

ІТЕ ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Щоквартальний науково-практичний журнал

1'2023

Видання засновано Харківським державним політехнічним університетом у 1998 році
(з листопада 2000 р. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»)

Держвидання
Свідчення Міністерства інформації України
КВ № 3427 від 18.08.1998 р.
Свідчення перереєстровано у Міністерстві юстиції України
КВ № 24313-ПР від 06.02.2020 р.

Журнал включений
до переліку наукових фахових видань України
(Наказ Міністерства освіти та науки України №886 від 02.07.2020)

Категорія журналу «Б»

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор

Л. Л. Товажнянський, член-кор. НАН України

Технічний редактор

К. О. Горбунів, канд. техн. наук, доц., професор НТУ "ХПІ"

ЧЛЕНИ РЕДКОЛЕГІЇ:

О. П. Арсенєва, д-р техн. наук, професор, професор каф. АКІТ
ХНУМГ

В. С. Ведь, д-р техн. наук, професор, зав.каф. ІТПА НТУ "ХПІ"

П. О. Некрасов, д-р техн. наук, професор, зав.каф. ТЖПБ НТУ "ХПІ"

П. О. Качанов, д-р техн. наук, професор, зав.каф. АУТС НТУ "ХПІ"

Г. Л. Хавін, д-р техн. наук, професор, професор НТУ "ХПІ"

А. М. Ганжа, д-р техн. наук, професор, професор каф. ТЕТ НТУ "ХПІ"

О. Б. Аніпко, д-р техн. наук, професор каф. інженерно-авіаційного
забезпечення, Харківський національний університет Повітряних сил
ім. І.Кожедуба

В. А. Маляренко, д-р техн. наук, професор, професор каф. СЕЕМ
ХНУМГ

П. О. Капустенко, канд.техн. наук, професор, акад. Академії
будівництва України

Ференс Фридлер, PhD, professor, Pázmány Péter Katolikus
üniversitet, Budapest, Угорщина

Шарифа Рафидан Ван Алві, PhD, professor, Малайзійський університет
технології

Девид Дж. Кукулька, PhD, професор, Державний університет Нью-
Йоркського коледжу у Буффало, США

Євген Кеніг, д-р техн. наук, професор, університет Падерборна,
Германія

Мартін Пікон-Нуньєс, PhD, professor, Університет Гуанахуато,
Мексика

Петар Варбанов, старший науковий співробітник NETME Center -
SPIL, Технологічний університет Брно, Чеська республіка

Майкл Уолмслі, BE, PhD ChemEng, Університет Вайкато, Окленд,
Нова Зеландія

П. Стехлік, PhD, проф., Директор Технологічного університету Брно
(Чеська республіка)

Панос Сеферліс, PhD., проф., університет Арістотеля, Салоніки,
Греція

Журнал включений до зовнішніх інформаційних систем, у тому
числі в бібліографічну базу даних OCLC WorldCat (США),
індексується пошуковими системами Google Scholar і Crossref;
зарєєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази
даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Офіційний сайт видання: <http://ite.khpi.edu.ua>

EDITORIAL BOARD

The editor-in-chief

L. L. Tovazhnyansky, Corresponding Member of the NAS of
Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor, NTU "KhPI"

Technical editor

K. O. Gorbunov, PhD, Assistant Professor, professor NTU "KhPI"

THE MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:

O. P. Arsenyeva, Doctor of Technical Sciences, Prof., Kharkov
National University of Municipal Economy named after O.M.
Beketova

V. E. Ved, Doctor of Technical Sciences, Prof., NTU "KhPI"

P. O. Nekrasov, Doctor of Technical Sciences, Prof., NTU "KhPI"

P. O. Kachanov, Doctor of Technical Sciences, Prof., NTU "KhPI"

G. L. Khavin, Doctor of Technical Sciences, Prof., NTU "KhPI"

A. M. Hanzha, Doctor of Technical Sciences, Prof., NTU "KhPI"

O. B. Anipko, Doctor of Technical Sciences, Prof., Kozhedub Kharkiv
Air Force University

V. A. Malyarenko, Doctor of Technical Sciences, Prof., Kharkov
National University of Municipal Economy named after O.M.
Beketova

P. O. Kapustenko, PhD, professor NTU "KhPI"

Ferenc Friedler, PhD, professor,

Pázmány Péter Catholic University, Budapest, Hungary

Sharifah Rafidah Wan Alwi, PhD, professor, Universiti Teknologi

Malaysia,

David J. Kukulka, PhD., professor, State University of New York

College at Buffalo, USA

Eugeniy Kenig, prof., dr.-ing., University of Paderborn, Germany

Martín Picón Núñez, PhD, professor, university of Guanajuato,

Mexico

Petar Sabevarbanov, Senior Researcher, NETME Centre -

SPIL, BRNO University of Technology, Czech Republic

Michael Walmsley, BE, PhD ChemEng, University of Waikato, New

Zealand

Petr Stehlik, PhD., professor, Director of Institute BRNO University

of Technology, Czech Republic

Panos Seferlis, PhD., professor, Aristotle University of Thessaloniki,

Thessaloniki, Greece

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:

61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2

Тел. 70-76-958

ЗМІСТ

ЕНЕРГЕТИКА ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЙ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

<i>Бабак Т. Г., Биканов С. М., Горбунов К. О., Пономаренко Є. Д., Соловей Л. В.</i> Теплова інтеграція потоків процесу розділення гетероазеотропної суміші фурфурол-вода на двох відгінних колонах.....	3
<i>Кошельнік О. В., Гойсан С. Б., Пугачова Т. М., Круглякова О. В., Павлова В. Г.</i> Перспективи використання альтернативних видів палива для опалення регенеративних повітрянагрівачів доменних печей.....	14

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

<i>Лубков М. В., Мосійчук К. О.</i> Метод чисельного моделювання у слабопроникних анізотропних пластах з метою збільшення нафтовіддачі.....	22
---	----

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

<i>Чернявський А. В., Григоров А. Б.</i> Експлуатаційні властивості палива для судноплавства, отриманого з вторинної полімерної сировини.....	33
<i>Дзевочко О. М., Подустов М. О., Дзевочко А. І.</i> Розробка нової апаратурно-технологічної схеми процесу сульфатування сумішей органічних речовин.....	41
<i>Снурніков Д. В., Красніков І. Л., Бабіченко А. К.</i> Дослідження водогрійного котла системи централізованого теплопостачання як об'єкта керування.....	51
<i>Селіхов Ю. А., Горбунов К. О.</i> Інтеграція роботи теплоенергетичної установки.....	62

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ

<i>Oleg B. Anipko</i> Spatial interpretation of A. Einstein's energy equation	69
<i>Сторінка редколегії.....</i>	73

Затверджено Вченою радою НТУ «ХПІ» (протокол № 2 від 28.02.2023 р.)

Інтегровані технології та енергозбереження / Щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків : НТУ «ХПІ», 2023. – № 1. – 76 с.

Збірник наукових та науково-практичних статей з питань енергозбереження та сучасних технологій різноманітних галузей промисловості.

© Національний технічний університет «ХПІ», 2023

Бабак Т.Г., доцент, Биканов С.М., к.техн.н., доцент, Горбунов К.О., к.техн.н., професор, Пономаренко Є.Д., доцент, Соловей Л.В., ст.викл.

ТЕПЛОВА ІНТЕГРАЦІЯ ПОТОКІВ ПРОЦЕСУ РОЗДІЛЕННЯ ГЕТЕРОАЗЕОТРОПНОЇ СУМІШІ ФУРФУРОЛ-ВОДА НА ДВОХ ВІДГІННИХ КОЛОНАХ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

Ключові слова: теплова інтеграція, пінч-аналіз, ректифікація, гетероазеотропні суміші, порогова задача, оптимізація тепломережі

Промислове розділення азеотропних сумішей є одним з найбільш поширених процесів в хіміко-технологічних системах. Ректифікація азеотропних сумішей потребує спеціальних методів організації цього процесу у зв'язку з особливостями процесу кипіння. Азеотропні суміші мають сильні відхилення від закону Рауля для ідеальних розчинів, у відповідності до яких парціальний тиск компонента насиченої пари пропорційний мольній частці відповідного компонента у розчині. При цьому, за третім законом Коновалова, розчинам, склад рівноважної пари над якими співпадає із складом розчинів, відповідають точки екстремуму на кривій залежності загального тиску пари (або температури кипіння) від складу розчину. Азеотропні суміші поділяються на позитивні та негативні, в яких температура кипіння азеотропу відповідає відповідно мінімуму або максимуму на ізобарі діаграми рівноважності рідина-пара для бінарної системи.

Суміш фурфурол-вода належить до класу частково-розчинних (гетероазеотропних) сумішей позитивних азеотропних сумішей. В цьому випадку ректифікація проводиться на двох колонах або в одноколонному апараті, при забезпеченні одним, а може і двома відстійниками, що дозволяють у значний мірі полегшити процес розділення за рахунок природнього процесу самовідділення шарів [1, 2].

Будь який процес ректифікації потребує велику потужність енергоносіїв як для нагріву та випаровування, так і для конденсації пар та охолодження технологічних потоків. У випадку розділення гетероазеотропних сумішей використання відстійників потребує додаткових енерговитрат – на охолодження для забезпечення температури ефективного розшарування гетероазеотропної суміші при відповідній температурі та нагріву фракції для повернення до колони.

Усі ці фактори є підставами для використання теоретично обґрунтованої та практично доведеної методики до проектування енергоефективних хіміко-технологічних систем, якою є пінч-аналіз [3, 4, 5]. Принципи пінч-аналізу щодо побудування систем оптимального використання теплової енергії технологічних потоків та, відповідно, споживання енергії зовнішніх енергоносіїв мають місце у різноманітних сферах виробництва, тобто у нафтохімічній, харчовій, фармацевтичній, хімічній [6, 7, 8, 9, 10].

Теплова інтеграція потоків процесу розділення суміші фурфурол-вода, що реалізована на різних варіантах технологічних схем (з використанням однієї ректифікаційної колони) розглянуто у роботах [11, 12, 13].

Розглянемо процес ректифікації гетероазеотропної суміші фурфурол-вода на двох колонах. Енерго-функціональна схема процесу зображена на рис 1. Початкова суміш фурфурол-вода з витратою $F = 6840$ кг/год, температурою $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ та масовою часткою фурфуролу $\bar{x}_F = 0,5$ подається до установки. Разом з потоками парів G_1 , G_2 , які утворюються в обох колонах, потік вихідної суміші поступає до теплообмінника-змішувача, де пари повністю конденсуються та суміш охолоджується до температури $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, та відправляється до відстійника, де суміш розділяється на легку та важку фракції. Після того, як легка фракція з витратою Φ_1 з масовою часткою фурфуролу $\bar{x}_{\text{лф}} = 0,095$ нагрівається у теплообміннику до температури $98\text{ }^{\circ}\text{C}$ (температура кипіння азеотропу) і подається до верхньої частини першої колони, у якій відбувається поділ цієї суміші на пару з температурою конденсації $98\text{ }^{\circ}\text{C}$, з витратою G_1 і з масовою часткою фурфуролу $\bar{y}_1 = 0,317$ та кубовий залишок з витратою W_1 і масовою часткою фурфуролу $\bar{x}_{W1} = 0,0002$. Кубова рідина першої колони, майже чиста вода, яка безперервно відводиться при температурі $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, охолоджується у холодильнику і направляється до ємності з температурою $30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Важка фракція з відстійника, яка збагачена фурфуролом, з витратою Φ_2 та з масовою часткою фурфуролу $\bar{x}_{\text{вф}} = 0,932$ нагрівається у теплообміннику до температури $99\text{ }^{\circ}\text{C}$, після чого подається у якості флегми до другої колони, де поділяється на пару з витратою G_2 , температурою $99\text{ }^{\circ}\text{C}$ і масовою часткою фурфуролу $\bar{y}_2 = 0,4$ та кубовий залишок. Цей кубовий залишок є майже чистим фурфуролом. Він постійно виходить з кубу колони при температурі $161\text{ }^{\circ}\text{C}$, витратою W_2 й масовою часткою фурфуролу $\bar{x}_{W2} = 0,999$ та потрапляє до охолоджувача, після якого надходить далі до ємності з температурою $30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для забезпечення процесу випаровування в колонах та підігріву флегми використовується водяна пара високого тиску. В теплообміннику-змішувачі, холодильниках дистилату та кубового залишку охолоджуючою утилітою є вода.

