження щодо впливу вологи на результати вимірювання об'єму і витрати природного газу [4]. При цьому метою дослідження ставилося визначення впливу двофазового (рідинної та газової фази) складу природного газу на перепад тиску при стандартному і спеціальному звукувальному пристрої. Дослідження стосувалися стандартних діафрагм та спеціальних звукувальних пристроїв з різними формами і видами отворів в них, наприклад, секторно-кільцевого типу і декількох наборів отворів еліпсоподібного виду. Використовувані алгоритми в публікації стосуються вимірювання двофазних потоків в яких волога знаходиться вже в скрапленому стані, тобто в стані насичення. Дослідження не стосуються визначення впливу пароподібної частини вологи в потоці. В цій роботі досліджується двофазне середовище в якому волога є в рідкому стані, а природний газ в газоподібному стані, а метою нашого дослідження є перебування вологи і повітря у газовому стані. Тому цей результат не може бути використаний згідно поставленої нами задачі дослідження.

Пошук конкретних технічних рішень з генерації вологих газоплинних середовищ показали, що їх на сьогодні практично немає у вигляді спеціальних лабораторних установок. Аналіз патентних рішень

показав, що можуть бути принципово створені пристрої, які можуть вимірювати (проводити) облік вологого природного газу, наприклад [5]. Він реалізований на базі витратоміра змінного перепаду тиску, принципово забезпечує вимірювання маси, об'єму та масової витрати робочого середовища. Однак генерувати еталонний потік вологого середовища практично неможливо, оскільки як еталонний засіб використовується дзвонова установка, для функціонування якої використовується сухе повітря.

Також може бути застосоване технічне рішення на прикладі установки, яка функціонує на базі ємності із стиснутим газом [6]. Однак ця установка та аналоги також передбачає відсутність вологи у згенерованому середовищі, оскільки у них лінія подачі газу обладнана осушувачем газу. Можна також формально створювати установки на базі критичного сопла із системою забезпечення критичного потоку [7]. При цьому, вимірювання витрати вологого газу є алгоритмічно достатньо складним, оскільки для їх функціонування необхідно знати функцію критичних витрат вологого газу через сопло, а на даний час таких залежностей практично немає і нормативні документи, які зараз є відомими закордоном також не передбачають використання вологого робочого середовища.

Висвітлення невіршених раніше частин загальної проблеми вказує на необхідність врахування впливу вологи у питаннях витратометрії термоанемометричними перетворювачами з використанням принципів технічної реалізації.

Формулювання цілей статті Розроблення лабораторної установки, яка могла би реалізувати концепцію фізичного моделювання впливу вологи та встановлення цього кількісного впливу на функціонування витратовимірювальної

техніки, у тому числі з використанням термоанемометричних сенсорів.

Виклад основного матеріалу. В роботі нами теоретично змодельовано вплив вологи на функціонування термоанемометричних сенсорів. Фізичне обґрунтування впливу полягає в тому, що термоанемометр вимірює швидкість потоку. Основним елементом давача є нагрівальний елемент, який може бути виготовлений з провідникових матеріалів із високою температуропровідністю (вольфрам, платина) та у різних конфігураціях (нитка, пластина та інші геометричні фігури) [8]. Термоанемометричні сенсори можуть працювати в режимах постійного струму або постійної температури. У більшості випадків нагрівальний елемент включений до мостової схеми, як один із балансувальних елементів. Головною особливістю термоанемометра з постійною температурою є той факт, що відповідний змінний резистор, який знаходиться у балансі із нагрівальним елементом є функцією температури. Відповідно при збільшенні чи зменшенні швидкості потоку газового середовища змінюється температура нагрівального елемента та відповідно опір змінного резистора.

Потік, в якому функціонує термоанемометричний сенсор, характеризується певними фізико-хімічними властивостями і вони, поряд з швидкістю потоку, також впливають на зміну вихідного сигналу сенсора. Тому основними для опису взаємодії нагрівального елемента є теплофізичні характеристики середовища в якому він функціонує [9]. Одним із основних теплофізичних параметрів газового середовища при його термоанемометричних дослідженнях є теплопровідність. Теплопровідність є властивістю, яка вказує на швидкість, з якою переноситься енергія в процесі теплопередачі, а параметр, що характеризує затримування тілом енергії є теплоємністю. Розрізняють ізобарну(при

постійному тиску системи) та ізохорну(при постійному об'ємі системи) теплоємності. Більш практичною при розрахунках тепло- та масообміну є ізобарна теплоємність, адже вона не потребує постійного об'єму системи, що в питаннях витратометрії з термоанемометричними сенсорами досить складно реалізувати. Ізобарною теплоємністю робочого тіла є відношення нескінченно малої кількості питомої теплоти при постійному тиску, яка підводиться до одиниці тіла або відводиться від неї в процесі нескінченно малої зміни температури цього тіла.

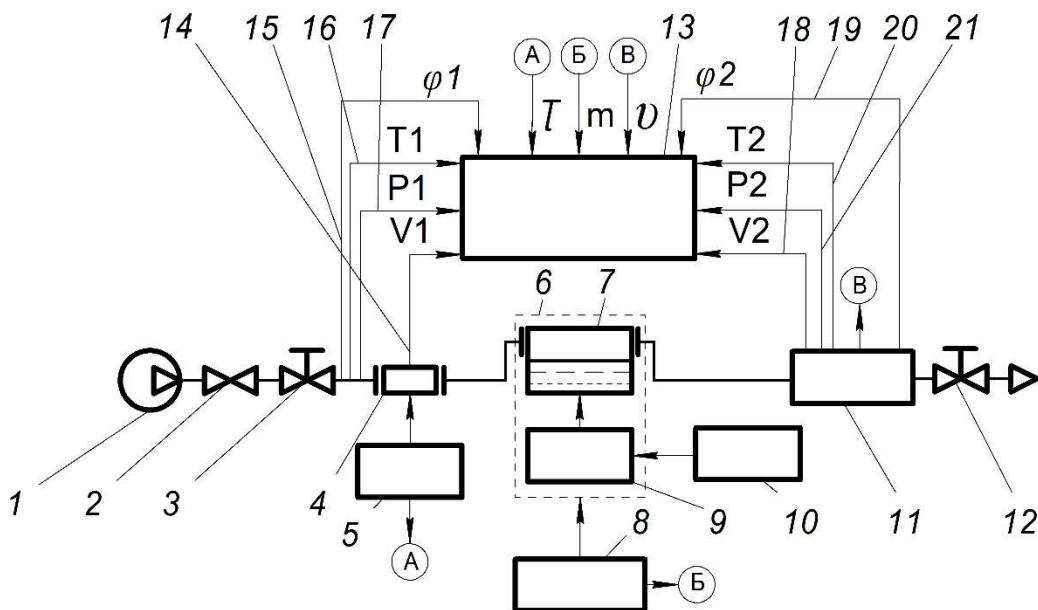
Отже, такі теплофізичні характеристики газового середовища як теплопровідність та теплоємність поряд із швидкістю потоку є визначальними при дослідженні взаємозв'язку нагрітого тіла та середовища в якому воно функціонує.

Нами розроблено макет лабораторної установки, який реалізує концепцію фізичного моделювання впливу вологи на роботу засобів обліку та складається з наступних секцій: генерування витрати, генерування вологи та досліджувальної. Для проведення спочатку аналітичних розрахунків та в подальшому для експериментальних досліджень авторами буде використано як газ повітря. Функціональна схема макету лабораторної установки наведена на рис.1.

Установка функціонує наступним чином: перед початком випробувань відкривають відсічний клапан 2, за допомогою джерела витрати 1 і регулятора тиску 3 встановлюють режим функціонування лабораторної установки. Водночас за допомогою задавача 10 вибирають режим роботи ультразвукового генератора 9 відповідно до встановленої витрати на вході та вмикають лабораторну установку з попередньо заданими параметрами генерування витрати та вологи, відповідно до алгоритму роботи установки, який наведено далі за текстом. Газ поступає через вхідний трубопровід до

лічильника газу 4. Хронометром 5 формується тривалість вимірювального циклу установки. При цьому вхідний потік газу змішується із вологою, яка створена секцією генерації вологи 6. До складу секції генерації вологи входить ємність з водою 7, що розміщена на еталонній вазі 8 (індивідуального виготовлення, з ціною поділки 0.01 грама). Фіксація значення маси ємності з водою до та після проведення експерименту дає можливість визначити

масу генерованої водяної пари. Для здійснення водяної пари використовується ультразвукова мембрана 9, інтенсивність генерування водяної пари встановлюється задавачем 10. Після змішування вхідного потоку із вологою секції генерації вологи потік поступає на досліджувальну секцію установки 11, в якій встановлений перетворювач витрати, наприклад, термоанемометричний сенсор.



1 – джерело витрати; 2 – відсічний клапан; 3, 12 – регулятор тиску; 4 – лічильник газу; 5 – хронометр; 6 – вузол генерації вологи; 7 – ємність з водою; 8 – еталонні ваги; 9 – мембрана ультразвукового генератора; 10 – керувальний блок ультразвукового генератора; 11 – досліджувальна секція установки; 13 – обчислювальний блок установки; інформативні параметри: 14, 18 – об’єм, 15, 19 – вологість, 16, 20 – температура, 17, 21 – тиск на вході та виході із лабораторної установки, відповідно

Рисунок 1 – Функціональна схема установка для фізичного моделювання впливу вологи на роботу термоанемометричних сенсорів.

Всі інформативні параметри із вхідної та вихідної лінії установки поступають в обчислювальний блок 13. Визначаються такі параметри як: об’єм повітря 14, 18, вологість 15, 19, температура 16, 20, тиск 17, 21 – на вході та виході із лабораторної установки відповідно. Також фіксується хронометрично час (лінія А) експерименту, значення маси генерованої вологи секцією б (лінія Б) та швидкість потоку в досліджувальній секції установки (лінія В),

яка вимірюється, наприклад, досліджуванним термоанемометричним сенсором.

Після завершення експерименту формується команда закінчення вимірювального циклу та реалізується обробка вимірювальної інформації блоком 13.

Оскільки, попередні наші дослідження показали, що при незначній кількості генерованої вологи досягається 100% відносна вологість, а далі відбувається її

перетворення у рідку фазу. Також технічно важко реалізувати малу зміну генерованої вологи в одиницю часу при малій зміні діапазону робочих витрат. Тому в установці використаний ультразвуковий генератор індивідуального виготовлення, а для забезпечення точного визначення вологи, яка масово генерується зволожувальною установкою, використовуються ваги з цифровим відліком. Тому алгоритм роботи установки передбачає вимірювання об'ємної і масової витрати вологого газу в певному діапазоні при зміні як витрати так і вологості.

Алгоритм роботи установки описується рівнянням, виходячи із закону балансу масової витрати:

$$Q_{m \text{ вих}} = Q_{m \text{ вх}} + Q_{\text{в}}, \quad (1)$$

де $Q_{m \text{ вих}}$ – масова витрата на виході установки, кг/с; $Q_{m \text{ вх}}$ – масова витрата газу на вході установки, кг/с; $Q_{\text{в}}$ – масова витрата вологи (водяної пари) вузлом генерування вологи; кг/с.

Математично алгоритм (1) можна подати наступним виглядом [10]:

$$Q_{m \text{ вих}} = \frac{V}{\tau} \left(2,89 \cdot 10^{-3} \rho_{\text{с}} \frac{P - \phi_{\text{вх}} \cdot P_{\text{вп max}}}{T \cdot K} \right) + \frac{m_{\text{в}}}{\tau}, \quad (2)$$

де V – об'єм повітря на вході установки впродовж вимірювального циклу, м^3 ; τ – тривалість вимірювального циклу, с; $\phi_{\text{вх}}$, P , T – відносна вологість, абсолютний тиск та абсолютна температура повітря за робочих умов установки (ϕ – у відносних одиницях; P – Па; T – К); $P_{\text{вп max}}$ – парціальний тиск водяної пари у насиченому стані за робочих умов установки, Па; K – коефіцієнт стисливості робочого середовища на вході установки (безрозмірна одиниця); $\rho_{\text{с}}$ – густина робочого середовища (повітря) за стандартних умов, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\rho_{\text{вп вх}}$ – густина водяної пари у повітрі на вході установки, $\text{кг}/\text{м}^3$; $m_{\text{в}}$ – маса генерованої вологи в установці, кг.

Для визначення довідкових даних $P_{\text{вп max}}$ і $\rho_{\text{вп max}}$ за робочих умов установки можна використати такі отримані нами апроксимаційні залежності на базі відомих довідкових табличних даних [11], для значень вхідної температури від 0,1 до 30°C, з коефіцієнтами кореляції та детермінації рівними 1, відносною похибкою апроксимації 0,1%:

$$P_{\text{вп max}} = 0,05 \cdot t^3 + 0,93 \cdot t^2 + 47,74 \cdot t + 606,21 \text{ Па}; \quad (3)$$

$$\rho_{\text{вп max}} = 3 \times 10^{-7} \cdot t^3 + 74 \times 10^{-7} \cdot t^2 + 3523 \times 10^{-7} \cdot t + 48228 \times 10^{-7} \text{ кг}/\text{м}^3; \quad (4)$$

де t – температура повітря за робочих умов установки, °C; $\rho_{\text{вп max}}$ – густина водяної пари у насиченому стані за робочих умов установки, $\text{кг}/\text{м}^3$.

В формулах (3) і (4) відсутні значення робочого тиску в установці, оскільки їх значення в розробленій моделі лабораторної установки становить (1...2) кПа надлишкового тиску, який визначається тиском джерела витрати. Це дає можливість нехтувати на фоні атмосферного тиску (близько 101 кПа) і використовувати відомі довідкові дані для параметрів водяної пари при стандартних умовах.

Масова витрата газу на вході установки складається із масової витрати сухого повітря і масової витрати вологи, яка міститься в ньому. Тому алгоритм (2) роботи установки подамо у вигляді:

$$Q_{m \text{ вих}} = \frac{V \cdot (\rho_{\text{сух вх}} + \rho_{\text{вп вх}}) + m_{\text{в}}}{\tau}, \quad (5)$$

де $\rho_{\text{сух вх}}$ – густина сухої частки газу на вході установки, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Густина водяної пари повітря на вході установки розраховується як:

$$\rho_{\text{вп вх}} = \rho_{\text{вп max}} \cdot \phi_{\text{вх}}. \quad (6)$$

Таким чином, масу сухого повітря $m_{\text{сух г}}$ і масу вологи $m_{\text{в вих}}$ на виході установки впродовж вимірювального циклу можна записати:

$$m_{\text{сух.г}} = V \cdot \rho_{\text{сух.г}}, \quad (7)$$

$$m_{\text{в.вих}} = V \cdot \rho_{\text{вп.вх}} + m_{\text{в}}. \quad (8)$$

Тому абсолютна вологість згенерованого потоку газу на виході установки описується формулою:

$$W_{\text{вих}} = \frac{V \cdot \rho_{\text{вп.вх}} + m_{\text{в}}}{V}, \quad (9)$$

а його густину $\rho_{\text{вих.г}}$ можна обчислити за формулою:

$$\rho_{\text{вих.г}} = \rho_{\text{сух.г}} + \rho_{\text{вп.вх}} + \frac{m_{\text{в}}}{V}. \quad (10)$$

Оскільки при фізичному моделюванні роботи установки доцільно оперувати параметром відносної вологості газу φ , то необхідно отримати залежність зміни саме цього параметра від робочих умов роботи установки.

Для цього запишемо рівняння взаємозв'язку масової витрати вологи на виході та вході установки, оскільки об'ємна витрата сухого газу на вході і виході установки є незмінною:

$$Q_0 \cdot \varphi_{\text{вих}} \cdot \rho_{\text{вп.мах}} = Q_0 \cdot \varphi_{\text{вх}} \cdot \rho_{\text{вп.мах}} + Q_{\text{в}}, \quad (11)$$

де Q_0 – об'ємна витрата сухого газу в установці, м³/с.

На базі (11) отримуємо:

$$\varphi_{\text{вих}} = \varphi_{\text{вх}} + \frac{Q_{\text{в}}}{Q_0 \cdot \rho_{\text{вп.мах}}}. \quad (12)$$

Так як вологість газу на виході залежить не тільки від маси генерованої вологи, але і від робочої витрати установки та вологи вхідного газу (навколишнє повітря), то доцільно здійснити моделювання робочих умов установки, бо очевидним є той факт, що генерування вологи може призвести до максимального насичення вологою вихідного газу.

Результати моделювання (рис. 2) реалізовані на базі залежності (12) для фіксованих об'ємних робочих витрат установки 1; 5; 10 м³/год (лінії 1, 2, 3 та 4, 5, 6 відповідно) при тривалості експерименту $\tau=100$ с і режимів генерування масової витрати вологи в діапазоні $Q_{\text{в}}$ (0...1·10⁵)кг/с. При цьому робочі умови в установці

прийняті $t=20^\circ\text{C}$, $P=103325$ Па (з врахуванням надлишкового тиску створюваним генератором витрати), а відносна вологість вхідного повітря приймалася 40% (лінії 1, 2, 3) та 60%(лінії 4, 5, 6).

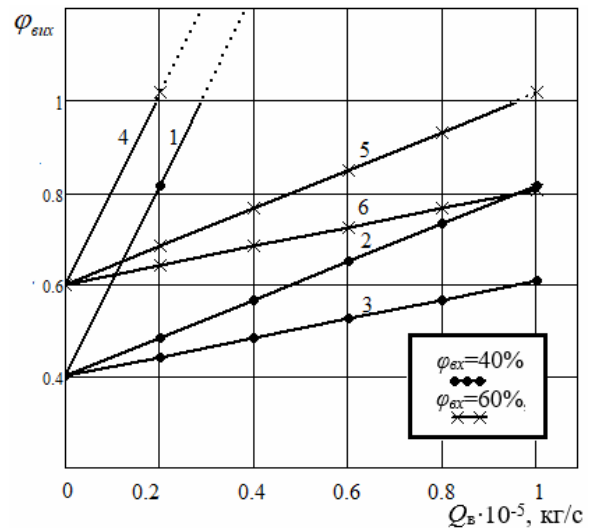


Рисунок 2 – Результати моделювання вологості вихідного потоку газу від робочих умов установки

Результати моделювання підтверджують вплив вологості навколишнього середовища на діапазон генерованої вологи в установці. Так зростання вологості навколишнього середовища призводить до зменшення максимальної генерованої витрати вологи, при якій досягається максимальне насичення вихідного потоку водяною парою, тобто до умов, коли $\varphi_{\text{вих}}=1$. Тому при витраті 1 м³/год і вхідній вологості 40% насичення потоку відбувається при генеруванні вологи $0,29 \cdot 10^{-5}$ кг/с, а при вологості 60% цей самий ефект досягається вже при $0,19 \cdot 10^{-5}$ кг/с. Вплив робочих витрат на вологість вихідного потоку показує, що при більших витратах 5 і 10 м³/год за умови вибраної максимальної генерованої витрати вологи $1 \cdot 10^{-5}$ кг/с практично не досягається максимальне насичення вихідного потоку яке при меншій вхідній вологості 40% становить 81,8 і 60,9 % відповідно. Поряд з цим при більшій вхідній вологості 60% отримуємо

101,8%(насичення) і 80,9% при вказаних вище відповідних витратах. Це свідчить про необхідність правильного вибору режимів функціонування макету лабораторної установки при дослідженні витратомірів газу на вологих робочих середовищах.

Рівняння (12) за умови коли $\varphi_{\text{вих}}=1$ дає можливість визначити граничні умови досягнення максимального стану насичення (100% відносної вологості) з врахуванням умов функціонування установки та відповідно до витрати вихідного потоку установки. Згідно з проведеними математичними перетвореннями формули (12) отримаємо:

$$Q_{\text{вmax}} = Q_0 \cdot \rho_{\text{впmax}} \cdot (1 - \varphi_{\text{вх}}) . \quad (13)$$

Отримана залежність (13) дає можливість розраховувати максимально можливу інтенсивність генерації вологи для досягнення насиченого потоку вихідного газу в залежності від об'ємної витрати вхідного газу Q_0 та його вологості $\varphi_{\text{вх}}$. Наприклад, при відносній вологості вхідного потоку 40% і об'ємній витраті 5 м³/год максимальна генерація вологи в установці становитиме $1,44 \cdot 10^{-5}$ кг/с, а за цих же параметрів вхідного потоку і об'ємній витраті 10 м³/год генерація вологи не повинна перевищувати $2,88 \cdot 10^{-5}$ кг/с.

Для дослідження впливу вологи на роботу об'ємних витратомірів необхідно використовувати формулу, яка отримується шляхом ділення виразу (5) на вираз (10), що подається в наступному кінцевому формульному виразі:

$$Q_{V.\text{вих}} = \frac{V \cdot (\rho_{\text{сух вх}} + \rho_{\text{вп вх}}) + m_{\text{в}}}{\tau \cdot \rho_{\text{вих.г}}} . \quad (14)$$

Розроблений макет лабораторної установки, викладена його функціональна схема з наведенням запропонованих методик обчислення та відповідними засобами вимірювальної техніки розкриває можливості фізичного моделювання впливу вологи на роботу витратомірів в діапазоні об'ємних витрат від 0,016 до 5 м³/год при генерації вологи ультразвуковим

генератором у повітряному потоці в межах генерування вологи від $0,1 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-4}$ кг/с.

Висновки. Розроблено модель макету лабораторної установки для дослідження впливу вологи на роботу витратовимірювальних засобів та викладено функціональну схему установки, яка може реалізовуватися на повітряному середовищі.

Розроблений алгоритм функціонування лабораторної установки з наведенням розробленої методології розрахунку вологості, масової і об'ємної витрати генерованого робочого середовища відповідно до вибраних параметрів роботи установки.

Здійснено математичне моделювання режимів роботи лабораторної установки і встановлені граничні режими його функціонування, які визначаються максимально можливим насиченням вихідного потоку водяною парою.

Експериментальні дослідження впливу вологи на роботу термоанемометричних перетворювачів будуть метою подальших наукових досліджень з використанням розробленого макету лабораторної установки.

Список використаних джерел

1. ДСТУ ГОСТ 8.585.2:2009 Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 2. Діафрагми. Технічні вимоги: [Чинний від 2010-04-01]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 2009. 92 с. (державний стандарт України).
2. Облік природного газу: довідник / М. П. Андрієшин, О. Є. Середюк, С. А. Чеховський [та ін.] / за ред. С.А.Чеховського. Івано-Франківськ: ПП «Сімік», 2008. 180 с.
3. Ткачук В. В., Середюк О. Є., Боднар Р. Т., Саманів Л. В. Моделювання впливу компонентного складу та вологості

природного газуна його теплофізичні характеристики. *Перспективні технології та прилади*: зб. наук. праць Луцького НТУ. 2021. №18. С. 129-137.

4. Tomaszewska-Wach B., Rzasza M. A Correction Method for Wet Gas Flow Metering Using a Standard Orifice and Slotted Orifices. *Sensors*. 2021. Vol. 21. No 7. P. 2291–2310.

5. Еталон передавання одиниці об'єму, маси та витрати природного газу / Середюк О. Є., Крук І. С., Рудько В. П., Чеховський С. А., Луцик Р. П., Прудніков Б. І.: пат. 25208 U Україна: МПК G01F 25/00 (2006). № u200704218; заявл. 16.04.2007; опубл. 25.07.2007, Бюл. № 11.

6. Установа для градування та перевірки витратомірів і лічильників газу / Середюк О. Є., Костинюк В. В., Прудніков Б. І.: пат. 27565 U Україна: МПК G01F 25/00 (2006). № u200705894; заявл. 29.05.2007; опубл. 12.11.2007, Бюл. № 1.

7. Установа для перевірки витратомірів і лічильників газу / Середюк О. Є., Петришин І. С.: пат. 54316 C2 Україна: МПК G01F 25/00 (2006). № 2002076003; заявл. 19.07.2002; опубл. 16.01.2006, Бюл. № 1.

8. Середюк О.Є., Криницький О.С., Ткачук В.В. Сучасні тенденції розвитку термоанемометрії у сфері обліку природного газу. *Український метрологічний журнал*. 2020. № 3. С. 51-55.

9. Ткачук В. В., Середюк О. Є. Дослідження впливу швидкості руху та складу газового потоку на чутливість термоанемометричних перетворювачів. *Інформаційно-вимірвальні технології IBT-2022*: зб. тез доп. міжнар. наук.-прак. конф. м. Львів, 9–10 листопада 2022 р., Львів: ЛПНУ, 2022. С. 127–128.

10. Serediuk O.Y., Malisevych V.V., Serediuk D.O., Tkachuk V.V., Dzividzinska I.S. Metrological model of the reference installation for the reproduction of moist air flow based on the concept of uncertainty. *Uncertainty in Measurement: Scientific,*

Normative, Applied and Methodical Aspects: XIX International Scientific and Technical Seminar, December 7–8 2022, Bulgaria, 2022. P. 38–40.

11. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 85th Edition. Front Cover. David R. Lide. CRC Press LLC: Boca Raton, FL. 2004. 2712 p.

References

1. DSTU HOST 8.585.2:2009 Metrolohiia. Vymiriuvannia vytraty ta kilkosti ridyny y hazu iz zastosuvanniam standartnykh vzvzhuvalnykh prystroiv. Chastyina 2. Diafrahmy. Tekhnichni vymohy: [Chynnyi vid 2010-04-01]. Vyd. ofits. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy, 2009. 92 p. (derzhavnyi standart Ukrainy). [in Ukrainian]

2. Oblik pryrodnoho hazu: dovidnyk / M. P. Andriishyn, O. Ye. Serediuk, S. A. Chekhovskiyi [ta in..] / za red. S.A.Chekhovskoho. Ivano-Frankivsk: PP «Simyk», 2008. 180 p. [in Ukrainian]

3. Tkachuk V. V., Serediuk O. Ye., Bodnar R. T., Samaniv L. V. Modeliuvannia vplyvu komponentnoho skladu ta volohosti pryrodnoho hazuna yoho teplofizychni kharakterystyky. *Perspektyvni tekhnologii ta prylady: zb. nauk. prats Luts'koho NTU*. 2021. №18. P. 129-137. [in Ukrainian]

4. Tomaszewska-Wach B., Rzasza M. A Correction Method for Wet Gas Flow Metering Using a Standard Orifice and Slotted Orifices. *Sensors*. 2021. Vol. 21. No 7. P. 2291–2310.

5. Etalon peredavannia odyntsi ob'emu, masy ta vytraty pryrodnoho hazu / Serediuk O. Ye., Kruk I. S., Rudko V. P., Chekhovskiyi S. A., Lutsyk R. P., Prudnikov B. I.: pat. 25208 U Ukraina: МПК G01F 25/00 (2006). № u200704218; zaiavl. 16.04.2007; opubl. 25.07.2007, Biul. № 11. [in Ukrainian]

6. Ustanovka dlia hraduiuvannia ta perevirky vytratimiriv i lichylnykyv hazu / Serediuk O. Ye., Kostyniuk V. V., Prudnikov B. I.: пат. 27565 U Ukraina: МПК G01F 25/00 (2006). № u200705894; zaiavl. 29.05.2007; opubl. 12.11.2007, Biul. № 1. [in Ukrainian]

7. Ustanovka dlia perevirky vytratimiriv i lichylnykyv hazu / Serediuk O. Ye., Petryshyn I. S.: pat. 54316 S2 Ukraina: MPK G01F 25/00 (2006). № 2002076003; zaiavl. 19.07.2002; opubl. 16.01.2006, Biul. № 1. [in Ukrainian]

8. Serediuk O.Ie., Krynytskyi O.S., Tkachuk V.V. Suchasni tendentsii rozvytku termoanemometrii u sferi obliku pryrodnoho hazu. *Ukrainskyi metrolohichnyi zhurnal*. 2020. № 3A. S. 51-55. [in Ukrainian]

9. Tkachuk V. V., Serediuk O. Ye. Doslidzhennia vplyvu shvydkosti rukhu ta skladu hazovoho potoku na chutlyvist termoanemometrychnykh peretvoriuvachiv. Informatsiino-vymiriuvalni tekhnolohii IVT-2022: zb. tez dop. mizhnar. nauk.-prak. konf. m. Lviv, 9–10 lystopada 2022 r., Lviv: LPNU, 2022. S. 127–128. [in Ukrainian]

10. Serediuk O.Y., Malisevych V.V., Serediuk D.O., Tkachuk V.V., Dzividzinska I.S. Metrological model of the reference installation for the reproduction of moist air flow based on the concept of uncertainty. *Uncertainty in Measurement: Scientific, Normative, Applied and Methodical Aspects: XIX International Scientific and Technical Seminar, December 7–8 2022, Bulgaria, 2022*. P. 38–40.

11. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 85th Edition. Front Cover. David R. Lide. CRC Press LLC: Boca Raton, FL. 2004. 2712 p.

МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ РІДКОЇ І ГАЗОПОДІБНОЇ ФАЗ

УДК 622.692.4:539.4

DOI: 10.31471/1993-9981-2023-1(50)-41-47

ОЦІНКА ІНТЕНСИВНОСТІ ВИТОКУ РЕЧОВИНИ ПРИ ПОРУШЕННІ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ОБ'ЄКТА

А. П. Олійник, О. М. Туць

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, 76019
вул. Карпатська, 15. E-mail: andrioliiny@gmail.com*

Статтю присвячено дослідженню технічного стану трубопроводів, якими транспортуються газорідинні суміші з агресивними компонентами, що є важливою науково-технічною проблемою. Реалізовано математичну модель процесу витікання продукту, що транспортується, внаслідок втрати герметичності труби на основі системи рівнянь Нав'є-Стокса з граничними умовами, які враховують геометрію зон витікання та величину швидкості витікання. За створеними на основі вказаних моделей обчислювальними алгоритмами проведено розрахунки. Наведено аналіз результатів розрахунків – швидкості витікання в залежності від динамічної в'язкості суміші. Проаналізовано вплив на параметри течії – витрати суміші та сили гідравлічного опору – зміни динамічної в'язкості суміші. При цьому використовувались результати моделювання течії Пуазейля. На основі аналізу поведінки перепаду тиску в зоні аварійного викиду забруднюючих речовин одержано формулу для експрес-оцінки величини зони проникнення з урахуванням властивостей ґрунту та швидкості перекриття аварійної ділянки. Наведено висновки за результатами досліджень. При розробці практичних методик для розрахунку течії в газорідинних свердловинних потоках необхідно дослідити вплив на його точність параметрів різницевої схеми, а саме кроків по поздовжній та поперечній координатах, а також провести дослідження поведінки розв'язків при різних значеннях числових характеристик процесу, наведених в п.2, що дозволить визначити область практичного застосування запропонованої моделі з огляду на геометричні розміри об'єктів, тип рідин, що протікають по системі, а також скоротити час розрахунку одного з варіантів задачі, що є особливо важливим при оптимізації моделі за критерієм її найкращої відповідності реальній фізичній картині процесу. Важливим питанням залишається встановлення меж застосування запропонованої двовимірної моделі для опису суттєво тривимірних реальних досліджуваних систем.

Ключові слова: напружений стан, трубопровід, течія в'язкої рідини, динамічна в'язкість, рівняння Нав'є-Стокса, газова суміш.

The article is devoted to the study of the technical condition of pipelines through which gas-liquid mixtures with aggressive components are transported, which is an important scientific and technical problem. A mathematical model of the process of leakage of the transported product due to loss of pipe tightness based on the system of Navier-Stokes equations with boundary conditions has been implemented and take into account the geometry of the leakage zones and the magnitude of the leakage velocity. Calculations were made according to computational algorithms created on the basis of the specified models. An analysis of the results of the calculations is presented - the flow rate depending on the dynamic viscosity of the mixture. The influence on the flow parameters – mixture consumption and hydraulic resistance forces – changes in the dynamic viscosity of the mixture was analyzed. At the same time, the results of modeling the Poiseuille flow were used. Based on the analysis of the behavior of the pressure drop in the zone of emergency release of pollutants, a formula was obtained for the express estimation of the size of the penetration zone, taking into account the properties of the soil and the speed of overlapping of the emergency area. Conclusions based on research results are presented. When developing practical methods for calculating flow in gas-liquid well flows, it is necessary to conduct a study of the influence of the parameters of the difference scheme on its accuracy namely steps along the longitudinal and transverse coordinates, as well as to conduct a study of the behavior of the solutions at different values of the numerical characteristics of the process given in corresponding clause, which will allow to determine the area of practical application of the proposed model from the point of view of the geometric dimension s of the objects, the type of fluids flowing through the system, as well as to reduce the calculation time of one of the variants of the problem, which is especially important when optimizing presented model according to the

criterion of its best correspondence to the real physical picture of the process. An important issue remains the establishment of limits of application of the proposed two-dimensional model for the description of essentially three-dimensional real systems under study.

Key words: stress state, pipeline, viscous fluid flow, dynamic viscosity, Navier-Stokes equation, gas mixture.

Вступ. Дослідження технічного стану трубопроводів, якими транспортуються газорідинні суміші з агресивними компонентами є важливою науково-технічною проблемою, вирішення якої дозволяє проводити ідентифікацію потенційно небезпечних ділянок. Зокрема, вивчення напружено-деформованого стану дозволяє виявити ті зони, в яких можлива втрата суцільності матеріалу трубопроводу, і, як наслідок, викиди транспортованих хімічно агресивних речовин. При цьому необхідно враховувати весь комплекс факторів силового впливу, що діють на трубопровід.

Мета роботи - дослідити зміну характеристик потоку в трубопроводі при зміні складу суміші, яка транспортується, шляхом вивчення впливу зміни динамічної в'язкості багатокомпонентної газової суміші.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій. Вказана проблема досліджувалась багатьма авторами [1,2, 5, 6. 7.9. 12], проте в цих роботах приймається та чи інша модель процесу деформування та напруженого стану без урахування особливостей продукту, що транспортується.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми. При вивченні технічного стану трубопроводів, якими транспортуються газорідинні суміші з агресивними компонентами, необхідно враховувати реальну просторову конфігурацію реальних трубопровідних систем як в надземному [1], так і в підземному положенні [7]. При цьому для надземних ділянок можна використовувати інтегральний підхід [1] до оцінювання напруженого стану, а також вивчати окремі

види силових впливів більш детально (наприклад, вітрові навантаження).

Формулювання цілей статті. Для вирішення мети дослідження необхідно виконати такі завдання:

- удосконалити методику розрахунку швидкості витoku суміші при втраті герметичності внаслідок виникнення критичних напружень в матеріалі труби;

- вивчити вплив зміни динамічної в'язкості, щоб дослідити зміну характеристик потоку в трубопроводі при зміні складу суміші, яка транспортується;

- здійснити порівняльний аналіз величини вказаної швидкості в залежності від динамічної в'язкості багатокомпонентної газової суміші;

- оцінити розмір зони проникнення забруднюючої речовини внаслідок аварії.

При розв'язанні поставлених задач застосовувалися методи описовий, аналітичний, чисельний, математичного моделювання.

Висвітлення основного матеріалу дослідження. Задача оцінки параметрів течії у трубопроводах та в свердловинних потоках зводиться до необхідності розв'язання системи рівнянь Нав'є-Стокса [5] в двовимірній постановці [9,12]:

$$\begin{cases} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + y \\ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + y \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

з умовами: $p = p_0 - kx$; k – коефіцієнт перепаду тиску. Саме ця величина визначає швидкість і об'єм забруднюючих речовин. Якісно ця залежність буде описана нижче.

$$u|_{x=0} = -\frac{ky^2}{4\mu} + \frac{kRy}{2\mu},$$

$$u|_{y=0} = u|_{y=2R} = 0 \quad (2)$$

$$v|_{x=0} = v|_{y=0} = 0$$

$$v|_{y=2R} = \begin{cases} 0, & x \leq x_1; x \geq x_2 \\ \pm v_{\text{вирп}}, & x \in [x_1, x_2] \end{cases}$$

Розроблено чисельний метод розв'язання системи (1), (2), доведено його збіжність і стійкість, побудовано та реалізовано розрахунковий алгоритм, виявлено оптимальні параметри розрахункової сітки. Це дозволяє

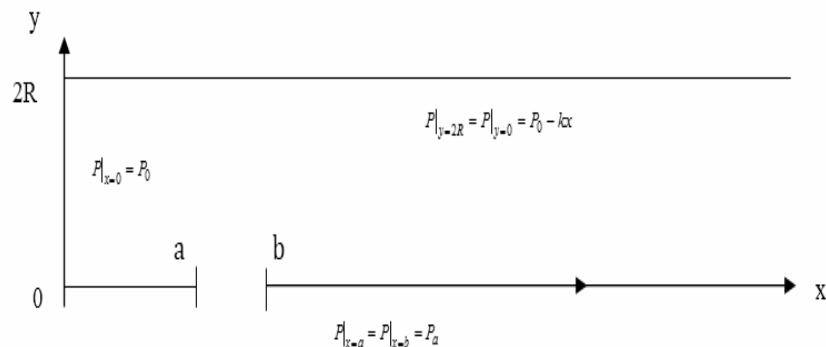


Рисунок 1 – Граничні умови для рівняння Лапласа (Задача Діріхле)

При цьому використовується метод верхньої релаксації [9]

Далі розв'язується система (1) з умовам (2), причому $v_{\text{вирп}}$ визначається за знайденими $P(x,y,t)$ за законом Дарсі:

$$\begin{cases} u = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \\ v = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{kg\rho}{\mu} \end{cases} \quad (5)$$

моделювати поля швидкостей при заданій величині $v_{\text{вирп}}$, що не завжди можна визначити практично. Тому для розв'язання системи (1) застосовується методика [5,6,9], яка дозволяє звести систему до рівняння Пуассона:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = 2\rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} \right). \quad (3)$$

Існують методики розв'язання системи (6), проте, використовуючи результати[9], можна зробити висновок, що

$$\left| 2\rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right| \ll 1, \quad (4)$$

і, з урахуванням (10), можна запропонувати наступний алгоритм розв'язання:

На першому кроці розв'язується рівняння (2) з граничними умовами (рис.1):

K – проникність середовища; μ – динамічна в'язкість рідини.

За знайденим розподілом швидкостей рівняння (4) розв'язується з заново перерахованою правою частиною. Процедура повторюється до тих пір, доки розв'язок не збіжиться. Особливістю одержаного розв'язку є те, що граничні умови (3) змінюються на кожному кроці ітераційної процедури, таким чином, у випадку збіжності ітераційного процесу, вдається визначити швидкість витікання рідин з досліджуваного об'єкта.

Дослідження технічного стану трубопроводів, якими транспортуються газорідинні суміші з агресивними компонентами передбачає вивчення властивостей цих сумішей. При вивченні течії в трубі циліндричного перерізу в'язкої рідини (газу) (радіус труби a , в'язкість μ , перепад тиску i) відомими є результатами [6] є течія Пуазейля, згідно з якими швидкість визначається за формулою:

$$\omega = \frac{i}{4\mu}(a^2 - r^2). \quad (5)$$

Профіль швидкості (5) в поперечному перерізі круглої труби є параболоїдом обертання, максимальна швидкість якого:

$$\omega_{\max} = \frac{ia^2}{4\mu}. \quad (6)$$

Об'ємна витрата складає:

$$Q = \int_0^a \omega \cdot 2\pi r dr = \frac{i\pi a^4}{8\mu}. \quad (7)$$

При транспортуванні газових сумішей з агресивними компонентами необхідно визначити реальне значення динамічної в'язкості:

$$\mu = \sum_{i=1}^n \sigma_i \mu_i, \quad (8)$$

де σ_i - масова частка i -ого компоненти, μ_i - його динамічна в'язкість. Коефіцієнт тертя C_f - це відношення сили опору

$$R = 2\pi a l \cdot \frac{ia}{2} = \pi a^2 l i, \quad (9)$$

до швидкості напору $\frac{\rho \omega_{\text{сеп}}^2}{2}$ і до деякої характерної площі s :

$$C_f = \frac{R}{\frac{\rho \omega_{\text{сеп}}^2}{2} s} = \frac{16}{\text{Re}}, \quad (10)$$

де Re - число Рейнольдса: $\text{Re} = \frac{d\omega_{\text{сеп}}}{\mu}$, де $\frac{\mu}{\rho}$

d - діаметр труби; $d = 2a$; μ та ρ - відповідно динамічна в'язкість та густина суміші. Для двокомпонентної суміші:

$$\mu = (1 - c_1)\mu_1 + c_1\mu_2, \quad (11)$$

де μ_1 - в'язкість основного компонента суміші, μ_2 - в'язкість додаткового компонента, $0 \leq c_1 \leq 1$. При цьому зміна швидкості становитиме:

$$\omega_1 - \omega_2 = \frac{i}{4\mu_1}(a^2 - r^2) - \frac{i}{c_1\mu_2 + (1 - c_1)\mu_1}(a^2 - r^2) = \quad (12)$$

$$= \frac{i(a^2 - r^2)}{4} \left[\frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{c_1\mu_2 + (1 - c_1)\mu_1} \right],$$

зміна витрати

$$Q_1 - Q_2 = \frac{i\pi a^4}{8} \left[\frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{c_1\mu_2 + (1 - c_1)\mu_1} \right]. \quad (13)$$

Знаючи вказані величини в абсолютних одиницях, можна оцінити, як необхідно змінити величини i перепадів тиску для забезпечення сталого, незмінного рівня витрати Q . Очевидно, що при реалізації моделі, яка передбачає розв'язання (1), (2), (5) необхідно враховувати склад вказаних сумішей шляхом використання залежності (11). Розроблена модель дозволяє вивчати технічний стан трубопроводів, якими транспортуються газорідинні суміші з агресивними компонентами, і, зокрема, широкий клас двокомпонентних сумішей – наприклад, воднево-метанові суміші. На рис. 2 наведено графік розподілу компоненти швидкості витікання суміші з трубопроводу при втраті герметичності при різних значеннях динамічної в'язкості (ряд 1 - μ_1 ряд 2 - μ_2 , $\mu_1 < \mu_2$)

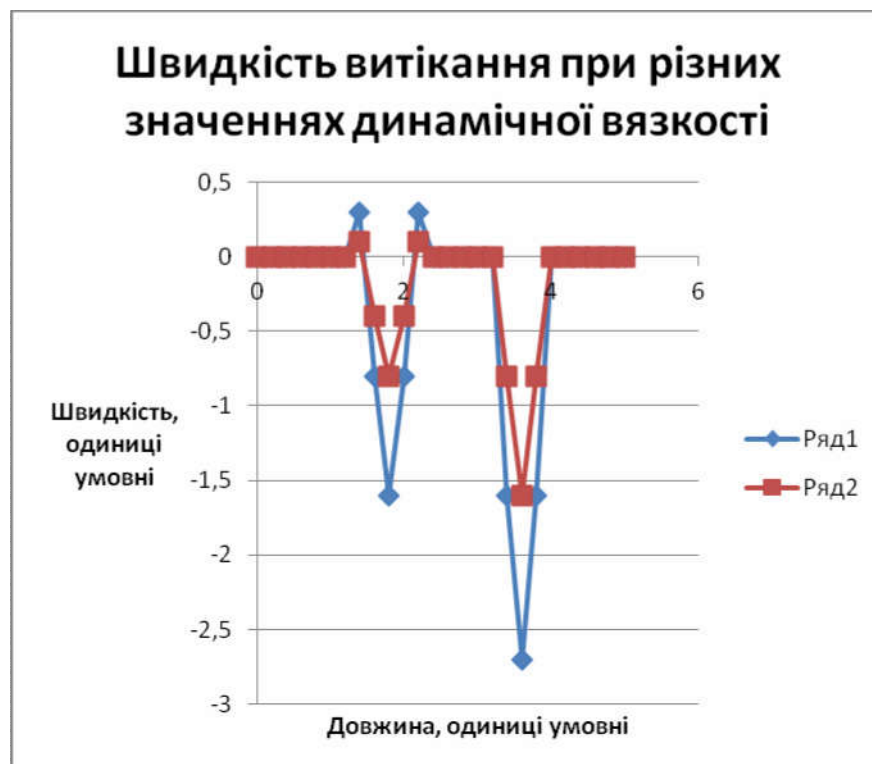


Рисунок 2 – Розподіл компоненти швидкості потоку за різних значень динамічної в'язкості (ряд 1 - μ_1 , ряд 2 - μ_2 , $\mu_1 < \mu_2$)

Нехай відомим є місце втрати суцільності труби (рис. 3). При цьому поширення шкідливих речовин може мати таку картину.

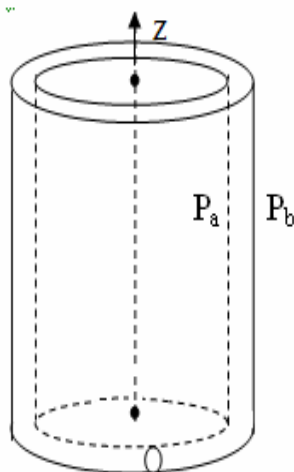


Рисунок 3 – Фрагмент труби

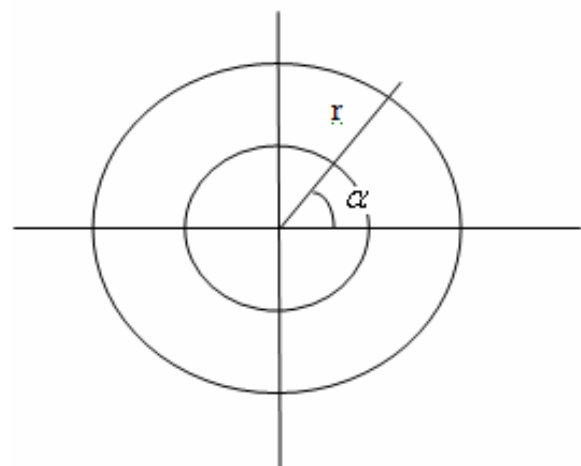


Рисунок 4 – Вибір координат в перерізі (верхня поверхня труби $\alpha=90$)

Викид відбувається у напрямі перпендикулярно осі труби (рис. 4), визначається перепадом тиску $p = p_0 - kx$, k – перепад тиску, при цьому величина k залежить від того, як швидко відповідні служби зупинять транспорт вуглеводнів

аварійною ділянкою. Оцінка параметрів витoku речовин проводиться за формулами (6)-(13).

При умові $k \ll 1$ реалізується стандартна модель дифузії (5);

$$- 0 \leq \alpha < 90$$

$$- p = p_a + \rho g y + p_d$$

- p_a - атмосферний тиск; $\rho g y$ - тиск ґрунту на глибині залягання трубопроводу; p_d - тиск при втраті суцільності трубопроводом. Величина витoku залежить від p_d та комплексу $p_a + \rho g y$, ця величина обумовлює величину зони забруднення. Такі ж закономірності справедливі і для $0 < \alpha < 90$. При $\alpha = 90$ можна оцінити глибину, на яку проникає забруднююча речовина із залежності $p_d = \rho g y$, звідки визначаємо y . Так, якщо робочий тиск в трубопроводі складає 1 МПа. Оскільки густина породи 8000 кг/метр куб, то глибина проникнення забруднюючих речовин в ґрунт сягає 12,5 метрів. Після цього виникає зворотна дифузія. Враховуючи (6)-(13), можна зробити висновок про те, що величина 12,5 є завищеною, оскільки не враховувалась в'язкість суміші, величина проникності середовища; структура ґрунту в зоні трубопроводу

Висновки. У результаті проведеного дослідження удосконалено методику розрахунку швидкості витoku суміші при втраті герметичності з причини виникнення критичних напружень в матеріалі труби. Досліджено зміну характеристик потоку в трубопроводі при зміні складу транспортованої суміші шляхом вивчення впливу зміни динамічної в'язкості. Проведено порівняльний аналіз величини вказаної швидкості в залежності від динамічної в'язкості багатоконпонентної газової суміші.

Одержано формулу для оцінки розмірів зони, на яку при аварії проникає забруднююча речовина. Ця формула може

бути застосована для подальших досліджень.

Список використаних джерел

1. Олійник А.П. Математичні моделі процесу квазістаціонарного деформування трубопроводних та промислових систем при зміні їх просторової конфігурації: Наукове видання. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. 320с.

2. Жовтуля Л. Я., Олійник А. П., Яворський А. В., Карпаш М. О. Розроблення методики оцінки напружено-деформованого стану лінійних ділянок магістральних трубопроводів. *Методи та прилади контролю якості*. №1(38). 2017. С. 57-63.

3. Chapman L., Heald C., Krause T. Origin of a magnetic easy axis in pipeline steel. *J. Appl. Phys.* 1999. Vol. 86. № 36. P. 1574-1580.

4. Cline A. K. Scalar and Planar Valued Curve Fitting Using Splines Under Tension. *Communications of the ACM*. vol.17, № 4, P.218-228.

5. Олійник А.П., Райтер П. М., Вершинін Ю. А. Моделювання потоків рідин в трубопроводі та дослідження стійкості різницевої схем. *Методи та прилади контролю якості*. 2016. №1(36). С. 48-53.

6. Олійник А.П., Григорчук Г. В., Говдяк Р. М. Застосування методів математичного моделювання для оцінки технічного стану трубопроводів та стану довкілля. *Методи та прилади контролю якості*. 2019. №1(42). С 97-103.

7. Жовтуля Л. Я., Олійник А. П., Яворський А. В., Цих В. С., Побережний Л. Я. Визначення зміни напружено-деформованого стану ділянки підземного трубопроводу за даними безконтактного позиціонування з поверхні землі. *Методи та прилади контролю якості*. 2017. №2(39). С. 14 – 22.

8. Олійник А.П. Розробка системи оцінки аеродинамічних характеристик

лопатеї осевого компресора газоперекачувального агрегату. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2011. №2(28). С. 19-22.

9. Oliinyk A.P., Shtayer L. O. Modelling of fluid flow in pipeline with the leaks due to surface. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. 2014. Vol 1. Issue 1. P. 45-52.

10. Дубовой В. М., Кветний Р. Н., Михальов О. І., Усов А. В. Моделювання та оптимізація систем: підручник. Вінниця, ПП «Едельвейс», 2017. 804 с

11 Семчук, Я. М., Палійчук Л. В. Основні завдання і методи досліджень для обґрунтування охорони підземних вод в районі видобутку калійних солей. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2007. №1(15). С. 164-167.

12. Трубопровідний транспорт газу. Київ, 2002. 600с.

References

1. Oliinyk A.P. Matematychni modeli protsesu kvazistatsionarnoho deformuvannya truboprovodnykh ta promyslovykh system pry zmini yikh prostorovoi konfihuratsii: Naukove vydannia. Ivano-Frankivsk: IFNTUNH, 2010. 320p. [in Ukrainian]

2. Zhovtulia L. Ya., Oliinyk A. P., Yavorskyi A. V., Karpash M. O. Rozroblennia metodyky otsinky napruzhenno – deformovanoho stanu liniinykh dilianok mahistralnykh truboprovodiv. *Metody ta pryklady kontroliu yakosti*. №1(38). 2017. P. 57 -63. [in Ukrainian]

3. Chapman L., Heald C., Krause T. Origin of a magnetic easy axis in pipeline steel. *J. Appl. Phys.* 1999. Vol. 86. № 36. P. 1574–1580.

4. Cline A. K. Scalar and Planar Valued Curve Fitting Using Splines Under Tension. *Communications of the ACM*. vol.17, № 4, P.218-228.

5. Oliinyk A.P., Raiter P. M., Vershynin Yu. A. Modeliuvannya potokiv ridynv truboprovodi ta doslidzhennia stiikosti

riznytsevykh skhem. *Metody ta pryklady kontroliu yakosti*. 2016. №1(36). P. 48-53. [in Ukrainian]

6. Oliinyk A.P., Hryhorchuk H. V., Hovdiak R. M. Zastosuvannia metodiv matematychnoho modeliuвання dlia otsinky tekhnichnoho stanu truboprovodiv ta stanu dovkillia. *Metody ta pryklady kontroliu yakosti*. 2019. №1(42). P. 97-103. [in Ukrainian]

7. Zhovtulia L. Ya., Oliinyk A.P., Yavorskyi A. V., Tsykh V. S., Poberezhnyi L. Ya. Vyznachennia zminy napruzhenodeformovanoho stanu dilianky pidzemnoho truboprovodu za danymy bezkontaktno pozytsionuvannya z poverkhni zemli. *Metody ta pryklady kontroliu yakosti*. 2017. №2(39). P. 14 – 22. [in Ukrainian]

8. Oliinyk A.P. Rozrobka systemy otsinky aerodynamichnykh kharakterystyk lopatei osovoho kompresora hazoperekachuvalnoho ahrehatu. *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu*. 2011. № 2(28). p. 19-22. [in Ukrainian]

9. Oliinyk A.P., Shtayer L. O. Modelling of fluid flow in pipeline with the leaks due to surface. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. 2014. Vol 1. Issue 1. P. 45-52.

10. Dubovoi V.M., Kviehnyi R.N, Mykhalov O.I., Usov A.V. Modeliuvannya ta optymizatsiia system: pidruchnyk. Vinnytsia, PP «Edelweis», 2017. 804 p

11. Semchuk, Ya. M., Paliichuk L. V. Osnovni zavdannia i metody doslidzhen dlia obgruntuvannya okhorony pidzemnykh vod v raioni vydobutku kaliinykh solei. *Naukovyi visnyk IFNTUNH*. 2007. №1(15). P. 164-167. [in Ukrainian]

АВТОМАТИЗАЦІЯ І КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 681.5.015:622.24

DOI: 10.31471/1993-9981-2023-1(50)-48-59

ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ БУРОВОГО НАСОСНОГО АГРЕГАТУ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТИСКОМ НА ЙОГО ВИХОДІ

Д. Р. Кропивницький, М. І. Горбійчук

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019; тел. (03422)4-60-67, E-mail: GenRocko@gmail.com, mi_profgorb@ukr.net

Розглянуто функціональну схему системи оптимального керування процесом механічного буріння, що має ієрархічну структуру. Нижній рівень системи включає буровий насосний агрегат, складовими частинами якого є система "привод — буровий насос" та пневмокомпенсатор. Основною задачею бурового насосного агрегату є забезпечення постійного моменту на валу, що дає змогу підтримувати постійним тиск промивальної рідини на вході в свердловину. Розроблено аналітичні математичні моделі для бурового насоса з асинхронним приводом та пневмокомпенсатора. Показано, що розроблені математичні моделі мають вигляд диференціальних рівнянь першого порядку і є нелінійними. Для їх лінеаризації нелінійні залежності було розкладено в ряд Тейлора. В розроблену математичну модель пневмоконденсатора входить значення коефіцієнта стисливості повітря. Введення такого поправочного коефіцієнта пояснюється тим, що при робочому тиску подачі бурового розчину в свердловину (від 14 МПа до 18 МПа) поведінка газу відрізняється від ідеального. Визначено, що коефіцієнт стисливості повітря є функцією двох аргументів — тиску і температури, які є змінними величинами. Дану функцію було апроксимовано регресійним поліномом другого порядку, а значення коефіцієнтів обчислено за методом найменших квадратів за допомогою програмного забезпечення в середовищі MatLab. Для візуалізації отриманих результатів побудовано графік залежності коефіцієнта стиснення від тиску та температури, з якого видно що обчислені значення коефіцієнтів z , співпадають з "експериментальними значеннями" з високою точністю. Для розроблених математичних моделей здійснено перетворення за Лапласом, що дозволило побудувати структурні схеми бурового насосного агрегату та його компонент. На основі отриманих схем синтезовано систему автоматичного керування бурового насосного агрегату з асинхронним приводом.

Ключові слова: математична модель, буровий насосний агрегат, автоматична система керування, тиск, передавальна функція

The functional diagram of an optimal control system for the process of mechanical drilling, which has a hierarchical structure, has been considered. The lower level of the system includes a drilling pump unit, consisting of the "drive-drilling pump" system and a pneumatic compensator. The main task of the drilling pump unit is to provide a constant torque on the shaft, which allows maintaining a constant pressure of the flushing fluid at the well inlet. Analytical mathematical models for the drilling pump with an asynchronous drive and the pneumatic compensator have been developed. It has been shown that the developed mathematical models take the form of first-order differential equations and are nonlinear. To make them linear, the nonlinear dependencies were expanded into a Taylor series. The developed mathematical model of the pneumatic condenser includes the value of the air compressibility coefficient. The introduction of such a corrective coefficient is explained by the fact that the behavior of the gas differs from ideal under the operating pressure of supplying the drilling fluid into the well (from 14 MPa to 18 MPa). It has been determined that the air compressibility coefficient is a function of two arguments - pressure and temperature, which are variable quantities. This function was approximated by regression polynomial of the second - order, and the coefficients values were computed by the method of least squares using the MatLab environment. To visualize the obtained results, a graph depicting the dependence of the compression coefficient on pressure and temperature was built, showing that the calculated coefficient values are appropriate to the "experimental values" z

with high accuracy. Laplace transforms were applied to the developed mathematical models, allowing to build of structural diagrams for the drilling pump unit and its components. Based on the obtained diagrams, an automatic control system for the drilling pump unit with an asynchronous drive was synthesized.

Keywords: mathematical model, drilling pump unit, automatic control system, pressure, transfer function

Вступ. Буріння свердловин на нафту і газ є складним і дорогим процесом. Сучасні дослідження значною мірою спрямовані на оптимізацію процесу буріння, удосконалення існуючого та створення нового обладнання, підвищення його надійності та відмовостійкості, попередження аварійних ситуацій.

У зв'язку широким впровадженням мікропроцесорної техніки виникають реальні можливості реалізувати складні алгоритми керування, які дадуть змогу здійснювати технологічний процес механічного буріння в оптимальному режимі.

На рис. 1 зображена функціональна схема системи оптимального керування процесом механічного буріння.

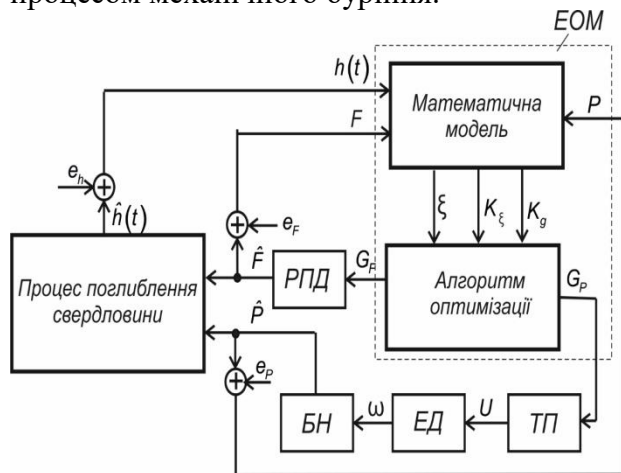


Рисунок 1 – Функціональна схема системи оптимального керування процесом механічного буріння

Допускаємо, що приводом бурового долота є гвинтовий вибійний двигун (ГВД). Математичну модель процесу механічного буріння подано як систему диференціальних рівнянь [1, 2]. Входами моделі є осьове навантаження на долото F , тиск бурового розчину P та поточне значення проходки $h(t)$. Тиск P і поточне значення проходки $h(t)$ вихідними даними для обчислення

оцінок стану озброєння долоті та його опори. Крім того, математична модель включає в себе такі величини, як швидкості зміни оцінок станів озброєння K_ξ і K_g , які поряд з оцінкою стану озброєння ξ є виходами блоку, який реалізує математичну модель процесу поглиблення свердловини.

На основі інформації про значення величин ξ , K_ξ і K_g та апріорної інформації такої як вартість долота d_c , вартість години роботи бурової установки C_d , тривалість спуско-піднімальних операцій T_{lo} формується критерій оптимальності, який розглянуто у роботі [3].

Результатом роботи блоку алгоритму оптимізації є значення сигналів G_F і G_p , які в певному масштабі задають значення осьового навантаження на долото і тиску промивальної рідини, що мінімізують заданий критерій оптимальності.

Сигнал G_F є вставкою регулятора подачі долота (РПД), завдання якого підтримувати оптимальне значення осьового навантаження на долото F^* .

За допомогою тиристорного перетворювача (ТП) задається необхідна частота обертання вала приводного електричного двигуна (ЕД). Вал приводного ЕД з'єднаний з буровим насосом (БН) за допомогою ланцюгової або клино-ремінної передачі. Буровий насос забезпечує необхідну подачу промивальної рідини Q та створює тиск P^* на вході в маніфольд. Значення тиску P^* визначено з допустимої області керування за допомогою оптимізаційної процедури, яка мінімізує вартість метра проходки свердловини [3].

Функціональна схема процесу буріння має ієрархічну структуру, на нижньому рівні якої знаходяться технічні ланки, що безпосередньо беруть участь в процесі поглиблення свердловини. Вплив режимних параметрів на процес буріння [4],

параметрів бурових розчинів [5], геологічних факторів [6] досліджено досить широко. Недостатньо вивчено вплив працездатності технічних засобів на показники процесу буріння. Цей фактор безпосередньо впливає на непродуктивні витрати часу, що у результаті позначається на комерційній швидкості буріння.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій.

При бурінні свердловини за допомогою ГВД, його можна розглядати як енергетичний вузол привода долота і поглиблення свердловини [7]. Оскільки, забезпечення надійності вузлів та елементів бурильної колони тісно пов'язані з використанням вибійних двигунів, то важливе значення має дослідження окрім ланок, які входять до складу бурового агрегату, таких як буровий насос з асинхронним приводом та пневмокомпенсатор.

В роботі [8] розглядається математична модель бурового насоса, в структуру якого входить компенсаційна ланка з метою підвищення рівня надійності та забезпечення його безперебійної роботи. Такий компенсаційний блок в байпасному контурі дозволяє імітувати роботу електропривода і під час пуску, і в усталеному режимі роботи. Проте така математична модель враховує основні технічні характеристики бурового насоса, а сам буровий агрегат не розглядається як елемент автоматичної системи керування процесом буріння.

У дослідженні [9] запропоновано автоматичну систему буріння з електроприводом. За допомогою серводвигуна та системи керування сервосистемою вона дозволяє контролювати момент на долоті під час процесу буріння. У порівнянні з традиційною гідравлічною установкою, ця система не тільки покращує точність керування завдяки введенню серводвигуна, але й значно підвищує надійність системи, тим самим зменшуючи

час на технічне обслуговування та вартість пристрою. Проте дана система є експериментальною і розроблена тільки для колонкового буріння алмазними долотами.

При роботі бурового насоса важливе значення має пусковий режим, алгоритм розрахунку якого було розглянуто в роботі [10]. Розроблений алгоритм враховує зміщення струму в штоках глибокого ротора приводного двигуна, змінний момент інерції та циклічний закон зміни навантаження, що дозволяє досліджувати динамічні процеси.

В роботі [11] досліджено математичні моделі бурових систем, що описуються звичайними диференціальними рівняннями з врахуванням повного опису асинхронного двигуна, що значно ускладнює аналітичні розрахунки.

Бурова насосна установка як об'єкт керування типу МІ-МО була розглянута в роботі [12], що дозволило на основі зв'язку спектральних щільностей потужностей сигналів витрати та тиску визначити її функцію передачі по каналу «витрата бурового розчину – тиск нагнітання» за допомогою автокореляційних функцій.

Проте дослідження компонент бурового агрегату як ланок, що входять до структури бурової установки не проводилось. Існуючі математичні моделі окремих елементів направлені на вирішення технологічних задач. На даний час відсутні моделі, придатні для синтезу системи автоматичного керування буровими насосами. Тому, в даній роботі було розроблено математичні моделі електричного привода та пневмокомпенсатора бурового насоса, які входять до структури бурового насосного агрегату.

Формулювання цілей і методів досліджень статті.

Метою роботи є розроблення математичної моделі бурового насосного агрегату та його компонент як нижніх елементів в ієрархічній системі процесу

буріння для синтезу автоматичної системи керування тиском на його виході. Для цього необхідно виконати такі задачі:

- розроблення математичної моделі привода бурового насоса на основі теорії електричного привода;
- розроблення математичної моделі пневмокомпенсатора з врахуванням реального стану робочого тіла компенсатора, з використанням методу найменших квадратів для обчислення коефіцієнта стисливості газу;
- виконати редукцію розроблених математичних моделей для побудови структурних схем, використовуючи методи розкладання нелінійних функцій в ряд Тейлора та перетворення Лапласа.

Виклад основного матеріалу.

Буріння свердловини на нафту і газ відбувається у взаємодії з буровим насосним агрегатом (БНА), який входить до складу бурової установки.

БНА має у своєму складі буровий поршневий насос, привідний двигун, силову передачу (ланцюгову або клиноремінну) та пристрій керування.

Буровий насос 1 (рис.2) створює потік рідини, яка характеризується витратою Q і тиском P . Ефективність процесу буріння значною мірою визначається режимом роботи бурового насоса. Створений ним потік бурового розчину, поступає до маніфольду 2, далі по бурильних трубах 3 попадає до гвинтового вибійного двигуна 4, який приводить в обертний рух долото. На поверхню буровий розчин разом з вибуреною по затрубному просторі виводиться із свердловини.

В основі ефективного керування асинхронним приводом лежить закон Костенка [13]

$$\gamma = \alpha \sqrt{\mu}, \quad (1)$$

де γ - відносна напруга; α -відносна частота; μ - відносний момент на валу приводу. Всі відносні величини приведені до відповідних номінальних значень.

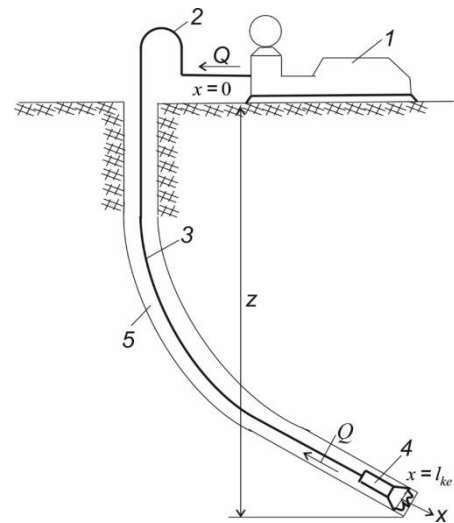


Рисунок 2 – Схематичне зображення гідравлічної системи бурової установки

До електричного привода бурових насосів пред'являється вимога забезпечення постійного моменту на його валу, що дає змогу підтримувати постійним тиск промивальної рідини на вході в свердловину. У такому випадку момент на валу двигуна повинен бути близьким до номінального, тобто $\mu \rightarrow 1$ і як це впливає із формули (1) $\gamma = \alpha$. Виконавши нескладні математичні перетворення можна визначити, що $U_V f = U_{1,n} f_n = \text{const}$.

Метод керування роботою асинхронного привода, коли підтримується постійне співвідношення між напругою джерела живлення і частотою обертання валу двигуна носить назву $U_V f$ - керування.

Керування роботою приводу передбачає [14] незалежність керуючих дій, які визначають електромагнітний момент двигуна. Природно, що керуючі дії повинні бути спостережливими. В асинхронних машинах є тільки дві такі величини – напруга статора і струм ротора. Для вибору другого керуючого впливу є три фізичні величини – основне потокозчеплення, потокозчеплення статора і ротора. Потокозчеплення статора і робочий струм можна безпосередньо виміряти

(спостерігати) і використати як керуючі дії [14].

Спрощена функціональна схема [14] системи частотного регулювання асинхронним приводом зображена на рис. 3.

Необхідна частота струму статора привода задається вставкою регулятора U_{tr} .

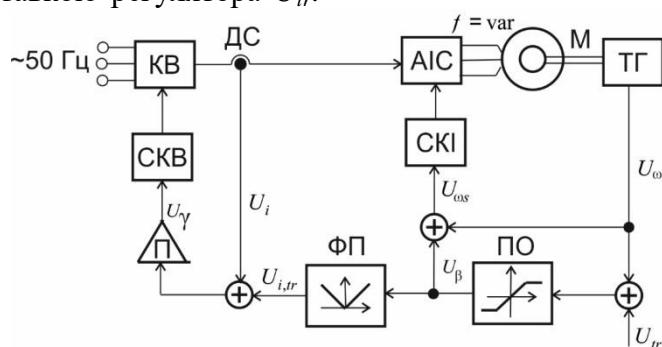


Рисунок 3 – Спрощена функціональна схема частотного регулювання асинхронним приводом

Вихідний сигнал U_β функціонального перетворювача ФП задає значення величини струму статора двигуна, який разом з сигналом U_i зворотного зв'язку по струму поступає через підсилувач П на вхід системи керування вентилями як сигнал U_γ .

Пристрій обмеження ПО виконує функцію захисту привода від перевантаження при різкому зростанні U_{tr} . Тоді відбувається обмеження сигналу U_β і відповідно сигналу $U_{i,tr}$, що приводить до обмеження значення моменту ротора привода.

На асинхронний привод діє збурення зі сторони бурового насоса. Крім того відбуваються внутрішні зміни електричних параметрів привода. Для компенсації дії зовнішнього середовища на привод у систему керування вводять від'ємний зворотний зв'язок.

Для синтезу і аналізу автоматичної системи керування електричним приводом бурового насосу створимо його математичну модель.

Електричний привод разом з буровим насосом утворюють динамічну систему, яку можна описати такими диференціальними рівняннями[15]:

На виході елемента порівняння формується сигнал неузгодженості ϵ , який, пройшовши через пристрій обмеження (ПО), додається до сигналу U_ω . У результаті формується сигнал $U_{\omega s}$ на вході системи керування СКІ автономним інвертором струму АІС.

$$\frac{di'_2}{dt} = \frac{U_{1f} - i'_2(z_1 + z'_2)}{L_s}, \quad (2)$$

$$M_{dr} = \frac{3i'^2_2 r'_2}{\Omega_{sf} s_l}, \quad (3)$$

$$J \frac{d\Omega}{dt} = M_{dr} - M_{dp}, \quad (4)$$

де $z_1 = \sqrt{(r_1/\alpha)^2 + x_1^2}$; x_1, x_2 – індуктивні опори статора і ротора; x_m – повний індуктивний опір обмотки статора; r_1, r'_2 – активні опори статора і ротора; s_l – ковзання привода; L_s – повна індуктивність двигуна; U_{f1} – напруга прикладена до статора привода; Ω_{sf} – синхронна кутова швидкість; J – приведений момент інерції, який враховує інерційність всіх мас, що визначаються числами оборотів привода; Ω_1 – кутова швидкість ротора привода; M_{dr}, M_{dp} – моменти привода і момент навантаження з сторони бурового насоса.

Після лінеаризації системи рівнянь (2) – (4) відносно стаціонарного режиму роботи механізмів «привод-буровий насос» та математичних перетворень, таких як розкладання нелінійної функції в ряд Тейлора та перетворення диференціального рівняння за Лапласом з врахуванням нульових початкових умов, було отримано

лінеаризовану математичну модель системи «привод-буровий насос», записану в термінах перетворення Лапласа:

$$\Delta M_{dr}(s) = \frac{k_{\Omega}}{T_z s + 1} \Delta U_{1f}(s), \quad (5)$$

$$\Delta \Omega(s) = \frac{1}{J_s} (\Delta M_{dr}(s) - \Delta M_{dp}(s)). \quad (6)$$

Тут: k_{Ω} — коефіцієнт, що враховує технічні параметри електричного привода.

На основі рівнянь (5) і (6) створена структурна схема системи «привод-буровий насос» як об'єкт автоматичного керування (рис. 4).

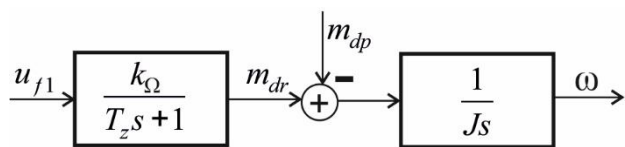


Рисунок 4 – Структурна схема системи «привод-буровий насос» як об'єкт автоматичного керування

Аналіз математичних моделей (5) і (6) показує, що система «привод-буровий насос» як об'єкт автоматичного керування представляє собою астатичну систему з астатизмом першого порядку.

Оскільки буровий насос є поршневым агрегатом і в процесі його роботи виникають пульсації потоку рідини, для згладжування яких на виході бурового насоса встановлений пневмокомпенсатор (рис. 5), то побудуємо математичну модель пневмоконденсатора, як складової частини бурового агрегату.

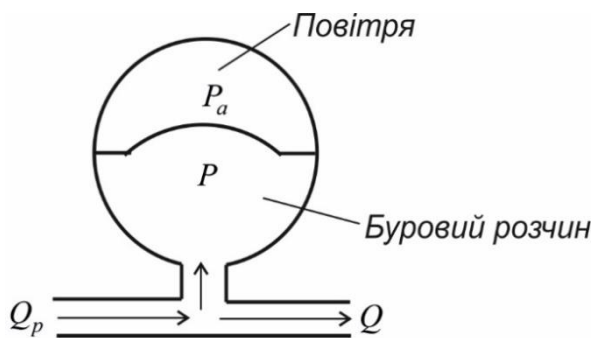


Рисунок 5 – Пневмокомпенсатор бурового насоса

Пневмокомпенсатор представляє собою ємність, яка розділена на дві частини діафрагмою. У нижню частину ємності поступає потік бурового розчину Q_p під тиском p_a . Верхня частина пневмокомпенсатора заповнена повітрям під тиском p_a . Далі потік рідини Q подається до маніфольду (рис 4.1).