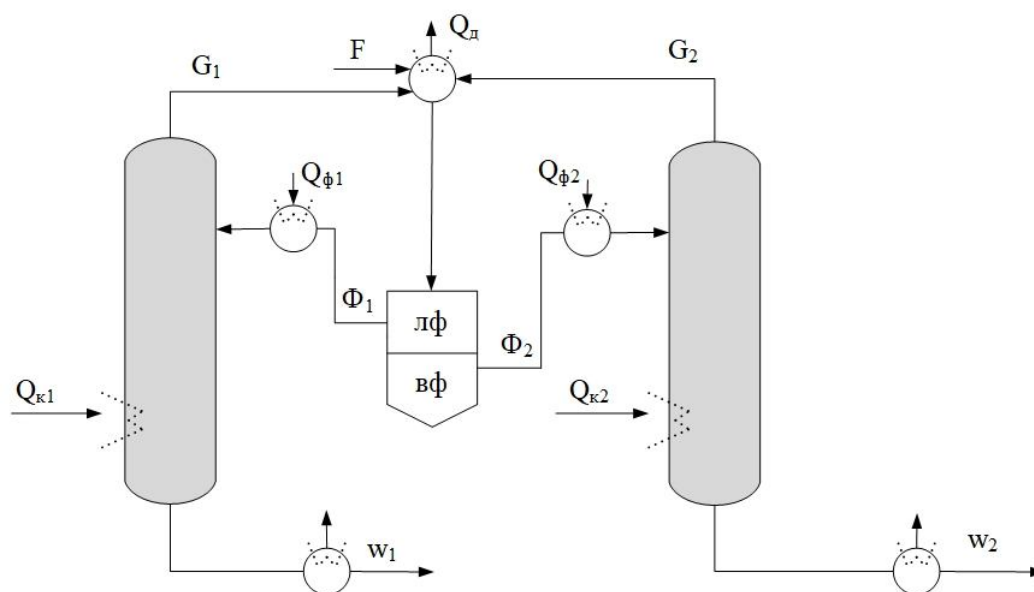


Рисунок 1 – Енерго-функціональна схема процесу ректифікації гетероазеотропної суміші фурфурол-вода на двох відгінних колонах

На основі даних було розраховано матеріальний та тепловий баланс процесу, виділено технологічні потоки та обчислено їх характеристики, що представлені у табл. 1.

Таблиця 1 – Таблиця технологічних потоків процесу ректифікації суміші фурфурол-вода

Потік	Температура		Витрата G , кг/с	Питома теплоємність c , кДж/(кг·°C)	Питома теплота пароутворення r , кДж/кг	Теплове навантаження, кВт
	T_p , °C	T_k , °C				
Пара з колони G_1	98	98	0,405	–	1699	688,617
Пара з колони G_2	99	99	0,12	–	1551	185,758
Конденсат пари з колони 1	98	40	0,405	3,381	–	79,492
Конденсат пари з колони 2	99	40	0,12	3,172	-	22,409
Кубовий залишок W_1	100	30	0,945	4,179	–	277,714
Кубовий залишок W_2	161	30	0,951	1,663	–	207,066
Кипіння в кубі колони 1	100	100	0,405	–	1699	731,379
Кипіння в кубі колони 2	161	161	0,12	–	1551	297,947
Флегма Φ_1	40	98	1,355	3,941	–	309,598
Флегма Φ_2	40	99	1,07	1,831	–	115,668
Початкова суміш F	30	40	1,9	2,92	–	55,48

Оцінюючи теплове навантаження встановленого на установці теплообмінного обладнання, можна зробити висновки, що існуюча схема ректифікаційної установки потребує для функціонування 1454,592 кВт потужності гарячих утиліт та 1405,576 кВт потужності холодних утиліт. При цьому рекуперація енергії складає 55,48 кВт за рахунок постачання потоку початкової суміші безпосередньо до теплообмінника-змішувача.

Аналізуючи характеристики технологічних потоків, треба відмітити, що процеси випаровування в кубовій частині колон не мають серед інших потоків партнерів для теплообміну. З іншого боку, логічно залишити теплообмінник-змішувач як пристрій, але можна зменшити його навантаження. Якщо для суміші, що виходить з теплообмінника-змішувача, вимагати повну відсутність парової фази, тобто вона повинна бути рідинною сумішшю фурфурол-вода, можна підвищити температуру виходу з теплообмінника-змішувача до 98 °C.

Таким чином, отримаємо ще один технологічний потік – потік, що прямує з теплообмінника-змішувача до відстійника, при цьому його треба охолодити від 98 °C до 40 °C, тобто до температури розділення у відстійнику. Назвемо цей потік Φ . Для нього були розраховані витрата, масова частка фурфуролу та питома теплоємність.

Для теплової інтеграції з використанням принципів та засобів пінч-аналізу сформуємо нову таблицю потоків (табл. 2), до якої включимо потік суміші з теплообмінника змішувача до відстійника, потоки живлення до верхньої частини обох колон та потоки кубових залишків. Скоригуємо позначення в термінах пінч-аналізу, тобто будемо називати початкову температуру потоку температурою постачання, а кінцеву – ціловою температурою, відповідно T_s та T_t . Далі розрахуємо потокову теплоємність $CP = \Delta H / |T_s - T_t|$, кДж/кг. Величину ΔH , кДж, в подальшому будемо називати зміною ентальпії, або зміною тепловмісту потоку.

Таблиця 2 – Потокова таблиця для пінч-інтеграції

№ потоку	Найменування потоку	Тип потоку	T_s , °C	T_t , °C	G , кг/с	CP , кДж/кг	ΔH , кВт
1	Ф	гарячий	98	40	2,425	7,298	423,305
2	W_1	гарячий	100	30	0,945	3,967	277,714
3	W_2	гарячий	161	30	0,951	1,581	207,066
4	Φ_1	холодний	40	98	1,355	5,338	309,598
5	Φ_2	холодний	40	99	1,07	1,96	115,668

Для отримання цільових значень потужності зовнішніх утиліт було побудовано складені криві та розглянуто варіанти їх відносного розміщення на температурно-ентальпійній діаграмі при варіації значення $\Delta T_{\min}$, тобто мінімальної відстані між гарячою та холодною складеною кривою по осі температури.

Було встановлено, що при $\Delta T_{\min} = 14,4665$ °C зникає потреба в гарячих утилітах, тобто ми маємо порогову задачу (рис. 2). В цьому випадку не має сенсу зменшувати мінімальної температурної різниці в теплообмінному обладнанні $\Delta T_{\min}$, бо при цьому необхідна мінімальна потужність зовнішніх утиліт, а також рекуперації, залишається постійною. Температура пінча гарячих потоків дорівнює 98 °C, холодних потоків – 83,5335 °C

Для розташування теплообмінного обладнання треба обрати близьке до отриманого, але таке значення $\Delta T_{\min}$, що можна використовувати при розрахунку теплообмінників, тому оберемо $\Delta T_{\min} = 14$ °C. В цьому разі буде відбуватися невеличке зближення складених кривих уздовж осі ентальпії і ми будемо отримувати потребу в охолодженні потоків вище та нижче пінча, а саме 3,41 кВт вище пінча та 479,44 кВт нижче пінча. За означенням пінч розподіляє систему теплових потоків на дві термодинамічно збалансовані підсистеми, одна з яких є джерелом тепла, а інша стоком тепла. Розподілення системи потоків при використанні $\Delta T_{\min} = 14$ °C – це використання псевдо пінча, через який буде перетікати невелика кількість теплової енергії.

Побудуємо сіткову діаграму, з урахуванням температури гарячих потоків на лінії псевдо пінча 98 °C, холодних потоків – 84 °C та розташуємо теплообмінне обладнання.

Вище пінча маємо жорстке обмеження на відсутність гарячих утиліт, тому розміщення теплообмінного обладнання проводиться спочатку від псевдопінча, а потім корегується від боку найвищих температур потоків. Після встановлення теплообмінника Т2 на потоці 3 є надлишок теплової енергії на 3,405 кВт більший, ніж може прийняти потік 4 для досягнення цільової температури. Тому корегуємо температуру потоку 3 на виході з теплообмінників Т3, Т2. Тобто, потік 3 не охолоджується до температури 98 °C, а тільки до 100,2 °C.

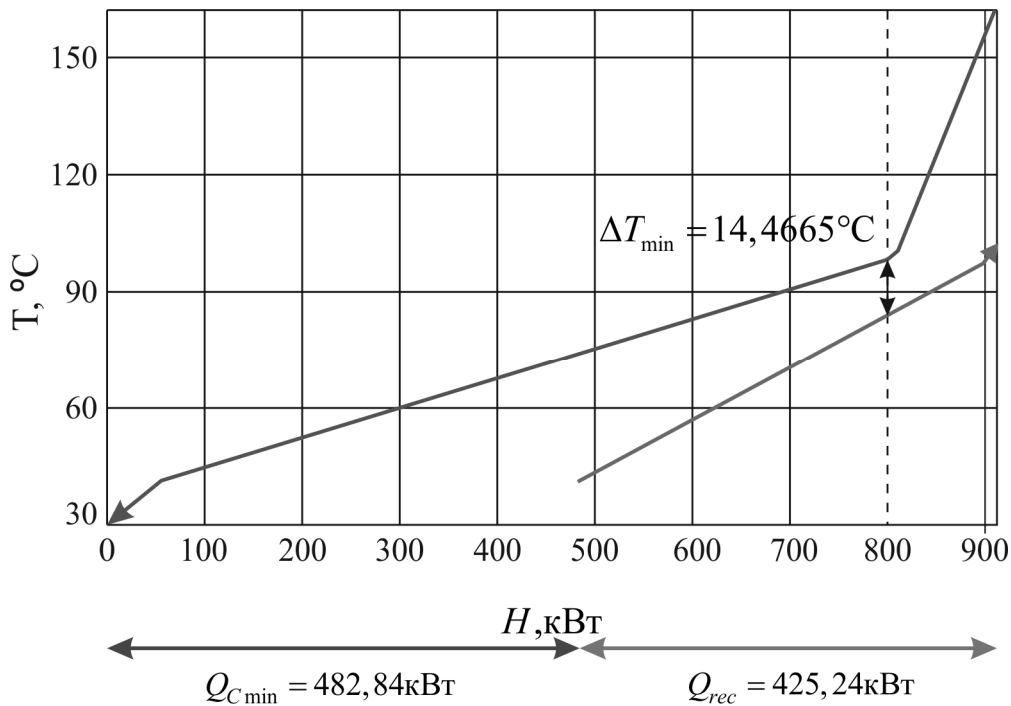


Рисунок 2 – Складені криві процесу для $\Delta T_{\min} = 14,4665 \text{ }^{\circ}\text{C}$

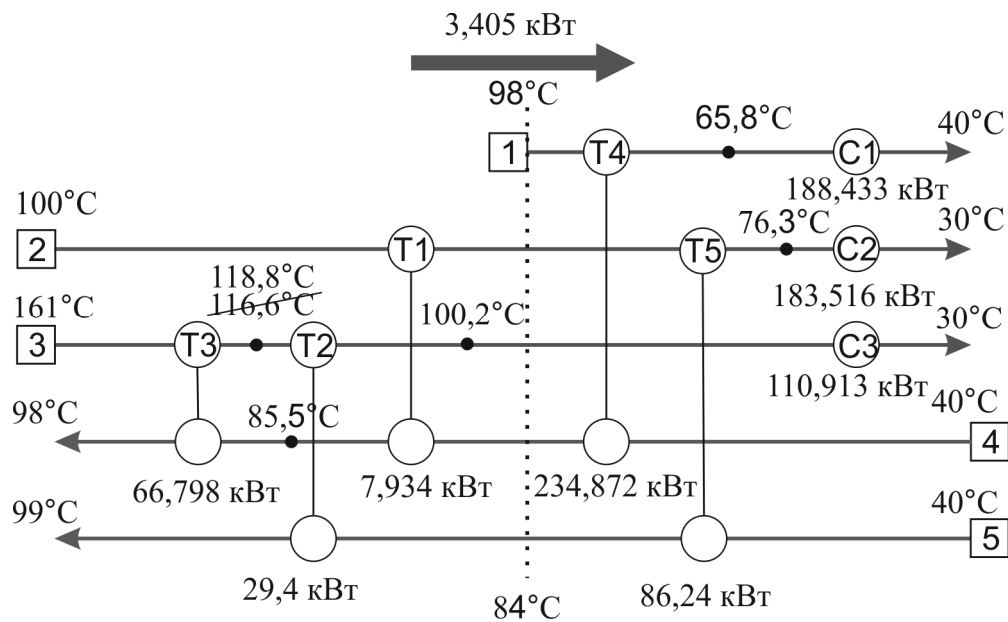


Рисунок 3 – Сіткова діаграма з розташуванням теплообмінного обладнання з використанням псевдопінча $14 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Принципово, можна зупинитися на одержаному проекті, але можна побачити подальші кроки удосконалення, а саме, спробувати спростити схему розташування теплообмінного обладнання. Тобто відмовитися від встановлення теплообмінних апаратів з малим навантаженням, що було реалізовано у роботі [14].