Очевидно, що тиск рідини урівноважується тиском стисненого повітря, тобто має місце така рівність $P = P_a$. У будь-який момент часу для пневмокомпенсатора справедливе рівняння матеріального балансу (допускаємо, що густина бурового розчину постійна величина), тобто

$$\frac{dV}{dt} = Q_p - Q, \quad (7)$$

де V - об'єм частини пневмокомпенсатора, заповненого рідиною.

Нехай V_0 - повний об'єм пневмокомпенсатора, а V_a - об'єм, зайнятий повітрям. Тоді $V = V_0 - V_a$.

З врахуванням цього рівняння (7) буде таким:

$$-\frac{dV_a}{dt} = Q_p - Q. \quad (8)$$

Буровий розчин подається в систему промивання свердловини під тиском від 14 до 18 МПа [16]. При таких тисках поведінка газу в пневмокомпенсаторі відрізняється від ідеального. Для опису стану реального газу використовують рівняння [17] подібне до рівняння, яке описує стан ідеального газу, з деяким поправочним коефіцієнтом z . Отже, $p_a V_a = z M_a R T_a$, де M_a - маса газу; R - газова стала; T_a - температура газу в пневмокомпенсаторі.

Для обчислення коефіцієнта стисливості газу z використано модифіковане рівняння стану Бенедикта-Веба-Равіна [18]: $z^3 - z^2 - a \cdot z - b = 0$, розв'язок якого здійснювався одним із числових методів [19].

Так як рівняння стану має три корені, то як значення величини Z вибирався той корінь, який задовільняв умові $0 < z_i \leq 1$, $i \in \{1, 2, 3\}$, $z = z_i$.

Підставивши значення V_a у рівняння (8) та врахувавши, що маса повітря M_a і газова стала R незмінні величини, отримали

$$-M_a R \frac{d}{dt} \left(\frac{z T_a}{\tilde{p}} \right) = Q_p - Q. \quad (9)$$

Для бурового поршневого насоса з асинхронним приводом, у якого м'яка характеристика «механічний момент-кутова швидкість», має місце наступне співвідношення [9]: $Q_p / Q_{p,0} = \Omega / \Omega_0$, де індексом «0» означені відповідні номінальні значення.

Тиск на виході бурового насоса після пневмокомпенсатора пропорціональний квадрату подачі рідини, тобто $p = k_q Q^2$.

Знавши значення p і Q , підставивши їх у рівняння (9), було отримано таке рівняння:

$$-M_a R \frac{d}{dt} \left(\frac{z T_a}{\tilde{p}} \right) = Q_{p,0} \frac{\Omega}{\Omega_0} - \sqrt{\frac{\tilde{p}}{k_q}}. \quad (10)$$

Знайдемо

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{z T_a}{\tilde{p}} \right) = \frac{1}{\tilde{p}^2} \left[\tilde{p} \left(T_a \frac{dz}{dt} + z \frac{dT_a}{dt} \right) - z T_a \frac{d\tilde{p}}{dt} \right]. \quad (11)$$

Коефіцієнт стисливості газу є функцією тиску і температури, тобто

$$z = f_z(\tilde{p}(t), T_a(t)). \quad (12)$$

За правилом диференціювання неявних функцій запишемо

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\partial f_z}{\partial \tilde{p}} \cdot \frac{d\tilde{p}}{dt} + \frac{\partial f_z}{\partial T_a} \cdot \frac{dT_a}{dt}. \quad (13)$$

Після підставки отриманих значень в рівняння (11) та (10), рівняння (10) набуло вигляду:

$$M_a R \left[T_a \left(\tilde{p} \frac{\partial f_z}{\partial \tilde{p}} - z \right) \frac{d\tilde{p}}{dt} + \tilde{p} \left(T_a \frac{\partial f_z}{\partial T_a} + z \right) \frac{dT_a}{dt} \right] = -\tilde{p}^2 \left(Q_{p,0} \frac{\Omega}{\Omega_0} - \sqrt{\frac{\tilde{p}}{k_q}} \right). \quad (14)$$

Алгоритм знаходження коефіцієнта стисливості повітря як функції аргументів тиску і температури не дає змоги у замкнутій формі знайти залежність (12). Тому, за результатами обчислень значень z при заданих значеннях тиску і температури,

залежність (12) апроксимували поліномом другого порядку, коефіцієнти якого обчислюються за методом найменших квадратів.

$$z_y = a_{0z} + a_{1z} \tilde{p} + a_{2z} T_a + a_{3z} \tilde{p}^2 + a_{4z} T_a^2 + a_{5z} \tilde{p} T_a. \quad (15)$$

Для обчислення коефіцієнта стисливості газу розроблено програмне забезпечення в середовищі MatLab. Були вибрані такі вхідні дані алгоритму обчислень: $p_{min} = 10 \text{ МПа}$, $p_{max} = 20 \text{ МПа}$, $T_{a,min} = -20 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{a,max} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

У результаті обчислень отримали такі значення коефіцієнтів рівняння регресії (15):

$$\begin{aligned} a_0 &= 1.8415 \text{e-}01 \\ a_1 &= 2.0640 \text{e-}02 \\ a_2 &= 3.1680 \text{e-}03 \\ a_3 &= 3.9441 \text{e-}05 \\ a_4 &= 2.9174 \text{e-}05 \\ a_5 &= -2.0448 \text{e-}04. \end{aligned}$$

На рис. 6 зображена залежність коефіцієнта стиснення повітря від тиску бурового розчину і температури повітря всередині пневмокомпенсатора. На тому ж рисунку показано залежність побудована за формулою (15).

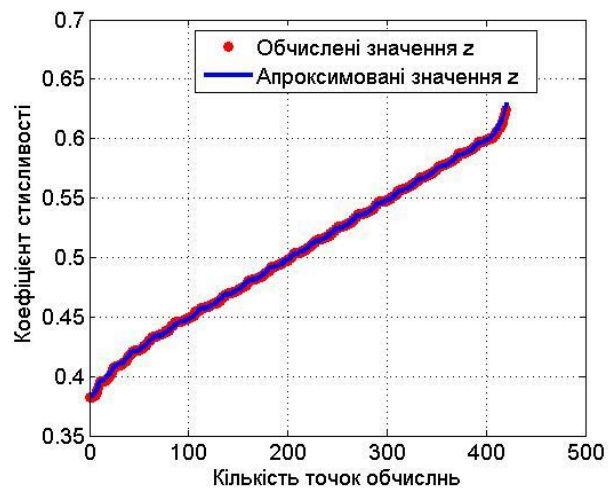


Рисунок 6 – Залежність коефіцієнта стиснення від тиску і температури

Оскільки відома регресійна модель (15), то можна визначити часткові похідні, які присутні у формулі (14). Підставивши необхідні значення та виконавши ряд

математичних перетворень, рівняння (14) набуде такого вигляду:

$$T_a(\tilde{p}(a_{1z} + 2a_{3z}\tilde{p} + a_{5z}T_a) - f_z(\tilde{p}, T_a))\tilde{p}' + \\ + \tilde{p}(T_a(a_{2z} + 2a_{4z}T_a + a_{5z}\tilde{p}) + f_z(\tilde{p}, T_a))T_a' = (16) \\ = -\frac{\tilde{p}^2}{M_a R} \left(Q_{p,0} \frac{\Omega}{\Omega_0} - \sqrt{\frac{\tilde{p}}{k_q}} \right)$$

де $\tilde{p}' = \frac{d\tilde{p}}{dt}$; $T_a' = \frac{dT_a}{dt}$.

Отримане рівняння (16) є нелінійним. Оскільки установка «привод-буровий насос» мають у своєму складі систему автоматичного керування кутовою швидкістю ротора асинхронного двигуна, то відхилення кутової швидкості $\Delta\Omega$ від свого усталеного значення Ω_0 буде невеликим. Тому нелінійне рівняння (16) можна лінеаризувати відносно статичного режиму роботи системи.

Після ряду математичних перетворень лінеаризована модель пневмокомпенсатора, як це випливає із рівняння (16), буде такою:

$$\alpha_0 \frac{dp}{dt} + \frac{\alpha_2}{M_a R} p = \alpha_1 \frac{dt_a}{dt} + \frac{\alpha_3}{M_a R} \omega. (17)$$

Відмітимо, що рівняння (17), матиме зміст коли $\alpha_0 > 0$ і $\alpha_2 > 0$.

Лінійне диференціальне рівняння (17) перетворимо за Лапласом, враховуючи нульові початкові умови. Отже,

$$\left(\alpha_0 s + \frac{\alpha_2}{M_a R} \right) p(s) = \alpha_1 s t_a(s) + \frac{\alpha_3}{M_a R} \omega(s).$$

Звідси знаходимо:

$$p(s) = \frac{M_a R \alpha_1 s}{\alpha_2 \left(\frac{\alpha_0}{\alpha_2} M_a R s + 1 \right)} t_a(s) + \\ + \frac{\alpha_3}{\alpha_2 \left(\frac{\alpha_0}{\alpha_2} M_a R s + 1 \right)} \omega(s)$$

Уведемо позначення: $T_\omega = \frac{\alpha_0}{\alpha_2} M_a R$,

$$\tau_t = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} M_a R, \quad k_\omega = \frac{\alpha_3}{\alpha_2}.$$

Тоді

$$p(s) = \frac{\tau_t s}{T_\omega s + 1} t_a(s) + \frac{k_\omega}{T_\omega s + 1} \omega(s). (18)$$

Рівняння (18) описує динамічний процес у пневмокомпенсаторі при малих відхиленнях відповідних величин від своїх усталених значень.

Структурна схема пневмокомпенсатора зображена на рис. 7.

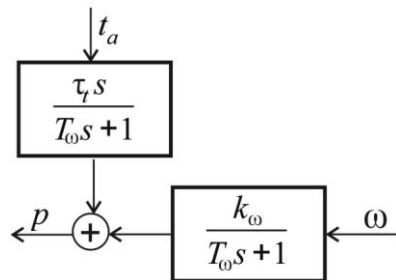


Рисунок 7 – Структурна схема пневмокомпенсатора

На основі математичних моделей системи «привод-буровий насос» і пневмокомпенсатора бурового насоса побудована структурна схема бурового насосного агрегату (рис. 4.10), яка об'єднує структурні схеми (рис. 5 і рис. 7).

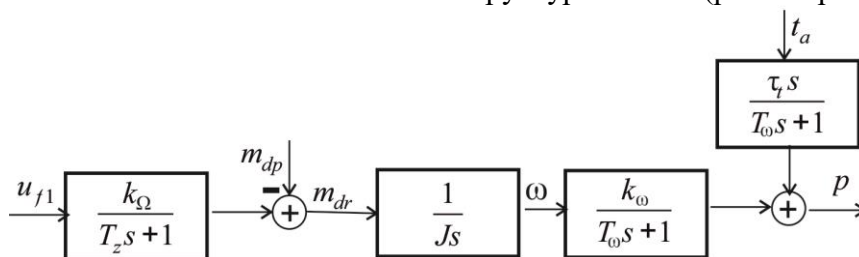


Рисунок 8 – Структурна схема бурового насосного агрегату

Завданням системи автоматичного керування буровим насосним агрегатом – підтримання постійної витрати і тиску бурового розчину. Оскільки на керований об'єкт (рис. 8) діють зовнішні збурення, що

зумовлюють відхилення тиску від заданого значення, то в контур керування введено додатковий контур (рис. 9), який включає в себе регулятор з передавальною функцією $W_{r2}(s)$.

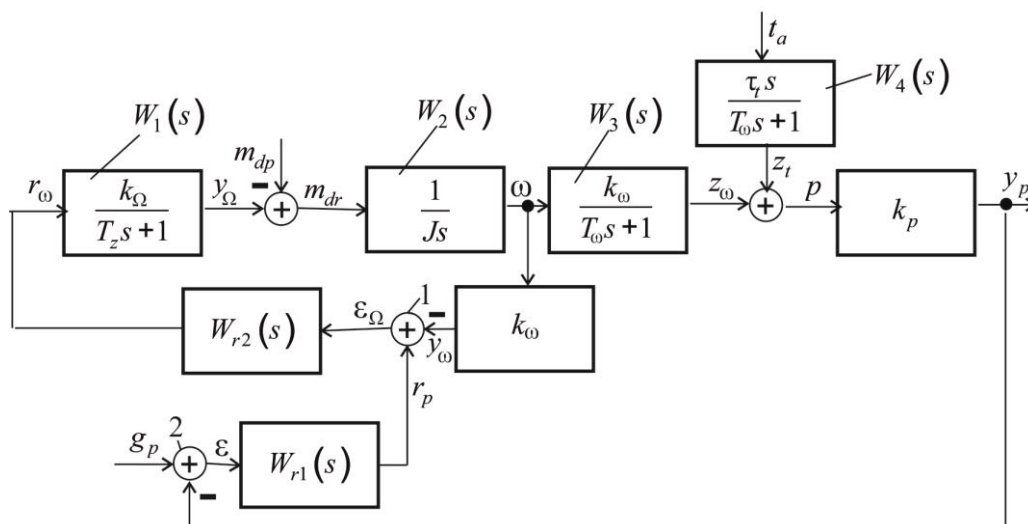


Рисунок 9 – Структурна схема автоматичного керування буровим насосним агрегатом з асинхронним приводом

Регулятор з передавальною функцією $W_{r1}(s)$ є базовим, за допомогою якого здійснюється стабілізація тиску промивальної рідини на виході із компенсатора. Для зменшення впливу зовнішніх збурень – температури зовнішнього середовища і моменту на роторі електричного привода – запропонований додатковий контур з регулятором $W_{r2}(s)$ (рис. 9), на вхід якого поступає сигнал, як завдання, від регулятора $W_{r1}(s)$.

Висновки

На основі вивчення фізичних процесів, що протікають в такій як буровий насосний агрегат, було побудовано аналітичну математичну модель системи “привод — буровий насос” у вигляді диференціальних рівнянь, що дозволяє дослідити роботу такої системи в часі.

Так як складовим компонентом бурового насоса є пневмоконденсатор, то було побудовано його математичну модель у формі диференціальних рівнянь з урахуванням побудови алгоритму

знаходження коефіцієнта стисливості повітря. Значення коефіцієнта стисливості повітря визначається поліномом другого порядку, для обчислення коефіцієнтів якого застосовувався метод найменших квадратів

На основі розроблених математичних моделей для компонент бурового агрегату було побудовано структурні схеми привода бурового насоса та пневмокомпенсатора. Після їх об'єднання які було отримано структурну схему бурового агрегату, яка є важливою складовою системи автоматичного керування буровим насосним агрегатом.

Розроблена структурна схема дозволяє знайти передавальну функцію системи автоматичного керування, що, в свою чергу, дозволяє в подальших дослідженнях визначити основні властивості системи, такі як стійкість роботи системи в стаціонарному та перехідному (пусковому) режимах роботи, за відомими критеріями та тривіальними алгоритмами.

Список використаних джерел

1. Горбійчук М. І., Кропивницький Д. Р. Математична модель процесу поглиблення свердловини під час буріння гвинтовими вибійними двигунами. *Збірник наукових праць національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. Миколаїв: видавничий дім "Гельветика", 2021. №1 (484). С. 68-74.
2. M. Horbiychuk, D.Kropyvnytskyi, V.Kropyvnytska. Improving empirical models of complex technological objects under conditions of uncertainty. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. №2 (122), С. 53-63.
3. Горбійчук М. І., Кропивницький Д. Р. Оптимальне керування процесом поглиблення свердловини з врахуванням стану озброєння долота. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2023. Том 1. №1, (317). С. 58-66.
4. Кропивницька В. Б. Процес буріння свердловини як складна система з багатокритеріальними оцінками процесів. *Методи та прилади контролю якості*, 2018. № 2. С.69-76.
5. Коцкулич Я.С., Оринчак М. І., Оринчак М. М. Бурові промивні рідини. Івано-Франківськ: «Факел», 2008. 500 с.
6. Прийняття рішень при виборі доліт і режимних параметрів буріння в залежності від характеру вихідної інформації / Г. М. Эфендиев, С. А. Алиев, М. Д. Сарбопеева [и др.]. *Геоінформатика*, 2016. № 3. С. 30– 39.
7. Огородніков П.І., Світлицький В.М., Угрюмов М.В. Вплив вибійних приводів на хвильові процеси в бурильній колоні. *Нафтогазова галузь України*. 2020. №1. С. 3-7.
8. T. V. Tabachnikova and L. V. Shvetskova. Results of mathematical modeling of the mud pump electric drive operation with the compensation unit in the circuit. IOP Conference Series Materials Science and Engineering. July, 2020. 012015. DOI:10.1088/1757-899X/860/1/012015
9. Zheng Zhou, Yuanbiao Hu, Baolin Liu, Kun Dai, Yudong Zhang. Development of Automatic Electric Drive Drilling System for Core Drilling. *Applied Sciences*, 2023. Volume 13, Issue 2. 1059p <https://doi.org/10.3390/app13021059>
10. Калужний, Б., & Маляр, А. Simulation of the start-up electric drive of a sucker rod pump installation. *Electrotechnic and Computer Systems*, 2019. (66). С. 167-169.
11. Leonov G.A., Kuznetsov N.V., Kiseleva M.A., Solovyeva E.P., Zaretskiy A.M. Hidden Oscillations in Mathematical Model of Drilling System Actuated by Induction Motor with a Wound Rotor. *Nonlinear Dyn.* 2014. (77). P. 277–288.
12. Sementsov G.N., Lagoyda A.I. Statistical identification of dynamic characteristics of boring pumping installations for optimization control. *Modern engineering and innovative technologies*, 2019. № 2(09-02). С. 12-30. DOI: 10.30890/2567-5273.2019-09-02-006
13. Основи електроприводу [Текст]: конспект лекцій / укл. В.В. Лишук, С. П. Літковець. Луцьк: Технічний коледж Луцького НТУ, 2020. 168 с.
14. Основи електропривода: підручник / Ю.М. Лавріненко, П.І. Савченко, О.Ю. Синявський, Д.Г. Войтюк, В.В. Савченко, І.М. Голодний. К.: Видавництво Ліра-К, 2017. 524 с.
15. Костинюк Л. Д. Математичні та структурні моделі асинхронних двигунів, побудованих на основі однофазних заступних схем. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*, 2008. № 615: Електроенергетичні та електромеханічні системи. С. 46-50.
16. Пащенко О. А. Вплив гідростатичного тиску на енерговитрати при бурінні свердловин. *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент — техника и технология его изготовления и применения*. 2016. Вып. 19. С. 107-112 .
17. Ковецька Ю.Ю., Дмитренко Н.П., Скіцько О.І., Плахотня Л.В. Теплообмін при

природній конвекції газу Ван-дер-Ваальса. *Теплофізика та теплоенергетика*, 2022. Т.44. № 1. С. 5-12

18. Himmelblau David M., Riggs James B. Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering: Eighth Edition. Prentice Hall, 2012. 857 p.

19. Andrew F. Hayes. Statistical methods for communication science. New Jersey, 2015. 507 p.

References

1. M. I. Horbiychuk, D. R. Kropyvnytskyi. Mathematical model of the process of deepening the well during drilling with screw downhole engines. *Collection of scientific papers of Admiral Makarov National Shipbuilding University*. 2021. No. 1 (484). P. 68-74. [in Ukrainian]

2. M. Horbiychuk, D. Kropyvnytskyi, V. Kropyvnytska. Improving empirical models of complex technological objects under conditions of uncertainty. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. No. 2 (122). P. 53-63.

3. Gorbiychuk M. I., Kropyvnytskyi D. R. Optimal control of the well deepening process taking into account the state of the bit arming. *Bulletin of the Khmelnytskyi National University*. 2023. Volume 1. No. 1, (317). P. 58-66. [in Ukrainian]

4. Kropyvnytska V. B. The well drilling process as a complex system with multi-criteria evaluation of processes. *Quality control methods and devices*. 2018. No. 2. P. 69-76. [in Ukrainian]

5. Kotskulich Ya.S., Orynychak M.I., Orynychak M.M. Drilling flushing fluids. Ivano-Frankivsk: "Fakel", 2008. 500 p. [in Ukrainian]

6. Making decisions when choosing bits and mode parameters of drilling depending on the nature of the initial information / G. M. Efendiev, S. A. Aliyev, M. D. Sarbopeeva [and others]. *Geoinformatics*, 2016. No. 3. P. 30–39. [in Ukrainian]

7. Ogorodnikov P.I., Svitlytskyi V.M., Ugryumov M.V. The influence of downhole drives on wave processes in the drill string. *Oil and gas industry of Ukraine*. 2020. No. 1. P. 3-7. [in Ukrainian]

8. T. V. Tabachnikova and L. V. Shvetskova. Results of mathematical modeling of the mud pump electric drive operation with the compensation unit in the circuit. IOP Conference Series Materials Science and Engineering. July, 2020. 012015. DOI:10.1088/1757-899X/860/1/012015

9. Zheng Zhou, Yuanbiao Hu, Baolin Liu, Kun Dai, Yudong Zhang. Development of Automatic Electric Drive Drilling System for Core Drilling. *Applied Sciences*, 2023. Volume 13, Issue 2. 1059 <https://doi.org/10.3390/app13021059>

10. Kaluzhnyi, B., & Malyar, A. Simulation of the start-up electric drive of a sucker rod pump installation. *Electrotechnics and Computer Systems*. 2019. Vol 66. P. 167-169.

11. Leonov, G.A.; Kuznetsov, N.V.; Kiseleva, M.A.; Solovyeva, E.P.; Zaretskyi, A.M. Hidden Oscillations in Mathematical Model of Drilling System Actuated by Induction Motor with a Wound Rotor. *Nonlinear Dyn*. 2014. Vol 77. P. 277–288.

12. Sementsov G.N., Iagoyda A.I. Statistical identification of dynamic characteristics of boring pumping installations for optimization control. *Modern engineering and innovative technologies*. 2019. No. 2(09-02). P. 12-30. DOI: 10.30890/2567-5273.2019-09-02-006

13. Fundamentals of an electric drive [Text]: lecture notes / incl. V.V. Lyshuk, S.P. Litkovets. – Lutsk: Technical College of Lutsk National Technical University, 2020. 168 p. [in Ukrainian]

14. Fundamentals of an electric drive: a textbook / Yu.M. Lavrinenko, P.I. Savchenko, O.Yu. Sinyavskyi, D.G. Voytyuk, V.V. Savchenko, I.M. Hungry. K.: Lira-K Publishing House, 2017. 524 p. [in Ukrainian]

15. Kostinyuk L. D. Mathematical and structural models of asynchronous motors built on the basis of single-phase substitute circuits. *Bulletin of the Lviv Polytechnic National University*. 2008. No. 615: Electrical and electromechanical systems. P. 46-50. [in Ukrainian]

16. O. A. Pashchenko. The influence of hydrostatic pressure on energy consumption when drilling wells. Rock-destroying and metal-working instrument — technique and technology of its manufacture and application, 2016. Vol. 19. P. 107-112. [in Ukrainian]

17. Kovets'ka YU.YU., Dmytrenko N.P., Skits'ko O.I., Plakhotnya L.V. Teploobmin pry pryrodniy konvektsiyi hazu Van-der-Vaal'sa. *Teplofizyka ta teploenerhetyka*. 2022, Vol.44. № 1. P. 5-12. [in Ukrainian].

18. Himmelblau David M., Riggs James B. *Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering: Eighth Edition*. Prentice Hall, 2012. 857 p.

19. Andrew F. Hayes. *Statistical methods for communication science*. New Jersey, 2015. 507 p.

УДК 681.5

DOI: 10.31471/1993-9981-2023-1(50)-60-71

УДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ГІДРАТАЦІЇ ЕТИЛЕНУ З УРАХУВАННЯМ ЙОГО НЕСТАЦІОНАРНОСТІ

В. С. Борин, Л. І. Фешанич, В. В. Мельничук

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська,
15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019; тел. (03422)4-60-67, e-mail: kafatp@ukr.net*

Проведено детальний аналіз способу отримання етилену, який відіграє важливу роль у розвитку нафтової та газової промисловості. Наведено характеристики етилену та його властивості. Досконало розглянуто вплив температури, тиску та циркуляції етилену на процес. Отримано залежності ступеня перетворення етилену на спирт від кількості кислоти в реакторі, показників процесу гідратації етилену від концентрації етилену в циркулюючому газі, показників процесу гідратації етилену від мольного співвідношення вода-циркулюючий газ. Вибрано найбільш оптимальний варіант та обґрунтовано вибраний спосіб гідратації етилену при різних каталізаторах. Проаналізовано методи, які використовуються в промисловості для отримання етилового спирту та виходячи із порівняння переваг і недоліків існуючих каталізаторів обрано найбільш, економічно вигідний і активний. Обґрунтовано, техніко-економічними розрахунками, спосіб отримання етанолу прямої гідратації етилену. Вибрано оптимальний технологічний режим процесу гідратації, а отже, реакції сприятимуть підвищенню тиску та зниженню температури. Вибраний спосіб періодичного підживлення каталізатора необхідною кількістю фосфорної кислоти значно скорочує витрати на процес. Проведено розрахунок процесу прямої гідратації етилену, що протікає в нестационарних умовах, викликаних винесенням фосфорної кислоти з поверхні носія і які ведуть до зниження продуктивності етилового спирту. Для підтримки стабільної роботи каталізатора запропоновано функцію управління, облік якої в кінетичній моделі процесу дозволяє підтримувати продуктивність етилового спирту на постійному рівні. Розроблено математичну модель процесу гідратації етилену, що дозволило підтримувати продуктивність етилового спирту на потрібному (стаціонарному) рівні з найменшими затратами на витрати фосфорної кислоти.

Ключові слова: гідратація, етилен, етиловий спирт, етанол, каталізатор, реакція, етиловий спирт, параметри, температура, тиск, циркуляція, газ, етилен, фосфорна кислота, управління.

A detailed analysis of the method of obtaining ethylene, which plays an important role in the development of the oil and gas industry, was carried out. The characteristics of ethylene and its properties were given. The influence of temperature, pressure and ethylene circulation on the process is thoroughly considered. The dependence of the degree of conversion of ethylene to alcohol on the amount of acid in the reactor, the indicators of the ethylene hydration process on the concentration of ethylene in the circulating gas, and the indicators of the ethylene hydration process on the water-circulating gas molar ratio were obtained. The most optimal option was chosen and the chosen method of ethylene hydration with different catalysts was justified. The methods used in the industry to obtain ethyl alcohol were analyzed and, based on a comparison of the advantages and disadvantages of existing catalysts, the most economical, profitable and active one was chosen. The method of obtaining ethanol by direct hydration of ethylene is substantiated by technical and economic calculations. The optimal technological mode of the hydration process was chosen, and therefore, the reactions will contribute to an increase in pressure and a decrease in temperature. The selected method of periodic feeding of the catalyst with the required amount of phosphoric acid significantly reduces process costs. The calculation of the process of direct hydration of ethylene, which takes place in non-stationary conditions caused by the removal of phosphoric acid from the surface of the carrier and which leads to a decrease in the productivity of ethyl alcohol, is carried out. To maintain the stable operation of the catalyst, a control function is proposed, the accounting of which in the kinetic model of the process allows maintaining the productivity of ethyl alcohol at a constant level. A mathematical model of the ethylene hydration process was developed, which made it possible to maintain the productivity of ethyl alcohol at the required (stationary) level with the least expenditure on the consumption of phosphoric acid.

Key words: hydration, ethylene, ethyl alcohol, ethanol, catalyst, reaction, ethyl alcohol, parameters, temperature, pressure, circulation, gas, ethylene, phosphoric acid, control.

Вступ. У зв'язку з тим [1], що сировиною для одержання етилового спирту є газ етилен, тому він відіграє важливу роль у розвитку нафтової та газової промисловості України. Етилен отримують при переробці попутного газу або природного газу, одержаного на нафтових родовищах. Етилен є важливим джерелом сировини у багатьох галузях промисловості, оскільки сфера його застосування велика. Широко використовується у виробництві стиrolу, оцтової кислоти, синтетичних тканин та етиламіну, каучуку. Найважливішою сферою застосування є одержання етилового спирту з прямою гідроочисткою етилену. Етиловий спирт є одним з головних сировинних матеріалів у народному господарстві, фармацевтиці, виробництві оцтової кислоти. До цього застосовувалися методи спиртового бродіння, одержання сірчаної кислоти [2]. Найбільш ефективним та раціональним методом отримання етилового спирту є отримання етилену шляхом прямої гідратації у присутності каталізатора. Етанол належить до багатотонних і широко застосовуваних продуктів органічного синтезу. Він є добрим, хоч і вогнебезпечним розчинником; у великих кількостях використовується в харчовій та медичній галузях промисловості, у парфумерії; служить паливом у рідинних ракетних двигунах, антифризом і т. д. Як проміжний продукт органічного синтезу, етанол має важливе значення для отримання складних ефірів, хлороформу, діетилового ефіру, ацетальдегіду. З нього отримують синтетичний каучук, оцтову кислоту, барвники, есенції, фотоплівку, порох, пластмаси. В даний час у країні розпочато розробку стратегій розвитку нафтохімічної галузі. Адже необхідно ефективно використовувати національний ресурс, готувати освічених, які дбають про своє майбутнє, фахівців, які відстоюватимуть національні інтереси. Тому **метою даної роботи** є дослідження технологічного

процесу та удосконалення математичної моделі процесу гідратації етилену, а також підтримування стабільної роботи каталізатора.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій.

Проведено аналіз сучасних закордонних та вітчизняних публікацій, зокрема у [3] наведено детальний огляд виробництва етанолу шляхом прямої гідратації етилену з метою поглиблення розуміння складності динаміки процесу та можливих майбутніх стратегій для подолання проблем. У [4] охарактеризовано процеси, що використовуються в промисловості для виробництва етанолу, а також наведено детальний опис використовуваних каталізаторів та сировини. У [5] проведено моделювання процесів гідратації і структурування етанолу. Розглянуто механізм змішування води та спирту при отриманні водно-спиртових сумішей в умовах обробки дискретно імпульсного введення енергії. Визначені оптимальні умови утворення водневих зв'язків у водно-спиртових сумішах. У [6] розглянуті реактори з масляним охолодженням, які створюють ширші робочі вікна щодо температур теплоносія, ніж реактори з водяним охолодженням. Показано, що визначення експлуатаційних характеристик гідратування етиленкарбонату в промислових умовах важливо для подальшого вдосконалення конструкції реактора та оптимізації процесу. У [7] проведено моделювання фазової рівноваги в багатокомпонентній реакційній системі процесу дегідратування етанолу. Знайдено структуру дистиляційної діаграми цієї системи та вивчено її еволюцію при зміні тиску. Аналіз властивостей діаграми дав змогу визначити діапазон значень робочих параметрів, що дозволяють розділити реакційну суміш, щоб запропонувати структуру технологічної системи розділення та провести її параметричну оптимізацію. У [8] проведено кінетичне дослідження

дегідрування етанолу до етилацетату на мідно-хромітовому каталізаторі. Даний аналіз показав, що актуальним залишається проведення математичного моделювання процесу гідратації етилену із урахуванням нестационарності процесу.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблематики. Для досягнення поставленої мети, потрібно провести детальний аналіз характеристик та властивостей етилену, показати вплив температури, тиску та циркуляції етилену на процес. Обґрунтувати оптимальний спосіб гідратації етилену при різних каталізаторах. Провести розрахунок процесу прямої гідратації етилену, що протікає в нестационарних умовах.

Формулювання цілей статті. Дослідити залежність показників процесу гідратації етилену від концентрації етилену в циркулюючому газі. Проаналізувати різновид каталізаторів, що використовуються при проведенні технологічного процесу, визначити причини зниження їх активності та вибрати найбільш оптимальний варіант для гідратації етилену.

Висвітлення основного матеріалу дослідження. Для початку, зробимо невелике пояснення щодо самої речовини етиловий спирт. Етанол - це рідка, летюча речовина, що не має кольору, із специфічним запахом. Він горить бездимним синім полум'ям, яке не завжди видно при нормальному освітленні. Має безліч застосувань у промисловому та фармацевтичному секторах як розчинник речовин, призначених для контактного споживання людиною, включаючи ароматизатори, барвники та лікарські засоби. Етанол також використовують як паливо зі змішаним бензином у транспортних засобах, які працюють 100% на етанолі. Виробництво етанолу було вкрай затребуване у всьому світі, після того, як була винайдена присадка до палива. Більшість виробленого етанолу використовується як моторне паливо або добавка в бензин для

підвищення його октанового числа. Як рідке паливо етанол має довгострокові переваги. Етанол має хороші властивості для іскрового запалювання з октановим числом двигуна 95 відповідно, що набагато більше, ніж звичайний бензин, що становить 92. Збільшення світового виробництва етанолу в основному обумовлено загальносвітовими економічними та екологічними міркуваннями безпеки. У більшості країнах Європи, а також Індії, Китаю та Бразилії, виробництво етанолу націлене на скорочення імпорту нафти, збільшення виробництва та споживання відновлюваного палива [1,2]. Існуючі способи одержання промислового етанолу представлені на рис. 1.

Основними параметрами, що впливають на реакцію процесу, є: температура, тиск та співвідношення вихідних компонентів. Якщо говорити про температуру, то зі збільшенням її вище 300 °C йдуть негативні процеси, що призводять до полімеризації етилену, утворенню ефіру і т.п., що сприяють зниженню селективності, а нижче 280°C характеризується малою активністю каталізатора. Тому робочою температурою є 280-300°C. Оскільки основна реакція – екзотермічна, підвищення тиску та зниження температури сприяє гідратації, тобто сприяє збільшенню виходу етилового спирту. Однак вибір високого тиску не бажано використовувати при вибраній нами температурі через те, що можлива конденсація водяної пари в реакторі, що призводить до зниження активності каталізатора. Оптимальний тиск становить 6,7 – 8 МПа. Від співвідношення вихідних компонентів залежить не лише конверсія етилену, а також активність каталізатора. При співвідношенні $H_2O:C_2H_4 = 0,5-0,75:1$ спостерігається підвищення конверсії олефіну та постійність концентрації каталізатора, якщо підвищити співвідношення $H_2O:C_2H_4$ вище 0,75:1 ступінь конверсії олефіну починає знижуватися. Таким чином, оптимальним співвідношенням $H_2O:C_2H_4 = 0,6-0,7: 1$ [1].

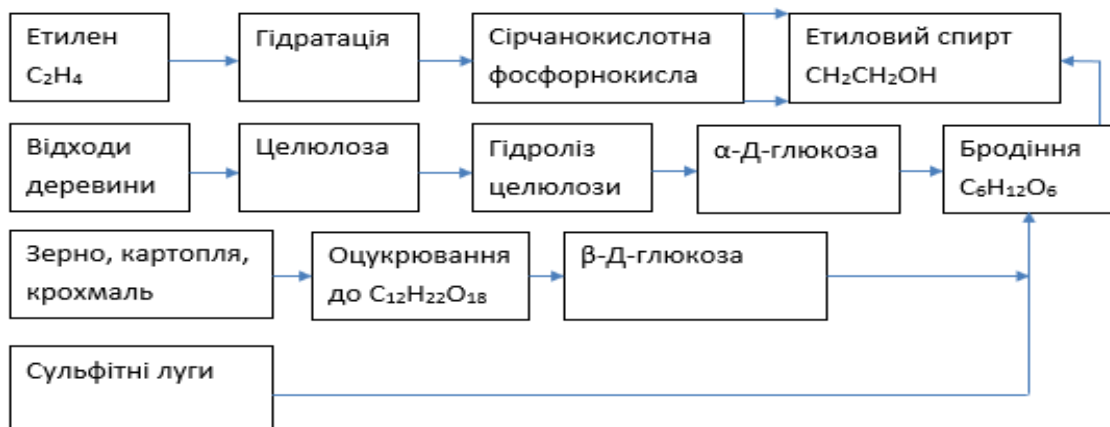


Рисунок 1 - Існуючі способи одержання промислового етанолу

Вже як 70 років у хімічній промисловості процес гідратації олефінів здійснюється за рахунок каталізатора, що складається з силікагелю з високим навантаженням фосфорної кислоти. Каталізатор характеризується як рідка фаза, що підтримується, а каталітичний актив, пов'язаний на носії, як концентрована рідка кислота. Фосфорна кислота на силікагелі більш стійка до вилуговування, ніж кислота на фосфаті металу. На основі силікагелю каталізатор фосфорної кислоти (H_3PO_4/SiO_2) часто використовується в промисловості, так як він має більш високу селективність за етиленом. Швидкість виробництва етилового спирту помітно зростає із підвищенням навантаження фосфорною кислотою. Фосфорна кислота, присутня в рідкій формі на силікагелі, має чисту кислотну природу. Вищі конденсовані фосфати вимагають більш тривалого гідролізу. Значними вадами фосфорно-кислотного каталізатора можна назвати поступове винесення його з поверхні носія та здатність викликати корозію. Дані недоліки можна усунути, застосовуючи нейтральні каталізатори – кремневольфрамові та вольфрамові [9,10].

Тепловий баланс

Реагенти потрапляють у реактор при температурі синтезу. Температура подачі сировини - 280 °C (553 K); Адіабатичний

режим. Втрати тепла приймаємо 1% від приходу [1]. У табл. 1 представлений тепловий баланс стадії гідратації етилену.

Таблиця 1 - Тепловий баланс стадії гідратації етилену

Прихід			Розхід		
Тепловий потік	Вт	%, мас	Тепловий потік	Вт	%, мас
$Q_{\text{поч}}$	20423768	94,9	$Q_{\text{кінцеве}}$	20463905,8	95,00
Q	1099200	5,1	$Q_{\text{нагріте}}$	0,00	0,00
Q	0,00	0,00	$Q_{\text{витрати}}$	215229,68	1,00
			ΔQ	843832,52	4,00
Всього	21522968	100	Всього	21522968	100

При гідратації етилену існує ефективний об'єм кислоти в реакторі. Це такий обсяг кислоти, вище якого швидкість процесу (вилучення спирту з реактора) не залежить від винесення кислоти з каталізатора. Ефективний об'єм характеризує ту мінімальну товщину рідкої кислотної плівки на поверхні носія, при якій вся кислота бере участь у процесі каталізу; подальше зменшення її товщини знижує швидкість каталізу. На рис. 2 графічно представлена залежність ступеня перетворення етилену на спирт від маси кислоти в реакторі при такому середньому технологічному режимі.

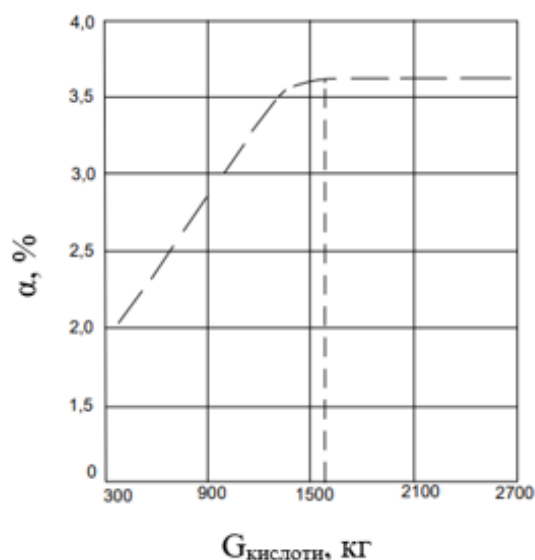


Рисунок 2 - Залежність ступеня перетворення етилену на спирт від кількості кислоти в реакторі

Таблиця 2 - Параметри технологічного режиму у реакторі

Температура в реакторі, °С	290
Циркуляція етилену, т/год.	30,6
Тиск у реакторі, кгс/см ²	70
Мольне співвідношення пар: етилен	0,67:1
Концентрація етилену в циркулюючому газі, %	92,7

Як видно з рис. 2, зниження вмісту кислоти від максимального до 1530 кг не впливає на ступінь конверсії етилену; подальше ж зменшення вмісту кислоти супроводжується пропорційним зниженням ступеня конверсії. Іншими словами, ефективна кількість кислоти в реакторі дорівнює 1530 кг.

Інші причини зниження активності каталізатора (науглецювання, зниження механічної міцності, зниження концентрації кислоти в порах) за дотримання всіх технологічних норм ведення режиму мають менший вплив на винесення фосфорної кислоти. Вказані причини можуть проявити себе тільки при помітних порушеннях режиму, наприклад на науглецювання – при підвищенні температури в реакторі та зменшення подачі пари (що особливо можливо в період пуску системи), зниження механічної міцності – при недотриманні

технологічного регламенту у каталізаторному відділенні; зниження концентрації кислоти в порах – зі збільшенням мольного відношення пари і циркулюючого газу. Тому основними регульованими параметрами, що визначають ефективність роботи установки гідратації етилену, є: температура і тиск в реакторі, величина циркуляції етилену, мольне співвідношення води та циркулюючого газу, тривалість пробігу реактора.

З підвищенням температури до 290 °С швидкість гідратації етилену зростає. Подальше підвищення температури до 320 °С супроводжується незначним зниженням ступеня конверсії етилену в етиловий спирт; при цьому різко зростає вихід побічних продуктів. Залежність поточної продуктивності реактора по спирту (G_{ch}) від температури (T, K) у верхній частині апарату описується емпіричним рівнянням:

$$G_{ch} = a + bT + cT^2 \quad (1)$$

де a, b, c – коефіцієнти, що залежать від активності каталізатора та від технічних параметрів процесу.

Кожному моменту часу відповідає оптимальна температура, що забезпечує максимальні поточну та сумарну продуктивності апарату за мінімальної собівартості спирту. Відхилення температури від оптимального на 5 °С призводить до зниження продуктивності реактора на 5% при цьому, відповідно, зростає витрата пари, електроенергії та каталізатора на 1 тону спирту. Оптимальна температура (T, K) верху реактора, відповідно до літературних даних [2], визначається за формулою:

$$T_{opt} = \frac{4552}{9,75 - \lg \frac{P_{H_2O}^{4/3}}{t_{Eф}}} \quad (2)$$

де: P_{H_2O} – парціальний тиск пари води в реакторі, $кгс/см^2$; t_{ef} - ефективний час реакції, $с$.

Використання цього рівняння для регулювання температури верху апарата ускладнюється труднощами визначення ефективної температури кожного моменту роботи реактора.

Для розрахунку продуктивності реактора при різному тиску можна використовувати ряд рівнянь, відомих з літературних джерел, проте через складність вони тут не наводяться. Результати розрахунків з використання цих рівнянь зведено до табл.3.

Таблиця 3 - Залежність продуктивності та собівартості продукції (%) від тиску в реакторі

Тиск, Па	Продуктивність реактора, %	Собівартість спирту, %
60	100	100
65	107	98.0
70	113	95.5
75	119	93.5

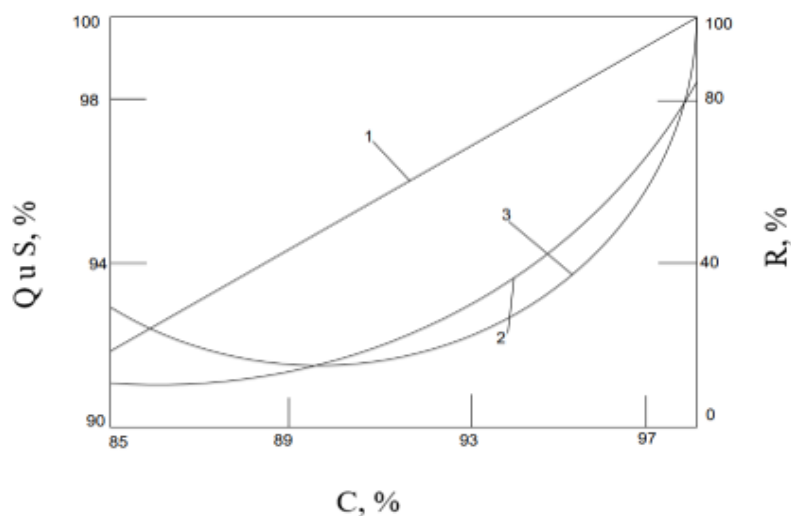
З таблиці видно, що підвищення тиску в межах величини допустимої за міцністю обладнання (80 кгс/см^2), економічно доцільно. Згідно з літературними даними, при збільшенні циркуляції етилену від 20 до 40 т/год. сумарна продуктивність реактора зростає. Одночасно збільшується витрата пари високого тиску та каталізатора на 1 тону спирту, але знижуються витрати електроенергії і так звані умовно-постійні витрати (амортизаційні відрахування, заробітна плата та інші), що ілюструється у

табл. 4. Як видно з таблиці, при підвищенні циркуляції етилену суттєво зростає продуктивність апарату, але збільшуються витратні коефіцієнти; собівартість спирту змінюється дуже незначно. Отже, оптимальної циркуляції у вивченому інтервалі немає; циркуляцію необхідно вибрати залежно від поточних завдань виробництва.

Збільшення концентрації етилену в циркулюючому газі при постійній циркуляції сприяє підвищенню продуктивності реактора та зниження витрати пари, електроенергії та каталізатора на 1 тону спирту. У той же час для підтримки більш високої концентрації етилену в газі необхідно збільшувати частку газу, що виводиться із системи для видалення інертних домішок, а це негативно впливає на собівартість цільового товару. Залежність основних показників процесу від концентрації етилену в циркулюючому газі показано на рис. 3 (температура $285 \text{ }^\circ\text{C}$, тиск 70 кгс/см^2 , циркуляція етилену 26 т/год, молярне співвідношення вода-циркулюючий газ дорівнює 0,6: 1). З рисунку видно, що крива 2 (собівартість) має досить помітний мінімум, що відповідає 90% концентрації етилену. З наведених даних також випливає, що підвищення концентрації етилену понад 93% недоцільно, оскільки це призводить до значного збільшення собівартості спирту.

Таблиця 4 - Залежність основних показників процесу від циркуляції етилену

Циркуляція етилену, т/год	Продуктивність реактора, %	Витрата на 1 т спирту, %			Умовно постійні витрати, %	Собівартість спирту, %
		Пар	Ката-лізатор	Електро-енергія		
20	100	100	100	100	100	100
25	112	110	103	93	87,0	99,96
30	118	118	106	87	78,0	100,08
35	136	124	108	82,5	70,5	100,09
40	148	129	110	79	64,5	100,33

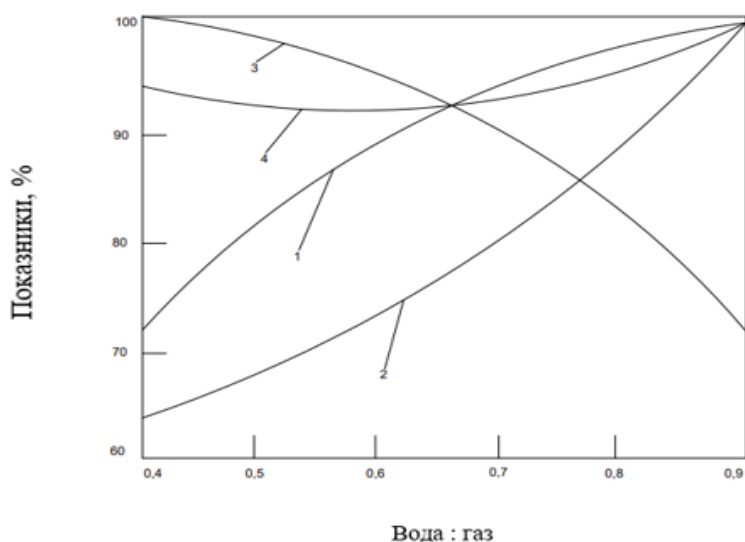


1 – продуктивність реактора; 2 – собівартість спирту; 3 – віддувка на тону спирту

Рисунок 3 - Залежність показників процесу гідратації етилену від концентрації етилену в циркулюючому газі

Залежність основних показників процесу від цього співвідношення визначається за допомогою досить складних рівнянь, які тут не наводяться. На рис. 4 наведено графічну залежність показників процесу гідратації етилену від мольного співвідношення вода-циркулюючий газ. З графіка видно, що зі збільшенням мольного співвідношення підвищуються продуктивність реактора та витрата пари на

1 тону спирту; при цьому витрата електроенергії та каталізатора зменшуються. Крім того, при збільшенні мольного співвідношення концентрація спирту в водно-спиртовому конденсаті знижується, і, отже, збільшуються витрати електроенергії на стадії ректифікації. Оптимальним з точки зору собівартості є мольне співвідношення вода-газ рівне (0,6 - 0,7): 1.



1 – продуктивність реактора; 2 – витрата пари; 3 – витрата каталізатора та електроенергії; 4 – собівартість спирту

Рисунок 4 - Залежність показників процесу гідратації етилену від мольного співвідношення вода-циркулюючий газ

Синтетичний етанол в даний час отримують методом прямої гідратації етилену. Каталізатором процесу прямої гідратації є фосфорна кислота, яка нанесена на твердий носій – силікагель. У промислових умовах процес ведуть при 275–3000 °С та тиску (7–8) МПа. Мольне співвідношення: водяна пара - етилен – 0.7:1; селективність етилового спирту 95.5% [1,2]. Термін служби каталізатора становить (400–500) год. Активність каталізатора в процесі роботи знижується внаслідок виносу кислоти. У роботі [9] пропонується для відшкодування кількості H_3PO_4 безперервно додавати її в парогазову суміш на вході в реактор, що в результаті призводить до великої її витрати. Запропоновано більш доцільний варіант – спосіб періодичної подачі фосфорної кислоти, завдяки чому витрата її значно скорочується. Для спостереження за ходом процесу вводимо функцію управління θ , рівну відношенню поточного та вихідного значень кількостей фосфорної кислоти: $\theta = G_{nom}/G_{вих}$, що визначає частку її активних центрів, що змінюється в процесі роботи каталізатора через частковий виніс кислоти. Введення функції управління в математичну модель процесу, що протікає в стаціонарних умовах, збереже продуктивність етилового спирту на потрібному для промисловості стаціонарному рівні та, крім того, значно скоротить витрати процес.

У пусковий період процесу гідратації (50 год) спостерігається максимальна швидкість виносу кислоти. Однак, незважаючи на це, кількість кислоти залишається ще достатньо великою, тому ступінь перетворення етилену залишається рівною максимально можливою – 4–5% з урахуванням термодинамічних обмежень. У цей період відбувається розробка каталізатора, при якому досягається його стабільна активність, що відповідає зазначеному ступеню перетворення. Значення θ у пусковому періоді близькі до одиниці. З плином часу він зменшуються.

Тому для збереження стабільності роботи каталізатора за критеріальне значення функції управління приймаємо $\theta = 0.98$, при якому різниця між поточним і вихідним значеннями кількості фосфорної кислоти ще мала. Прийняте значення θ будемо дотримуватись протягом усього терміну роботи каталізатора.

Максимальна швидкість виносу фосфорної кислоти в пусковий період для використовуваної в процесі її кількості 6534 кг становить 2 кг/год. Далі вона поступово знижується до середньої – 0.5 кг/год [9]. Розподілене значення швидкості виносу по часових інтервалах (по 50 год при терміні роботи каталізатора, що дорівнює 500 год), вважаючи, що в межах кожних 50 год швидкість виносу та відповідне їй значення θ залишаються майже незмінними. Як тільки наприкінці кожного інтервалу значення θ почне відрізнятися від величини 0.98 приблизно на 1–2%, що відразу позначиться на активності каталізатора і відповідно – на виході етилового спирту, для підтримки процесу із значенням θ на рівні 0.98 слід негайно добавляти, відповідно цьому тимчасовому інтервалу, кількість фосфорної кислоти, що дорівнює різниці між винесеною її кількістю у пусковому періоді та на кожному наступному інтервалі.

Хід розрахунку процесу по запропонованому способі наведений в табл. 5. Використовуючи дані з даної таблиці, методом найменших квадратів [2], визначили регресійну залежність для контролю за процесом гідратації ($y = G_{nom} = f(\tau)$), за якою можна у будь-який момент часу визначити поточне значення фосфорної кислоти (G_{nom}) і відповідне значення θ (рис. 6).

Динаміка зміни функції управління з часом ясно простежується на рис. 6, де відрізки нижче кривої $\theta(\tau)$ означають виніс на відповідному етапі кількості фосфорної кислоти, а відрізки вище кривої – ту кількість фосфорної кислоти, яку необхідно

добавити в реактор для підтримки прийнятого значення $\theta = 0.98$. Заштрихована область – область стабільної активності каталізатора для $0.98 < \theta < 1$.

Таблиця 5 - Результати розрахунку процесу гідратації при періодичному підживленні каталізатора фосфорною кислотою

t, год	Швидкість вносу фосфорної кислоти, кг/год	Кількість віднесеної фосфорної кислоти за год, кг	Початна кількість фосфорної кислоти, кг	Функція керування $\theta = \text{Слот}/G_{\text{вх}}$	Добавка фосфорна кислоти, кг
0	0	0	6534	1	-
50	2.01	100	6434	0.9847	-
100	1.95	97.5	6336.5	0.9698	2.5
150	1.9	95.0	6241.5	0.9552	5.0
200	1.8	90	6151.5	0.9415	10.0
250	1.7	85	6066.5	0.9285	15.0
300	1.4	70	5996.5	0.9177	30.0
350	1.2	60	5936.5	0.9086	40.0
400	1.0	50	5886.5	0.9009	50.0
450	0.8	40	5486.5	0.8947	60.0
500	0.5	25	5821.5	0.8910	75.0
					287.5

Як бачимо із табл. 5, загальна кількість періодичних добавок фосфорної кислоти, з метою підтримки стабільної активності каталізатора, складає за весь термін його роботи (500 год) 287.5 кг, що в 2.6 рази менше, ніж при неперервній її подачі (750 кг) у промисловості [9]. Таким чином, спосіб періодичного підживлення каталізатора необхідною кількістю

фосфорної кислоти значно скорочує витрати на процес.

Етанол належить до багатотонажних і широко застосовуваних продуктів органічного синтезу. Він є добрим, хоч і вогнебезпечним, розчинником; у великих кількостях використовується в харчовій та медичній галузях промисловості, у парфумерії та служить паливом у рідинних ракетних двигунах, антифризом і т. д.

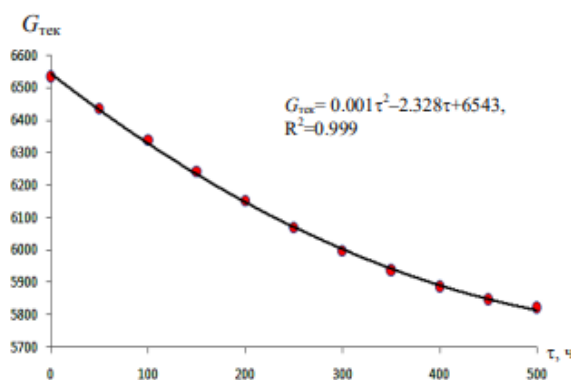
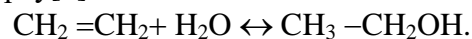


Рисунок 5 - Зміна кількості фосфорної кислоти в часі

Основна реакція, що протікає в гідратації, - утворення етилового спирту [1]:



Відповідно стехіометричній схемі кінетичне рівняння має вигляд [11-13]:

$$\frac{dP_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}}}{dt} = \frac{k}{P_{\text{H}_2\text{O}}^{\frac{1}{2}}} (P_{\text{C}_2\text{H}_4} - K^{-1} \frac{P_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}}}{P_{\text{H}_2\text{O}}}),$$

де $P_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}}$, $P_{\text{C}_2\text{H}_4}$, $P_{\text{H}_2\text{O}}$ - парціальні тиски відповідно етилового спирту, етилену та води, атм.; t - умовний час реакції, що визначається як відношення обсягу активної фосфорної кислоти в каталізаторі до об'ємної витрати парогазової суміші, с; k - константа швидкості реакції, що дорівнює $k = k' P_{\text{H}_2\text{O}}^{\frac{1}{2}}$ і визначається з виразу $\log k' = 5.39 - \frac{14860}{4.57T}$; константа швидкості реакції, що спостерігається, рівна

$$k = -\frac{1}{t} K_p P_{H_2O} \ln\left(1 - \frac{P_{C_2H_5OH}}{K_p P_{C_2H_4} P_{H_2O}}\right); \text{ константа}$$

рівноваги реакції, ат⁻¹, визначається з виразу

$$K_p = \frac{2093}{T} - 6.304 + \left(\frac{10.47}{T} - \frac{6.37 \cdot 10^3}{T}\right) P,$$

де P – загальний тиск системи.

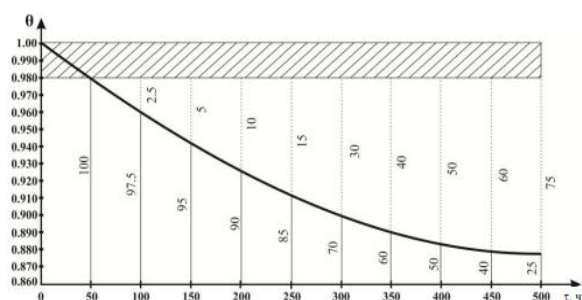


Рисунок 6 - Динаміка зміни функції управління від часу τ при періодичній підживленні фосфорною кислотою.

Перетворимо рівняння (4) використовуючи закон Дальтона-Авогадро

$$p_i = \frac{n_i}{\sum n_i} P, \quad P_i - \text{ парціальний тиск } i\text{-го}$$

компонента, n_i – число молей i -го компонента, після деяких перетворень отримано кінетичне рівняння процесу прямої гідратації етилену:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{k}{\left(\frac{n_{H_2O}^0 - n}{n_{C_2H_4}^0 + n_{H_2O}^0 - n} P\right)^{\frac{1}{2}}} * \left(\frac{n_{C_2H_4}^0 - n}{n_{C_2H_4}^0 + n_{H_2O}^0 - n} P - K_p^{-1} \frac{n}{n_{H_2O}^0 - n}\right) * \frac{(n_{C_2H_4}^0 + n_{H_2O}^0 - n)^2}{P(n_{C_2H_4}^0 + n_{H_2O}^0)}$$

де $n, n_{C_2H_4}, n_{H_2O}$ – поточні значення етилового спирту, етилену та води. Дана модель розроблена для стаціонарних умов протікання процесу без урахування втрати активності каталізатора з часом.

Ввівши обрану нами функцію управління процесом θ в кінетичну модель процесу, що протікає в стаціонарних

умовах, отримано нестационарну кінетичну модель:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{k\theta}{\left(\frac{n_{H_2O}^0 - n}{n_{C_2H_4}^0 + n_{H_2O}^0 - n} P\right)^{\frac{1}{2}}} * \left(\frac{n_{C_2H_4}^0 - n}{n_{C_2H_4}^0 + n_{H_2O}^0 - n} P - K_p^{-1} \frac{n}{n_{H_2O}^0 - n}\right) * \frac{(n_{C_2H_4}^0 + n_{H_2O}^0 - n)^2}{P(n_{C_2H_4}^0 + n_{H_2O}^0)}$$

Виводячи рівняння теплового балансу враховано теплоту хімічної реакції одержання етилового спирту та теплоту, що йде на нагрівання олефіну:

$$\frac{4}{p_{кат} \pi D^2} \frac{dT}{dl} = -\frac{\sum r \Delta H_R}{\sum_{i=1}^3 n_i C_{pi} (1.3)} - Q_{наг} \quad (5)$$

Для обліку перепаду тиску довжині реактора використано рівняння Ергуна

$$\frac{dP}{dl} = -\left(\frac{150}{Re} + 1.75\right) * \frac{p_{газ} u_0^2 (1-\epsilon)}{d_p g \epsilon^3} * 0.987 * 10^{-5}$$

(6)

де T – температура реакції, K ; $p_{кат}$ – щільність каталізатора, кг/м³; r – швидкість реакції, моль кг_{кат}⁻¹ ч⁻¹; C_{pi} – теплоємність i -го компонента, кал моль⁻¹ град⁻¹; ΔH_R – теплота реакції кал/моль; $Q_{наг}$ – теплота, що йде на нагрівання етилену, кал/моль; n_i – поточне число молей i -го компонента, моль/год; Re – критерій Рейнольдса, рівний $\frac{d_p p_{газ} u_0}{\mu(1-\epsilon)}$, D – діаметр реактора, м; $p_{газ}$ – щільність газу кг/м³; u_0 – лінійна швидкість, м/с; d_p – еквівалентний діаметр частинок, м; ϵ – порізність, б/р; μ – в'язкість газу, кг м⁻¹ с⁻¹; l – довжина реактора, м.

Рівняння кінетичної моделі спільно з рівняннями теплового балансу (5) та втрати напору (6) становлять повну математичну модель процесу прямої гідратації етилену з

урахуванням нестационарності його протікання [13].

Висновок. Проведено розрахунок процесу прямої гідратації етилену, що протікає в нестационарних умовах, викликаних винесенням фосфорної кислоти з поверхні носія і які ведуть до зниження продуктивності етилового спирту. Для підтримки стабільної роботи каталізатора запропоновано функцію управління, облік якої в кінетичній моделі процесу дозволяє підтримувати продуктивність етилового спирту на постійному рівні. Удосконалено математичну модель процесу гідратації етилену, що дозволило підтримувати продуктивність етилового спирту на потрібному (стационарному) рівні з найменшими затратами на витрати фосфорної кислоти.

Список використаних джерел

1. Борин В.С., Фешанич Л.І., Мельничук В.В. Аналіз методів для отримання прямої гідратації етилену. *Європейський науковий конгрес* : матеріали III Міжнар. наук.-практ конф., Мадрид, 17-19 квіт. 2023р. Мадрид, 2023. С. 112-119.
2. Борин В.С., Фешанич Л.І., Мельничук В.В. Управління процесом прямої гідратації етилену. *Інновації та перспективи сучасної науки* : матеріали IV Міжнар. наук.-практ конф., Стокгольм, 10-12 квіт. 2023р. Стокгольм, 2023. С. 120-124.
3. Hidzir N. S., Som A. S., Abdullah Z. Ethanol production via direct hydration of ethylene: A review. *International conference on global sustainability and chemical engineering*, August, 2014. 7p. URL: https://www.researchgate.net/publication/277957681_Ethanol_Production_via_Direct_Hydration_of_Ethylene_A_review.
4. Daryl A.B., Julien L.T. Ethanol Production by catalytic hydration of ethylene. *Integrated Project*. 2020. P.21
5. Дубовкіна І. О. Моделювання процесів гідратації та структурування етанолу в умовах обробки ДІВЕ. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2012. Вип. 6. №. 6. С.50-52.
6. Huang H., Cao C., Wang Y., Yang Y., Lv J., Xu J. Model-Based Analysis for Ethylene Carbonate Hydrogenation Operation in Industrial-Type Tubular Reactors. *Processes*. 2022. Vol. 10. P. 25.
7. Semenov I. P., Pisarenko Y. A., Frolova A.K. Separation of a reaction mixture of ethyl acetate production via ethanol dehydrogenation. *Theor Found Chem Eng*. 2017. Vol. 51. P. 418–431
8. Carotenuto G., M. di Serio Tesser, Santacesaria E. Kinetic study of ethanol dehydrogenation to ethyl acetate promoted by a copper/copper-chromite based catalyst. *Catal. Today*. 2013. Vol. 203. P. 202.
9. Борин В.С., Фешанич Л.І., Мельничук В.В. Аналіз технологічного процесу прямої гідратації етилену як об'єкта автоматизації. *Інновації та перспективи сучасної науки* : матеріали VIII Міжнар. наук.-практ конф., Лондон, 20-22 квіт. 2023р. Лондон, 2023. С. 143-152.
10. Основи автоматики і автоматизація технологічних процесів: навчальний посібник / Г.Н. Семенов та ін. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2000.348 с.
11. Горбійчук М.І. Моделювання об'єктів і систем керування в нафтовій і газовій промисловості : навчальний посібник. Частина 1. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 1999.199 с.
12. Горбійчук М.І. Моделювання об'єктів і систем керування в нафтовій і газовій промисловості : навчальний посібник. Частина 2. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 1999. 226 с.
13. Борин В.С. Фешанич Л.І., Мельничук В.В. Математична модель процесу гідратації етилену з урахуванням його нестационарності. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології* : матеріали IX Міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених, аспірантів і студентів, Київ, 19 квітня 2023 р. Київ, 2023. С. 61-62.

References

1. Boryn V.S., Feshanych L.I., Melnychuk V. V. Analiz metodiv dlia otrymannia priamoi hidratatsii etylenu. Yevropeyskyi naukovyi konhres : materialy III Mizhnar. nauk.-prakt. konf., Madryd, 17-19 06. 2023r. Madryd, 2023. P. 112-119. [in Ukrainian]
2. Boryn V.S., Feshanych L.I., Melnychuk V. V. Upravlinnia protsesom priamoi hidratatsii etylenu. Innovatsii ta perspektyvy suchasnoi nauky : materialy IV Mizhnar. nauk.-prakt. konf., Stokholm, 10-12 06 2023r. Stokholm, 2023. P. 120-124. [in Ukrainian]
3. Hidzir N. S., Som A. S., Abdullah Z. Ethanol production via direct hydration of ethylene: A review. *International conference on global sustainability and chemical engineering*, August, 2014. 7p. URL: https://www.researchgate.net/publication/277957681_Ethanol_Production_via_Direct_Hydration_of_Ethylene_A_review.
4. Daryl A.B., Julien L.T. Ethanol Production by catalytic hydration of ethylene. *Integrated Project*. 2020. P.21.
5. Dubovkina I. O. Modeliuvannia protsesiv hidratatsii ta strukturuvannia etanolu v umovakh obrobky DIVE. *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*. 2012. Vol. 6. №. 6. P.50-52. [in Ukrainian]
6. Huang H., Cao C., Wang Y., Yang Y, Lv J., Xu J. Model-Based Analysis for Ethylene Carbonate Hydrogenation Operation in Industrial-Type Tubular Reactors. *Processes*. 2022. Vol. 10. P. 25.
7. Semenov I. P., Pisarenko Y. A., Frolkova A.K. Separation of a reaction mixture of ethyl acetate production via ethanol dehydrogenation. *Theor Found Chem Eng*. 2017. Vol. 51. P. 418–431.
8. Carotenuto G., M. di Serio Tesser, Santacesaria E. Kinetic study of ethanol dehydrogenation to ethyl acetate promoted by a copper/copper-chromite based catalyst. *Catal. Today*. 2013. Vol. 203. P. 202.
9. Boryn V.S., Feshanych L.I., Melnychuk V. V. Analiz tekhnolohichnoho protsesu priamoi hidratatsii etylenu yak obiekta avtomatyzatsii. Innovatsii ta perspektyvy suchasnoi nauk : materialy VIII Mizhnar. nauk.-prakt. konf., London, 20-22 06 2023r. London, 2023. P. 143-152. [in Ukrainian]
10. Osnovy avtomatyky i avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh protsesiv: navchalnyi posibnyk / H.N. Sementsov ta in. Ivano-Frankivsk: IFNTUNH, 2000. 348 p. [in Ukrainian]
11. Horbiichuk M.I. Modeliuvannia obektiv i system keruvannia v naftovii i hazovii promyslovosti : navchalnyi posibnyk. Chastyna 1. Ivano-Frankivsk: IFNTUNH, 1999. 199p [in Ukrainian].
12. Horbiichuk M.I. Modeliuvannia obektiv i system keruvannia v naftovii i hazovii promyslovosti : navchalnyi posibnyk. Chastyna 2. Ivano-Frankivsk: IFNTUNH, 1999. 226 p. [in Ukrainian]
13. Boryn V.S. Feshanych L.I., Melnychuk V. V. Matematychna model protsesu hidratatsii etylenu z urakhuvanniam yoho nestatsionarnosti. Avtomatyzatsiia ta kompiuterno-intehrovani tekhnolohii : materialy IKh Mizhnar. nauk.-prakt. konf. molodykh uchenykh, aspirantiv i studentiv, Kyiv, 19 kvitnia 2023 r. Kyiv, 2023. P. 61-62. [in Ukrainian]

УДК 004.774.6:004.43:519.85

DOI: 10.31471/1993-9981-2023-1(50)-72-80

АДАПТАЦІЯ ЧИСЕЛЬНИХ МЕТОДІВ ДО ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРИКЛАДНИХ ТА ІНЖЕНЕРНИХ ЗАДАЧ В СФЕРІ UX/UI ДИЗАЙНУ

Т. Є. Мохнаткіна, О. С. Царева

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, 76019. E-mail: a.if.ua1981@gmail.com*

Досліджуються різні підходи та техніки, які можуть бути використані для адаптації чисельних методів до програмної реалізації прикладних та інженерних задач в сфері UX та UI дизайну. При цьому увагу зацентровано на методах, які забезпечують швидкість, точність та ефективність обчислень, а також враховують специфіку інтерфейсів користувача. Зроблено огляд та аналіз сучасних розробок і досягнень в області UX та UI дизайну, а також окреслено перспективи та можливі внески чисельних методів у покращення процесу створення кінцевого продукту та його наповнення. Також увагу зосереджено на різноманітних аспектах, від аналізу та візуалізації даних до оптимізації розташування елементів інтерфейсу. Дослідження проведене для глибшого розуміння можливостей і переваги чисельних методів у сучасному дизайні інтерфейсів користувача. При цьому підкреслено, що використання чисельних методів потребує врахування певних факторів, таких як величина вибірки, розподіл даних та контекст дослідження. В даному дослідженні висвітлено ключові виклики, з якими стикаються дизайнери UX та UI при розробці складних інтерфейсів. Описано, вимоги до швидкості та ефективності обчислень та їх зростання в залежності від збільшення обсягу даних, що обробляються в реальному часі. Підкреслено, що точність чисельних методів є вирішальним фактором для забезпечення високої якості взаємодії з користувачем. Встановлено залежність оптимізації розташування елементів інтерфейсу від точних вимірів та обчислень, виконаних за допомогою чисельних методів. В результаті проведеного дослідження підтверджено, що чисельні методи можуть бути цінними інструментами в інформаційній архітектурі в UI/UX дизайні для створення логічних структур групування інформації та розроблення якісної структури контенту. Результати дослідження відкривають нові перспективи для використання чисельних методів у UX та UI дизайні як інструмента покращення продуктивності, зниження часу розробки та підвищення якості кінцевого продукту.

Ключові слова: чисельні методи, UI/UX дизайн, аналіз даних, візуалізація даних, прикладні та інженерні задачі, метод Монте-Карло, кластерний аналіз, статистичний аналіз.

The article explores various approaches and techniques that can be used to adapt numerical methods to software implementation of applied and engineering tasks in the field of UX and UI design. At the same time, attention is focused on methods that ensure speed, accuracy and efficiency of calculations, and also take into account the specificity of user interfaces. An overview and analysis of modern developments and achievements in the field of UX and UI design is made, as well as the prospects and possible contributions of numerical methods to improving the process of creating the final product and its filling are outlined. Attention is also focused on various aspects, from data analysis and visualization to optimization of the layout of interface elements. The research was carried out for a deeper understanding of the possibilities and advantages of numerical methods in the modern design of user interfaces. At the same time, it is emphasized that the use of numerical methods requires taking into account certain factors, such as sample size, data distribution, and research context. This study highlights the key challenges UX and UI designers face when designing complex interfaces. The requirements for the speed and efficiency of calculations and their growth depending on the increase in the amount of data processed in real time are described. It is emphasized that the accuracy of numerical methods is a decisive factor for ensuring a high quality of interaction with the user. The dependence of the optimization of the location of the interface elements on accurate measurements and calculations performed using numerical methods was established. As a result of the conducted research, it was confirmed that numerical methods can be valuable tools in information architecture in UI/UX design for creating logical structures of information grouping and developing a qualitative content structure. The research results open new perspectives for the use of numerical methods in UX and UI design as a tool for improving productivity, reducing development time, and improving the quality of the final product.

Keywords: numerical methods, UI/UX design, data analysis, data visualization, applied and engineering problems, Monte Carlo method, cluster analysis, statistical analysis.

Вступ

Універсальність чисельних методів у сфері вирішення прикладних та інженерних задач є відомим фактом вже довгий час. Об'єктом є чисельні методи, реалізовані за допомогою програмного забезпечення для вирішення інженерних і прикладних задач, які виникають у процесі створення продукції веб-дизайну. Однією з фундаментальних задач UI/UX дизайну є рішення відповідних проблем, з якими стикаються користувачі. Для їх запобігання важливим етапом є проведення попередніх досліджень ще на етапі розробки проекту. Кожен вид досліджень допомагає виявити той чи інший аспект, який вимагає вдосконалення або який допоможе вдосконалити кінцевий продукт. За допомогою збору, розрахунку, та аналітичної обробки інформації формується певна інформаційна база, яка забезпечує якісний кінцевий продукт, що відповідає інтересам конкретного споживача або групи споживачів. На кожному з цих етапів можливим і доцільним є використання чисельних методів, які застосовуються в інших сферах життєдіяльності і професійної реалізації: медицина, IT-технології, екологія і т.д.