Скористуємося аналізом мережі щодо наявності циклів. Цикл у мережі надає ступені вільності для зміни навантаження теплообмінників в рамках циклу, але при цьому треба контролювати порушення $\Delta T_{\min}$, що обране для системи в цілому.

В даному випадку виявлено цикл, що зображено на рис. 4

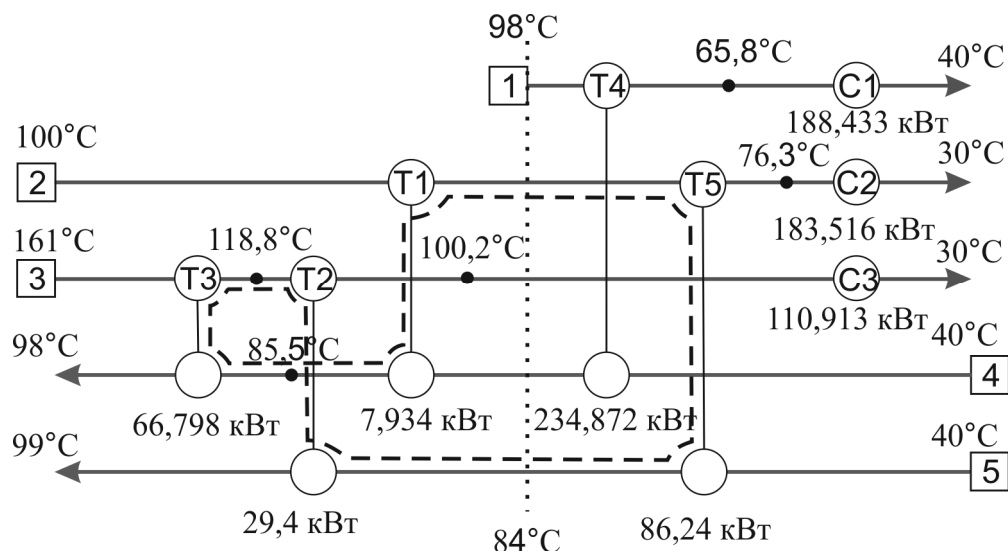


Рисунок 4 – Цикл через псевдопінч

В межах циклу фігурує теплообмінник T1 з малим навантаженням 7,934 кВт, тому було прийняте рішення його позбутися, що призводить до розбиття циклу. Навантаження цього пристрою потрібно розподілити між теплообмінниками циклу, що передбачає також коригування температури за частиною мережі, що входить до циклу. Отриману мережу представлено на рис. 5.

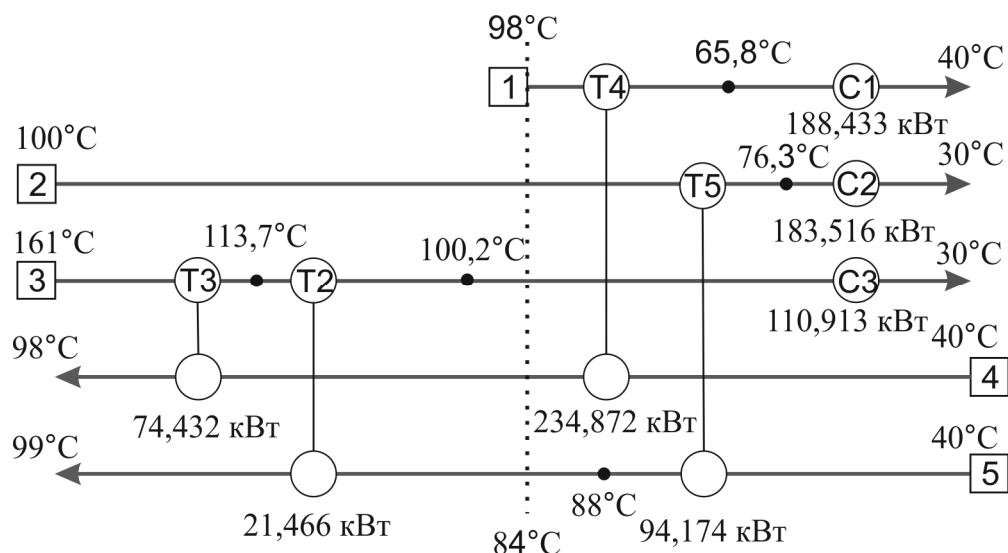


Рисунок 5 – Оптимізація мережі теплообмінників за рахунок розбиття циклу

На теплообміннику T2 відбувається порушення $\Delta T_{\min}$, але в даному випадку немає ступенів вільності для відновлення $\Delta T_{\min}$. Це дуже не шкодить проекту в цілому, бо

порушення стосується тільки одного з теплообмінних апаратів. Також треба відмітити, що прийнята величина $\Delta T_{\min}$ досить велика і прийнятна навіть для трубчатих теплообмінних пристроїв.

У відповідності до сіткової діаграми було розраховане теплообмінне обладнання в рамках пропозицій фірми Alfa Laval (табл. 3).

Таблиця 3 – Теплообмінне обладнання до установці

Назва	Тип пластин	Кількість пластин	Площа, m^2	Ціна, грн
T2	TL3P	19	1,309	60 847,08
T3	T5M	13	1,092	59 292,9
T4	T5M	26	2,184	75 235,93
T5	TL3B	25	1,863	65 153,73
C1	T5M	41	1,764	68 524,31
C2	T5M	22	1,848	69 866,63
C3	TL3P	37	2,549	82 628,78

Підводячи підсумки, при реалізації проекту модернізації отримуємо 980,332 кВт замість 1405,576 потужності зовнішніх утиліт для охолодження, 1029,326 кВт замість 1454,592 для підігріву. Сумарна потужність рекуперації завдяки інтеграції складає 425,244 кВт.

Література

1. Коган В.Б. Азеотропная и экстрактивная ректификация / В.Б. Коган. – Л.: ГОСХИМИЗДАТ, 1961. – 316 с.
2. Багатуров С.А. Основы теории и расчета перегонки и ректификации. – Изд. 3-е, перераб. / С.А. Багатуров. – М.: Химия, 1974. – 440 с.
3. Smith R. Chemical Process Design and Integration. Chichester. McGraw-Hill, John Wiley and Sons Ltd. 2005. 687 p.
4. Kemp Ian C. Pinch Analysis and Process Integration. – OXFORD. Elsevier Ltd. 2007. 396 p.
5. Смит Р., Клемеш Й., Тобажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульєв Л.М. Основы интеграции тепловых процессов. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2000. – 456 с.
6. Тобажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульєв Л.М., Болдырев С.А., Арсеньєва О.П., Тарновский М.В. Интеграция тепловых процессов на установке первичной переработке нефти АВТ А 12/2 при работе в зимнее время. // Теоретические основы химической технологии. – 2009. – Т.43. – №6. – С. 665–676.
7. Ulyev L., Vasiliev M., Boldyryev S. Process integration of crude oil distillation with technological and economic restrictions. // Journal of Environmental Management, 2018, vol. 222, pp. 454–464. doi: 10.1016 /j.jenvman. 2018.05.062.
8. Babak T., Golubkina O., Ponomarenko Y., Solovey L., Khavin G. The investigation of the process streams in the multi-effect evaporation plant for the concentration of sorghum syrup // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – V. 3, No. 8 (93) (2018). – Energy Saving Technologies and Equipment, – P. 52–58.

9. Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульев Л.М., Болдырев С.А. Улучшение тепловой интеграции на сахарных заводах // Интегровані технології та енергозбереження. – Харків – НТУ «ХПІ». – 2002. – №2. – С. 11–16.

10. Биканов С.М., Бабак Т.Г., Данилов Ю.Б., Биканова В.В. Застосування методу пінч-аналізу при проведенні теплової інтеграції процесу випарювання хлориду магнію // Интегровані технології та енергозбереження. – Харків НТУ «ХПІ». – 2020. – №1. С. 13–21.

11. Ульєв Л.М., Гарєв А.О., Миронов А.М. Пінч-аналіз процесу ректифікації суміші фурфурол-вода // Вісник НТУ «ХПІ». – 2013. – № 9. – С. 90–97.

12. Бабак Т.Г., Голубкина О.А., Малышко Ю.В., Пономаренко Е.Д. Модернизация процесса ректификации частично растворимой азеотропной смеси фурфурол-вода // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2016. – №29 (1201). – С. 38–42.

13. Бабак Т.Г., Балюк С.В., Голубкина О.А., Пономаренко Е.Д. Оптимизация энергопотребления ректификационной установки на основе интеграции тепловых потоков // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2016. – №29 (1201). – С. 43–48.

14. Бабак Т.Г., Быканов С.Н., Соловей Л.В., Ус В.А. Оптимизация потребления энергоносителей в процессе выпаривания водного раствора гидроксида натрия // Вісник Національного Технічного Університету «ХПІ». Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів, 2018. – №40(1316). – С. 33–38.

Bibliography (transliterated)

1. Kohan V.B. Azeotropnaia y ekstraktyvnaia rektyfikatsyia / V.B. Kohan. – L.: HO-SKhYMYZDAT, 1961. – 316 p.

2. Bahaturov S.A. Osnovi teoryy y rascheta perehonky y rektyfikatsyy. – Yzd. 3-e, pererab. / S.A. Bahaturov. – M.: Khymyia, 1974. – 440 p.

3. Smith R. Chemical Process Design and Integration. Chichester. McGraw-Hill, John Wiley and Sons Ltd. 2005. 687 p.

4. Kemp Ian C. Pinch Analysis and Process Integration. – OXFORD. Elsevier Ltd. 2007. 396 p.

5. Smyt R., Klemesh Y., Tovazhnyanskyy L.L., Kapustenko P.A., Ulyev L.M. Osnovy yntehratsyy teplovykh protsessov. – Kharkov: NTU «KhPY». 2000. – 456 p.

6. Tovazhnyanskyy L.L., Kapustenko P.A., Ulyev L.M., Boldirev S.A., Arseneva O.P., Tarnovskyi M.V. Yntehratsyia teplovykh protsessov na ustanovke pervychnoi pererabotke nefty AVT A 12/2 pry rabote v zymnee vremia. // Teoretycheskye osnovi khymycheskoi tekhnolohyy. – 2009. – Т.43. – №6. – Р. 665–676.

7. Ulyev L., Vasiliev M., Boldyryev S. Process integration of crude oil distillation with technological and economic restrictions. // Journal of Environmental Management, 2018, vol. 222, pp. 454–464. doi: 10.1016 /j.jenvman. 2018.05.062.

8. Babak T., Golubkina O., Ponomarenko Y., Solovey L., Khavin G. The investigation of the process streams in the multi-effect evaporation plant for the concentration of sorghum syrup // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – V. 3, No. 8 (93) (2018). – Energy Saving Technologies and Equipment. – P. 52–58.

9. Tovazhnyanskyy L.L., Kapustenko P.A., Ulyev L.M., Boldyryev S.A. Uluchshenye teplovoi yntehratsyy na sakharnikh zavodakh // Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia. – Kharkiv – NTU «KhPI». – 2002. – №2. – P. 11–16.

10. Bykanov S.M., Babak T.H., Danylov Yu.B., Bykanova V.V. Zastosuvannia metodu pinch-analizu pry provedenni teplovoi intehratsii protsesu vypariuvannia khlorydu mahniiu // Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia. – Kharkiv NTU «KhPY». – 2020. – №1. P. 13–21.

11. Ulyev L.M., Hariev A.O., Myronov A.M. Pinch-analiz protsesu rektyfikatsii sumishi furfurool-voda // Visnyk NTU «KhPI». – 2013. – № 9. – P. 90–97.

12. Babak T.H., Holubkyna O.A., Malishko Yu.V., Ponomarenko E.D. Modernyzatsiia protsesa rektyfikatsyy chastychno rastvorymoi azeotropnoi smesy furfurool-voda // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Zbirnyk naukovykh prats. Seriia: Innovatsiini doslidzhennia u naukovykh robotakh studentiv. – Kh.: NTU «KhPI». – 2016. – №29 (1201). – P. 38–42.