Саме тому метою нашого дослідження є дослідження способів адаптації чисельних методів до програмної реалізації на прикладі прикладного пакету Excel і мови програмування Python в сфері UI та UX дизайну.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень

Сфери застосування чисельних методів різноманітні. Науковці розглядають їх як потужний інструмент для моделювання клімату та погодних умов [1], розробки програмних засобів для обробки зображень та відео, моделювання та дослідження біологічних систем, медичного

моделювання та аналізу, екологічного моделювання та аналізу. Клімат і погода є складними системами, що включають в себе велику кількість фізичних процесів, таких як атмосферна циркуляція, радіаційний баланс, теплообмін, вологість і багато інших. Розуміння цих процесів та прогнозування майбутнього стану клімату та погоди вимагає використання математичних моделей та чисельних методів. У моделюванні клімату та погоди використовуються різні чисельні методи, основні з них: вирішення диференціальних рівнянь, статистичного аналізу, прогнозування, обробки, аналізу і засвоєння інформації [1].

Застосування чисельних методів у розробці програмних засобів для обробки зображень та відео є невід'ємною частиною сучасної комп'ютерної графіки та комп'ютерного зору [2]. Завдяки цим методам, можливо розробляти потужні алгоритми та програмні інструменти для обробки, аналізу та візуалізації зображень та відеоданих з високою швидкістю та точністю. Тут використовуються методи фільтрації, сегментації, кластеризації для структурування багатовимірних даних і спрощення їх подальшої обробки [3]. У моделюванні та дослідженні біологічних систем [4] широко використовуються чисельні методи, які допомагають вирішувати складні проблеми, пов'язані з аналізом та розумінням біологічних процесів. Наприклад методи математичного моделювання, обробки сигналів, статистичний аналіз даних, класифікацію та кластеризацію даних.

У медичному моделюванні [5] та аналізі також широко використовуються чисельні методи, щоб досліджувати та аналізувати різні аспекти медичних систем та процесів. Це метод скінченних елементів, метод скінченних різниць, метод Монте-Карло [6].

Останній застосовується, наприклад, для імітаційного моделювання для вивчення поширення поляризованого світла в біологічній тканині, для оцінки експозиції та ризику при біомоніторингу. Суть методу в тому, що формують модель, що становить розподіл імовірності наявності ризику впливу небезпечної речовини у даній просторово-часовій області. Порівнюючи значення ризику з допустимим для даної області значенням, визначають область недопустимого ризику. Оцінку ризику проводять поетапно, від простої (детермінованої) до більш складної (використання одновимірного, а пізніше і двовимірного методу Монте-Карло)[6].

У екологічному моделюванні та аналізі використовуються різні чисельні методи для дослідження та оцінки взаємодії між живими організмами та їх оточенням, а також встановлення еколого-економічної залежності [7]: метод диференціальних рівнянь, метод агентно-орієнтованого моделювання, метод геоінформаційних систем (ГІС). Отримані Моделі відносять до класу імітаційних моделей, оскільки частина їх параметрів адекватно ідентифікується за допомогою експертних оцінювань, зокрема засобами машинної імітації [7].

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми. Роль чисельних методів в обробці наукової графіки підкреслена багатьма дослідниками [8], а питання веб-дизайну, дизайну інтерфейсів є актуальним протягом тривалого періоду [9]. Проте зростання ролі та значущості UX та UI дизайну в останні роки створює потребу у адаптації цих методів до програмної реалізації. Інтерфейси користувача стають все складнішими та динамічнішими, вимагаючи швидкості обчислень, точності та ефективності. В даному дослідженні ми прагнемо зосередити увагу на можливості використання описаних чисельних методів у

різних етапах створення продукту UI/UX дизайну.

Формулювання цілей статті

Окреслити роль чисельних методів у створенні інтерфейсів, які працюють швидко, ефективно та точно, та забезпеченні зручної та задовільної взаємодії з користувачем. Визначити чисельні методи, які будуть найбільш застосовними для потреб UI/UX дизайну.

В нашому дослідженні ми використовували описовий, аналітичний, графічний, статистичний метод і методи математичного та комп'ютерного моделювання.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Чисельні методи допомагають дизайнерам створювати інтерфейси, які працюють швидко, ефективно та точно, забезпечуючи зручну та задовільну взаємодію з користувачем на кожному етапі створення кінцевого продукту. Розглянемо декілька видів досліджень [9] і проаналізуємо можливість застосування того чи іншого методу під час їх реалізації.

Естимация. Визначення прогнозованої тривалості завдань, бюджету та ресурсів (рис.1).

У естиматії дизайн процесів використовуються різні чисельні методи для аналізу та оптимізації ефективності, якості та ергономіки дизайну. У контексті естиматії дизайн процесів, метод Монте-Карло може бути використаний для моделювання невизначеності та ризиків, оцінки ймовірності успіху або невдачі, аналізу навантажень та взаємодії між різними компонентами дизайну, оскільки цей метод найбільш оптимально використовувати при роботі з теоретико-ймовірнісним описом завдання [10].

Застосування методу Монте-Карло в естиматії дизайн процесів може включати генерацію випадкових величин для параметрів дизайну, виконання повторних симуляцій та аналіз статистичних даних для

отримання оцінок показників дизайну, таких як ймовірність успіху, середня продуктивність, середній час виконання та інші.

Метод Монте-Карло є основою методу імітаційного моделювання, призначеного для моделювання систем в умовах невизначеності, важливу роль при цьому відіграє спосіб моделювання чисел, рівномірно розподілених на відрізку [0;1] –

аналітичний чи стохастичний, об'єм вибірок випадкових чисел, потужність ЕОМ. на яких проводиться моделювання систем різного призначення як правило стохастичного (з урахуванням імовірнісного характеру величин) характеру.

Task ID	Task Name	Description	Resources	Estimate 1	Estimate 2	Estimate 3	Estimate 4	Estimate 5	
1	DOPE 360								
2	Cost	Development Design and logs for transferring the performance of duties. Development of a user interface to store relevant data.							
3	Total	Research stage		187.0	244.0	323.0	19.0	188.7	
14	Definition	POVs prioritizing	Identifying the most important POVs	+ POVs board	2.0	4.0	8.0	0.7	4.7
15	Definition	Jobs to be done discovery (JTBD)	Generating clear jobs Ranked	+ board	6.0	8.0	10.0	0.7	8.7
16	Definition	JTBD Prioritization	Prioritizing jobs to identify the hierarchy of functionality	+ board	1.0	1.5	2.0	0.2	1.7
17	Definition	Empathy map	Identifying problems from four main channels: see: hear, say, do	+ board for each response	2.0	3.0	4.0	0.3	3.3
18	Definition	sum			15.0	21.5	28.0	1.2	23.7
19	Solution Discovery	How Might We (HMW)	A tool for generating the maximum number of possible solutions with the involvement of a team.	+ board	2.0	2.5	3.0	0.2	2.7
20	Solution Discovery	Solution Prioritization	Focusing on the main solutions.	+ board	1.0	2.0	3.0	0.3	2.3
21	Solution Discovery	Sketching	Solution rough drafts	+ several cameras	2.0	5.0	8.0	1.0	6.0
22	Solution Discovery	Sketches clustering and prioritization	Selection of the most effective options for possible implementation at an early stage.	+ board	1.0	2.0	3.0	0.3	2.3
23	Solution Discovery	Information Architecture (IA)	Placement of functionality in the overall architecture with elaboration of large and small elements	+ board	8.0	13.0	18.0	1.7	14.7
24	Solution Discovery	User Flow	Allows you to display the sequence of specific user tasks. As a result, we will not forget anything when designing information architecture	+ board for each flow	6.0	10.0	12.0	0.7	10.7
25	Solution Discovery	sum			22.0	34.5	47.0	4.3	38.7
26	Concept Validation	Low-High-fidelity Wireframing	The prototype will be designed from low-detailed to high-detailed. This will save time by validating the data at the very beginning.	Wire board	40.0	41.0	50.0	1.7	48.7
27	Concept Validation	Usability testing	Testing is the only existing opportunity to test our product for quality. We can avoid mistakes before the solutions are implemented by code.	Script	24.0	30.0	36.0	2.0	32.0
28	Concept Validation	User Interface	Implement a prototype into an existing design system. Validated solutions must fit harmoniously into the existing user interface.	Wire board	24.0	28.0	32.0	1.3	29.3
29	Documentation / presentation	Documentation	Fluency results for further teamwork on the project.		16.0	20.0	24.0	1.3	21.3
30	Documentation / presentation	sum			164.0	123.0	142.0	8.8	136.3
31	Communication	1-2 times per week		+ Chat, calls	16.0	24.0	32.0	2.7	28.7

Рисунок 1 – Часова естимация (DOPE time estimating)

Виходячи із цільового призначення, всю множину виміральної інформації, що отримується в процесі натурних випробувань від різних джерел, можна поділити на інформацію про технічні параметри досліджуваних систем і інформацію про змінні впливи та режими функціонування випробувальних засобів.

У результаті експрес-аналізу сукупності цієї інформації дослідники одержують дані, необхідні для оперативного керування процесом дослідження. Вимірвальна інформація при експрес-аналізі дозволяє вирішити наступні задачі: встановлення степені відповідності режимів функціонування комплексу технічних засобів системи і взаємодіючих об'єктів в заданій програмі експерименту; оцінки якості виміральної інформації і вибір характерних ділянок для подальшої

обробки; аналіз основних оціночних показників і тактико-технічних характеристик систем і їх окремих елементів; виявлення аномалій в роботі досліджуваних засобів і причин їх виникнення; визначення якісних і кількісних характеристик досліджуваних сигналів і процесів.

Метод Монте-Карло є потужним інструментом для естиматії дизайн процесів, особливо там, де існує багато невизначеності, випадковості або складних взаємодій. Він дозволяє отримати статистично обґрунтовані оцінки та прогнози, що допомагають в прийнятті розумних та обґрунтованих рішень в процесі дизайну. Також використовуються методи математичного моделювання та методи оптимізації. Ці методи включають еволюційні алгоритми, генетичні

алгоритми, алгоритми зошитів та інші методи оптимізації для знаходження найкращих рішень у просторі параметрів.

Побудова дерева навігації (інформаційна архітектура). В інформаційній архітектурі в UI/UX дизайні застосовуються метод кластерного аналізу

та метод Монте-Карло для деяких аспектів розробки та аналізу (Рис.2).

Кластерний аналіз: Цей метод використовується для групування схожих об'єктів або елементів разом у кластери на основі спільних характеристик.

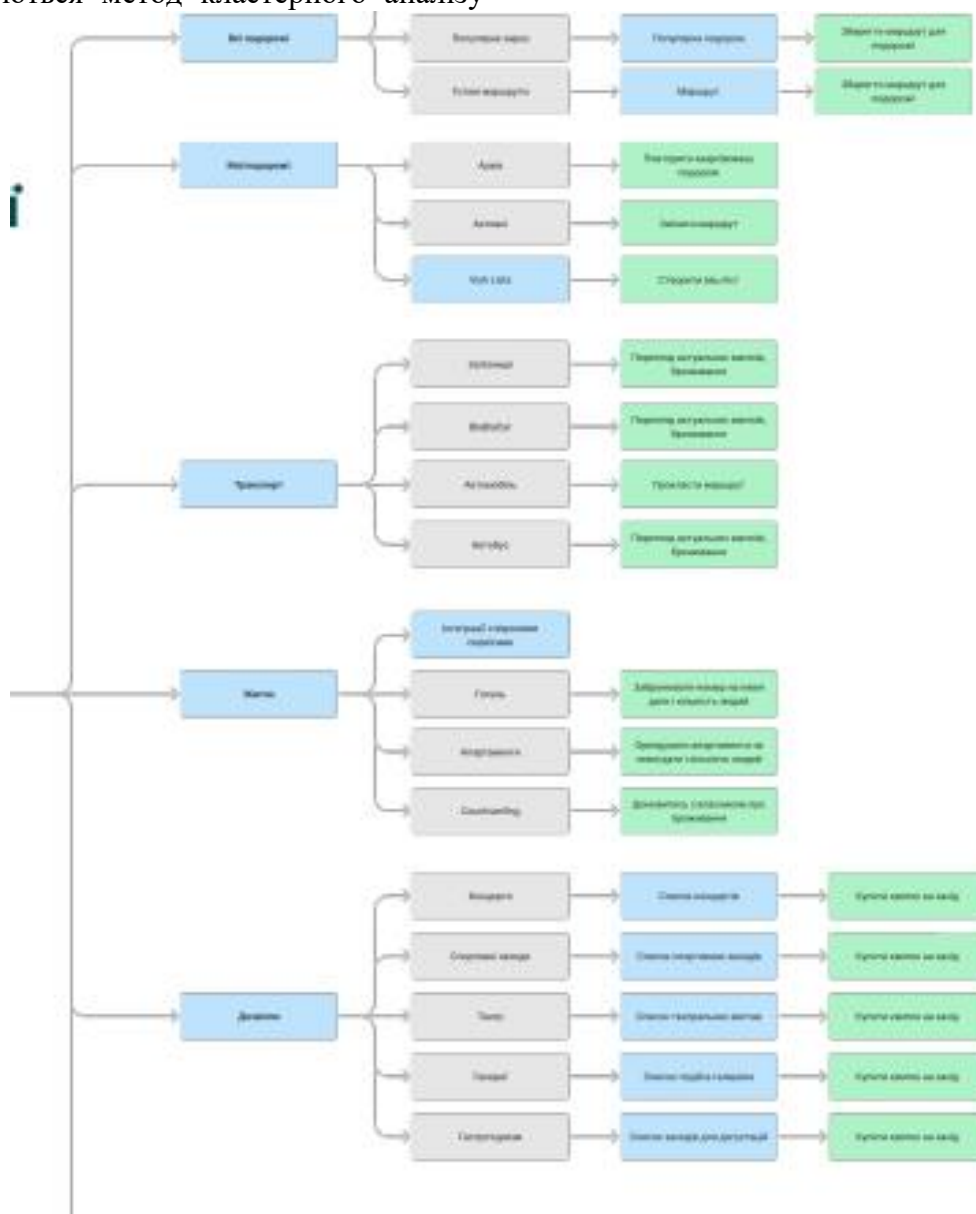


Рисунок 2 – Зразок побудови дерева навігації

У контексті інформаційної архітектури, кластерний аналіз може бути використаний для групування контенту, такого як сторінки, категорії або теги, для полегшення навігації та пошуку для користувачів. Він

допомагає створити логічні зв'язки між елементами та поліпшити організацію інформації.

Метод Монте-Карло: Цей метод базується на статистичних симуляціях та випадкових вибірках для оцінки параметрів

та величин. В контексті UI/UX дизайну, метод Монте-Карло може бути використаний для оцінки різних сценаріїв або варіантів взаємодії користувача з інтерфейсом. Шляхом випадкових вибірок можна виміряти ефективність, час відгуку та інші показники UX/UI дизайну для різних варіантів розташування елементів, інтерфейсних рішень тощо. Це дозволяє отримати статистичні дані та прогнози, що сприяють прийняттю обґрунтованих рішень стосовно покращення дизайну та досвіду користувача.

Теплова карта (heatmap). У теплових картах в UI/UX дизайні (Рис.3) чисельні методи використовуються для вимірювання, обробки та візуалізації даних, які впливають на взаємодію користувача з інтерфейсом.

Методи статистичного аналізу та Монте-Карло можуть бути застосовані в

теплових картах в UI/UX дизайні для отримання статистичних даних та вимірювання впливу на взаємодію користувачів з інтерфейсом.

Статистичний аналіз: Цей метод використовується для обробки та аналізу даних, зібраних з теплової карти. Застосовуючи статистичні методи, такі як середнє значення, медіана, стандартне відхилення та кореляція, можна отримати показники, які описують розподіл активності користувачів на інтерфейсі. Наприклад, статистичний аналіз може допомогти виявити найбільш популярні області або найменш використовувані функції, що може вплинути на подальше вдосконалення дизайну.

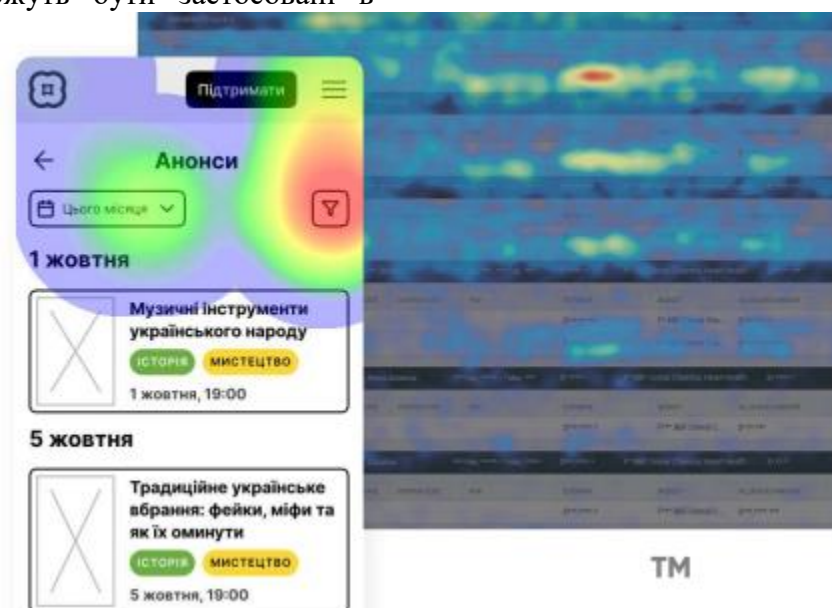


Рисунок 3 – Приклад теплової карти (heatmap)

Метод Монте-Карло: Цей метод базується на статистичних симуляціях та випадкових вибірках для оцінки параметрів та величин. В контексті теплових карт, метод Монте-Карло може бути використаний для створення випадкових вибірок або симуляцій активності користувачів на інтерфейсі. Шляхом

випадкових вибірок можна виміряти ефективність різних зон або елементів інтерфейсу та отримати статистичні дані. Це дозволяє досліджувати різні сценарії та варіанти взаємодії, що сприяє прийняттю обґрунтованих рішень щодо покращення дизайну та досвіду користувача.

Ці чисельні методи, використовуючи статистичний аналіз та метод Монте-Карло,

допомагають отримати кількісні показники та визначити основні фактори, що впливають на взаємодію користувачів з інтерфейсом. Далі, ці дані можуть бути використані для прийняття обґрунтованих рішень щодо оптимізації та вдосконалення дизайну.

Комбінування методу статистичного аналізу та методу Монте-Карло дозволяє отримати більш повне уявлення про взаємодію користувачів з інтерфейсом в тепловій карті.

A/B тестування. Дослідження полягає в створенні двох версій того, що розробник хоче змінити / створити. Далі користувачі з цільової аудиторії вибирають те, що їм більше до вподоби. Таким чином тестується, наприклад, стиль, зображення, контент, кнопки тощо. Фактично, А / В-тестування (Рис.4) – це форма порівняльного аналізу кількісних характеристик двох робочих версій сайту, додатки тощо [11].

Його застосовують для внесення покращень в готовий продукт. Це тестування вимагає глибокого розуміння статистики для правильного формування тесту і аналізу результатів тестування. Дослідники зауважують щодо недоцільності використання цього типу тесту на стадії проектування, для певного типу дизайну



Рисунок 4 – Каркас питань для А/В тестування[11]

Найдоцільніше його застосовувати для порівняння двох версій готового продукту з

метою визначення більш вдалої. Саме тому доцільно на кінцевому етапі тестування застосовувати чисельні методи, наприклад, для обробки та аналізу даних, а також для визначення статистичної значущості результатів тестування [12]. Нижче наведено кілька чисельних методів, які можна застосовувати з використанням програмного коду на мові Python. По-перше, t-тест: t-тест є одним з найпоширеніших статистичних методів для порівняння середніх значень двох груп даних. Використовуючи t-тест, можна визначити, чи є статистично значуща різниця між варіантами дизайну. В Python, бібліотека `scipy.stats` містить функції для виконання t-тесту, наприклад, `ttest_ind`. Нижче наводимо фрагмент програмного коду:

```

# Обчислюємо рівень значимості та р-значення для тесту
t_stat, p=stats.ttest_ind(group_b, group_a,
equal_var=False)

# Виводимо результати
print('Group A – Conversion Rate^
{:.2%}'.format(mean_a))
print('Group B - Conversion Rate^
{:.2%}'.format(mean_b))
print('P*value: {:.4f}'.format(p))
if p<0.05:
    print ('The difference is statistically
significant')
else:
    print ('The difference is not
statistically significant')

```

Аналіз дисперсії (ANOVA): ANOVA є статистичним методом, який дозволяє порівняти середні значення трьох або більше груп даних. Використовуючи ANOVA, можна визначити, чи є статистично значуща різниця між варіантами дизайну. В Python, бібліотека `scipy.stats` також надає функції для виконання ANOVA, наприклад, `f_oneway`.

Bootstrap-аналіз: Bootstrap-аналіз є методом, який використовує випадкові вибірки з наявних даних для оцінки розподілу та статистичних показників. Використовуючи цей метод, можна отримати довірчі інтервали та інші статистичні метри, які допомагають оцінити статистичну значущість результатів тестування.

Метод Монте-Карло: Метод Монте-Карло використовує випадкові вибірки та симуляції для оцінки статистичних показників і є одним із найефективніших методів дослідження будь-яких систем [13]. В контексті А/В тестування, можна використовувати Метод Монте-Карло для проведення симуляцій та отримання статистичних метрик, таких як довірчі інтервали, р-значення та інше.

Ці чисельні методи дозволяють проводити статистичний аналіз даних з А/В тестування і забезпечують об'єктивність та наукову обґрунтованість рішень у процесі UI/UX дизайну.

Висновок

У результаті проведеного дослідження ми довели, що чисельні методи є універсальним засобом вирішення прикладних та інженерних задач в сфері UI/UX дизайну. Визначено, що найбільш застосовними є методи кластерного аналізу, статистичні методи та метод Монте-Карло. Останній є найбільш адаптивним і найкраще підходить для вирішення поставлених задач, оскільки може бути використаним на кожному етапі UI/UX дизайну

Список використаних джерел

1. Прусов В. А., Сніжко С. І. Методи прикладного системного аналізу в гідрометеорології: підручник. К., 2017. 701 с.
2. Solem, Jan Erick. Programming computer vision with Python. Beijing; Cambridge; Sebastopol [etc.]: O'Reilly, 2012.

3. Байбуз О. Г., Сидорова М. Г. Інформаційна технологія кластеризації даних у часовому періоді спостережень. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2013. №4. С. 59-66

4. Власов А., Демічковський А. Іващенко О., Лопатьєв А., Пітин М., Системний підхід і математичне моделювання біологічних та природних процесів [електронний варіант]. URL: <http://surl.li/hablz>

5. Олійник А. П., Фешанич Л. І., Олійник Є. А. Математичне моделювання процесу розвитку епідеміологічної ситуації з урахуванням особливостей поширення COVID-19. *Методи та прилади контролю якості*. 2020. №1(44). С. 138-146.

6. Brauer F., Castillo-Chavez C. *Mathematical Models in Population Biology and Epidemiology*. Springer, 2012. 508 p

7. Григорків В. С. Моделювання еколого-економічної взаємодії. Чернівці, 2007. 84 с.

8. Комп'ютерна наукова графіка. *Вибрані питання комп'ютерного моделювання процесів і явищ: монографія/За ред. Балик Н. Р.* Тернопіль, 2022. С. 27-32

9. Designing Web Usability by Jakob Nielsen [електронний варіант]. URL: <http://surl.li/habsr>

10. Бізюк А. В., Постельняк О. С. Дослідження якості ui/ux методом а/в тестування [електронний варіант]. URL: <http://surl.li/habqw>

11. Чемерис Г. Ю. UI/UX дизайн: навчальний посібник. Запоріжжя, 2021. 290с.

12. Сльота М. І. Особливості моделювання системи масового обслуговування методом Монте-Карло. Матеріали III студентської вузівської наукової конференції «Математичні методи, моделі та інформаційні технології в управлінні підприємством». 5 листопада 2018 р., м. Вінниця. С. 47-50.

13. Литвинова О. Б. Методи імітаційного моделювання в оцінці

надійності найпростіших систем. *Reporter of Priazovskiy state technical university*. 2016. Issue 31, Vol.1. P. 168-175.

References

1. Prusov V. A., Snizhko S. I. *Metody prykladnoho systemnoho analizu v hidrometeorologii: pidruchnyk*. K., 2017. 701 p. [in Ukrainian]
2. Solem, Jan Erick. *Programming computer vision with Python*. Beijing; Cambridge; Sebastopol [etc.]: O'Reilly, 2012.
3. Baibuz O. H., Sydorova M. H. *Informatsiina tekhnolohiia klasteryzatsii danykh u chasovomu periodi sposterezhen. Systemni doslidzhennia ta informatsiini tekhnolohii*. 2013. №4. P. 59-66. [in Ukrainian].
4. Vlasov A., Demichkovskiy A. Ivashchenko O., Lopatiev A., Pityn M., *Systemnyi pidkhid i matematyчне modeliuвання biologichnykh ta pryrodnikh protsesiv [elektronnyi variant]*. URL: <http://surl.li/hablz>. [in Ukrainian]
5. Oliinyk A. P., Feshanych L. I., Oliinyk Ye. A. *Matematyчне modeliuвання protsesu rozvytku epidemiologichnoi sytuatsii z urakhuvanniam osoblyvostei poshyrennia COVID-19. Metody ta prylady kontroliu yakosti*. 2020. №1(44). P. 138-146. [in Ukrainian]
6. Brauer F., Castillo-Chavez C. *Mathematical Models in Population Biology and Epidemiology*. Springer, 2012. 508 p.
7. Hryhorkiv V. S. *Modeliuвання ekoloho-ekonomichnoi vzaiemodii*. Chernivtsi, 2007. 84 p. [in Ukrainian].
8. *Kompiuterna naukova hrafika. Vybrani pytannia kompiuternoho modeliuвання protsesiv i yavysch: monohrafiia*/Za red. Balyk N. R. Ternopil, 2022. P. 27-32. [in Ukrainian].
9. *Designing Web Usability by Jakob Nielsen*. URL: <http://surl.li/habsr>
10. Biziuk A. V., Postelniak O. S. *Doslidzhennia yakosti UI/UX metodom A/V testuvannia [elektronnyi variant]*. URL: <http://surl.li/habqw>. [in Ukrainian]
11. Chemerys H. Yu. *UI/UX dyzain: navchalnyi posibnyk*. Zaporizhzhia, 2021. 290p. [in Ukrainian].
12. Slota M. I. *Osoblyvosti modeliuвання systemy masovoho obsluhovuvannia metodom Monte-Karlo. Materialy III studentskoi vuzivskoi naukovoї konferentsii «Matematychni metody, modeli ta informatsiini tekhnolohii v upravlinni pidpriemstvom»*. 5 lystopada 2018 r., m. Vinnytsia. p. 47-50 [in Ukrainian]
13. Lytvynova O. B. *Metody imitatsiinoho modeliuвання v otsyntsi nadiinosti naiprostishykh system*. *Reporter of Priazovskiy state technical university*. 2016. Issue 31, Vol.1. P. 168-175 [in Ukrainian]

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ЗАДАЧАХ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 681.518.5

DOI: 10.31471/1993-9981-2023-1(50)-81-92

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТА МОНІТОРИНГУ ДЛЯНКИ ТРУБОПРОВОДУ У ПРОГРАМІ ASPEN HYSYS

О. В. Кучмистенко

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу; 76019, Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; e-mail: pma@nung.edu.ua

В роботі досліджується проблеми створення віртуальної моделі трубопровідної системи в програмі Aspen HYSYS, враховуючи фізичні параметри, компоненти, технологічні процеси та обмеження. Отримані динамічні характеристики моделі можуть бути використані для дослідження адекватності моделі та перевірка її поведінки за реальних умов. Також необхідно дослідити чутливість моделі до зміни параметрів та збурень. Задачею є забезпечення високої адекватності моделі та ефективного регулювання технологічних параметрів трубопровідної системи. На основі результатів аналізу, можуть бути запропоновані виправлення та удосконалення моделі з метою досягнення стабільності, точності та оптимальної роботи процесу. Рештовною метою є розробка автоматизованої системи керування, яка базується на створеній моделі трубопровідної системи у програмі Aspen HYSYS. Матеріал розглядає необхідність удосконалення трубопровідних систем у контексті транспорту різних речовин. Він підкреслює важливість ефективності, безпеки та надійності цих систем у зв'язку з зростанням обсягів транспорту, дотриманням стандартів безпеки та вимогами екологічних норм. Дані дослідження направлені на ефективне управління технологічними процесами, використання автоматизованих систем контролю і керування для забезпечення оптимальних параметрів роботи системи. Враховуючи отримані динамічні характеристики і результати досліджень, такі системи можуть забезпечити ефективне регулювання технологічних параметрів трубопровідної системи. Загалом, цей матеріал підкреслює актуальність вдосконалення трубопровідних систем для забезпечення їх найвищої продуктивності, безпеки та стійкості. Моделювання та симуляція у Aspen HYSYS дозволяє проводити моделювання та симуляцію роботи системи з різними налаштуваннями та дає можливість виконувати віртуальні експерименти, досліджувати вплив змінних параметрів та оцінювати результати процесу.

Ключові слова: віртуальна модель трубопровідної системи; система автоматичного контролю і керування; Aspen HYSYS.

The paper examines the challenges of creating a virtual model of a pipeline system in Aspen HYSYS, taking into account physical parameters, components, technological processes, and constraints. The obtained dynamic characteristics of the model can be used to investigate the adequacy of the model and validate its behavior under real conditions. It is also necessary to study the sensitivity of the model to parameter changes and disturbances. The task is to ensure a high level of model adequacy and effective regulation of the technological parameters of the pipeline system. Based on the results of the analysis, improvements and enhancements to the model can be proposed to achieve stability, accuracy, and optimal process performance. The ultimate goal is the development of an automated control system based on the created model of the pipeline system in Aspen HYSYS. The material discusses the need for improving pipeline systems in the context of transporting various substances. It emphasizes the importance of efficiency, safety, and reliability of these systems in light of increasing transport volumes, compliance with safety standards, and environmental requirements. The material also highlights the role of efficient management of technological processes and the use of automated control and monitoring systems to ensure optimal operating parameters of the system. Considering the obtained dynamic characteristics and research results, such systems can provide effective regulation of the technological parameters of the pipeline system. Overall, this material underscores the relevance of enhancing pipeline systems to ensure their highest productivity, safety, and stability. Modeling and simulation in Aspen HYSYS allow for conducting simulations of the system's operation with various configurations and enable virtual experiments to investigate the impact of variable parameters and evaluate process outcomes.

Keywords: virtual model of a pipeline system; automated control and management system; Aspen HYSYS.

Вступ. Необхідність удосконалення трубопровідних систем обумовлена рядом факторів, що впливають на їх функціональність та надійність. Спостерігається постійне зростання обсягів транспортування різних речовин, включаючи нафту, газ та інші ресурси, яке ставить високі вимоги до потужності і пропускної здатності трубопроводів. Також необхідно враховувати різні умови експлуатації, такі як тиск, температура, склад транспортованих речовин, що вимагає розробки та впровадження нових технологій і матеріалів для покращення стійкості і безпеки трубопровідних систем.

Додатково, забезпечення ефективного управління трубопровідними системами має велике значення. Це включає розробку та впровадження автоматизованих систем контролю і керування, які дозволяють ефективно відслідковувати і регулювати різні параметри, такі як тиск, витрата, температура тощо. Покращення управління трубопровідними системами сприяє зниженню витрат, збільшенню ефективності та забезпеченню високої якості транспортування речовин.

Також, необхідність удосконалення трубопровідних систем обумовлена потребою відповідності вимогам стандартів безпеки та екологічних норм. Вдосконалення систем включає розробку та впровадження заходів для запобігання аваріям, витокам, забрудненню навколишнього середовища, а також ефективного виявлення і вирішення можливих проблем.

Всі ці аспекти підкреслюють необхідність постійного удосконалення трубопровідних систем з метою забезпечення їх оптимальної функціональності, ефективності і безпеки. Це означає постійне вдосконалення технологій, матеріалів та методів проектування, будівництва та експлуатації трубопроводів.

Удосконалення систем транспорту нафти і газу включає розробку більш точних і надійних методів прогнозування та моделювання гідравлічних і теплових процесів у трубопроводах, що дозволяє більш ефективно розраховувати оптимальні режими роботи. Також проводяться дослідження щодо впливу фізичних, хімічних і механічних факторів на деградацію матеріалів трубопроводів та розробка нових матеріалів з покращеними характеристиками стійкості і тривалості служби.

Одним з важливих аспектів удосконалення трубопровідних систем є розробка та впровадження систем автоматизованого керування, які дозволяють ефективно контролювати та регулювати режими роботи трубопроводів. Це включає використання передових технологій і алгоритмів керування, таких як системи ПІД-регулювання, для забезпечення точного утримання потрібних параметрів, наприклад, тиску та температури у трубопроводі. Такі системи забезпечують стабільну і надійну роботу трубопровідної системи, покращують її ефективність та знижують ризик виникнення аварійних ситуацій.

Метою даної роботи є встановлення ефективного регулювання технологічних параметрів системи, таких як тиск, температура, витрата, забезпечення стабільності та точності процесу.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Оптимізація проектування нафто- та газопроводів є важливим процесом для забезпечення ефективного, безпечного і економічно вигідного транспортування нафти і газу [1, 2]. Цей процес включає в себе розрахунки, аналіз та врахування різних факторів, таких як географічні умови, властивості транспортованих речовин, обсяги поставок, економічні чинники та вимоги щодо безпеки та

нормативів [3, 4]. Під час оптимізації проектування нафто- та газопроводів використовуються різноманітні методи і підходи, включаючи математичне моделювання, розрахунки гідравлічних характеристик, вибір оптимального маршруту прокладання, визначення оптимальних параметрів трубопроводу (таких як діаметр, товщина стінки, матеріал), а також врахування факторів екологічної, соціальної та економічної природи [5, 6].

Метою оптимізації є досягнення максимальної продуктивності, ефективності і безпеки транспортування нафти і газу, зниження витрат і ризиків, а також використання доступних ресурсів інфраструктури з максимальною вигодою [7, 8]. Процес оптимізації проектування нафто- та газопроводів може включати дослідження, аналіз різних варіантів, врахування вимог нормативних документів та стандартів, а також оцінку економічної ефективності та стійкості проекту [9, 10].

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми моделювання трубопровідних систем у Aspen HYSYS включає такі аспекти:

1. Розробка точних моделей гідравліки. Однією з ключових проблем у моделюванні трубопровідних систем є розробка точних моделей гідравлічних характеристик, які дозволять враховувати різноманітні фактори, такі як тертя, розширення, турбулентність тощо. Необхідно постійно вдосконалювати і точніші моделі, щоб забезпечити більш точні результати.

2. Урахування нестационарних процесів. Багато трубопровідних систем піддаються нестационарним процесам, таким як зміна температури, тиску, складу речовини тощо. Розв'язання цієї проблеми вимагає розробки адекватних моделей, які зможуть враховувати ці динамічні зміни та забезпечити достатню точність результатів.

3. Оптимізація процесу моделювання. Важливим аспектом є розробка ефективних алгоритмів та методів оптимізації для використання в Aspen HYSYS. Це включає розробку алгоритмів пошуку оптимальних параметрів трубопровідної системи, а також вдосконалення процесу моделювання для забезпечення швидкості обчислень та ефективного використання ресурсів.

4. Врахування різноманітних фізико-хімічних процесів. В деяких випадках, трубопровідні системи включають різноманітні фізико-хімічні процеси, такі як конденсація, кристалізація, реакції, поглинання тощо. Розробка моделей, які можуть враховувати ці процеси та їх взаємодію з гідравлікою системи, є одним з викликів у сфері моделювання трубопроводів.

Формулювання цілей статті. Задача полягає в дослідженні можливостей використання програми Aspen HYSYS для моделювання та аналізу трубопровідної системи з метою розробки автоматизованої системи керування. У контексті використання програми Aspen HYSYS, об'єктом дослідження є віртуальна модель трубопровідної системи, яка створюється та аналізується в програмі. Ця модель відтворює фізичні параметри та компоненти, технологічні процеси та обмеження реальної трубопровідної системи.

Висвітлення основного матеріалу дослідження: для досягнення вказаної мети забезпечення результатів, необхідно вирішувати наступні завдання:

1. Створення віртуальної моделі трубопровідної системи в програмі Aspen HYSYS, враховуючи фізичні параметри, компоненти, технологічні процеси та обмеження. Це включає встановлення топології трубопроводу, вибір матеріалів, визначення геометричних параметрів труб та інших елементів системи.

2. Налаштування технологічних параметрів в моделі, таких як тиск,

температура, витрата, концентрація. Це вимагає визначення початкових значень параметрів та встановлення правильних обмежень для забезпечення безпечної та ефективної роботи системи.

3. Розробка та налаштування блоків PID контролерів для регулювання технологічних параметрів системи. Це включає налагодження коефіцієнтів PID контролера, встановлення цілей регулювання та налаштування режимів роботи контролера для досягнення бажаних значень параметрів.

Необхідність удосконалення систем транспорту нафти і газу та інших речовин пояснюється кількома науковими аспектами [3]:

1. Ефективність. Розвиток технологій та наукових розробок ставить перед науковцями виклик забезпечити більш ефективну та оптимальну систему транспорту нафти і газу. Це означає максимізацію пропускну здатності трубопроводів, зниження енерговитрат, оптимізацію процесу перекачки та забезпечення ефективного використання ресурсів.

2. Надійність. Одним з ключових факторів є забезпечення надійності систем транспорту нафти і газу. Це включає у себе запобігання витокам, аварійним ситуаціям та забезпечення безперебійної роботи системи. Наукові дослідження допомагають вдосконалювати матеріали, технології контролю та системи моніторингу для забезпечення безпеки і надійності транспортних мереж.

3. Екологічна стійкість. Розвиток наукових знань дозволяє нам більш усвідомлено підходити до питань екологічної стійкості систем транспорту нафти і газу. Це включає використання екологічно чистих матеріалів, виявлення та запобігання забруднення навколишнього середовища, а також розробку ефективних методів очищення та реабілітації забруднених ділянок.

4. Енергоефективність. Системи транспорту нафти і газу потребують значних енергетичних витрат. Наукові дослідження спрямовані на розробку енергоефективних технологій та процесів, що дозволяють знижувати споживання енергії та покращувати енергетичну ефективність систем транспорту. Це може включати оптимізацію процесів перекачки, використання високоефективних насосів та компресорів, впровадження технологій когенерації, забезпечення оптимального режиму роботи системи та використання відновлюваних джерел енергії для зменшення впливу на довкілля та зниження витрат на енергію.

5. Технологічний розвиток. Наукові дослідження допомагають розвивати нові технології транспорту нафти і газу, які відповідають сучасним вимогам. Це включає використання передових матеріалів для трубопроводів, вдосконалення систем контролю та моніторингу, впровадження автоматизованих процесів та інтелектуальних систем управління.

6. Економічна ефективність. Удосконалення систем транспорту нафти і газу має на меті забезпечити економічну ефективність. Наукові дослідження спрямовані на зниження витрат, оптимізацію процесів, використання нових технологій та стратегій, що дозволяють покращити прибутковість та конкурентоспроможність систем транспорту.

7. Вимоги керованості. Системи транспорту нафти і газу повинні відповідати вимогам керованості, які стосуються безпеки, нормативних стандартів та екологічних обмежень. Наукові дослідження спрямовані на розробку технологій та практик, які дозволяють дотримуватися цих вимог і забезпечувати високий рівень виконання нормативів.

Всі ці аспекти потребують наукових досліджень, впровадження новітніх технологій та співпраці між науковими

установами, промисловими підприємствами та регуляторними органами. Результати наукових досліджень допомагають покращити ефективність, надійність, екологічну стійкість та економічну ефективність систем транспорту нафти і газу, що є важливими факторами для сталого розвитку енергетичної інфраструктури.

Автоматичні системи прокладання і проектування трубопроводів представляють собою технологічні рішення, спрямовані на автоматизацію процесу прокладання трубопроводів з метою забезпечення високої точності, ефективності та безпеки виконання робіт. Однією з головних переваг автоматичних систем прокладання трубопроводів є їх висока точність і узгодженість. Вони використовують сучасні технології, такі як глобальне позиціонування (GPS) для точного визначення траси прокладання. Це сприяє уникненню відхилень від проектних параметрів траси та забезпечує високу геометричну точність. Крім того, автоматичні системи прокладання трубопроводів забезпечують зменшення часу і затрат. Їх використання дозволяє прискорити процес прокладання і проектування трубопроводів і знизити витрати робочої сили. Це призводить до економії часу та ресурсів і сприяє ефективному виконанню проектів.

Безпека є ще однією важливою перевагою автоматичних систем прокладання трубопроводів. Вони дозволяють виконувати роботи на безпечній відстані від небезпечних зон та забезпечують контроль над процесом прокладання. Це зменшує ризик виникнення аварійних ситуацій та пошкоджень трубопроводів і сприяє забезпеченню безпеки персоналу та довкілля [5].

Автоматичні системи прокладання і проектування трубопроводів також сприяють мінімізації впливу на довкілля. Вони дозволяють точно визначити

оптимальні траси, уникати чутливих екологічних об'єктів, зменшувати розкопки та земляні роботи. Це сприяє збереженню природних ресурсів, зменшенню руйнування природних екосистем і забезпеченню сталого розвитку.

У результаті, автоматичні системи прокладання і проектування трубопроводів є важливими інноваціями в галузі транспорту нафти і газу. Вони сприяють покращенню точності, ефективності та безпеки робіт, зменшують вплив на довкілля та сприяють використанню передових технологій. Впровадження таких систем допомагає забезпечити стале розвиток галузі та забезпечити надійний і безпечний транспорт нафти і газу. Дослідження та розробки в цій області включають в себе пошук нових методів та технологій, які можуть забезпечити ефективно та екологічно безпечно прокладання трубопроводів.

Одним з ключових аспектів удосконалення систем транспорту нафти і газу є забезпечення безпеки. Автоматичні системи прокладання трубопроводів можуть відігравати важливу роль у зниженні ризиків, пов'язаних з аваріями та витокami, шляхом автоматизації процесів та впровадження надійних систем моніторингу та контролю. Це включає в себе використання датчиків, систем виявлення витоків, автоматичного керування та аналізу даних для реагування на потенційні небезпеки та запобігання аваріям.

Другим аспектом удосконалення систем є збільшення ефективності транспорту нафти і газу. Це можна досягти шляхом використання передових технологій та інноваційних матеріалів, які забезпечують зменшення опору та втрат енергії в трубопроводах. Впровадження автоматичних систем прокладання трубопроводів також може сприяти оптимізації трас, зменшенню кількості необхідних розкопок та земляних робіт, а також управлінню режимами експлуатації з

метою забезпечення оптимальної продуктивності та ефективності.

Необхідність удосконалення систем транспорту нафти і газу також обумовлена вимогами сталого розвитку та збереження природних ресурсів. Автоматичні системи прокладання трубопроводів можуть допомогти уникнути прокладання трас через чутливі екологічні зони, забезпечуючи мінімальний вплив на природні екосистеми. Вони дозволяють точно визначити оптимальні траси, уникнути руйнування природних об'єктів та забезпечити збереження різноманіття природи. Крім того, автоматичні системи прокладання трубопроводів можуть впроваджувати нові технології, які зменшують втрати та витрати енергії, сприяють зменшенню викидів шкідливих речовин і мінімізують вплив на кліматичні зміни.

Удосконалення систем транспорту нафти і газу також вимагає врахування соціально-економічних аспектів. Автоматичні системи прокладання трубопроводів можуть сприяти зниженню витрат на робочу силу та скороченню часу виконання проектів, що позитивно впливає на економічну ефективність. Вони також забезпечують надійність транспортування нафти і газу, зменшуючи ризик аварій та втрати продукції, що має значення для енергетичної безпеки та стабільності постачання.

Отже, удосконалення систем транспорту нафти і газу шляхом впровадження автоматичних систем прокладання трубопроводів є необхідним кроком у напрямку покращення ефективності, безпеки, сталості та екологічної придатності. Вони поєднують наукові розробки, передові технології та інженерні рішення для досягнення цих цілей. Впровадження таких систем сприятиме сталому розвитку галузі та задоволенню потреб сучасного суспільства у безпечному та ефективному транспорті нафти, газу та інших речовин [6].

Створення моделі трубопровідної системи для вивчення її статичних і динамічних властивостей є важливою необхідністю з точки зору аналізу, проектування та оптимізації таких систем. Модель трубопровідної системи є абстрактним представленням реальної фізичної системи, що дозволяє досліджувати її різні аспекти та властивості у контрольованому середовищі.

Перш за все, модель трубопровідної системи дозволяє вивчати статичні властивості системи. Це включає аналіз розподілу тиску, швидкості та потоків речовин у системі при різних режимах роботи. Модель може враховувати параметри трубопроводів, насосів, клапанів, регуляторів тиску та інших компонентів, а також умови навколишнього середовища. Це дозволяє оцінити ефективність системи, знайти можливі проблеми та визначити оптимальні параметри для досягнення потрібних показників продуктивності [7].

Другим аспектом є дослідження динамічних властивостей трубопровідної системи. Модель може враховувати вплив зовнішніх факторів, таких як перехідні процеси, зміна тиску або витрати, а також реакцію системи на зміни внутрішніх параметрів. Це дозволяє аналізувати динаміку системи, виявляти резонансні явища, коливання, перепади тиску та інші динамічні явища. Такі дослідження дозволяють покращити стійкість системи до змін та виявити можливі проблеми, що можуть виникнути при зміні умов експлуатації. Створення моделі трубопровідної системи для вивчення статичних і динамічних властивостей також є корисним інструментом для вирішення проблем з проектування, вдосконалення та оптимізації системи. Модель може служити для виконання різних сценаріїв, дослідження впливу змінних параметрів, виявлення слабких місць та визначення оптимальних рішень.

Подальший аналіз статичних і динамічних властивостей трубопроводної системи допомагає зрозуміти її поведінку при різних умовах та сприяє покращенню якості та надійності системи. Наприклад, можна вивчити вплив зміни діаметру трубопроводів, розташування компонентів, налаштування регуляторів, щоб знайти оптимальний баланс між продуктивністю, витратами та енергоефективністю. Також можна аналізувати вплив різних факторів, таких як розширення або скорочення системи, зміна температури, для оцінки їх впливу на здатність системи до адаптації та стійкості. Усі ці дослідження та аналізи, проведені на основі моделі трубопроводної системи, дозволяють отримати цінну інформацію, яка допомагає уникнути проблем при фізичному впровадженні системи, вдосконалити її дизайн та оптимізувати параметри експлуатації. Це дозволяє зекономити час, кошти та ресурси, а також забезпечити більш ефективне, безпечне та стійке функціонування трубопроводної системи на практиці [8, 9].

Створення моделі трубопроводної системи дозволяє аналізувати статичні властивості, такі як розподіл тиску, швидкості та витрат речовин у системі. Це дозволяє визначити оптимальну конфігурацію системи, встановити оптимальні параметри трубопроводів, насосів, клапанів та інших компонентів. Також можна дослідити вплив різних

чинників, таких як розташування, геометрія труб, наявність перешкод, на роботу системи і виявити можливі проблеми або зони перевантаження.

Створення моделі трубопроводу у програмі Aspen HYSYS використовується для детального аналізу та моделювання транспорту різних речовин через трубопроводну систему. Цей процес включає кроки по визначенню компонентів системи, розміщенню трубопроводів, встановленню параметрів, проведенню симуляції та аналізу результатів.

Першим кроком є визначення компонентів системи, які можуть включати різні речовини, такі як рідини, гази або суміші. Кожен компонент має встановлені властивості, такі як температура кипіння, тиск насиченості, фізичні властивості та термодинамічні параметри. Ці дані використовуються для створення реалістичної моделі системи. Після визначення компонентів проводиться розміщення трубопроводів у програмі Aspen HYSYS. Встановлюються параметри трубопроводів, такі як довжина, діаметр, матеріал труб та характеристики розгалужень або з'єднань. Також встановлюються умови роботи, такі як тиск на початку та кінці трубопроводу, температура, режими роботи та потужність насосів (рис. 1).

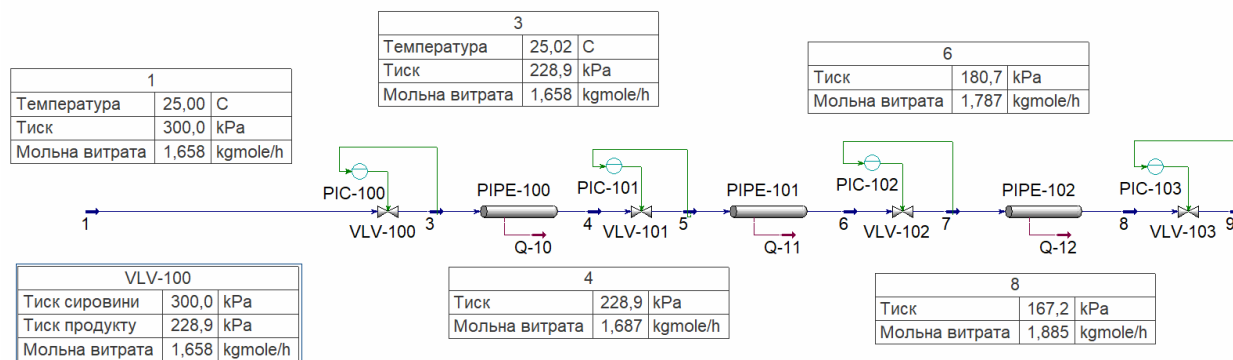


Рисунок 1 – Модель трубопроводної системи у програмі Aspen HYSYS

Після встановлення параметрів проводиться симуляція моделі. У програмі Aspen HYSYS використовуються різні математичні моделі та алгоритми для вирішення рівнянь масопередачі, енергобалансу та інших процесів, що відбуваються в системі. За допомогою цих моделей програма розраховує фізичні властивості речовин, тиски, швидкості потоків, температури та інші параметри вздовж трубопроводу.

Для розрахунку основних параметрів трубопровідної системи використовується модель Пенг-Робінсона (Peng-Robinson) яка є одною з найпопулярніших емпіричних математичних моделей розрахунку фазового рівноваги та властивостей рідин і газів. Вона використовується в хімічній та нафтогазовій промисловості для опису поведінки змішаних речовин, зокрема речовин, що зустрічаються в системах нафти та газу.

Модель Пенг-Робінсон базується на рівнянні стану для змішаних речовин, яке враховує взаємодію між молекулами та інтермолекулярні силові поля. Вона використовує параметри критичної температури, критичного тиску та фактору ацентричності, щоб описати поведінку речовини при різних температурах та тисках. Вона також забезпечує опис фазових рівноваг, таких як тиск насиченої пари, коефіцієнт компресії, об'ємну поведінку та коефіцієнти розподілу між фазами. Вона також використовується для визначення фізичних властивостей речовин, таких як теплоємність, теплопровідність, в'язкість та інші, що є важливими при проектуванні та експлуатації нафтових і газових систем.

Модель дозволяє проводити розрахунки фазових рівноваг та властивостей рідин і газів в широкому діапазоні температур та тисків, що робить її цінним інструментом для моделювання та проектування процесів у нафтогазовій промисловості. Вона допомагає визначити оптимальні умови експлуатації та планувати

оптимальні параметри для різних проектів, включаючи проектування та оптимізацію трубопровідних систем, процесів зберігання та транспортування нафти та газу.

Використання моделі Пенг-Робінсон [11] допомагає виявити вплив різних факторів, таких як температура, тиск, склад речовини, на фазову рівновагу та властивості речовини. Це дозволяє зрозуміти та прогнозувати поведінку речовин в різних умовах, спрощує проектування та оптимізацію систем, покращує ефективність процесів та сприяє прийняттю інформованих рішень у нафтогазовій промисловості.

У своєму термічному вигляді рівняння зводиться до формулювання

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v(v-b)+b(v-b)} \quad (1)$$

та в поліноміальній (кубичній) формі широко використовується у практиці:

$$Z^3 + (B-1)Z^2 + (A-2B-3B^3)Z + (B^2 + B^3 - AB) = 0. \quad (2)$$

Тут P – тиск, Па; T – температура, К; v – молярний об'єм, м³/моль; R – універсальна газова постійна, Дж/(моль К); A , B – коефіцієнти рівняння; a , b – коефіцієнти рівнянь вандерваальсовського типу, м³/моль; Z – коефіцієнт стисливості.

Після завершення симуляції можна провести аналіз результатів моделі. Це може включати перегляд профілі тисків, температур, швидкостей та інших параметрів вздовж трубопроводу, виявлення зон перевантаження або зменшення тиску, аналіз розподілу компонентів у системі та їх зміну з часом (рис. 2). Крім того, можна вивчити ефективність системи, шляхом визначення коефіцієнтів перетину труб, споживання енергії та інших параметрів.

Програма Aspen HYSYS також дозволяє проводити різноманітні сценарії та випробування для визначення впливу різних факторів на роботу трубопроводу. Це може включати зміну параметрів тиску, температури, витрати речовини або введення різних режимів роботи. Такі

сценарії дозволяють виявити потенційні проблеми, досягнення найкращої ефективності системи, здійснити оптимізацію та встановити оптимальні параметри для

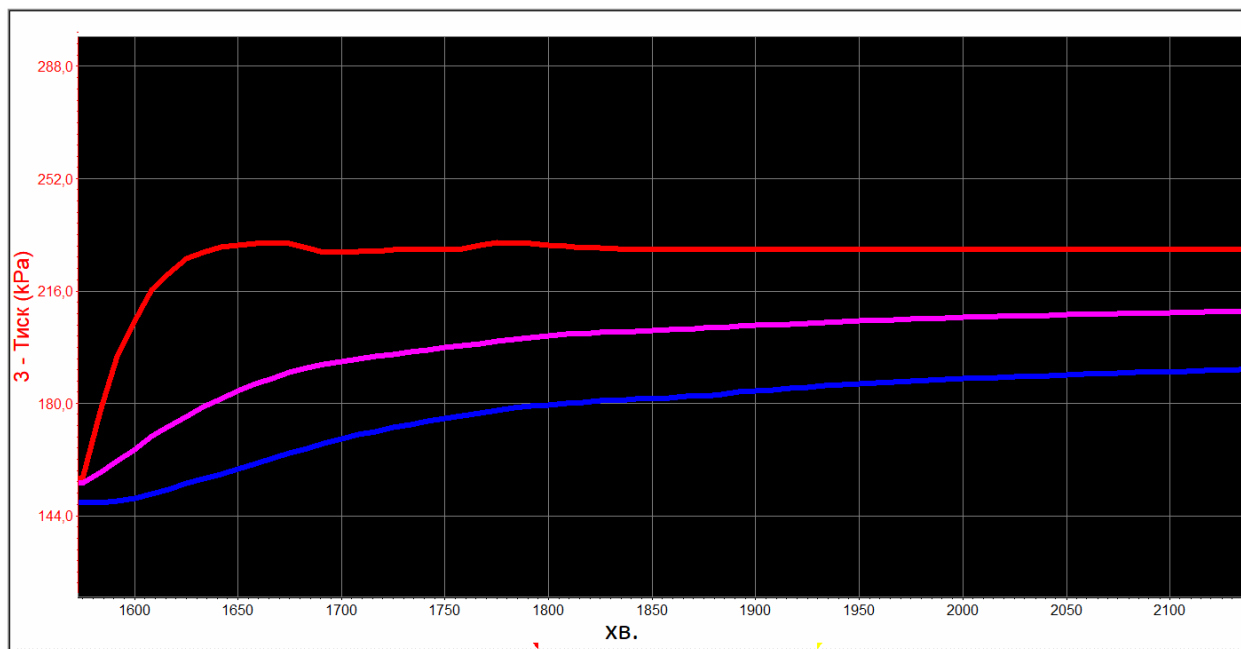


Рисунок 2 – Результат моделювання зміни тисків у трубопровідній системі

Розроблена у модель може забезпечити регулювання технологічними параметрами за допомогою блоку PID контролера. Цей елемент використовується для автоматичного керування та регулювання процесу, шляхом зміни значень вхідних сигналів. Також можливе і ручне керування. Блоки PID контролерів підключені до ділянок трубопроводів PIPE-100, PIPE-101, PIPE-102, та здійснюють регулювання технологічних параметрів (рис. 3).

Блоки PID контролерів у Aspen HYSYS можна налаштовувати, аналізувати їх вплив на процес, встановлювати коефіцієнти складових (P, I, D) та інші параметри для досягнення оптимального моделювання та регулювання технологічних параметрів відповідно до реальних динамічних перехідних характеристик.

Узагальнюючи, створення моделі трубопровідної системи в програмі Aspen HYSYS дозволяє провести детальний аналіз

та моделювання різних аспектів системи, включаючи розподіл тиску, швидкостей та витрат речовин, ефективність роботи, вплив зовнішніх факторів та проведення різноманітних сценаріїв. Це допомагає вдосконалити трубопровідну систему, забезпечити її надійну та безпечну роботу, а також знайти оптимальні рішення для поліпшення продуктивності та ефективності (рис. 4).

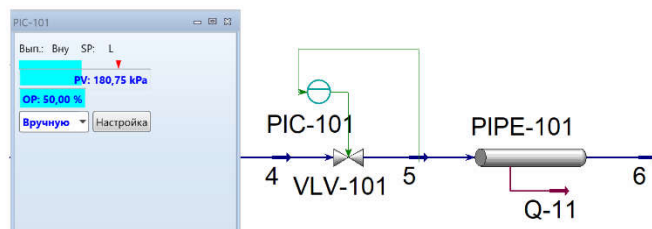


Рисунок 3 – Реалізація регулювання тиску у трубопровідній системі блоком PID контролера (PIC-101)

Отримані динамічні характеристики можуть бути використані для дослідження адекватності моделі трубопровідної

системи. Ці характеристики відображають зрозуміти, наскільки точно модель поведінку системи в часі та дозволяють відтворити реальний процес.

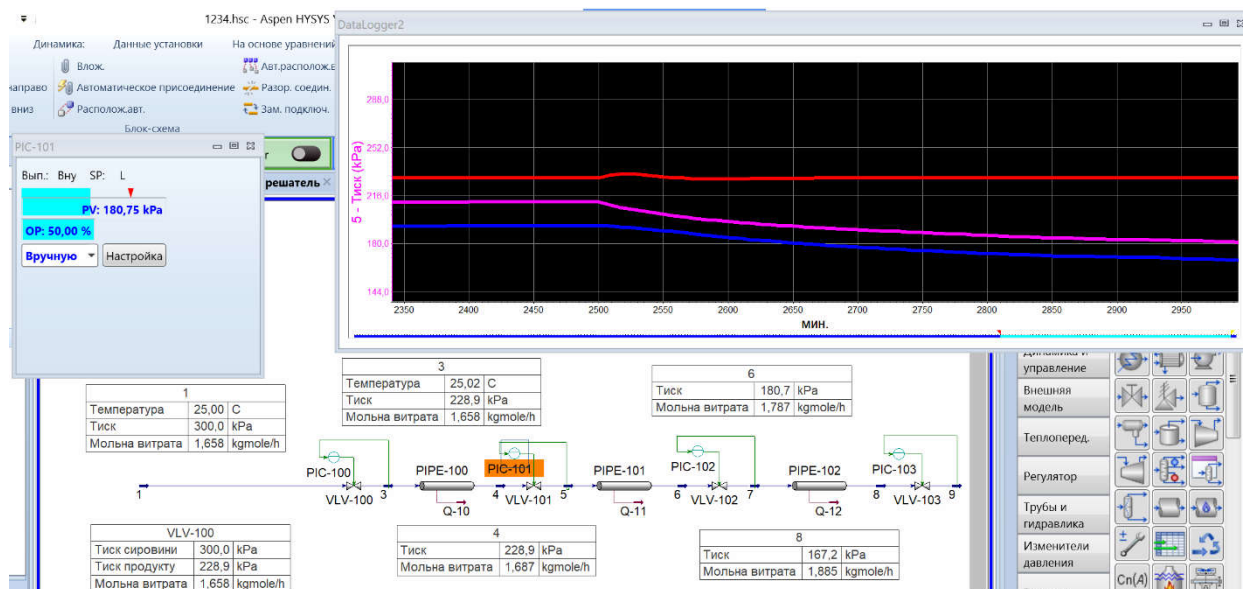


Рисунок 4 – Результат моделювання зміни тисків у трубопровідній системі

Для дослідження адекватності моделі можуть бути використані такі підходи:

1. Порівняння експериментальних та модельних даних. Отримані динамічні характеристики можна порівняти з експериментально вимірними даними. Якщо модель добре узгоджується з експериментальними даними, це свідчить про адекватність моделі. Важливо порівнювати не лише загальні тренди, але й деталі процесу, такі як часові затримки, амплітуди коливань та інші параметри.

2. Перевірка моделі за допомогою реальних умов. Динамічні характеристики моделі можуть бути перевірені за допомогою реальних умов експлуатації системи. Це може включати зміну вхідних параметрів, випробування системи на різних навантаженнях або проведення імітаційних експериментів. Якщо модель успішно відтворює реакцію системи на реальні умови, це підтверджує її адекватність.

3. Чутливість моделі до параметрів та збурень. Дослідження чутливості моделі до зміни параметрів та збурень може також

допомогти оцінити її адекватність. Якщо модель показує очікувану реакцію на зміни параметрів та збурень, це може свідчити про її правильну конфігурацію та адекватність.

4. Використання аналізу помилок. Аналіз помилок моделі, таких як помилка прогнозування або помилка апроксимації, може також допомогти оцінити адекватність моделі. Якщо помилки моделі є низькими і несистематичними, це може свідчити про високу адекватність моделі. Однак, систематичні помилки можуть вказувати на потребу вдосконалення моделі.

В цілому, отримані динамічні характеристики дозволяють оцінити адекватність моделі трубопровідної системи (рис. 1.5). Це важливий етап у розробці автоматизованих систем керування, оскільки точна модель системи дозволяє ефективно регулювати технологічні параметри та забезпечувати оптимальну роботу процесу. При необхідності, на основі результатів аналізу можуть бути внесені виправлення та удосконалення в модель з метою підвищення її адекватності.

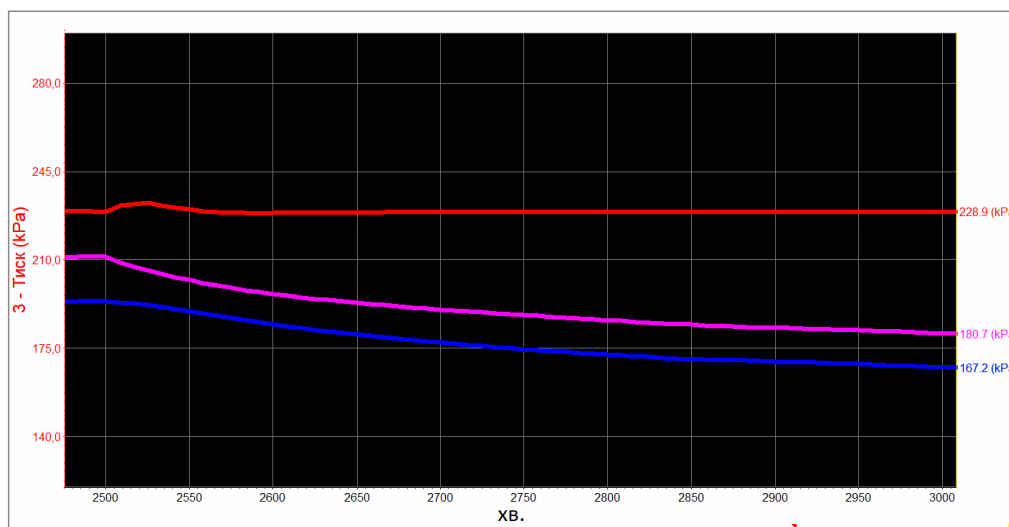


Рисунок 5 – Результат моделювання зміни тисків у трубопровідній системі при ручному регулюванні регулятором VLV-101

Отже, створення моделі трубопровідної системи для вивчення її статичних і динамічних властивостей є необхідним етапом у розвитку трубопровідної інфраструктури. Це дозволяє детально вивчити різні аспекти системи, враховуючи різноманітні фактори та умови експлуатації. Крім того, модель трубопровідної системи дозволяє аналізувати динамічні властивості системи. Це включає дослідження реакції системи на зміну тиску, витрати, температури та інших факторів у реальному часі. Можна вивчити динаміку перехідних процесів, коливання, резонансні явища та їх вплив на ефективність та безпеку системи. Це дозволяє встановити оптимальні параметри регуляторів, амортизаторів та інших компонентів для забезпечення стійкої роботи системи при змінних умовах.

Створення моделі трубопровідної системи також дозволяє провести різноманітні сценарії та випробування, що допомагає виявити проблеми та ризики експлуатації системи. Модель може служити для виявлення слабких місць, прогнозування впливу зовнішніх факторів, таких як природні стихії, технічні неполадки або навмисні втручання. Це

дозволяє ідентифікувати потенційні проблеми та прийняти відповідні заходи безпеки для запобігання аварійних ситуацій та забезпечення надійності та безпеки експлуатації.

Висновки

Створення моделі трубопровідної системи у програмі Aspen HYSYS може відігравати важливу роль у розробці системи автоматизованого керування. Можна виділити такі основні аспекти за якими ця модель може сприяти розробці автоматизованої системи керування:

1. Моделювання процесу. Модель трубопровідної системи дозволяє відтворити реальні умови та процеси, що відбуваються у системі. Вона дозволяє дослідити різні сценарії роботи системи, включаючи різні параметри та умови, і визначити оптимальні режими роботи. Це допомагає розробити стратегії керування та встановити критерії для автоматизованої системи.

2. Оптимізація процесу. Модель може використовуватися для оптимізації процесу та підвищення його ефективності. За допомогою оптимізаційних алгоритмів, знаходяться оптимальні параметри та

налаштування системи керування для досягнення бажаних результатів, таких як максимізація продуктивності, мінімізація споживання енергії або зниження витрат.

3. Перевірка стратегій керування. Модель трубопровідної системи може бути використана для перевірки стратегій керування, перевірки їх працездатності та надійності.

4. Розробка алгоритмів керування. Модель може послужити основою для розробки алгоритмів керування, таких як ПД-регулятори, оптимальні алгоритми керування або алгоритми передачі величини. Використовуючи дані з моделі, можна розробити та перевірити різні стратегії керування для досягнення бажаних цілей, таких як стабілізація тиску, підтримка оптимального режиму роботи, зменшення впливу збурень і т.д.

5. Тестування та налагодження. Модель трубопровідної системи може бути використана для тестування та налагодження розроблених алгоритмів керування. Це дозволяє перевірити працездатність та ефективність алгоритмів перед їх впровадженням у реальну систему. Модель дозволяє проводити віртуальні експерименти з різними сценаріями та умовами, що допомагає виявити та виправити можливі проблеми та недоліки алгоритмів.

6. Оптиміальне керування та реалізація. З використанням моделі трубопровідної системи у Aspen HYSYS можна розробити оптимальну систему керування, яка враховує різні фактори, такі як режими роботи, обмеження, цілі та вимоги. Модель дозволяє виконувати реалістичні симуляції та тестування системи керування перед її реалізацією в реальному середовищі.

Sciences: Collected scientific works. Rivne: NUVGP, 2014. Issue 4 (68). P. 22-28.

2. Hultmark M., Vallikivi M., Bailey S. C. C., Smits A.J. Logarithmic scaling of turbulence in smooth- and rough-wall pipe flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 2013. Vol. 728, P. 376-395.

3. Mahsakazemi. Optimization of Oil and Gas Multi Stage Separators Pressure to Increase Stock Tank Oil. *Oriental J. of Chemistry*. 2011. Vol. 27. № 4. P. 1503–1508.

4. Bi K., Hao H. Using pipe-in-pipe systems for subsea pipeline vibration control. *Engineering Structures*. 2016. Vol. 109, p. 75-84.

5. Brown N.J., Bastien L.A.J., Price P.N. Transport properties for combustion modeling. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2011. Vol. 37, p. 565–582.

6. Inverse Space Marching Method for Determining Temperature and Stress Distributions in Pressure Components/ J. Taler [et al.]. *Developments in Heat Transfer*. – Rijeka, Croatia. 2011. P. 273–292.

7. Amathematical model for evaluation the efficiency of gas-main pipelines in transient operational modes/ V. Chekurin, Yu. Ponomaryov, O. Khymko. *An international quarterly journal*. 2015. Vol. 4, № 3. P. 25–32.

8. HYSYS Simulation Basis. Aspen Technology, Inc., 2005. 527 p.

9. HYSYS User Guide. Aspen Technology, Inc., 2005. 533 p.

10. Kou J., Sun S. Unconditionally stable methods for simulating multi component two-phase interface models with Peng-Robinson equation of state and various boundary conditions. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2016. Vol. 291. P. 158–182.

References

1. Gerasimov G.G., Gerasimov Ye.G., Ivanov S.Yu. Determination of the basic parameters of pressure stabilizers by analytical method. *Visnyk NUVGP. Ser. Technical*

УДК 691.307

DOI: 10.31471/1993-9981-2023-1(50)-93-100

РЕАЛІЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РОЗРАХУНКУ НАДІЙНОСТІ КС ЗА ТИПОМ ТЕХНОЛОГІЧНИХ З'ЄДНАНЬ ГПА ЗАСОБАМИ БЛОЧНОГО ПРОГРАМУВАННЯ

Д. Ф. Тимків, А. В. Семенчук, О. С. Царева, Т. О. Ваврик

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул.
Карпатська 15, м. Івано-Франківськ, 76019, e-mail: a.if.ua1981@gmail.com*

Одним зі шляхів вирішення проблеми ефективного використання енергоресурсів у сучасних умовах є зменшення витрат газу в процесі його транспортування; повна утилізація тепла на компресорних станціях магістральних газопроводів. Для ГТС характерні багаторівневість мережевої структури, значні розміри та часи релаксації збурень, розподілені та дискретні керуючі впливи, високий ступінь невизначеності як внутрішніх параметрів, так і зовнішніх чинників. ГТС обмінюється з довкіллям масою, імпульсом і енергією. Окремі складові ГТС взаємодіють між собою, а тому зміна режиму роботи окремої ділянки веде до зміни режиму всієї системи. Розрахунок параметрів функціонування таких систем є складною математичною проблемою. Її розв'язання вимагає побудови адекватних математичних моделей окремих об'єктів ГТС і розробки відповідних алгоритмів для забезпечення необхідної точності обчислень параметрів схеми з'єднань газоперекачувальних агрегатів (ГПА). Загалом, для встановлення робочих параметрів ГПА проводять розрахунок: режимноенергетичних параметрів (тиск і температуру газу на виході ГПА, а також затрати паливного газу); параметрів газового потоку на виході нагнітача; області допустимих змін параметрів ГПА; продуктивності нагнітачів і частоти обертів, за яких забезпечується перекачування газового потоку із заданими режимними параметрами; параметрів технічного стану нагнітачів і їх приводів згідно замірених даних. У даній статті для розрахунку вибрано такий параметр як надійність. Основну увагу зосереджено на умові, пов'язаній з оцінкою ефективності роботи КС. Визначено коефіцієнт готовності: з одного боку, з чисто імовірних і технічних позицій, з іншого – позицій показника ефективності роботи об'єкту, ґрунтуючись на усереднених величинах. Наведено необхідні розрахункові співвідношення для визначення коефіцієнта продуктивності, ймовірності станів і інших допоміжних величин для ряду технологічних схем, представлених у статті. Проведено висновки результатів реалізації математичної моделі засобами блочного програмування, доведено адекватність моделі. Продемонстровано один зі способів застосування моделі для вибору оптимального типу з'єднання ГПА при проектуванні нових КС.

Ключові слова: математичне моделювання, надійність, компресорні станції, газоперекачувальний агрегат, математичне очікування

One of the ways to solve this problem of efficient use of energy resources in modern conditions is to reduce gas consumption in the process of its transportation; full utilization of heat at compressor stations of main gas pipelines. GTS is characterized by the multi-level network structure, significant dimensions and relaxation times of the disturbance, distributed and discrete control influences, and a high degree of uncertainty of both internal parameters and external factors. GTS exchanges mass, momentum and energy with the environment. Separate components of the GTS interact with each other, and therefore a change in the mode of operation of a separate section leads to a change in the mode of the entire system. Calculation of parameters of functioning of such a system is a complex mathematical problem. Its solution requires the construction of adequate mathematical models of individual GTS objects and the development of appropriate algorithms to ensure the necessary accuracy of calculations of parameter schemes from combined gas pumping units (GPUs). In general, in order to establish the working parameters of the HPA, the following calculations are carried out: mode and energy parameters (gas pressure and temperature at the HPA outlet, as well as fuel gas consumption); gas flow parameters at the supercharger outlet; areas of permissible changes in parameters of the GPA; the performance of the superchargers and the frequency of revolutions at which the pumping of the gas flow with the given operational parameters is ensured; parameters of the technical condition of superchargers and their drives according to the measured data. In this article, such a parameter as reliability is selected for calculation. The main attention is focused on the conditions related to the evaluation of the effectiveness of the work of the CS. Readiness coefficients were determined: on the one hand, from purely probabilistic and technical positions, on the other - a positional indicator of the object's work efficiency, based on average values. Provision of

estimated sums for determining productivity coefficients, state probabilities and other auxiliary values for a number of technological schemes presented in the articles is given. The conclusions of the results of the implementation of the mathematical model using block programming were drawn, and the adequacy of the model was proven. One of the methods of applying the model for choosing the optimal type of connection of the HPA in the design of new CSs is demonstrated.