13. Babak T.H., Baliuk S.V., Holubkyna O.A., Ponomarenko E.D. Optymyzatsiia enerhopotrebleniia rektyfikatsyonnoi ustanovky na osnove yntehratsyy teplovikh potokov // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Zbirnyk naukovykh prats. Seriia: Innovatsiini doslidzhennia u naukovykh robotakh studentiv. – Kh.: NTU «KhPI». – 2016. – №29 (1201). – P. 43–48.

14. Babak T.H., Bykanov S.N., Solovei L.V., Us V.A. Optymyzatsiia potrebleniia enerhonosytelei v protsesse viparyvannia vodnoho rastvora hydroksyda natryia // Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu «KhPI». Seriia: Innovatsiini doslidzhennia u naukovykh robotakh studentiv, 2018. – №40(1316). – P. 33–38.

УДК 66.045.53

Бабак Т.Г., доцент, Биканов С.М., к.техн.н., доцент, Горбунов К.О., к.техн.н., професор, Пономаренко Є.Д., доцент, Соловей Л.В., ст. викл.

ТЕПЛОВА ІНТЕГРАЦІЯ ПОТОКІВ ПРОЦЕСУ РОЗДІЛЕННЯ ГЕТЕРОАЗЕОТРОПНОЇ СУМІШІ ФУРФУРОЛ-ВОДА НА ДВОХ ВІДГІННИХ КОЛОНАХ

Процес ректифікації азеотропних сумішей має місце в багатьох галузях хімічної промисловості. Цей процес потребує значних енерговитрат, як на підігрів та випаровування технологічних потоків, так і на конденсацію пари та охолодження продуктів. Витрати зовнішньої енергії суттєво залежать від засобів організації процесів розділення.

Пінч-аналіз є одним з сучасних методів проектування хіміко-технологічних систем з метою оптимального використання зовнішніх джерел енергії шляхом максимальної теплової інтеграції технологічних потоків системи, враховуючи обмеження конкретного виробництва, вимоги екологічної безпеки та захисту довкілля.

В даній роботі розглядається тепла інтеграція процесів розділення гетероазеотропної суміші фурфурол-вода на двох колонах, в кожній з яких легкокиплячим є азеотроп, а низькокиплячим – один з компонентів.

Було розраховано тепловий та матеріальний баланс ректифікаційної установки та сформовано таблицю даних потоків, тобто проведено екстракцію даних хіміко-технологічної системи. Серед загальної множини теплових потоків було обрано підмножину для інтеграції

Для обраних теплових потоків, що підлягають тепловій інтеграції, було побудовано складені криві та проаналізовано їх взаємне розташування на температурно-ентальпійній діаграмі. Цей аналіз показав, що для визначеного значення мінімальної температурної різниці в теплообмінному обладнанні $\Delta T_{\min}$, отримуємо порогову задачу. Проблему було сформульовано для значення $\Delta T_{\min}$, трохи меншого, ніж порогове значення, що привело до невеликого збільшення споживання зовнішніх енергоносіїв.

Було розглянуто опції подальшого удосконалення мережі теплообмінників та було виявлено наявність циклу через псевдопінч, що дало змогу прибрати теплообмінник з низьким навантаженням та перерозподілити це навантаження на інші. Відновлення $\Delta T_{\min}$ в даному випадку неможливе, бо маємо жорсткі умови по відсутності гарячих утиліт.

Продемонстрована значна економія витрат потужності зовнішніх утиліт.

Для модернізації було підібране сучасне теплообмінне обладнання фірми Alfa Laval на усі позиції, що потребується.

Ключові слова: тепла інтеграція, пінч-аналіз, ректифікація, гетероазеотропні суміші, порогова задача, оптимізація тепломережі.

Бабак Т.Г., доцент, Быканов С.Н., к.техн.н., доцент,
Горбунов К.А., к.техн.н., професор, Пономаренко Е.Д., доцент, Соловей Л.В., ст. преп.

ТЕПЛОВАЯ ИНТЕГРАЦИЯ ПОТОКОВ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ ГЕТЕРОАЗЕОТРОПНОЙ СМЕСИ ФУРФУРОЛ-ВОДА НА ДВУХ ОТГОННЫХ КОЛОННАХ

Процесс ректификации азеотропных смесей имеет место во многих отраслях химической промышленности. Этот процесс требует значительных энергозатрат как на нагрев и испарение технологических потоков, так и на конденсацию паров и охлаждение продуктов. Потребление внешней энергии существенно зависит от способов организации процессов разделения.

Пинч-анализ является одним из современных методов проектирования химико-технологических систем с целью оптимального использования внешних источников энергии путем максимальной тепловой интеграции технологических потоков системы, с учетом ограничений конкретного производства, требований экологической безопасности и защиты окружающей среды.

В данной работе рассматривается тепловая интеграция процессов разделения гетероазеотропной смеси фурфурол-вода на двух колонах, в каждой из которых легкокипящим является азеотроп, а низкокипящим – один из компонентов.

Были рассчитаны тепловой и материальный баланс ректификационной установки и сформирована таблица данных потоков, то есть, проведена экстракция данных химико-технологической системы. Из общего множества тепловых потоков было выбрано подмножество для интеграции.

Для выбранных тепловых потоков, подлежащих тепловой интеграции, были построены составные кривые и проанализировано их взаимное расположение на температурно-ентальпийной диаграмме. Этот анализ показал, что для определенного значения минимальной температурной разности в теплообменном оборудовании $\Delta T_{\min}$, имеет место пороговая задача. Проблему было сформулировано для значения $\Delta T_{\min}$ несколько меньшего, чем пороговое значение, что привело к небольшому увеличению потребления внешних энергоносителей.

Были рассмотрены опции дальнейшего усовершенствования сети теплообменников, и было выявлено наличие цикла через псевдопинч, что дало возможность удалить теплообменник с низкой нагрузкой и перераспределить эту нагрузку между другими. Восстановление $\Delta T_{\min}$ в данном случае невозможно, ибо принято жесткое ограничение по отсутствию горячих утилит.

Продемонстрирована значительная экономия затрат мощности внешних утилит.

Для модернизации было подобрано современное теплообменное оборудование фирмы Alfa Laval на все необходимые позиции.

Ключевые слова: тепловая интеграция, пинч-анализ, ректификация, гетероазеотропные смеси, пороговая задача, оптимизация теплосети.

Babak T., Bykanov S., Gorbunov K., Ponomarenko Ye., Solovey L.

STREAMS HEAT INTEGRATION IN THE SEPARATION PROCESS OF THE FURFURAL-WATER HETEROAZEOTROPIC MIXTURE BY USING TWO STRETCHING COLUMNS

The process of azeotropic mixtures rectification takes place in many branches of the chemical industry. This process requires significant energy consumption both for heating and evaporation of process streams, and for vapor condensation and cooling of products. The consumption of external energy essentially depends on the methods of separation processes organization.

Pinch analysis is one of the modern methods for designing chemical-technological systems with the aim of optimal use of external energy sources by maximizing the heat integration of system process streams, taking into account the limitations of a particular manufacture, the requirements of environmental safety and environmental protection.

In this paper the heat integration of the heteroazeotropic furfural-water mixture separation process by two columns was considered. In each column the azeoptrope is a light-boiling one, and one of the mixture components is a low-boiling one.

The heat and material balances of the rectifying plant were calculated and the table of its streams was formed, that is, the data of the chemical-technological system were extracted. From the total set of heat streams, the subset was selected for heat integration.

Composite curves for the selected heat streams subject to heat integration were built and their relative position on the temperature-enthalpy diagram was analyzed. This analysis showed that for a certain value of the minimum temperature difference in the heat exchange equipment $\Delta T_{\min}$, there is a threshold problem. The problem was formulated for a value of $\Delta T_{\min}$ slightly less than the threshold value that led to a slight increase in the consumption of external energy carriers.

Options for further improvement of the network of heat exchangers were considered, and the occurrence of a cycle through the pseudopinch was identified. It gave possibility to remove a heat exchanger with a low load and redistribute this load among to other ones. Restoring $\Delta T_{\min}$ in this case is impossible, because a strict restriction on the absence of hot utilities is accepted.

Significant savings in external utilities load have been demonstrated.

For retrofit modern Alfa Laval heat exchange equipment was selected for all the necessary positions.

Keywords: heat integration, pinch analysis, rectification, heteroazeotropic mixtures, threshold problem, heating system optimization.

Кошельник О.В., к.техн.н., доцент, Гойсан С.Б., аспірант, Пугачова Т.М., к.техн.н., професор, Круглякова О.В., к.техн.н., доцент, Павлова В.Г., к.техн.н., ст. викладач

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ВИДІВ ПАЛИВА ДЛЯ ОПАЛЕННЯ РЕГЕНЕРАТИВНИХ ПОВІТРОНАГРІВАЧІВ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
м. Харків*

Ключові слова: доменна піч, регенеративний повітрянагрівач, звалищний газ, температура горіння, нагрів дуття.

Вступ. В умовах важкого економічного стану, в якому опинилась Україна в останній час, вирішення проблем енергозабезпечення та економії енергоресурсів приймає все більше значення. Чорна металургія є однією з найбільш енерго- та ресурсоемних галузей промисловості, на долю якої припадає близько 70 % енергоспоживання повного металургійного циклу. За прогнозом навіть через 20–30 років 85 % металу буде вироблятися за традиційною технологією, а тільки 10–15 % за допомогою альтернативних технологій, які сьогодні доцільно застосовувати лише в специфічних умовах [1–3]. Для досягнення технологічно необхідної температури в доменній печі для високотемпературного нагрівання великих обсягів дуттьового повітря застосовуються регенеративні повітрянагрівачі з нерухомою вогнетривкою теплоакумуючою насадкою [4]. Враховуючи енергоемність доменного виробництва та значну вартість енергоносіїв, проведення досліджень щодо підвищення ефективності та економічності роботи доменних печей сьогодні є досить актуальним завданням.

Виділення невирішеної частини загальної проблеми. Одним із способів економії металургійного коксу та підвищення продуктивності доменних печей є отримання більш високої температури доменного дуття в регенеративних повітрянагрівачах (ПН). Для цього необхідно збільшити температуру горіння палива, що можливо здійснити двома шляхами. Перший – це попередній підігрів компонентів горіння, другий – додавання в газову суміш більш висококалорійних складових [5, 6]. Як правило, для цього використовували природний або коксовий газ. Враховуючи дуже високу вартість природного газу, використання його в якості добавки для підвищення температури горіння є нерентабельним. В той же час, сьогодні виробництво коксового газу в Україні значно зменшилось, що призводить до його дефіциту.

В якості альтернативи пропонується використання звалищного газу. Він являє собою складну суміш різних газів, що є результатом дії мікроорганізмів на полігонах твердих побутових відходів (ТПВ). Звалищний газ складається з 2 основних компонентів – метану та вуглекислого газу. Кількість інших летучих органічних сполук становить < 1 % [7–9]. Саме склад звалищного газу є основним фактором визначення рівня викидів димових газів у результаті процесу горіння. Збільшення вмісту органічних складових призводить до зростання обсягів виходу біогазу. На невеликих звалищах, серед відходів яких домінують неорганічні матеріали, емісія звалищного газу в середньому складає 2000–3000 м³/рік. В той час на полігонах твердих побутових відходів великих міст середній показник накопичення біогазу – близько 5–10 млн. м³/рік за умови,

що полігон функціонує більше 5 років [10, 11]. Звалища України щорічно викидають в атмосферу більше, ніж 1,35 млрд. м³ звалищного газу. Процес організації використання значної кількості твердих відходів є дуже складною проблемою, екологічно небезпечною та в багатьох випадках економічно неефективною. Тому сьогодні актуальним питанням є пошук методів переробки відходів та екологічно-ефективного використання звалищ ТПВ з метою одержання теплової або електричної енергії.

Склад газу значно варіюється в залежності від типу відходів і часу розміщення їх на полігоні (табл. 1). Як видно за табл. 1, звалищний газ має досить велику частку горючих елементів, що робить його перспективним паливом для різних високотемпературних установок.

Таблиця 1 – Склад звалищних газів

Компонент	Частка, %
CH ₄	40–60
CO ₂	35–45
O ₂	≈ 1
N ₂	< 1–10
H ₂	< 1–3
H ₂ O	1–5
Інші сполуки	< 1–3

Викладення основної частини дослідження. Мета розрахунку – визначення необхідного складу паливної суміші, яка забезпечить технологічно необхідний рівень підігріву доменного дуття. Для цього необхідно розрахувати витрату повітря горіння та кількість продуктів згоряння, виходячи з вихідного складу паливної суміші. Склад штучних газів наведений в табл. 2. Розглядалися наступні гази – доменний, коксовий, а також біогаз, що є продуктом розкладання органічних відходів твердих побутових відходів.

Таблиця 2 – Склад штучного газоподібного палива

Газ	Склад газу, %						
	CH ₄	C ₂ H ₄	H ₂	CO	CO ₂	O ₂	N ₂
Домений	0,3	-	2,5	23,8	15,2	-	58,2
Коксовий	26,27	3,01	52,74	7,13	5,76	0,603	4,49
Звалищний	50	-	2	-	40	3	5

Визначити дійсне значення температури газів t_d під куполом доменного повітрянагрівача можливо, застосувавши методику, викладену в [2], що встановлює залежність дійсної від адіабатної температури горіння з використанням пірометричного коефіцієнта $\eta_{\text{пир}}$, який враховує реальні умови горіння палива.

Величина коефіцієнта $\eta_{\text{пир}}$ може бути знайдена для повітрянагрівача із зовнішньою камерою згоряння за формулою:

$$\eta_{\text{пир}} = 3,35 \cdot 10^{-6} \cdot t_k^2 - 9,48 \cdot 10^{-3} \cdot t_k + 7,576,$$

де t_k – температура димових газів під куполом, °C.

Цим умовам повинні задовольняти відповідні значення адіабатної температури горіння паливної суміші:

$$t_a = \frac{t_k}{\eta_{\text{пир}}}.$$

Розрахунок необхідного співвідношення газів для отримання заданої температури під куполом повітрянагрівача виконувався за 6 варіантами: чистий доменний газ, коксо-доменна суміш та суміш доменного газу та біогазу за умов підігріву повітря горіння за рахунок теплоти газів, що відводяться, та без нього. Для забезпечення температури під куполом 1250 °C, необхідна адіабатна температура повинна складати 1368 °C.

Склад змішаного газу визначався за виразом:

$$X_{\text{сум}} = X_1(1 - g_1) + X_2 \cdot g_2,$$

де X_1, X_2 – вміст кожного елемента в газовій суміші, %; g_1, g_2 – частка кожного із газів в суміші. Отримані данні розрахунків наведені в таблиці 3.

Таблиця 3 – Результати розрахунку процесу горіння суміші палив

Найменування показника		Варіанти					
Доля газу в паливній суміші, %	доменно-го g_d	100	100	90,3	–	88,3	92,4
	кокового g_k	–	–	9,7	6,3	–	–
	біогазу g_{bg}	–	–	–	–	11,7	7,6
Температура повітря горіння $t_{\text{пид}}$, °C		50	180	50	180	50	180
Коефіцієнт надлишку повітря α		1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Дійсна витрата повітря горіння $V_{\text{пов}}$, м ³ /м ³		0,707	0,707	1,12	0,98	1,23	1,05
Об'єм продуктів згоряння V_r , м ³ /м ³		1,66	1,66	2,1	1,95	2,2	2,01
Теплота згоряння газів Q_n^p , кДж/м ³		3376	3376	4786	4292	5101	4496
Адіабатна температура горіння t_a , °C		1249	1287	1423	1423	1423	1423
Температура газів під куполом t_k , °C		1189	1201	1300	1300	1300	1300

Як видно із результатів розрахунків, використання чистого доменного газу за умов його попереднього нагріву до температури 180 °С відхідними димовими газами після повітрянагрівача (більшу температуру неможливо забезпечити технологічно) не дає можливості отримати необхідну температуру під куполом. Варіанти 3–6 представляють результати розрахунків процесу горіння суміші доменного, коксового або звалищного газів. Необхідна частка звалищного газу повинна складати 7,6 % за умов підігріву повітря горіння. Витрата паливної суміші для доменного повітрянагрівача об'ємом 1033 м³ буде складати 68523 м³/год при продуктивності ПН 2100 м³ гарячого дуття за годину. Витрата звалищного газу при цьому – 5208 м³/год. На великих полігонах вихід біогазу сягає 10 млн.м³/рік, тобто об'єми його виходу є недостатніми. Тому як перспективний варіант слід розглядати суміш доменного, коксового та звалищного газів, що може забезпечити задану температуру під куполом доменного повітрянагрівача.

Висновок. Для забезпечення температури гарячого дуття на рівні 1100–1250 °С в доменних повітрянагрівачах в якості палива застосовується суміш доменного та коксового газів. В роботі проаналізована можливість заміни при опаленні доменних повітрянагрівачів частини коксового газу звалищним. Звалищний газ після очищення практично не містить сполуки сірки та інші шкідливі речовини, тому може розглядатися в якості висококалорійної добавки для паливної суміші, що подається в повітрянагрівачі. Проведені розрахункові дослідження показали, що для регенераторів доменної печі об'ємом 1033 м³ при нагріванні гарячого дуття в кількості 2100 м³/год необхідна частка звалищного газу складає 7,6 % за умов нагрівання повітря горіння до температури 180 °С. Це забезпечить температуру гарячого дуття 1250 °С.

Крім того, слід відзначити також значний екологічний ефект від застосування звалищного газу. Це вирішує проблему забруднення значних територій та повітряного басейну.

Література

1. Товаровский И.Г. Доменная плавка. Эволюция, ход процессов, проблемы и перспективы / И.Г. Товаровский. – Днепропетровск: Пороги, 2003. – 596 с.
2. Грес Л.П. Энергосбережение при нагреве доменного дутья / Л.П. Грес. – Днепропетровск: Пороги, 2004. – 209 с.
3. Кошельник О.В. Методика створення універсального обчислювального комплексу для моделювання регенеративних теплообмінників високотемпературних плавильних агрегатів / О.В. Кошельник // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2007. – № 2/3 (26). – С. 47–50.
4. Кошельник О.В. Моделювання роботи теплообмінних апаратів систем енергота теплопостачання високотемпературних технологічних установок / О.В. Кошельник, Є.В. Хавін, В.Г. Павлова // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2015. – № 1. – С. 14–18.
5. Ganzha A. Analysis of efficiency and reliability of blast-furnace process waste heat recovery systems / A. Ganzha, O. Zaiets // Technology audit and production reserves. – 2017. – V.1 (33). – P. 48–54.

6. Розробка перспективних систем утилізації теплових вторинних енергоресурсів доменного виробництва / Ганжа А.М., Кошельнік О.В., Павлова В.Г., Хавін Є.В. // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2016. – № 2. – С. 14–18.

7. Чонка І.І. Особливості вирішення проблеми відходів в умовах Закарпатської області / І.І. Чонка, С.Ю Чундак, О.В. Рубець // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. – 2010, № 893. – С. 77–83.

8. Прищепа А.М. Екологічні проблеми та стратегія поводження з твердими побутовими відходами (на прикладі міста Дубно) / А.М. Прищепа, О.А. Брежицька // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. 36. наук. праць. – 2007. – Вип. 3 (39). Ч. 1. – С. 145–150.

9. Stassen H.E. Small-Scale Biomass Gasifiers for Heat and Power: A Global Review / H.E. Stassen // World Bank Technical Paper. Energy series. – 1995. – No. 296. – P. 88.

10. S. Heidenreich. Advanced Biomass Gasification: New Concepts for Efficiency Increase and Product Flexibility / S. Heidenreich. – London: Academic Press. – 140 p.

11. Rettenberger G. Utilization of Landfill Gas and Safety Measures / G. Rettenberger // Solid Waste Landfilling. – Elsevier, 2018. – P. 463–476.

12. Використання звалищного газу в енергетичних цілях: економічні аспекти / Є. Дудек, П. Клімек, О. Гвоздевич, Ю. Стефаник // Нафтогазова енергетика. – 2007. – № 2 (3). – С. 8–13.

Bibliography (transliterated)

1. Tovarovskyi I.G. Domennaia plavka. Evoliutsyia, khod protsessov, problemy u perspektivy / I.G. Tovarovskyi. – Dnepropetrovsk: Porohy, 2003. – 596 p.

2. Hres L.P. Enerhosberezhnye pry nahreve domennoho dutia / L.P. Hres. – Dnepropetrovsk: Porohy, 2004. – 209 p.

3. Koshelnik O.V. Metodyka stvorennia universalnoho obchysluvalnoho kompleksu dlia modeliuvannia reheneratyvnykh teploobminnykh vysokotemperaturnykh plavylnykh ahrehativ / O.V. Koshelnik // Vostochno-evropeyskyi zhurnal передовykh tekhnolohyi. – 2007. – № 2/3 (26). – P. 47–50.

4. Koshelnik O.V. Modeliuvannia roboty teploobminnykh aparativ system enerho- ta teplopostachannia vysokotemperaturnykh tekhnolohichnykh ustanovok / O.V. Koshelnik, Ye.V. Khavin, V.H. Pavlova // Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia. – 2015. – № 1. – P. 14–18.

5. Ganzha A. Analysis of efficiency and reliability of blast-furnace process waste heat recovery systems / A. Ganzha, O. Zaiets // Technology audit and production reserves. – 2017. – V.1 (33). – P. 48–54.

6. Розробка перспективних систем утилізації теплових вторинних енергоресурсів доменного виробництва / Ганжа А.М., Кошельнік О.В., Павлова В.Г., Хавін Є.В. // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2016. – № 2. – С. 14–18.

7. Chonka I.I. Osoblyvosti vyrishennia problemy vidkhodiv v umovakh Zakarpatskoi oblasti / I.I. Chonka, S.Iu Chundak, O.V. Rubets // Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V. N. Karazina. – 2010, № 893. – P. 77–83.

8. Pryshchepa A.M. Ekolohichni problemy ta stratehiia povodzhennia z tverdymy pobutovymy vidkhodamy (na prykladi mista Dubno) / A.M. Pryshchepa, O.A. Brezhytska //

Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia. Zb. nauk. prats. – 2007. – Vyp. 3 (39). Ch. 1. – P. 145–150.

9. Stassen H.E. Small-Scale Biomass Gasifiers for Heat and Power: A Global Review / H.E Stassen // World Bank Technical Paper. Energy series. –1995. – No. 296. –P. 88.

10. S. Heidenreich. Advanced Biomass Gasification: New Concepts for Efficiency Increase and Product Flexibility / S. Heidenreich. – London: Academic Press. – 140 p.

11. Rettenberger G. Utilization of Landfill Gas and Safety Measures / G. Rettenberger // Solid Waste Landfilling. – Elsevier, 2018. – P. 463–476.

12. Vykorystannia zvalyshchnoho hazu v enerhetychnykh tsiliakh: ekonomichni aspekty / Ye. Dudek, P. Klimek, O. Hvozdevych, Yu. Stefanyk // Naftohazova enerhetyka. – 2007. – № 2 (3). – P. 8–13.

УДК 662.767.2; 669.162.23

Кошельник О.В., к.техн.н., доцент, Гойсан С.Б., аспірант, Пугачова Т.М., к.техн.н., професор, Круглякова О.В., к.техн.н., доцент, Павлова В.Г., к.техн.н., ст. викладач

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ВИДІВ ПАЛИВА ДЛЯ ОПАЛЕННЯ РЕГЕНЕРАТИВНИХ ПОВІТРОНАГРІВАЧІВ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ

Проаналізовано можливість використання штучного газоподібного палива – звалищного газу – для опалення регенеративних повітрянагрівачів печей доменного виробництва. Підвищення температури доменного дуття є одним з найбільш ефективних способів економії металургійного коксу та збільшення продуктивності доменних печей. Для цього в якості палива для регенеративних теплообмінників використовується суміш доменного та коксового газів. Враховуючи існуючий сьогодні дефіцит коксового газу, в якості висококалорійної добавки пропонується використання звалищного газу, основним горючим елементом якого є метан. Проведені розрахунки горіння суміші газоподібних палив в трьох комбінаціях: доменних газ, коксо-доменна суміш та суміш доменного та звалищного газів. Розглядалася можливість підвищення температури гарячого дуття до 1250 °С в системі повітропостачання доменної печі об'ємом 1033 м³. Для досягнення заданої температури необхідний рівень адіабатної температури горіння повинен складати 1423 °С, а температури димових газів під куполом – 1300 °С. Даний рівень температури неможливо досягнути при використанні тільки доменного газу, тому розглядалися два варіанти: використання коксо-доменної суміші з вмістом коксового газу 6,3 % та одночасним нагріванням повітря горіння до 180 °С за рахунок теплоти відхідних газів доменних повітрянагрівачів, а також спалювання суміші доменного та звалищного газів з нагріванням повітря горіння до 180 °С (вміст звалищного газу при цьому – 7,6 %). Витрата суміші палив в останньому випадку складає 68523 м³/год, тобто необхідна кількість звалищного газу дорівнює 5208 м³/год. Обсяги виходу газу на звалищах великих міст складають 5–10 млн.м³/рік, що є меншим ніж необхідна кількість біогазу для опалення повітрянагрівача. Тому має сенс розглядати для досягнення необхідного рівня температур використання суміші трьох газів – доменного, коксового та звалищного у відповідних співвідношеннях. Використання звалищного газу також

сприяє вирішенню важливої екологічної проблеми забруднення земель та атмосфери при накопичування твердих побутових відходів.