Key words: mathematical modeling, reliability, compressor stations, gas pumping unit, mathematical expectation

Вступ

В Україні діє складна система взаємозв'язаних магістральних газопроводів. Лінійні ділянки (ЛД), які з'єднані трубами-перемичками з встановленими на них кранами, одно- чи багатоцехові компресорні станції (КС) з однотипними чи різнотипними газоперекачуючими агрегатами (ГПА), що оснащені арматурою регулювання тиску, витрат, зміни поперечного перерізу трубопроводу тощо, та інші технологічні елементи газопроводів утворюють цілісний інженерний об'єкт. Тому зміна режиму роботи окремої ділянки зумовлює зміни режиму роботи всієї системи.

Аналіз останніх досліджень. Однією із найважливіших проблем при експлуатації газоперекачувальних агрегатів (ГПА) природного газу визначають забезпечення їх стійкої роботи [1]. Оскільки газотранспортна система України є керованим об'єктом, то управління газопотоками здійснюється зміною: стану запірної арматури, продуктивності газоперекачувальних агрегатів, параметрів джерел та відборів газу тощо [2]. Зміну необхідно проводити за визначеними розрахунковими параметрами, для цього застосовується, зокрема, математичне моделювання для обчислень параметрів робочого процесу, які можуть збігатися з окремими обчисленнями, виробленими при виконанні розрахунків [3].

Математичне моделювання активно застосовується для вирішення прикладних і проектних задач щодо роботи ГТС за різних умов, в тому числі для моделювання можливості зменшення кількості паралельно працюючих

газоперекачувальних агрегатів на кожній компресорній станції; дослідження зміни конфігурації мережі та режимів роботи компресорних станцій та іншого технологічного обладнання, за яких перехід з одного заданого режиму роботи ГТС на інший відбудеться із забезпеченням певного критерію або критеріїв; дослідження технічного стану трубопроводів [4-8].

Виділення раніше не вирішеної частини проблеми. У технічних системах, зазвичай, після виходу з ладу її елементів проводяться ремонтні роботи, підганяються відповідні параметри до встановлених інструкцією з експлуатації. В таких випадках момент повної готовності [9] є тоді, коли всі елементи системи в працездатний стан за час, не більший заданого. Цей стан не сприяє зниженню ефективності роботи системи і, як правило, визначається коефіцієнтом повної готовності K_{n2} [9].

Таким чином, за розрахованим коефіцієнтом повної готовності можна здійснити вибір оптимальної схеми ГПА, перевірити правильність якого можна за відповідністю коефіцієнта продуктивності, вираженого через початкові (тобто попередньо задані) показники надійності, коефіцієнту продуктивності, вираженого через коефіцієнт ймовірності [9]. Під коефіцієнтом повної готовності розуміємо [9] такий стан готовності усіх елементів ГПА, коли відсутні часткові відмови, тобто КС повністю знаходиться в працездатному стані.

Мета дослідження Більшість газопроводів України мають значний термін експлуатації. Тому вони потребують перевірки на показники надійності.

Поставлена мета може бути досягнута внаслідок розв'язання таких задач як визначення вибраних показників надійності КС для різних схем з'єднання ГПА; реалізація математичної моделі розрахунку основних параметрів засобами блочного програмування для перевірки її на адекватність (відповідність отриманих розрахунків теоретичним даним); виявлення відповідності отриманого коефіцієнта повної готовності коефіцієнтам продуктивності, виражених через початкові показники надійності і ймовірності відповідно, для вибору оптимальної схеми КС.

Висвітлення основного матеріалу

Введено [9] наступні обмеження, які носять технологічний характер і впливають на надійність роботи КС (мається на увазі теоретична модель КС, якій може відповідати будь-яка реальна):

- всі (робочі і резервні) ГПА однотипні і їх початкові характеристики надійності однакові;

- відключення ГПА як в аварійних, так і в планових ситуаціях відбувається миттєво (тобто не розглядається поступовість (поопераційність) відключення (включення) ГПА);

- закони розподілу вірогідності часу безвідмовної роботи і відновлення є пуассонівськими, при переході на інший тип ГПА змінюються тільки початкові характеристики;

- завантаження паралельних групи агрегатів пропорційне;

- резерв на КС є ненавантаженим;

- «перекіс» схеми, що виникає під час імітації відмови, при вичерпанні резервів усувається відключенням додаткових ГПА.

Коефіцієнт готовності за своїм призначенням характеризує не тільки підготовленість системи до роботи, але й її ефективність. Тому, пов'язуючи готовність системи з вихідними ефектом (тобто роботою в повністю працездатному стані),

можна цей ефект охарактеризувати коефіцієнтом готовності

$$H_w = \sum_{i=0}^{n-1} \beta_i p_i, \quad (1)$$

де β_i – відношення продуктивності i -го стану до заданої (номінальної);

p_i – ймовірність виникнення i -го стану;

Коефіцієнт часткової готовності [9], визначений для сприятливих станів з частковими відмовами, може оцінюватися в різний спосіб. Ми пропонуємо два визначення коефіцієнта часткової готовності (коли присутні часткові відмови обладнання ГПА, тобто КС знаходиться в працездатному стані лише частково, причому зберігаючи часткову ефективність). Перше - за ймовірністю настання часткової працездатності системи за умови наявності часткових відмов (або за ефективністю системи при наявності часткових відмов). Друге - математичне очікування, реалізоване в математичній моделі.

У першому випадку коефіцієнт готовності є ймовірністю того, що система працює з частковими відмовами, які дозволяють використовувати систему за призначенням зі зниженою ефективністю. У другому – коефіцієнт часткової готовності є відношенням математичного очікування показника ефективності до номінального його значення при часткових відмовах, що дозволяють використовувати систему за призначенням зі зниженою ефективністю. Це визначення є більш зручним для використання, оскільки повністю відповідає коефіцієнту продуктивності.

Коефіцієнт ефективності чисельно рівний коефіцієнту повної готовності, тобто $H_w = p_0 = K_{n2}$ за умови, що $m=1, \beta_0=1$. Оскільки коефіцієнт ефективності для газотранспортних систем (тобто і для газопроводів, і КС) виражається безпосередньо через продуктивність, введемо ще один показник – коефіцієнт продуктивності [9].

При технічній підготовці елементів системи може виявитися, що до роботи будуть не готові тільки деякі елементи. Але оскільки система не може залишатися повністю відключеною, доцільно, щоб вона працювала при неповному складі елементів, тобто за неповної або часткової готовності, що утворюють єдину математичну модель.

За повної готовності коефіцієнт виражається чисельно однією і тією ж величиною [9] (при $m=1, \beta_0=1, H_w = M\{\beta\} = 1 - p_0 + (1-p_0) \cdot 0 = p_0 = P_{nz} = \pi$).

Проаналізуємо основні схеми з'єднання агрегатів, які використовуються при проектуванні КС, і виведемо відповідні розрахункові формули математичної моделі.

Визначаємо коефіцієнт повної готовності КС для простого випадку, коли є тільки один компресор і одна ремонтна бригада (Сх I:1+0).

Параметри процесу λ_k, μ_k задаються формулами:

для навантаженого резерву (резервні елементи працюють)

$$\lambda_k = (n - m - k)\lambda;$$

$$\mu_k = \begin{cases} k\mu, & k \leq r \\ r\mu, & k > r \end{cases}; \quad (2)$$

для ненавантаженого резерву (резервні елементи не працюють)

$$\lambda_k = \begin{cases} \lambda n, & k \leq m \\ n + m - k, & k > m \end{cases}. \quad (3)$$

Задається ймовірність початкових станів процесу $p_k(0)$.

У теорії ймовірності доводиться, що для будь-якого початкового стану процесу існують межі $\lim_{t \rightarrow \infty} p_k(t) = p_k$

Кінцева ймовірність p_k рівна середньому часу, коли k елементів – несправні і виражається через інтенсивність відмов і відношення за (4). Для системи тривалої дії процес достатньо повно описується параметрами p_k :

$$p_k = \frac{\theta_k}{\sum_{k=0}^N \theta_k}, \quad (4)$$

$$\text{де } \theta_k = \frac{\lambda_0 + \lambda_1 \dots \lambda_{k-1}}{\mu_1 \mu_2 \dots \mu_k}; k=0; \theta_0 = 1$$

Величина θ_k зі збільшенням числа k спершу зростає, а потім спадає.

Припустимо, що параметри λ і μ є заданими для компресорних агрегатів. Фінальна ймовірність:

$$n=1, m=0, r=1, \text{ тобто } \lambda_0 = \lambda; \mu_1 = \mu \text{ далі}$$

$$\theta_0 = 1; \theta = \frac{\lambda}{\mu} \text{ і } p_0 = \frac{1}{1 + \frac{\lambda}{\mu}}, p_0 \frac{\lambda}{\mu} p_0 \quad (5)$$

Оскільки p_0 – ймовірність того, що елементів, які вийшли з ладу, немає (він один), то приймаємо за P_{kc} величину p_0 . Отже,

$$P_{nz} = \frac{\lambda}{\mu} p_0 \quad (6)$$

Варто зазначити, що для більш складних випадках коефіцієнт готовності необхідно щоразу визначати.

Нехай на компресорній станції (рис.1) встановлено чотири компресори за схемою: Сх II:4+0. Робиться припущення, що ремонтна бригада одна. Режим роботи такий [9]: якщо вийшов з ладу один (будь-який) ГПА, то для уникнення «перекосу» в з'єднанні двох груп ГПА відключається й інший, сполучений послідовно. При виході з ладу двох (будь-яких) агрегатів ті що залишилися, працюють як послідовна пара. В обох випадках вважається, що продуктивність вдвічі менша, ніж в безаварійній ситуації. Якщо з ладу вийшли три компресори, то станцію вважають такою, що повністю вийшла з ладу.

За цією характеристикою перший випадок відповідатиме сприятливому стану, другий – несприятливому.

Оскільки через P_k позначили вірогідність стану при відмові k елементів, то за показник ефективності роботи КС приймається коефіцієнт продуктивності [9] у вигляді співвідношення:

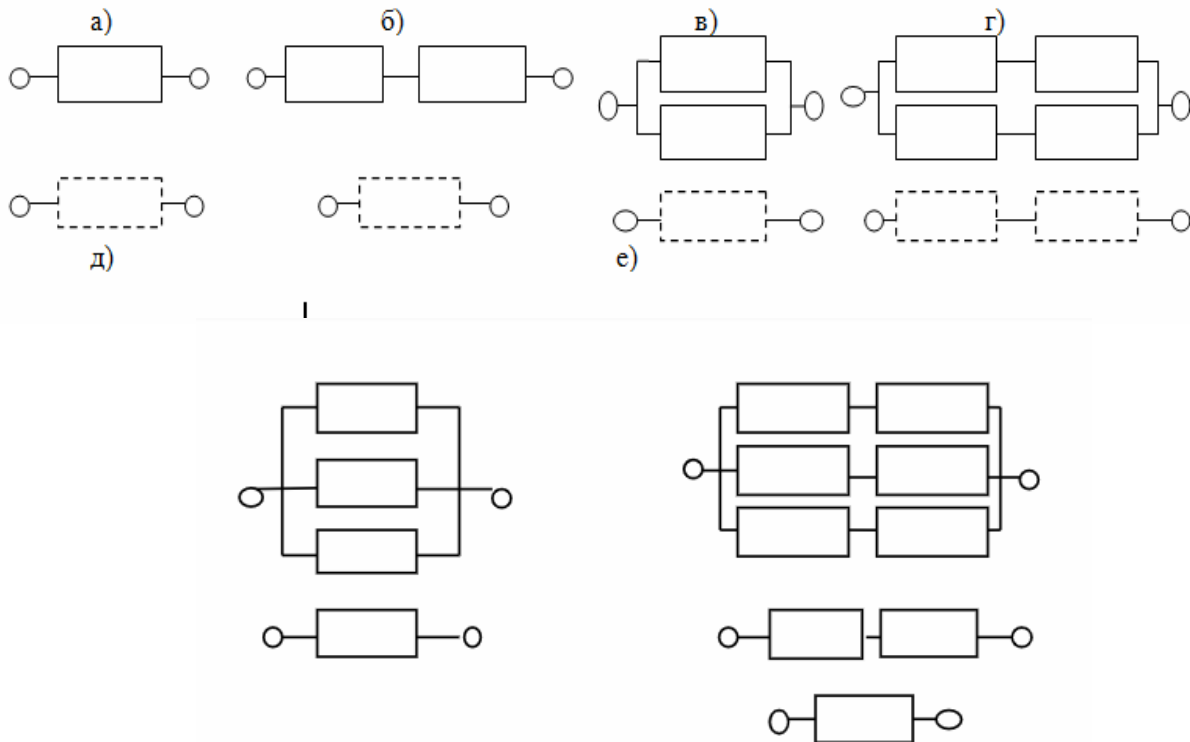
$$\pi_{kc} = p_0 + \beta_1 p_1 + \beta_2 p_2,$$

де для даної схеми КС $\beta_1 = \beta_2 = 0,5$; $p_0 = P_{КС}$.

При виході з ладу одного агрегату відключенням другого ми порушуємо точну умову процесу загибелі і розмноження. У розрахунках ця неточність нехтується, оскільки вона не впливає на результат. Використовуючи формули (3) і (4) при $n=4$,

$m=0, r=1$, обчислюємо (вважаючи $v = \frac{\lambda}{\mu}$)
 величини $\theta_0=1, \theta_1=4v, \theta_2=12v^2, \theta_3=24v^3, \theta_4=24v^4$, і ймовірність

$$p = \frac{1}{1 + 4v + 12v^2 + 24v^3 + 24v^4}; p_i = \theta_i p, i=1,2,3 \quad (8)$$



a) - Cx I: 1+1; б) - Cx II: 2+1; в) - Cx I 2+1; г) - Cx II: 4+2
 д) - Cx I: 3+1; е) - Cx II: 6+2+1

Рисунок 1 – Основні схеми з'єднання ГПА на одноцехових КС [9]

Введемо співвідношення, за умови, що в резерві один ГПА (СХ II 4+1). Тобто, $n=4, m=1, r=1, \theta_1=4v, \theta_2=16v^2, \theta_3=48v^3, \theta_4=96v^4, \theta_5=96v^5$,

Як і раніше,

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{i=0}^3 \theta_i}, p_i = \theta_i p_0, i=1,2,3 \quad (9)$$

За коефіцієнт продуктивності приймаємо

$$\pi_{КС} = \sum_{i=0}^3 \beta_i p_i, \quad (10)$$

де

$$\beta_0 = \beta_1 = \beta_2 = 1, \beta_3 = \beta_4 = 0,5, P_{ен} = p_0 + p_1 + p_2$$

Причому p_1 легко підрахувати, оскільки

$$\theta_0 = 1, \theta_1 = 4v, \theta_2 = 16v^2, \theta_3 = 64v^3,$$

$$\theta_4 = 192v^4, \theta_5 = 384v^5, \theta_6 = 384v^6$$

Тут

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{i=0}^4 \theta_i}, p_i = \theta_i p_0, i=1, \dots, 4 \quad (11)$$

Відношення інтенсивності і відновлення представлене через
$$\nu = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{T_b}{T_p}$$
 (число відмов час відновлення). Числові значення для агрегатів деяких типів за даними статистики наступні: ГТК-10-2 $\nu=0,003$; ГТК-10-4 $\nu=0,0227$; ГТН-16 $\nu=0,09289$; ГТНР-10 $\nu=0,0593$; ГТК-25і $\nu=0,02145$; ГТК-10і $\nu=0,0764$. Таким чином, було отримано ряд формул для розрахунку показників надійності найбільш поширених схем з'єднання ГПА на компресорних станціях [9].

Реалізуємо математичну модель за допомогою блочного програмування (VBA Excel).

I блок – розрахунок відношення інтенсивності й відновлення, порівняння математичних розрахунків зі статистичними. Для подальшого розрахунку

обираємо саме статистичні дані (для більшої універсальності моделі).

II блок – розрахунок коефіцієнту повної готовності за умови настання першого та другого випадків.

III блок – розрахунок коефіцієнту продуктивності за математичним очікуванням та імовірністю.

Формуємо графічні залежності на основі аналізу отриманих результатів (рис. 2), які дозволяють прогнозувати й аналізувати роботу системи в цілому за розрахованими показниками надійності.

За показником коефіцієнту повної готовності можна визначити найбільш оптимальну схему з'єднання ГПА (рисунок 1), за якої зберігається працездатність цілої системи навіть за умови настання першого та другого випадків.

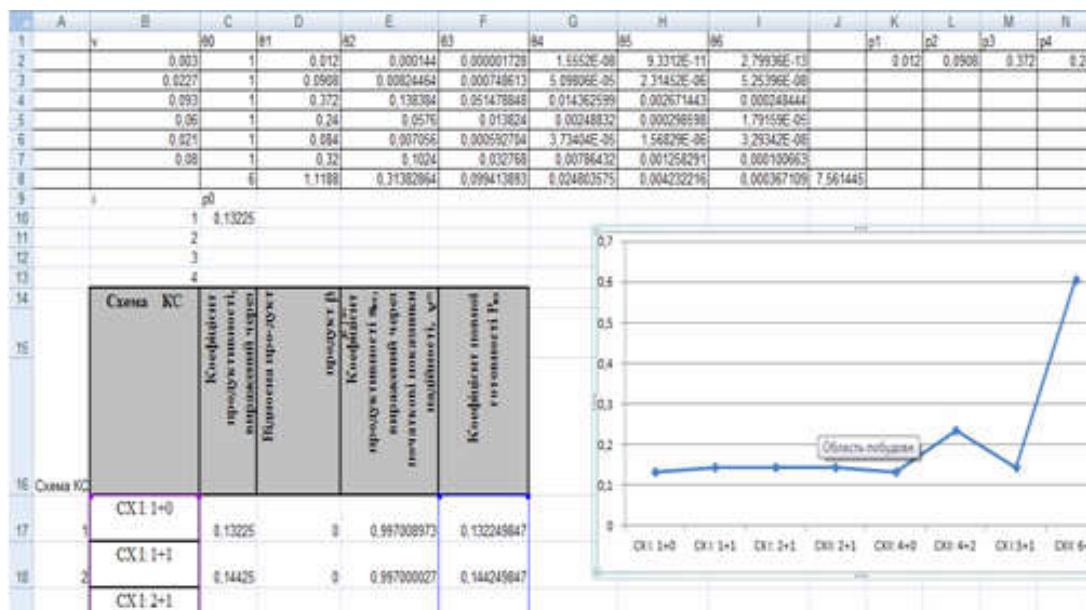


Рисунок 2 – Фрагмент вікна блочної програми з аналізом отриманих результатів

Перевірити правильність вибору можна, визначивши відповідність коефіцієнту продуктивності за математичним очікуванням (початкові показники надійності) коефіцієнту продуктивності за імовірністю (рис. 3).

У результаті аналізу графічної залежності розрахованих показників виявляємо відповідність показника повної готовності тієї чи іншої схеми ГПА коефіцієнту продуктивності, розрахованому за імовірністю. Разом із тим, відношення

імовірнісного показника надійності до показника за математичним очікуванням підтверджує адекватність моделі, оскільки найвищий показник надійності за

імовірністю відповідає найвищому показнику стану повної готовності системи.

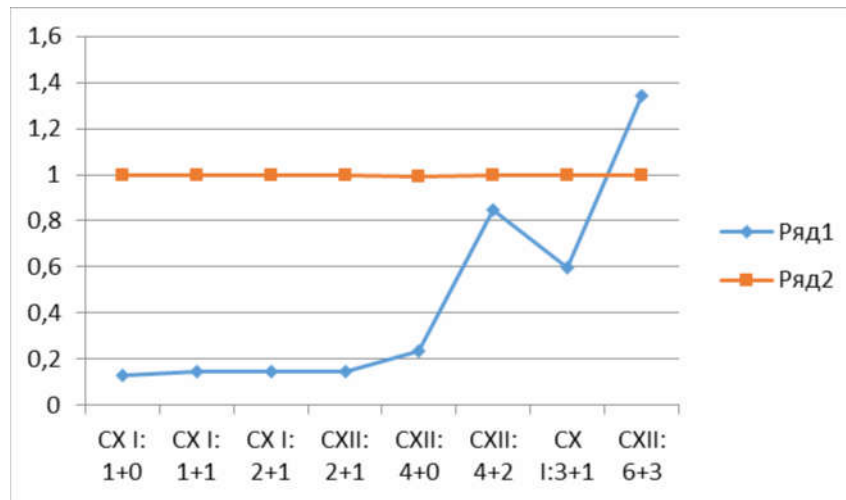


Рисунок 3 – Відношення коефіцієнта продуктивності за математичним очікуванням (початкові показники надійності) та коефіцієнту продуктивності за імовірністю

Висновок. В результаті проведеного дослідження реалізовано математичну модель розрахунку коефіцієнта повної готовності для вибору оптимальної схеми ГПА. Аналіз отриманих результатів дозволив виявити залежності між показниками надійності основних схем з'єднання газоперекачувальних агрегатів на компресорних станціях, які можна застосовувати для вибору оптимальної схеми з'єднання ГПА, перевірки роботи системи в цілому за наявності кількох типів відмов, прогнозування показників надійності системи. Це дає можливість перевірити правильність вибору оптимальної схеми ГПА за допомогою відповідності коефіцієнту продуктивності вираженого через початкові показники надійності.

Список використаних джерел

1. Горбійчук М. І., Когутяк М. І., Ткачешак Н. В. Математична модель системи «нагнітач природного газу-

антипомпажний клапан». *Дослідження та методи аналізу*. 2017. № 2(63). С. 79-89.

2. Матвійчук В. А., Веселовська Н. Р., Шаргородський С. А. Математичне моделювання новітніх технологічних систем: Монографія. Вінниця, 2021. 192 с.

3. Притула Н. Математичне моделювання перехідних процесів і системах транспортування газу. URL: <https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/8600abe0-e779-422a-a08f-0b495d670eb8/content>.

4. Притула Н. Розрахунок параметрів поточкорозподілу газу в газотранспортній системі (стаціонарний випадок). *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. 2007. Вип. 5. С. 146-155.

5. Заміховський Л. М., Зікратий С. В., Штаєр Л. О. Сучасний стан оцінки надійності систем автоматики газоперекачувальних агрегатів. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2017. № 2. С. 79-88.

6. Середюк М. Д., Ганджа М. Є. Вибір енергоефективних режимів експлуатації магістральних газопроводів за їх неповного завантаження. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2017. № 1. С. 67-72.

7. Чепуркін В. До побудови системи моделювання й оптимізації процесів транспортування природного газу. *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. 2007. Вип. 5. С. 156-169.

8. Олійник А. П., Фешанич Л. І. Математичне моделювання процесу деформування та напруженого стану трубопроводів під дією динамічних навантажень. *Вісник національного технічного університету «ХПІ»*. 2020. №1(3). С. 5-14.

9. Розрахунок надійності різних технологічних з'єднань ГПА. *Комплексна галузева методика: типові розрахунки показників надійності систем газонафтопостачання*. Івано-Франківськ, 2009. С. 20-27.

References

1. Horbiychuk M. I., Kohutyak M. I., Tkacheshak N. V. Matematychna model' systemy «nahnitach pryrodnoho hazu-antypompazhnyy klapan». *Doslidzhennya ta metody analizu*. 2017. № 2(63). P. 79-89. [in Ukrainian].

2. Matviychuk V. A., Veselovs'ka N. R., Sharhorods'kyu S. A. Matematychno modelyuvannya novitnikh tekhnolohichnykh system: Monohrafiya. Vinnytsya, 2021. 192 p. [in Ukrainian].

3. Prytula N. Matematychno modelyuvannya perekhidnykh protsesiv i systemakh transportuvannya hazu. URL: <https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/8600abe0-e779-422a-a08f-0b495d670eb8/content>. [in Ukrainian].

4. Prytula N. Rozrakhunok parametriv potokorozpodilu hazu v hazotransportniy systemi (statsionarnyy vypadok). *Fizyko-matematychne modelyuvannya ta informatsiyi tekhnolohiyi*. 2007. Vol. 5. p. 146-155. [in Ukrainian].

5. Zamikhovs'kyu L. M., Zykratyy S. V., Shtayer L. O. Suchasnyy stan otsinky nadiynosti system avtomatyky hazoperekachuval'nykh ahrehati. *Naukovyy visnyk Ivano-Frankivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu*. 2017. № 2. P. 79-88. [in Ukrainian].

6. Seredyuk M. D., Handzha M. YE. Vybir enerhoefektyvnykh rezhymiv ekspluatatsiyi mahistral'nykh hazoprovodiv za yikh nepovnoho zavantazhennya. *Naukovyy visnyk Ivano-Frankivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu*. 2017. № 1. P. 67-72. [in Ukrainian].

7. Chepurkin V. Do pobudovy systemy modelyuvannya y optymizatsiyi protsesiv transportuvannya pryrodnoho hazu. *Fizyko-matematychne modelyuvannya ta informatsiyi tekhnolohiyi*. 2007. Vol. 5. P. 156-169. [in Ukrainian].

8. Oliynyk A. P., Feshanych L. I. Matematychno modelyuvannya protsesu deformuvannya ta napruzhenoho stanu truboprovodiv pid diyeyu dynamichnykh navantazhen'. *Visnyk natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHPI»*. 2020. №1(3). P. 5-14. [in Ukrainian].

9. Rozrakhunok nadiynosti riznykh tekhnolohichnykh z'yednan' HPA. *Комплексна галузева методика: типові розрахунки показників надійності систем газонафтопостачання*. Івано-Франківськ, 2009. P. 20-27. [in Ukrainian].

УДК 004.412

DOI: 10.31471/1993-9981-2023-1(50)-101-112

ПРОГНОЗУВАННЯ ЯКОСТІ ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ЯКОСТІ ВИМОГ

М. В. Кузь¹, Б. С. Незамай^{2}, В. А. Ровінський¹, Н. Д. Подубинська²*

¹ Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, вул. Шевченка,
57, м. Івано-Франківськ, Україна

² Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул.
Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна

Оцінка якості програмного забезпечення є важливою складовою частиною його розробки з метою як забезпечення останньої, так і обґрунтованого порівняння програм чи їх версій. В даний час оцінка якості програмного забезпечення базується на низці міжнародних стандартів. При цьому, як правило, використовуються методи експертного оцінювання на основі метричного підходу оцінки якості програмних засобів. Прогнозування характеристик якості програмних засобів – це наступний крок забезпечення якості, що має уможливити одержання обґрунтованих досяжних характеристик якості, так і бути застосованим для маркетингових досліджень.

У роботі розглянуто існуючі підходи до прогнозного моделювання характеристик якості програмних засобів. Проаналізовано фактори, які визначають прогноз якості програмних засобів. Встановлено, що одним із основних факторів, які визначають якість розроблюваного продукту, є якість вимог до нього. Запропоновано метод прогнозування характеристик якості програмних засобів на основі характеристик якості вимог. Характеристики якості вимог встановлюються на етапі тестування (верифікації) вимог. Вихідними даними, на яких базується прогнозна модель, є характеристики якості, що одержуються методом історичних аналогій. Прогнозна модель передбачає просту лінійну залежність впливу характеристик вимог на прогнозовані характеристики програмного засобу, але при цьому враховується кількість вимог (величина проекту) та їх класифікація. Фактично, метод прогнозування полягає у встановленні впливу оцінки характеристики якості вимог на характеристики якості майбутнього проекту, і здійснюється методом експертного оцінювання. Одержані значення можуть бути використані як для обґрунтування досяжних характеристик якості, так і для встановлення тісніших “зворотніх зв’язків” з замовниками для покращення вимог до проекту.

Ключові слова: програмні засоби, якість, прогнозування характеристик якості, тестування вимог.

Software quality assessment is an important component of its development in order to ensure both the latest and reasonable comparison of programs or their versions. Currently, software quality assessment is based on a number of international standards. At the same time, as a rule, methods of expert evaluation are used based on the metric approach of assessing the quality of software tools. Forecasting the quality characteristics of software tools is the next step in quality assurance, which should allow both obtaining reasonable achievable quality characteristics and serving, for example, for marketing research.

The paper examines existing approaches to predictive modeling of software quality characteristics. The factors that determine the forecast of software quality are analyzed. It was established that one of the main factors that determine the quality of the developed product is the quality of the requirements for it. A method of forecasting software quality characteristics based on requirements quality characteristics is proposed. Quality characteristics of requirements are established at the stage of testing (verification) of requirements. The initial data from which the predictive model is based are the quality characteristics obtained by the method of historical analogies. The predictive model assumes a simple linear dependence of the influence of the characteristics of the requirements on the predicted characteristics of the software tool, but at the same time, the number of requirements (the size of the project) and their classification are taken into account. In fact, the forecasting method consists in the established influence of the assessment of the quality characteristics of the requirements on the quality characteristics of the future project, and is carried out by the method of expert evaluation. The obtained values can be used both to substantiate the achievable quality characteristics and to improve "feedback" with customers to improve project requirements.

Keywords: software tools, quality, forecasting of quality characteristics, requirements testing.

Вступ На даний час оцінка якості програмного забезпечення базується на низці міжнародних стандартів. В основі методів оцінки лежить метричний підхід на основі методів експертного оцінювання. Це відкриває певні можливості для спроб оцінити досяжні характеристики якості програмних засобів на етапі проектування та розроблення – тобто до прогнозування якості програмних засобів. В процесі огляду та аналізу існуючих опублікованих досліджень, які безпосередньо чи опосередковано стосуються прогнозу якості програмного забезпечення, виділено такі їх групи: аналіз ризиків, прогнозування помилок, та, власне, прогнозування характеристик якості програмного забезпечення. Описані спроби прогнозування характеристик якості програмного забезпечення містять один з трьох основних принципів: класичні методи прогнозування [1, 2], генетичні алгоритми [3, 4] або реалізації методів машинного

навчання [5, 6, 7]. Останні дозволяють прогнозувати на основі встановлення різного роду класифікацій та співвідношення розроблюваного програмного засобу з одержаною класифікацією. Найпоширеніший інструмент при цьому – методи дерев рішень та навчання штучних нейронних мереж. **Мета роботи** – проаналізувати існуючий стан прогнозування якості програмних засобів, запропонувати метод прогнозування якості програмних засобів на основі аналізу вимог.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій.

Описані нейромереві підходи до прогнозу якості базуються на SafetyCase методології (Safety computer aided softwareengineering) [8]. На рисунку 1 зображено узагальнену модель SafetyCase методології.

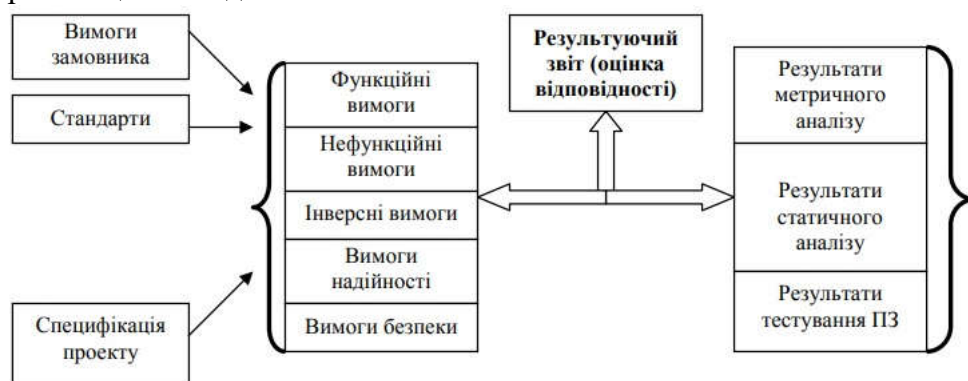


Рисунок 1 – Узагальнена модель SafetyCase методології [8]

Базовими частинами моделі при цьому є:

- профайл вимог, який формується базуючись на методиці розробки програмного забезпечення та відповідних стандартів якості для розробки програмних засобів;
- стандарти галузі, для якої розробляється програмне забезпечення;
- профайл результатів аналізу програмних засобів, який формується на

основі метричного аналізу результату розробки на поточний момент часу і результату тестування;

- оцінка відповідності результатів вимогам (профайл вимог).

Нейромеревий підхід використовується для спроб спрогнозувати складність та якість розроблюваного ПЗ на основі метрик етапу проектування і базується на навчанні багатоварових

перцептронів [4, 6]. Вхідними даними при цьому є метрики складності етапу проектування з поточними значеннями, прогнозовані значення складності етапу проектування, метрики якості етапу проектування прогнозовані значення.

Для оцінки результатів характеристик якості програмних засобів на основі роботи з метриками проектування описано [9] інтелектуальну систему опрацювання і прогнозування складності та якості програмного забезпечення (рисунок 3).

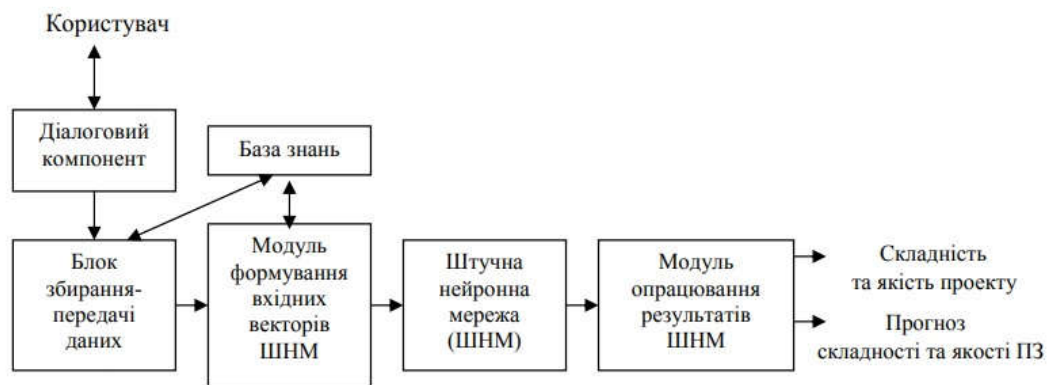


Рисунок 2 – Інтелектуальна система процесу прогнозування складності та якості програмних засобів [9]

Про описані методи використання нейромереж для прогнозування якості програмного забезпечення програмних засобів можна зробити наступні висновки:

- для навчання нейромереж буде потрібна велика база навчальних прикладів, з огляду на велике різноманіття задач, для розв'язку яких використовується програмне забезпечення;
- описані підходи часто дають прогноз оцінки якості, що базується на іншому прогнозі характеристик.

Безпосередньо стосується прогнозування якості програмного забезпечення прогнозування дефектів програмного забезпечення. Методи прогнозування, які оперують кількостями дефектів і не враховують при цьому структуру проекту, є так звані методами “чорного ящика” [10]. Методи прогнозування кількості дефектів, які враховують складність модулів і структуру програмного засобу в цілому називаються методами “білого ящика” (прозорі скриньки). Моделі росту надійності програмних засобів базуються на використанні функції надійності. Під

надійністю програмних засобів в даному випадку розуміють ймовірність того, що система за певних умов навантаження впродовж певного часу буде працювати певним чином. Для одержання цієї функції найчастіше використовують експотенційний розподіл. Параметри розподілу обираються на основі попереднього досвіду та поточної інформації про виявлені дефекти [10, 11].

Прогнозування кількості дефектів методом експертних оцінок може бути як простим (експрес методом), так і складним в реалізації з задіяванням опитування значної кількості спеціалістів, які беруть участь у проекті (на основі методів Делфі). Ідея методу прогнозування кількості дефектів в модулях програмних засобів полягає в тому, що в основу прогнозу покладається думка спеціалістів, що базується на їх професійному практичному досвіді роботи над поточним та аналогічними проектами. Даний метод корисний у випадку, коли прогнозування кількості дефектів має бути виконано на рівні всього проекту чи його великих частин [12]. Недоліком такого підходу прогнозування кількості дефектів є його

суб'єктивність та неможливість масштабувати на менші частини проекту.