Ключові слова: доменна піч, регенеративний повітрянагрівач, звалищний газ, температура горіння, нагрів дуття.

Кошельник А.В., к.техн.н., доцент, Гойсан С.Б., аспірант, Пугачова Т.Н., к.техн.н., професор, Круглякова О.В., к.техн.н., доцент, Павлова В.Г., к.техн.н., ст. преподаватель

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА ДЛЯ ОТОПЛЕНИЯ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Проанализирована возможность использования искусственного газообразного топлива – свалочного газа – для отопления регенеративных воздухонагревателей печей доменного производства. Повышение температуры доменного дутья является одним из наиболее эффективных способов экономии металлургического кокса и увеличения производительности доменных печей. Для этого в качестве топлива для регенеративных теплообменников используется смесь доменного и коксового газов. Учитывая существующий сегодня дефицит коксового газа, в качестве высококалорийной добавки предлагается использование свалочного газа, основным горючим элементом которого является метан. Проведенные расчеты горения смеси газообразных топлив в трех комбинациях: доменный газ, коксодоменная смесь, смесь доменного и свалочного газов. Рассматривалась возможность повышения температуры горячего дутья до 1250 °С в системе воздухообеспечения доменной печи объемом 1033 м³. Для достижения заданной температуры необходимый уровень адиабатной температуры горения должен составлять 1423 °С, а температуры дымовых газов под куполом – 1300 °С. Данный уровень температуры невозможно достичь при использовании только доменного газа, поэтому рассматривались два варианта: использование коксодоменной смеси с содержанием коксового газа 6,3 % и одновременным нагревом воздуха горения до 180 °С за счет теплоты отходящих газов доменных воздухонагревателей, а также сжигание смеси доменного и свалочного газов с нагревом воздуха горения до 180 °С (содержание свалочного газа при этом – 7,6 %). Расход смеси газов в последнем случае составляет 68523 м³/ч, т.е. необходимое количество свалочного газа – 5208 м³/ч. Объемы выхода газа на свалках больших городов составляют 5–10 млн.м³/год, что меньше, чем необходимое количество биогаза для отопления воздухонагревателя. Поэтому имеет смысл рассматривать для достижения необходимого уровня температур использования смеси трех газов – доменного, коксового и свалочного в соответствующих соотношениях. Использование свалочного газа также способствует решению важной экологической проблемы загрязнения земель и атмосферы при накоплении твердых бытовых отходов.

Ключевые слова: доменная печь, регенеративный воздухонагреватель, свалочный газ, температура горения, нагрев дутья.

Koshelnik O., Hoisan S., Pugacheva T., Kruglyakova O., Pavlova V.

PROSPECTS OF USING ALTERNATIVE FUELS FOR HEATING OF REGENERATIVE AIR HEATERS FOR BLAST FURNACES

Landfill gas as one of the promising artificial gaseous fuels is analyzed for use in heating system of regenerative air heaters for blast furnaces.

Increasing the temperature of blast is one of the most effective ways for metallurgical coke saving and increase the productivity of blast furnaces. To increase this temperature, a mixture of blast-furnace and coke oven gases is used as fuel for regenerative heat exchangers. Considering the current shortage of coke oven gas, landfill gas, the main combustible element of which is methane, is proposed as a high-calorie additive to the main fuel.

Calculations were made for the combustion of a mixture of gaseous fuels in three combinations: blast-furnace gas, blast-furnace and coke gases mixture, blast-furnace and landfill gases mixture.

The possibility of increasing the temperature of the hot blast to 1250 °C for the air supply system of a blast furnace with a volume of 1033 m³ was considered. Calculations showed that in order to achieve such a temperature, the adiabatic combustion temperature should be 1423 °C, and the flue gas temperature in the crown should be 1300 °C. Such temperatures cannot be reached using only blast-furnace gas, so two possible options were considered. The first option is the use of a coke and blast furnace gases mixture with a coke gas content of 6.3 % and combustion air heating to 180 °C by exhaust gases from blast furnace air heaters. The second option is combustion of a mixture of blast-furnace and landfill gas with combustion air heating to 180 °C (the content of landfill gas is 7.6 %).

The flow rate of the fuel mixture for the second option is 68,523 m³/h, and the required amount of landfill gas is 5208 m³/h. The volumes of gas output from landfills in large cities are reported to be 5–10 MCM a year, which is less than the amount of biogas required to heat an air heater. Therefore, to achieve the required temperature it makes sense to consider a tree gas mixture that is blast-furnace, coke and landfill gases an appropriate proportions.

The use of landfill gas contributes to the solution of an important environmental problem of land and atmosphere pollution during the accumulation of municipal solid waste.

Keywords: glass furnace, heat recovery, regenerative heat exchangers, heat storage element, phase transition, efficiency.

Лубков М.В., доктор фіз.-мат. наук, професор, Мосійчук К.О., аспірантка

МЕТОД ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ У СЛАБОПРОНИКНИХ АНІЗОТРОПНИХ ПЛАСТАХ З МЕТОЮ ЗБІЛЬШЕННЯ НАФТОВІДДАЧІ

*Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»,
м. Полтава*

Ключові слова: моделювання, слабопроникні анізотропні пласти (САП), нафтовіддача пластів, нагнітальні свердловини, комбінований метод, метод кінцевих різниць, метод кінцевих елементів.

Задача підвищення коефіцієнта вилучення нафти продовжує залишатися актуальною і дедалі активніше постає в той час, коли все більше родовищ України перебувають у пізній стадії розробки. Для вирішення цієї проблеми традиційно використовуються технології збільшення нафтовіддачі пласта [1–5], які доповнюються новими матеріалами та інноваційними поєднаннями відомих раніше методів. Спільною рисою згаданих технологій є те, що зрештою всі вони спрямовані на зміну фільтраційних параметрів пласта як наприклад проникність, пористість, в'язкість з тим щоб отримати таку їх комбінацію, яка б дозволила збільшити ефективність витіснення залишкової нафти. Однак для ефективного використання цих технологій критичним є наявність якомога повнішої картини фільтрації нафтової фази поблизу видобувної та нагнітальної свердловин в САП. Актуальним питанням є: чи всі параметри впливають однаковою мірою на інтенсивність фільтрації? Чи є ряд факторів, що мають пріоритет у роботі пласта в таких умовах і на яких, відповідно, і має бути зосереджена увага інженера? На думку авторів кожен окремий набір вихідних умов необхідно розглядати окремо і за допомогою всебічного аналізу засобами чисельного моделювання виявляти параметри з максимальним рівнем впливу на нафтовіддачу.

Загалом, методи чисельного моделювання дозволяють розв'язувати різні задачі прикладного характеру [6–8]: збільшення нафтовіддачі за різних впливів на пласт поблизу видобувної свердловини; спільний вибір системи розробки нафтоносного пласта; підтримання раціональних обсягів видобутку свердловини; виявлення залишкових запасів і застійних зон у контурі живлення свердловини; поступовий аналіз і послаблення ступеня ризиків розроблення та забезпечення стратегії експлуатації системи діючих нафтовидобувних свердловин.

Нафтогазова галузь є найбільш активним користувачем методів чисельного моделювання. Тому причина очевидна: неможливість ставити експеримент безпосередньо над пластом. З чисельною моделлю пласта така проблема відсутня. За її поведінкою ми можемо судити про роботу реального покладу. Чисельна модель пласта в свою чергу є комп'ютерною програмою, яка використовує чисельні методи для розв'язання математичної моделі пласта (система нелінійних часткових диференціальних рівнянь – НЧДР). Розв'язок такої моделі обов'язково вимагає дискретизації розрахункової області. Цей процес конвертує НЧДР у алгебраїчні рівняння, котрі мають результати у дискретних точках простору та в дискретні моменти часу. Існує декілька методів реалізації дискретизації. Найбільш широкого використання у нафтогазовій галузі знайшов метод кінцевих різниць. У ньому НЧДР записується для заданої точки простору у заданий

момент часу. Обраний момент часу (попередній, поточний, проміжний) веде до явної, неявної чи постановки Кренка-Ніколсона [3]. В результаті диференційні рівняння перетворюються на алгебраїчні. Після лінеаризації, отримується розв'язок, який представляє собою розподіл величин тиску та насичення по пласту, а також дебіт свердловини.

Проте лишається чимало проблем, присвячених точності та достовірності моделювання складних слабопроникних анізотропних нафтоносних пластів. Запропонований у даній роботі скінченно-елементно-різницевий метод, який дає змогу поєднувати переваги скінченно-елементного методу та методу скінченних різниць, для розв'язання нестационарної задачі п'єзопровідності з огляду на неоднорідний розподіл різних фільтраційних параметрів усередині деформованого пласта та на його межах дає змогу адекватно обчислити розподіл пластового тиску в реальних умовах експлуатації свердловин, що дає ряд переваг порівнюючи з існуючими методами.

Метод передбачає двовимірну ізотропну нестационарну модель п'єзопровідності [6, 9, 10]. В даному випадку загальна постановка задачі п'єзопровідності з урахуванням умови проникності на границі області в декартовій системі координат (x, y), що зв'язана з границями досліджуваної області, має вид [10]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{1}{c} (k_{xx} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + k_{yy} \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + 2k_{xy} \frac{\partial P}{\partial x} \frac{\partial P}{\partial y}) + \gamma, \quad (1)$$

$$P(t = 0) = P_0, \quad (2)$$

$$k_b \text{grad} P = \alpha (P - P_b). \quad (3)$$

де (1) – нестационарне анізотропне рівняння п'єзопровідності; (2) – фіксований тиск для кожної точки; (3) – умова інфільтрації флюїду на границях розглянутої області, при розрахунку фільтрації нафти. Тиск p заданий як функція декартових координат і часу. $c = \eta(m\beta_1 + \beta_2)$ – коефіцієнт п'єзоопору; k_{xx} , k_{yy} , k_{xy} – анізотропні коефіцієнти проникності нафтової фази; η – динамічна в'язкість нафти; m – пористість нафтоносного пласта; β_1 – коефіцієнт стискання нафти; β_2 – коефіцієнт стискання скелету порід нафтоносного пласта; γ – параметр інтенсивності видобутку нафти в свердловині; P_0 – початковий тиск у пласті; α – коефіцієнт інфільтрації нафтової фази на межах розглянутої області; P_b – тиск на границях розглянутої області; k_b – коефіцієнт проникності нафтової фази на межах розглянутої області.

Для розв'язку нестационарної задачі п'єзопровідності (1)–(3) застосовується варіаційний скінчено-елементний метод, який дає розв'язок варіаційного рівняння за допомогою функціоналу п'єзопровідності (за варіаційним принципом Лагранжа [8–10]):

$$\delta I(P) = 0. \quad (4)$$

Спочатку задача формулюється у варіаційній постановці. Функціонал $I(P)$ – функціонал анізотропної задачі п'єзопровідності (1)–(3), який представляється у вигляді:

$$I(P) = \frac{1}{2} \iint_S \{k_{xx} (\frac{\partial P}{\partial x})^2 + k_{yy} (\frac{\partial P}{\partial y})^2 + 2k_{xy} \frac{\partial P}{\partial x} \frac{\partial P}{\partial y} + 2 \int_{P_0}^P c \frac{\partial P}{\partial t} dP - 2\gamma P\} dx dy - \frac{1}{2} \int_L \alpha (P - 2P_b) P dl, \quad (5)$$

де S – площа перерізу області, яка досліджується, L – контур, що охоплює площу S , dl – елемент контуру.

При розв'язанні варіаційного рівняння (4) застосовується восьмивузловий ізопараметричний чотирикутний скінчений елемент [6]. Як глобальна система координат, де відбувається об'єднання усіх скінчених елементів, на які розбито площу S , використовується декартова система (x, y) . В якості локальної системи координат, де в межах скінченого елемента визначаються функції апроксимації φ_i на основі квадратичних поліномів і проводиться чисельне інтегрування, використовується нормалізована система координат (ξ, η) [6]. В цій системі, координати, тиск, початковий тиск пласта, тиск на границях області, коефіцієнт інфільтрації нафти на межах області, а також похідні від тиску по координатам апроксимуються наступним чином:

$$x = \sum_{i=1}^8 x_i \varphi_i; y = \sum_{i=1}^8 y_i \varphi_i; P = \sum_{i=1}^8 P_i \varphi_i; P_0 = \sum_{i=1}^8 P_{0i} \varphi_i; P_b = \sum_{i=1}^8 P_{bi} \varphi_i; \alpha = \sum_{i=1}^8 \alpha_i \varphi_i; \frac{\partial P}{\partial x} = \sum_{i=1}^8 P_i \Psi_i, \frac{\partial P}{\partial y} = \sum_{i=1}^8 P_i \Phi_i, \Psi_i = \frac{1}{|J|} \left(\frac{\partial \varphi_i}{\partial \eta} \frac{\partial y}{\partial \xi} - \frac{\partial \varphi_i}{\partial \xi} \frac{\partial y}{\partial \eta} \right), \Phi_i = \frac{1}{|J|} \left(\frac{\partial \varphi_i}{\partial \xi} \frac{\partial x}{\partial \eta} - \frac{\partial \varphi_i}{\partial \eta} \frac{\partial x}{\partial \xi} \right), \quad (6)$$

де $J = \frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial x}{\partial \eta} - \frac{\partial y}{\partial \eta} \frac{\partial x}{\partial \xi}$ – якобіан переходу між системами (x, y) і (ξ, η) .

Виходячи з варіаційного рівняння (4) і вважаючи, що вузлові значення від похідних тиску за часом $\frac{dP_i}{dt}$ – є відомими величинами і не варіюються складемо систему диференціальних рівнянь для n -го вузла p -го скінченого елемента у виді:

$$\frac{\partial I_p}{\partial P_n} = \sum_{i=1}^8 \{H_{ni}^p \frac{dP_i}{dt} + (A_{ni}^p + Q_{ni}^p) P_i - Q_{ni}^p P_0\} - \gamma_n^p = 0, \quad (7)$$

$$H_{ij}^p = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 c^p \varphi_i \varphi_j |J| d\xi d\eta, A_{ij}^p = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 (k_{xx}^p \Psi_i \Psi_j + k_{yy}^p \Phi_i \Phi_j + k_{xy}^p \Psi_i \Phi_j) |J| d\xi d\eta,$$

$$Q_{ij}^p = \int_L \alpha \varphi_i \varphi_j dl, \gamma_i^p = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \gamma^p \varphi_i |J| d\xi d\eta.$$

Для розв'язання системи лінійних диференціальних рівнянь першого порядку (7) при початкових умовах з (6) використовується метод скінчених різниць, в якому апроксимація похідної за часом здійснюється на основі неявної різницевої схеми:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{P(t + \Delta t) - P(t)}{\Delta t}. \quad (8)$$

Підставляючи вираз (8) в систему (7), отримуємо наступну систему лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\sum_{i=1}^8 \left\{ \left(\frac{1}{\Delta t} H_{ni}^p + A_{ni}^p + Q_{ni}^p \right) P_i(t + \Delta t) - \frac{1}{\Delta t} H_{ni}^p P_i(t) - Q_{ni}^p P_0^i \right\} - \gamma_n^p = 0 \quad n = 1, 2, \dots, 8. \quad (9)$$

Після інтегрування по кожному скінченному елементу отримується глобальна система лінійних алгебраїчних рівнянь, що дозволяє визначати невідомі значення тиску в момент часу $t + \Delta t$ через їх значення в попередній момент часу t . Розв'язок глобальної системи рівнянь здійснюється на основі чисельного методу Гауса без вибору головного елемента [10], в результаті якого визначається тиск в усіх вузлових точках скінченно-елементної сітки досліджуваної області в заданий момент часу.

Розглянемо анізотропний нафтоносний пласт в якому діє система нафтовидобувних та нагнітальних свердловин розміром $900 \times 900 \text{ м}^2$. Оберемо характерні середні параметри слабопроникного нафтоносного пласта [2, 6]: $k_{xx} = k_{yy} = k_{xy} = 1 \text{ Д (Дарсі)} = 10^{-14} \text{ м}^2$; $m = 0,2$; $\eta = 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$; $\beta_1 = 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$; $\beta_2 = 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$. В цьому випадку коефіцієнт п'єзоопору $c = 0,3 \cdot 10^{-12} \text{ с}$. При моделюванні розподілу тисків у розглянутій пластовій ділянці припустимо, що початковий тиск у пласті дорівнює 200 атм, що середній дебіт свердловини складає 135 м^3 нафти на добу. Припустимо, що нагнітальна свердловина буде закачувати в пласт таку ж саму кількість розчину із подібними до нафти фізичними властивостями за добу. Для мінімізації крайових ефектів при моделюванні, на межах розглянутої ділянки виберемо достатній для промислового видобутку коефіцієнт інфільтрації нафти рівний $\alpha = 10^{-7} \text{ м}$. Результати моделювання показують, що процес встановлення тиску у межах розглянутої ділянки відбувається приблизно за 5 діб після початку дії системи свердловин. На рис. 1а – показано розподілення тиску поблизу 27 рівномірно розташованих видобувних свердловин при заданих вище параметрах фільтрації та дебіт свердловини у абсолютно ізотропному пласті ($k_{xy} = 0$). На рис. 1б – показано розподілення тиску з попередніми параметрами видобутку в ізотропно-зсувному пласті ($k_{xx} = k_{yy} = k_{xy}$). На рис. 1в,г – показано розподілення тиску при попередніх умовах у критично слабопроникному пласті ($k = 0,5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$).

На рис. 2 а,б – позначено розподілення тиску при попередніх умовах в САП. На рис. 2 в,г – позначено розподілення тиску при попередніх умовах в слабопроникних зсувно-анізотропних пластах.

На рис. 3 а,б – позначено розподілення тиску при попередніх умовах в критично САП ($k = 0,8 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$). На рис. 3 в,г – позначено розподілення тиску при попередніх умовах в критично слабопроникних зсувно-анізотропних пластах.

На рис. 4 а,б – позначено розподілення тиску поблизу 27 рівномірно розташованих видобувних свердловин та 6 симетрично розташованих нагнітальних свердловин в критично слабопроникних ($k = 0,5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$) ізотропних та зсувно-ізотропних пластах. На рис. 4 в,г – позначено розподілення тиску при представлених вище умовах у зсувно-анізотропних пластах.

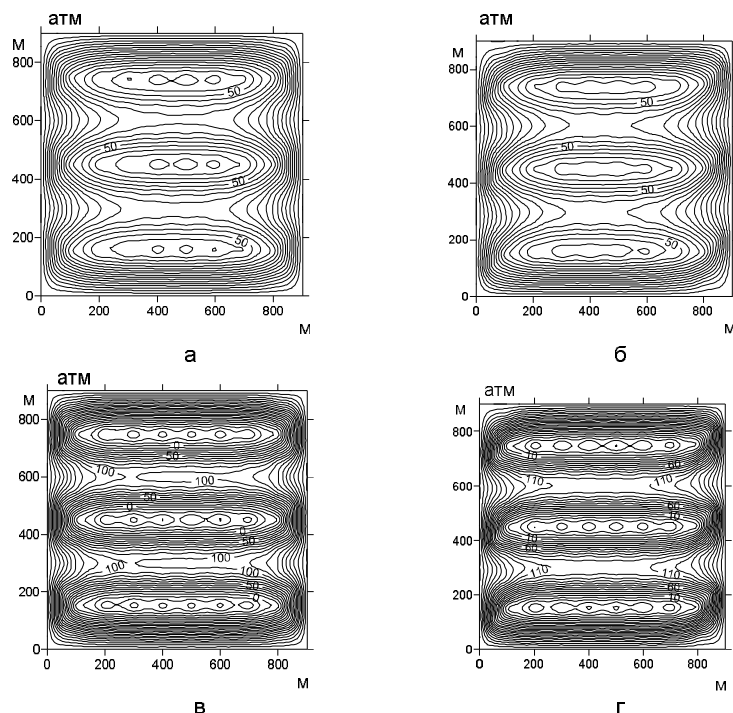


Рисунок 1 (а-г) – Ізолінія тиску поблизу 27 рівномірно розташованих видобувних свердловин ($k = 10^{-14} \text{ м}^2$): а) $k_{xy} = 0$; б) $k_{xx} = k_{yy} = k_{xy}$; у критично проникних ($k = 0,5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$) в) $k_{xy} = 0$; г) $k_{xx} = k_{yy} = k_{xy}$

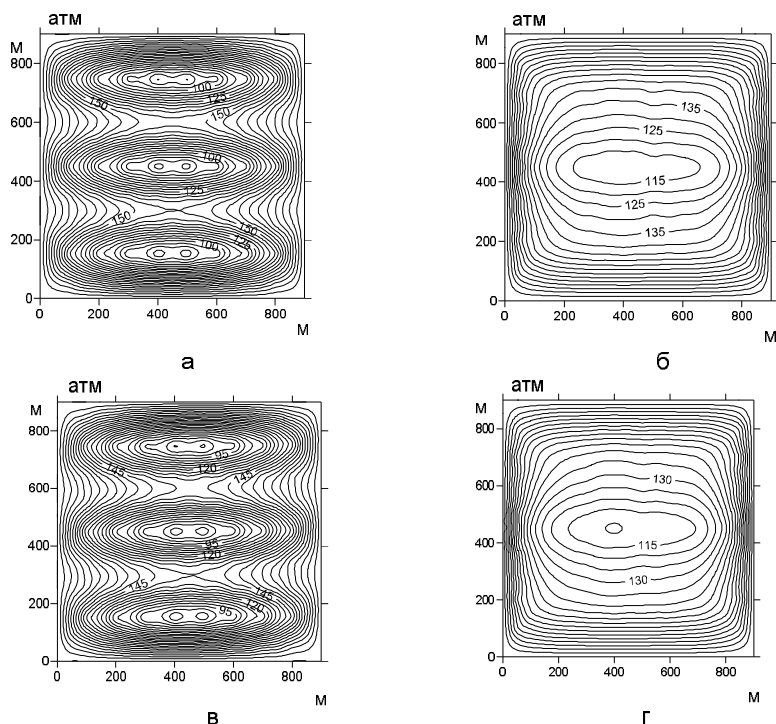


Рисунок 2 (а-г) – Ізолінія тиску поблизу 27 рівномірно розташованих видобувних свердловин у САП: а) $k_{xx}=10^{-13}$, $k_{yy}=10^{-14}$, $k_{xy}=0$ м²; б) $k_{xx}=10^{-14}$, $k_{yy}=10^{-13}$, $k_{xy}=0$ м²; в) $k_{xx}=10^{-13}$, $k_{yy}=10^{-14}$, $k_{xy}=10^{-14}$ м²; г) $k_{xx}=10^{-14}$, $k_{yy}=10^{-13}$, $k_{xy}=10^{-14}$ м²