Метод історичних аналогій базується на зборі та порівнянні метрик між минулими реалізованими та поточним проектом. Шляхом встановлення схожості між метриками роблять висновок про прогнозну схожість решти характеристик проектів. При цьому враховують тип програмного засобу, призначення модуля, складність та інші параметри і метрики. Аналіз при цьому може здійснюватись на всіх можливих рівнях – від проекту в цілому до конкретного класу [12]. Основним недоліком методу історичних аналогій є необхідність вибору проекту-аналогу. За невдалого вибору розбіжність між прогнозом та реальним станом будуть суттєвими за як завгодно доведеної аналогії між проектами.

Конструктивна модель якості використовує експертно-детерміновані підмоделі введення та усунення дефектів для побудови якісної моделі [12]. В рамках підходу спочатку оцінюється кількість нетривіальних вимог. Використовуються оцінки розміру програмного засобу, ряд атрибутів процесу автоматизації та проекту в цілому. Результатом моделі є оцінка (прогноз) кількості невиявлених дефектів на одиницю розміру [12, 13].

Класифікаційні методи дозволяють виявити програмні модулі з вищою ймовірністю помилок. Зазвичай вони використовуються на більш низьких рівнях деталізації, в тому числі і на рівні класів. Регресійні моделі прогнозування використовуються для вирішення задач, що вимагають дослідження відношення між двома і більше змінними, причому шуканим є кількість дефектів у програмному засобі. Параметри регресії оцінюються за метриками для уже наявних частин проекту (або попередніх ітерацій проекту). Одержана регресія використовується для прогнозування дефектів.

Для задач прогнозування дефектів найчастіше використовується логістична і лінійна регресія [13]. В основі такої моделі лежить допущення про те, що існує дискретний зовнішній фактор, який має визначальний вплив на досліджуваний процес, і цей вплив можна описати лінійною формулою

$$Z(t) = \alpha_0 + \alpha_1 X(t) + \varepsilon_t, \quad (1)$$

де: α_0 і α_1 – коефіцієнти регресії; ε_t – помилка моделі [14]. Причому в (1) для одержання прогнозного значення в певний момент часу треба знати значення цього фактору в цей же момент часу, що важко забезпечити на практиці.

Наступною групою методів, які використовуються для класифікації і прогнозування дефектів, є динамічні методи, які базуються на методах машинного навчання [2, 5, 13]. Першим кроком для побудови моделі прогнозування є створення екземплярів з архівів програмного забезпечення. Це використання системи контролю версій, системи відслідковування помилок, архівів файлів метрик. Кожний екземпляр може стосуватись частини проекту, модуля, класу чи функції в залежності від цілей та задач прогнозування, та від масштабу проекту. Кожний досліджуваний екземпляр має метрики і мітки, які вказують схильність до дефектів. Потім відбувається нормалізація даних за певною схемою. Після одержання нормалізованого набору даних відбувається навчання моделі прогнозування. Модель прогнозування може передбачати наявність помилок в новій ітерації програмного блоку, що розглядається. Прогнозування того, чи містить даний блок дефекти, є задачею класифікації. Прогнозування кількості помилок при цьому здійснюється за регресійною моделлю.

З допомогою моделі нечіткої логіки можна формалізувати величини та причинно-наслідкові зв'язки між прогнозованими параметрами та

впливаючими на них параметрами і сформулювати прогноз в умовах невизначеності параметрів прогнозування [13].

Дана методологія передбачає наступні кроки:

- визначення входів і виходів створюваної системи;
- визначення функцій приналежності для кожної метрики;
- розробка нечітких правил і одержання експертної думки;
- агрегування всіх окремих нечітких множин для різних правил;
- пошук чіткого вхідного значення шляхом дефазифікації.

Перевагою такого підходу є можливість використання як кількісних, так і якісних характеристик моделі. Недоліком є значна дуже швидке зростання складності при зростанні кількості входів.

Висвітлення невіршених раніше частин загальної проблеми

В результаті аналізу виявлено наступні недоліки: описані підходи орієнтуються на вузькі аспекти оцінки якості, наприклад, лише на прогноз кількості помилок; методи прогнозування стосуються конкретних класів задач і мов програмування; методи прогнозування складні та дорогі в впровадженні і використанні, що не гарантує якості прогнозу. Існуючі підходи до прогнозування якості програмних засобів не беруть до уваги якості вимог, що, на думку авторів, суттєво погіршує точність прогнозування.

Формулювання цілей статті.

На процес розробки програмного забезпечення впливає цілий ряд факторів, які роблять можливим прогнозування характеристик якості програмних засобів або навпаки, ускладнюють його і, відповідно, знижують якість проекту. Серед позитивних можна назвати наступні:

- наявність досвіду роботи команди розробників над схожими проектами;

поняття ‘схожих’ проєктів може бути розглянуте в рамках певної класифікації;

- високої якості технічного завдання на розробку програмних засобів; оцінка якості технічного завдання та їх вплив на прогнозовані характеристики якості програмних засобів можуть бути розглянуті;
- стабільність роботи команди; стійкість її “ядра”. Питання плинності кадрів на проєкті в рамках методики прогнозування характеристики якості може бути враховане;

- високий рівень покриття тестами проєкту в рамках інших метрик буде важливим фактором, який сприятиме якості моделі прогнозування;

- низькі ризики розробки програмного забезпечення незалежно від впровадженої моделі управління ризиками – це позитивний фактор для прогнозування характеристик якості;

- стабільність характеристик якості програмного засобу.

До факторів, вплив яких призведе до погіршення якості прогнозу слід вднести:

- велика складність проєкту, незалежно від моделі оцінки складності;
- зміни та велика кількість уточнень технічного завдання від замовників проєкту;
- значна плинність кадрів на проєкті;
- перше використання командою/ підрозділом/ фірмою мови/ бібліотеки/ фреймворку/тощо;

- перехід до нової методології (наприклад, від СКРАМУ на Керовану тестами розробку);

- низький відсоток покриття тестами як незалежний негативний фактор, що призводить до поганої якості прогнозування програмних засобів.

В цілому можна виділити наступні підходи до прогнозування якості:

- розробка класифікацій проєктів та програмних засобів, з метою прогнозування характеристик якості шляхом переносу “очікувань”, що може здійснюватись:

1) методами кластерного аналізу,

2) найрізноманітнішими методами машинного навчання,

3) розробкою штучних класифікацій на основі аналізу стандартів якості програмного забезпечення;

- прогнозування якості на основі пошуку взаємозв'язків між факторами:

1) аналіз впливу технічного завдання на прогноз якості;

2) кореляційні зв'язки між різними метриками та прогнозними характеристиками на ітераціях розвитку проекту;

- метод експертних оцінок: дану методологію доцільно використовувати у разі, коли наступні фактори ускладнюють можливість прийняти оптимальне рішення:

1) неможливо застосувати жодну модель прогнозування на основі відомої інформації;

2) наявність визначальних факторів, які не піддаються кількісній оцінці;

3) наявність декількох варіантів подальшого розвитку проекту та необхідність вибору одного з них;

4) неповторюваність та неможливість експериментальної перевірки прогнозованого перебігу подій і результатів процесів вирішення проблеми.

Проведений аналіз свідчить, що в ідеальних умовах, визначальним фактом, який впливає на адекватність прогнозу якості програмного засобу, є якість вимог на його розробку [9, 15]. Основна ціль статті – метод прогнозування якості програмних засобів на основі аналізу якості вимог.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Як свідчать численні джерела (наприклад, [1, 9, 13]), до 85% причин дефектів полягають у погано сформульованих вимогах, і до 50% дефектів при розробці програмних засобів знаходяться у вимогах. Це є підставою для врахування при прогнозуванні якості програмних засобів характеристик вимог. Першим етапом прогнозування в рамках

даної роботи пропонується історичний підхід (підхід історичних аналогій) – встановлення початкових прогнозних значень методом аналогій.

На основі [16] для розгляду задачі прогнозування якості програмних засобів розглянуто наступні типи вимог:

– функціональні вимоги:

1) бізнес-вимоги,

2) вимоги користувача,

3) функціональні вимоги;

- нефункціональні вимоги:

1) якісні характеристики (quality attributes):

a) зручність у використанні (usebility),

b) ефективність (effisency),

c) переносимість (portability),

d) цілісність (integrity);

2) продуктивність (performance),

3) документованість (documentation),

4) вимоги до середовища (environment).

3 метою оцінки вимог розглядаються основні характеристики вимог, а саме [16]:

1) – необхідність (necessary) оцінка того, наскільки важлива дана вимога для виконання основної функції розроблюваного програмного застосунку чи системи в цілому;

2) – повнота (complate) детальність опису вимоги;

3) – узгодженість (consistant) кожна вимога не має суперечити і повинна дублювати інші;

4) – однозначність (unambigious) безваріантне розуміння вимоги всіма учасниками процесів;

5) – тестованість (veryfible, testible) можливість перевірки, та підтвердження реалізації вимоги;

6) – відслідковуваність (traceble). В рамках даної роботи характеристика відслідковуваності звужується до розуміння узгодженості вимоги в ієрархії “бізнес-вимога – користувацька вимога – функціональна вимога” (хоча насправді це ширша характеристика [16]).

Відповідно до ДСТУ [17] користувацька якість програмного забезпечення базується на внутрішній та зовнішній якості (рис. 3).

Для оцінки впливу характеристики вимог на прогнозне значення характеристики якості введемо наступну шкали (таблиця 1). В таблиці під ‘хорошими вимогами’ розуміється вимоги, які відповідають здоровому глузду та

стандартам роботи згідно [17]. Будь-яка обґрунтована підозра на відсутню вимогу погіршить прогноз вказаних характеристик на умовну одиницю. Приклад характеристики впливів показано на рисунку 5.



Рисунок 3 – Характеристики якості програмних засобів [17]

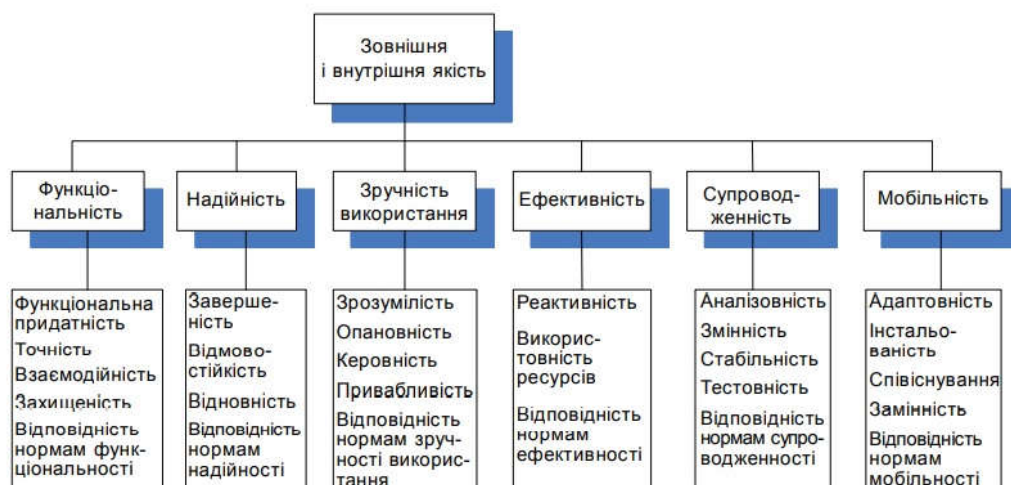


Рисунок 4 – Модель якості програмного забезпечення [17]

Результуючі показники на основі наведених взаємозалежностей коректуються за формулою [18]:

$$q = q_i + k_B \sum kpb + k_U \sum kpu + k_F \sum kpf + k_{NF} \sum kpnf, \quad (2)$$

де q – прогнозована метрика характеристики якості,

q_i – прогноз на основі історичного аналізу,

k_B – ваговий коефіцієнт впливу на прогноз якості бізнес вимог,

kpb – корекції прогнозу за бізнес-вимогами,

k_U – ваговий коефіцієнт впливу на прогноз якості вимог користувача,

kpu – корекції прогнозу за вимогами користувача,

k_F – ваговий коефіцієнт впливу на прогноз якості вимог до функцій,

k_{pf} – корекції прогнозу за вимогами до функцій,

k_{NF} – ваговий коефіцієнт впливу на прогноз якості нефункціональних вимог,

k_{pnf} – корекції прогнозу за нефункціональними вимогами.

В загальному випадку вагові коефіцієнти впливу обираються в залежності від прийнятої шкали та

масштабу проекту (кількості вимог). При цьому, якщо одержані значення прогнозів “впираються” в верх шкали, то робиться висновок, що ніщо не перешкоджає досягненню високої якості програмного продукту; якщо в малі – треба працювати з вимогами.

Таблиця 1 – Кількісна оцінка (шкалювання) впливу характеристик вимог на прогнозне значення характеристик якості програмних засобів

Характеристика вимоги	Оцінка	Характеристика оцінки
Необхідність	-1	Незрозуміло, наскільки важливою є дана вимога для цілі розроблюваного програмного засобу
	0	Опис відповідає вимогам
	+1	Надано вичерпне пояснення
Повнота опису	-1	Недостаній опис вимоги
	0	Опис формально відповідає вимогам до “хороших вимог”
	+1	Опис гранично ‘прозорий’ для можливого застосування
Узгодженість	-1	Необхідним є аналіз вимог на несуперечливість
	0	Опис відповідає вимогам до вимог на розробку
	+1	Надано вичерпне пояснення
Однозначність	-1	Необхідно складати глосарій, щоб виявити/уточнити можливі різбіжності
	0	Опис відповідає вимогам до вимог на розробку
	+1	Надано вичерпне пояснення
Можливість перевірки	-1	Інформація про можливості перевірки недостатньо
	0	Опис формально відповідає вимогам до “хороших вимог”
	+1	Наявна вся можлива інформація для перевірок до тестових прикладів включно, де це можливо
Відслідковуваність	-1	Інформації для відслідковуваності недостатньо
	0	Опис формально відповідає вимогам до “хороших вимог”
	+1	Роль конкретної вимоги в ієрархії вимог та цілях проекту зрозуміла

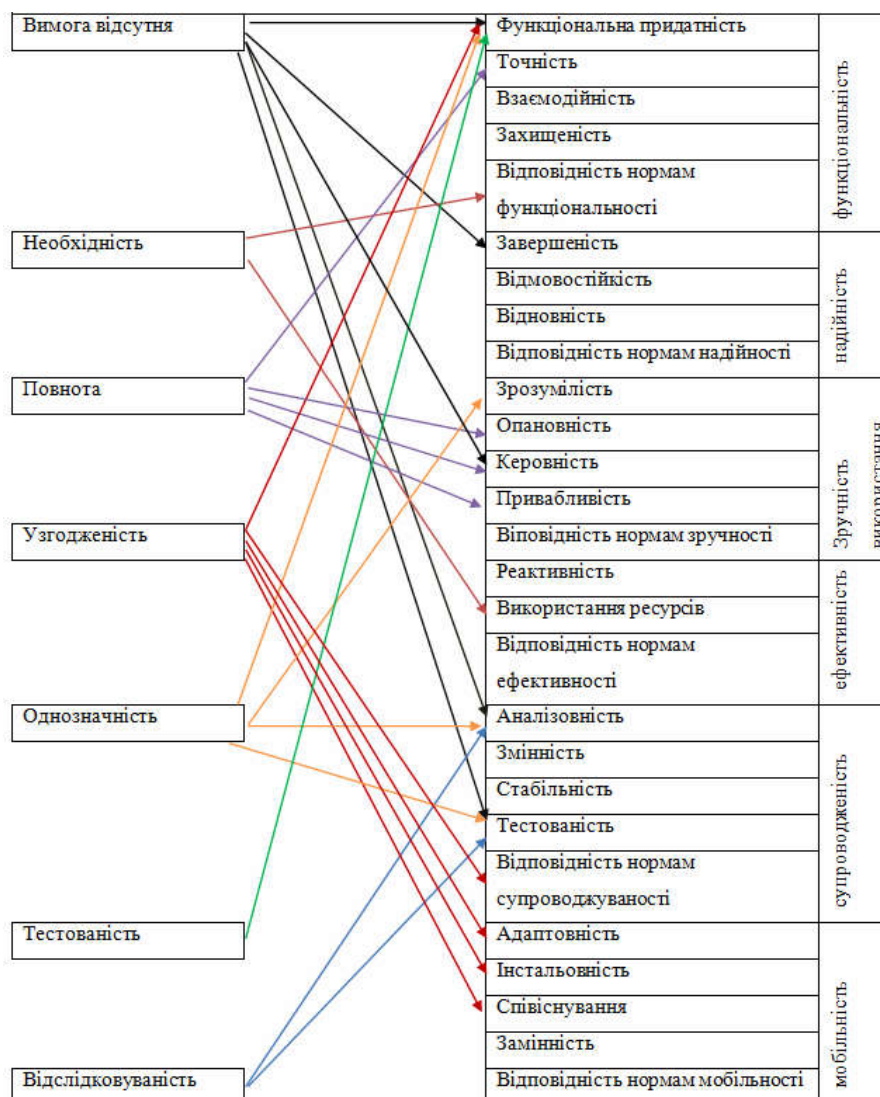


Рисунок 5 – Вплив на прогноз характеристик вимог користувача (приклад, розроблений для типового редактора коду)

Висновки

Проаналізовано існуючі підходи та методи прогнозування характеристик якості програмних засобів в рамках метричного підходу. Здійснено аналіз впливів, які впливають на якість розроблених програмних засобів. Встановлено, що за інших рівних вимог визначальний вплив на досяжні характеристики якості має якість вимог на розробку програмного засобу. Пропонований метод прогнозування характеристики якості вимог ґрунтується і відштовхується від етапу тестування

(верифікації) вимог. Запропоновано адаптовну шкалу для оцінки характеристик якості вимог для прогнозування характеристик якості програмних засобів. Метод історичних аналогій дає точку відліку характеристикам якості. Якість вимог дозволяє уточнити (власне, спрогнозувати) в рамках запропонованої прогностичної моделі прогнозовані значення характеристики якості конкретного майбутнього проекту. Одержані значення можуть бути використані як для обґрунтування досяжних

характеристик якості, так і для покращення зворотніх зв'язків з замовниками для покращення вимог до проекту.

Список використаних джерел

1. Lanubile F. and Visaggio G. Evaluating predictive quality models derived from software measures: lessons learned. *Journal of Systems and Software*. 1997. Vol. 38. Pp. 225–234.
2. Hong E., Wu C. Criticality models using SDL metrics set. *4 th Asia-Pacific Software Engineering and International Computer Science Conference*. 1997. P. 23–30.
3. Evett M., Khoshgoftar T., Chien P. and Allen E. GP-based software quality prediction, *Third Annual Genetic Programming Conference*. 1998. P. 60–65.
4. Zhang D., Tsai J.J.P. Machine learning and software engineering. *Software Quality Journal*. 2003. Vol. 11. Issue 2, P. 87–119.
5. Ganesan K., Khoshgoftar T., Allen E. Casedbased software quality prediction, *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering*. 2000. Vol. 10, N 2. P. 139–152.
6. Khoshgoftar T., Seliya N. Analogy-Based Practical Classification Rules for Software Quality Estimation. *Empirical Software Engineering*. 2003. Vol. 8. N 4. P. 325–350.
7. Khoshgoftar T., Allen E.B., Deng J. Using regression trees to classify fault-prone software modules, *IEEE Transactions on Reliability*, 2002, Vol. 51, N 4, P. 455–462.
8. Netkachova K. I. Safety Case Methodology: Architecting principles. *Радіоелектроніка і комп'ютерні системи*. Харків: НАУ"ХАІ". 2010. №7. С.109-112.
9. Говорущенко Т.О. Теоретичні та прикладні засади інформаційної технології оцінювання достатності інформації щодо якості у специфікаціях вимог до програмного забезпечення – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.06 «Інформаційні технології» (12 – Інформаційні технології) – Хмельницький національний університет, Українська академія друкарства, Львів, 2018, 310 с.
10. Білецький Т. П., Федасюк Д. В. Прогнозування дефектів у програмному забезпеченні алгоритмами глибинного навчання CNNта RNN. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2021. Т. 31. №2. С. 114 – 120.
11. Subnis P., Kadam A. Software reliability growth model with bug ccle and duplicate detection techniques. *Bharati Vidyapeech Deemed univ. CollegeofEng. PuneIndia*. 2013. P 345-349.
12. Яковина В. С. Симець І. І. Прогнозування дефектів програмного забезпечення ансамблем нейронних мереж. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2021. Т. 31, №6. С. 104 – 111.
13. Науково-технічні дослідження у галузі інформаційних технологій: колективна монографія / заг. ред. М. В. Кузь. – Академія технічних наук України. – Івано-Франківськ: Видавець Кушнір Г.М. 2022. Т1. 152 с.
14. Єріна А. М. Статистичне моделювання та прогнозування. Київ: КНТЕУ, 2001. 114с.
15. Незамай Б. С. Методика прогнозування якості програмних засобів, *Перспективи розвитку науки, освіти та технологій в контексті євроінтеграції: збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції (Полтава, 18 серпня 2022 р.)*. Полтава: ЦФЕНД. 2022. С. 65-66.
16. George Koelsch Herndon *Requirements Writing for System Engineering*. Virginia, USA. 2016. 409с.
17. ДСТУ ISO/IEC 9126-1:2013. Програмна інженерія: якість продукту Частина 1. Модель якості (ISO/IEC TR 9126-1:2001, IDT). (Національний стандарт України)

18. Незамай Б. С. Прогнозування якості програмного забезпечення. 2022 *International Conference on Innovative Solutions in Software Engineering (ICISSE) присвячена 50-річчю від дня народження професора Павла Федорука*. Івано-Франківськ, 30 листопада 2022 р. Івано-Франківськ: ПНУ. 2022. С. 86-89.

References

1. Lanubile F. and Visaggio G. Evaluating predictive quality models derived from software measures: lessons learned. *Journal of Systems and Software*. 1997. Vol. 38. P. 225–234.
2. Hong E., Wu C. Criticality models using SDL metrics set, *4 th Asia-Pacific Software Engineering and International Computer Science Conference*. 1997. P. 23–30.
3. Evett M., Khoshgoftar T., Chien P. and Allen E. GP-based software quality prediction, *Third Annual Genetic Programming Conference*, 1998, P. 60–65.
4. Zhang D., Tsai J.J.P. Machine learning and software engineering, *Software Quality Journal*. 2003. Vol. 11, Issue 2. P. 87–119.
5. Ganesan K., Khoshgoftar T., Allen E. Casedbased software quality prediction, *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering*. 2000. Vol. 10. No 2. P. 139–152.
6. Khoshgoftar T., Seliya N. Analogy-Based Practical Classification Rules for Software Quality Estimation, *Empirical Software Engineering*. 2003. Vol. 8, No 4. P. 325–350.
7. Khoshgoftar T., Allen E.B., Deng J. Using regression trees to classify fault-prone software modules, *IEEE Transactions on Reliability*. 2002. Vol. 51, No 4. P. 455–462.
8. Netkachova K. I. Safety Case Metodology: Architecting principles. *Радіоелектроніка і комп'ютерні системи*. Харків: НАУ"ХАІ". 2010. №7. С.109-112.
9. Hovorushchenko T.O. Teoretychni ta prykladni zasady informatsiynoyi tekhnolohiyi otsinyuvannya dostatnosti informatsiyi shchodo

yakosti u spetsyfikatsiyakh vymoh do prohrannoho zabezpechennya – Kvalifikatsiyna naukova pratsya na pravakh rukopysu. Dysertatsiya na zdobuttya naukovoho stupenya doktora tekhnichnykh nauk za spetsial'nistyuu 05.13.06 «Informatsiyni tekhnolohiyi» (12 – Informatsiyni tekhnolohiyi) – Khmel'nyts'kyi natsional'nyy universytet, Ukrayins'ka akademiya drukarstva, L'viv. 2018. 310 p. [in Ukrainian].

10. Bilets'kyi T. P., Fedasyuk D. V. Prohnozuvannya defektiv u prohrannomu zabezpechenni alhorytmamy hlybnyynoho navchannya CNNta RNN. *Naukovyy visnyk NLTU Ukrayiny*. 2021. T. 31, №2. S. 114 – 120. [in Ukrainian].

11. Subnis P., Kadam A. Software reliability growth model with bug ccle and duplicate detection techniques. *Bharati Vidyapeech Deemed univ. College of Eng. Pune India*. 2013. P 345-349.

12. Yakovyna V. S. Symets' I. I. Prohnozuvannya defektiv prohrannoho zabezpechennya ansablem neyronnykh merezh. *Naukovyy visnyk NLTU Ukrayiny*. 2021. T. 31, №6. P. 104 – 111. [in Ukrainian].

13. Naukovo-tekhnichni doslidzhennya u haluzi informatsiynykh tekhnolohiy: kolektyvna monohrafiya / zah. red. M. V. Kuz'. Akademiya tekhnichnykh nauk Ukrayiny. Ivano-Frankivs'k: Vydavets' Kushnir H.M. 2022. Vol 1. 152 p. [in Ukrainian].

14. Yerina A. M. Statystychno modelyuvannya ta prohnozuvannya. Kyiv: KNTEU. 2001. 114 p. [in Ukrainian].

15. Nezamay B. S. Metodyka prohnozuvannya yakosti prohrannykh zasobiv, Perspektyvy rozvytku nauky, osvity ta tekhnolohiy v konteksti yevrointehratsiyi: zbirnyk tez dopovidey mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi (Poltava, 18 08 2022.), Poltava: TSFEND. 2022. P. 65-66. [in Ukrainian].

16. George Koelsch Herndon Requirements Writing for System Engineering. Virginia, USA. 2016. 409 p.

17. DSTU ISO/IEC 9126-1:2013. Prohramna inzheneriya: YAKIST' PRODUKTU Chastyna 1. Model' yakosti (ISO/IEC TR 9126-1:2001, IDT). (Natsional'nyy standart Ukrayiny) [in Ukrainian].

18. Nezamay B. S. Prohnozuvannya yakosti prohramnoho zabezpechennya. 2022 International Conference on Innovative Solutions in Software Engineering (ICISSE) prysvyachena 50-richchyu vid dnya narodzhennya profesora Pavla Fedoruka. Ivano-Frankiv'k, 30 11 2022. Ivano-Frankivs'k: PNU. 2022. p. 86-89. [in Ukrainian].

ВИМОГИ ДО ПОДАНИХ МАТЕРІАЛІВ

Рукописи статей, що подаються до університетських науково-технічних журналів, повинні бути актуальними, зрозумілими, повноцінними, виконаними на високому науково-технічному рівні і відповідати нафтогазовому профілю, містити наукову і практичну новизну, викликати інтерес у читачів наукової спільноти.

Рекомендації щодо написання статті:

Стаття не повинна містити елементів плагіату (включаючи перевидання статті або її частин, подання одночасно в декілька журналів, використання текстів та ілюстрацій без дозволу їх правовласника) і самоплагіату.

Стаття має бути написано грамотно без орфографічних і граматичних помилок.

Стаття повинна бути завершеною, не фрагментарною, логічною, спрямованою на вирішення конкретних цілей і задач нафтогазової проблематики.

Стаття повинна висвітлювати важливі регіональні дослідження, які не можуть бути проведені в іншій місцевості і відображають конкретні географічні, кліматичні, соціально-економічні проблеми.

Стаття здатна як доповнити і розширити бази Scopus і Web of Science, так і зробити новий внесок у нафтогазову галузь науки, сформувані нові дискусійні теми, відкрити нові перспективи співпраці в науковій галузі.

Авторам рекомендується перевіряти кінцеві варіанти статті на помилки, перш ніж повернути виправлений рукопис до редакції, оскільки врахування запізнених поправок не гарантоване.

Відповідальність за зміст статті і коректність викладеного матеріалу несе автор.

До редакції стаття подається он-лайн, після попереднього узгодження тематики статті з проблематикою журналу:

<https://nv.nung.edu.ua> – журнал: "Науковий вісник ІФНТУНГ",
<https://rrngr.nung.edu.ua> - "Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ",
<https://nge.nung.edu.ua> - "Нафтогазова енергетика",
<https://mpky.nung.edu.ua> - журнал "Методи та прилади контролю якості",
<https://eung.nung.edu.ua> - журнал "Науковий вісник ІФНТУНГ. Серія: Економіка та управління в нафтовій і газовій промисловості";
<https://ogpe.nung.edu.ua> – журнал «**Journal of Hydrocarbon Power Engineering**»;
<https://ebzr.nung.edu.ua> – журнал «Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування».

Електронна пошта редакції: redntv@nung.edu.ua

Стаття повинна бути структурована за такими пунктами:

1. **Назва статті** відтворює її зміст та привертає увагу наукової спільноти, в тому числі міжнародної. Містить не більше 12 слів.
2. **Кількість авторів** – не більше 6 (причому не більше 4 з однієї організації).
3. **Анотація** викладена в одному абзаці (не поділяється на підрозділи), зрозуміла, містить короткий опис проведених досліджень, розкриває основні результати роботи; ціль статті сформульовано коректно.
Обсяг анотації разом із ключовими словами - не менш як 1800 знаків (українською та англійською).
4. **Ключові слова** конкретизують інформацію про дослідження, але не узагальнюють її. Складаються з 3-6 слів, словосполучень, відокремлених за допомогою крапки з комою, не повторюються в назві статті, відповідають змісту роботи.
5. **Вступ** дає змогу оцінити сучасний стан проблеми на світовому рівні. Завершується вступ формулюванням **мети роботи** – «виявити...», «охарактеризувати...», «з'ясувати...».
6. **Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій**, в яких започатковано вирішення проблеми і на які посилається автор.
7. **Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми**, якій присвячується стаття.
8. **Формулювання цілей статті** (постановка задачі і методів досліджень, що розглядаються).
9. **Висвітлення основного матеріалу дослідження** з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Розділ дає змогу побачити, що в дослідженнях виключені всі можливі джерела помилок, автор володіє інформацією про всі чинники, що впливають на результат.
Кількість дослідів повинна бути достатньою, об'єм вибірок має відповідати аналогічним дослідженням, опублікованим в міжнародних наукових виданнях. Дослідні дані обробляють коректними статистичними методами (перевагу надавати якомога сучаснішим багатомірним). Аналіз результатів містить достатнє статистичне обґрунтування і відповідає загально визначеним нормам нафтогазової галузі.
10. **Висновки** з проведеного дослідження (наукова новизна, теоретичне і практичне значення):
 - лаконічні, конкретні, відповідають меті і назві статті;
 - дослівно не дублюються у всіх мовних версіях анотацій;
 - не починаються «черговою фразою» (напр., «В результаті проведених досліджень були отримані такі...»);
 - міститься нова інформація, відсутнє перефразування будь яких розділів статті;
 - аргументи логічні і структуровані, дані статті підтверджують і обґрунтовують висновки;
 - висвітлюють перспективи подальшої роботи у даному напрямку;
 - відображають те, як результати корелюють з очікуваннями і більш ранніми дослідженнями. У висновках вказано чи стаття підтверджує чи спростовує вже існуючі теорії і як дослідження вплинуло на процес збагачення наукових знань.

11. Список використаних джерел слід оформити відповідно до правил для авторів, заснованих на ДСТУ 8302:2015 "Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання». Також **необхідно подати REFERENCES транслітерацію** літератури

Ресурс для транслітерації з української мови - <http://ukrlit.org/transliteratsiia/>

Рекомендований обсяг рукопису статті - від 7 стор.

Електронний варіант статті повинен задовольняти таким вимогам:

1. **Стаття набирається** у редакторі Microsoft Word на аркуші формату 210x297 мм, поля (мм): верхнє – 20, нижнє – 25, лівє – 30, правє – 15.

2. Порядок набору:

УДК (Times New Roman (Cyr), кегль 11, без абзацного відступу, вирівнювання – зліва).

Назва статті (Arial (Cyr), кегль 14, bold, прописом, без абзацного відступу, вирівнювання – по центру, відбивки зверху і знизу – 12 пт).

Ініціали, прізвище автора (співавторів) (Times New Roman (Cyr), кегль 11, bold italic, без абзацного відступу, вирівнювання – по центру). Прізвище відповідального за подання статті автора повинно бути позначене зірочкою.

Назва організації, її повна поштова адреса, адреса електронної пошти (Times New Roman (Cyr), кегль 11, italic, без абзацного відступу, вирівнювання – по центру, відбивка знизу – 12 пт). Якщо автори статті представляють декілька організацій, то необхідно для кожної організації вказати її назву, повну поштову адресу і адресу електронної пошти.

Анотації українською та англійською мовами – кегль (менший від основного тексту статті) – 10, інтервал - 1,0. Об'єм анотації - 1800 знаків кожною мовою.

Основний текст набирається таким чином:

2.1. Стиль “звичайний”, гарнітура - Times New Roman (Cyr), кегль 12, абзацний відступ – 0,75 см, міжрядковий інтервал – 1,0.

2.2. Відбивки по тексту не використовуються за винятком підрозділів статті (підрозділи, підпункти і т. п. відокремлюються відбивками “перед” – 9, “після” – 6).

3. Для набирання **формул** використовується редактор формул **Math Type (версії не нижче 6.x або Equation v. 3.0)** Стилї: **Text** – Times New Roman (Cyr), **Function** – Times New Roman (Cyr), italic, **Variable** - Times New Roman (Cyr), italic, L.C.Greek – Symbol, italic, **Symbol** – Symbol, italic, **Matrix/Vector** - Times New Roman (Cyr), **Number** - Times New Roman (Cyr). Розміри: **Full** – 11, **Subscript/Superscript** – 8, **Sub-Subscript/Superscript** – 8, **Symbol** – 14, **Sub-Symbol** – 10.

Забороняється використовувати вбудований у MS Office версій 10 і вище редактор формул!

Для наочності рекомендується формули відокремлювати відбивками зверху і знизу – 6 пт.

Формули компонуються так, щоб вони вміщалися в колонку шириною 80 мм!!!

4. Таблиці повинні бути складені лаконічно, зрозуміло і містити мінімальні відомості, необхідні для ілюстрування суті статті. Таблиці не повинні дублювати результати, представлені в інших місцях рукопису (наприклад, у вигляді графіків).

Назва таблиці: Times New Roman (Сур), кегль 11, bold, без абзацного відступу, вирівнювання – по центру, відбивки зверху і знизу – 6 пт.

Таблиці компонуються так, щоб вони вміщалися в колонку шириною 80 мм або 165мм!!!

5. Ілюстрації до статей (схеми, графіки, діаграми) повинні бути виконані у растровому (векторному) форматах (BMP, TIF, PCX, JPG, GIF, CDR) і додаватися окремим файлом.

Забороняється використовувати графічний редактор MS WORD!!!

Ілюстрації типу фотографій повинні бути відскановані з роздільною здатністю не менше 400 dpi і/або додаватися в оригіналі.

Усі рисунки, графіки і фотографії можуть бути чорнобілими, кольоровими або півтоновими.

Ілюстрації, перескановані з періодики та накреслені вручну, не приймаються!!!

Підписи до ілюстрацій: Times New Roman (Сур), кегль 10, bold, без абзацного відступу, вирівнювання – по центру. **Написи в ілюстраціях** виконуються гарнітурою Arial.

Забороняється використовувати аббревіатуру в назвах.

6. Використані автором літературні джерела, на які є посилання у тексті, наводяться у кінці статті загальним списком у порядку згадування. До нього слід включати лише джерела, на які є посилання у статті. У тексті порядковий номер (згідно списку) літературного джерела, на яке посилаються, подається у квадратних дужках, наприклад, [4]. Обов'язково оформити **REFERENCES**.

Додатково до тексту статті додається файл з довідкою про авторів (для присвоєння індексу DOI кожній публікації).

ДОВІДКА ПРО АВТОРА

1. Автор (укр. і англ.) _____
(Прізвище, ім'я, по батькові)

2. Науковий ступінь _____

3. Вчене звання, ID ORCID _____

4. Місце роботи (повна назва організації та адреса укр. і англ.) _____

5. Контактний номер телефону _____

6. Електронна пошта _____

7. Поштова адреса з індексом (на яку необхідно направити примірник збірника наукових праць)

8. Назва публікації (укр. і англ.) _____

9. Анотації двома мовами з ключовими словами (укр., англ.) _____

10. Дата подання статті до редакції _____

Якщо авторів декілька, довідку можна оформити одну з чітким вказанням прізвищ і місця роботи українською і англійською мовами.

Рукописи, які не враховують наведені вище вимоги, повертаються автору без розгляду по суті. Датою надходження рукопису статті в редакцію вважається дата надсилання її кінцевого варіанта.