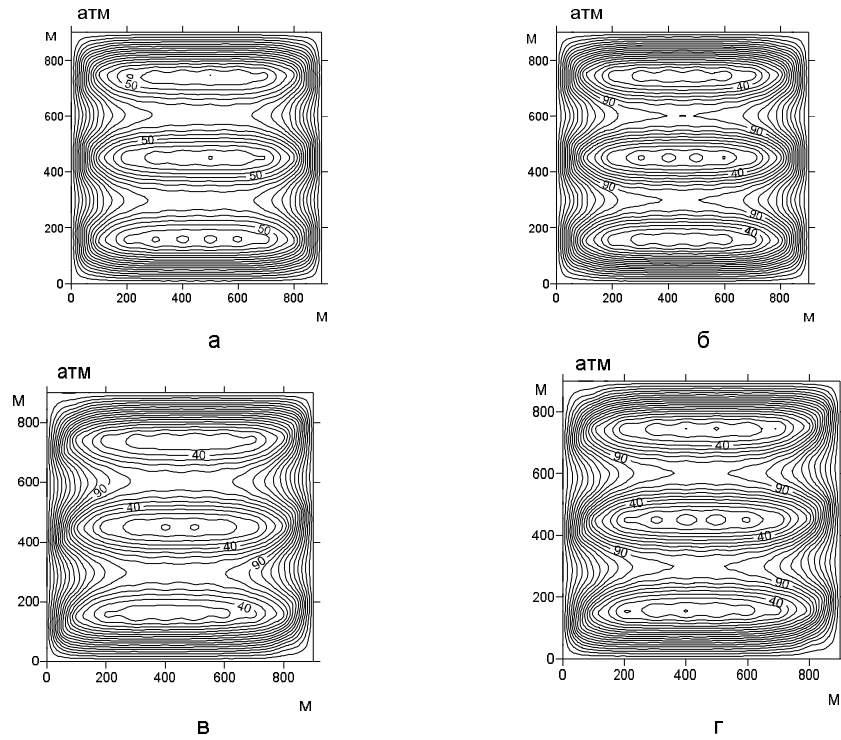


Рисунок 3 (а–г) – Ізолінія тиску поблизу 27 рівномірно розташованих видобувних свердловин у критично проникних анізотропних пластах: а) $k_{xx}=0,8 \cdot 10^{-14}$, $k_{yy}=10^{-14}$, $k_{xy}=0$ м²; б) $k_{xx}=10^{-14}$, $k_{yy}=0,8 \cdot 10^{-14}$, $k_{xy}=0$ м²; в) $k_{xx}=0,8 \cdot 10^{-14}$, $k_{yy}=10^{-14}$, $k_{xy}=10^{-14}$ м²; г) $k_{xx}=10^{-14}$, $k_{yy}=0,8 \cdot 10^{-14}$, $k_{xy}=10^{-14}$ м²

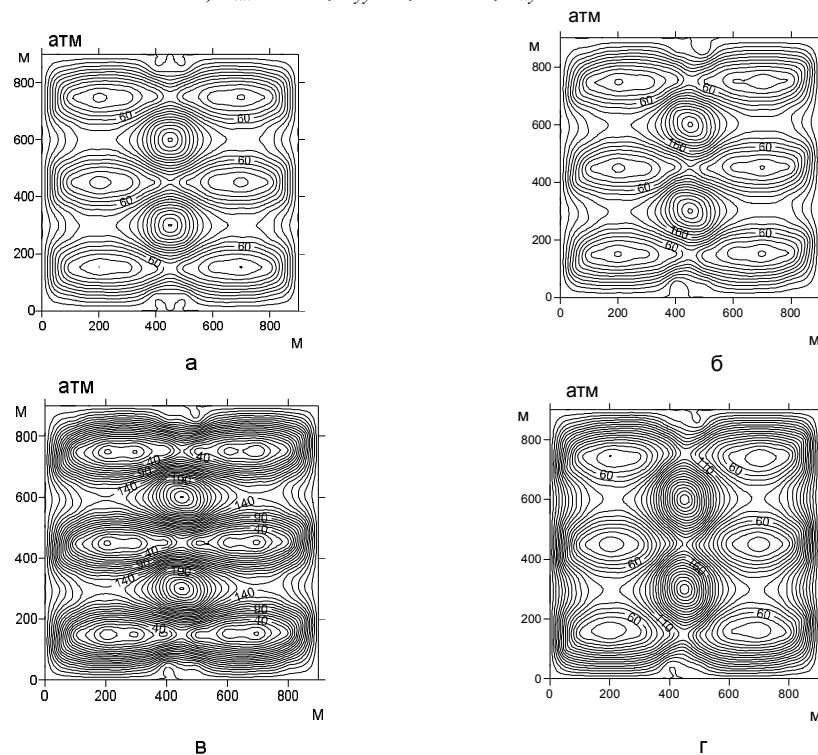


Рисунок 4 (а–г) – Ізолінія тиску поблизу 27 рівномірно розташованих видобувних та 6 симетрично розташованих нагнітальних у критично проникних ізотропних пластах ($k=0,5 \cdot 10^{-14}$ м²): а) $k_{xy}=0$; б) $k_{xx}=k_{yy}=k_{xy}$; у критично проникних анізотропних пластах; в) $k_{xx}=10^{-14}$, $k_{yy}=0,5 \cdot 10^{-14}$, $k_{xy}=0,5 \cdot 10^{-14}$ м²; г) $k_{xx}=0,5 \cdot 10^{-14}$, $k_{yy}=10^{-14}$, $k_{xy}=0,5 \cdot 10^{-14}$ м²

Аналіз результатів. Аналіз рис. 1 а,б показує, що невелике підвищення розподілу тиску у цьому випадку пов'язано з додаванням фільтрації у зсувному напрямку. Аналіз рис. 1 в,г – у критично проникних пластах підвищення розподілу тиску в зсувно-ізотропному випадку має вже більш виражений характер. Аналіз рис. 2а,б – можна виявити вплив анізотропії на фільтраційний процес у слабопроникних пластах. Ми спостерігаємо не тільки кількісну, але і якісну зміну фільтраційних потоків навколо видобувних свердловин. Збільшення проникності у поперечному напрямку, щодо лінії розташування видобувних свердловин (рис. 2б) призводить до збільшення притоку нафти й відповідно до інтенсифікації фільтраційного процесу. Розгляд рис. 2в,г – у випадку наявності зсувної проникності, ми спостерігаємо деяке послаблення фільтраційного процесу, що може бути викликане блокуванням фільтрації вздовж головних осей анізотропії з боку зсувної фільтрації. Аналіз рис. 3а,б – виявляє вплив анізотропії на фільтраційні процеси у критично проникних пластах: зменшення проникності у поперечному напрямку щодо розташування свердловин (рис. 3б) призводить до помітного послаблення фільтраційного процесу. Наявність зсувної фільтрації (рис. 3 в, г), завдяки блокуванню головних напрямків анізотропії приводить до подальшого послаблення фільтраційного процесу. На рис. 4 бачимо підтримання процесу фільтрації у критично проникних пластах за допомогою нагнітальних свердловин. Рис. 4 а, б показують однакові результати фільтраційного процесу в обох випадках. Таким чином нагнітальна дія дещо знижує вплив зсувної проникності на загальний процес фільтрації і у той же час не зменшує впливу анізотропії фільтраційного процесу, збільшення проникності у поперечному напрямку щодо розташування видобувних свердловин призводить до помітної активізації фільтраційного процесу (рис. 4 в,г).

Отже, в залежності від ступеню проникності пласта, вплив зсувної проникності виконує протилежні функції. Так у критично проникних пластах він надає додатковий напрямок проникності й тим самим активізує загальний фільтраційний процес. В той же час він блокує напрямки фільтрації вздовж головних осей анізотропії й тим самим послаблює загальний фільтраційний процес у більш проникних пластах. Збільшення проникності в напрямку поперечному до лінії розташування видобувних свердловин завжди призводить до активізації загального фільтраційного процесу.

Очевидно для оптимального розміщення системи видобувних та нагнітальних свердловин у анізотропному слабопроникному нафтоносному пласті доцільно використовувати описаний у цьому дослідженні метод. Таким чином, для ефективного використання анізотропних слабопроникних пластів необхідно впорядковано та системно розміщувати видобувні та нагнітальні свердловини, по можливості уникати місць із зсувною проникністю пласта. Очевидно найкращі умови збільшення нафтовіддачі у відповідних практичних випадках досягаються завдяки оптимальному підбору усіх впливових факторів анізотропної фільтрації. З іншого боку ці фактори можуть бути оцінені за допомогою математичного моделювання на основі представленого методу.

Висновки. У дослідженні представлено чисельний метод розв'язання математичної моделі неоднорідного нафтоносного пласта на основі скінченно-елементного та методу кінцевих різниць. Для перевірки адекватності отриманих результатів було розв'язано нестационарну анізотропну задачу п'єзопровідності у деформованих пластах.

Результати моделювання показують, що в залежності від ступеню проникності пласта, вплив зсувної проникності виконує протилежні функції. Так у критично проникних пластах він активізує загальний фільтраційний процес. В той же час вздовж голо-

вних осей анізотропії він послаблює загальний фільтраційний процес у більш проникних пластах.

Таким чином, розміщувати нагнітальні свердловини у слабопроникних пластах бажано в напрямку перпендикулярному щодо лінії розташування видобувних свердловин.

Література

1. Abou-Kassem J.H., Farouq-Ali S.M., & Islam M.R. (2013). *Petroleum Reservoir Simulations*. Elsevier, 1(2), 45–67.
2. Ohen H.A., & Civan F. (1993). Simulation of formation damage in petroleum reservoirs. *SPE Advanced Technology Series*, 1(01), 27–35.
3. Douglas J., Furtado F., & Pereira F. (1997). On the numerical simulation of waterflooding of heterogeneous petroleum reservoirs. *Computational Geosciences*, 1(2), 155–190.
4. Higham, D. J. (2001). An algorithmic introduction to numerical simulation of stochastic differential equations. *SIAM review*, 43(3), 525–546.
5. Wu Y.S., & Pruess K. (1988). A multiple-porosity method for simulation of naturally fractured petroleum reservoirs. *SPE Reservoir Engineering*, 3(01), 327–336.
6. Азіз Х., Сеттапі Е. Математичне моделювання пластових систем. М.: Ін-т комп'ют. дослідж., 2004. 416 с.
7. Chen Z., Huan G., Ma Y. *Computational methods for multiphase flows in porous media*. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2006. 521p.
8. Ertekin T., Abou-Kassem J.H., King G. =R. *Basic applied reservoir simulation*. Texas: Richardson, 2001. 421 p.
9. Trangenstein J.A., & Bell J.B. (1989). Mathematical structure of the black-oil model for petroleum reservoir simulation. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 49(3), 749–783.
10. Лубков М.В. Моделювання продуктивного тиску в неоднорідних нафтоносних пластах / М.В. Лубков, О.О. Захарчук, В.І. Дмитренко, О.В. Петраш // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Хімія, хімічні технології та екологія".– Харків: НТУ "ХПІ", 2021.– № 2 (6). С. 23–29. doi: 10.20998/2079-0821.2021.02.10.
11. Russell T.F., & Wheeler M.F. (1983). Finite element and finite difference methods for continuous flows in porous media. In *The mathematics of reservoir simulation* (pp. 35–106). Society for Industrial and Applied Mathematics.
12. Qi M., Li M., Moghanloo R.G., & Guo, T. (2021). A novel simulation approach for particulate flows during filtration. *AIChE Journal*, 67(4), e17136. DOI:10.1002/aic.17136.

Bibliography (transliterated)

1. Abou-Kassem J.H., Farouq-Ali S.M., & Islam M.R. (2013). *Petroleum Reservoir Simulations*. Elsevier, 1(2), 45–67.
2. Ohen H.A., & Civan F. (1993). Simulation of formation damage in petroleum reservoirs. *SPE Advanced Technology Series*, 1(01), 27–35.
3. Douglas J., Furtado F., & Pereira F. (1997). On the numerical simulation of waterflooding of heterogeneous petroleum reservoirs. *Computational Geosciences*, 1(2), 155–190.

4. Higham, D. J. (2001). An algorithmic introduction to numerical simulation of stochastic differential equations. *SIAM review*, 43(3), 525–546.
5. Wu Y.S., & Pruess K. (1988). A multiple-porosity method for simulation of naturally fractured petroleum reservoirs. *SPE Reservoir Engineering*, 3(01), 327–336.
6. Azyz Kh., Settary E. *Matematycheskoe modelyrovanye plastovykh system*. M.: Ynt kompiut. yssled., 2004. 416 p.
7. Chen Z., Huan G., Ma Y. *Computational methods for multiphase flows in porous media*. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2006. 521 p.
8. Ertekin T., Abou-Kassem J. H., King G. R. *Basic applied reservoir simulation*. Texas: Richardson, 2001. 421 p.
9. Trangenstein J.A., & Bell J.B. (1989). Mathematical structure of the black-oil model for petroleum reservoir simulation. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 49(3), 749–783.
10. Lubkov M.V. Modeliuvannia produktyvnoho tysku v neodnorodnykh naftonosnykh plastakh / M.V. Lubkov, O.O. Zakharchuk, V.I. Dmytrenko, O.V. Petrash // *Visnyk NTU «KhPI»*. Seriya: Khimiia, khimichni tekhnologii ta ekolohiia». – Kharkiv : NTU "KhPI", 2021. – № 2 (6). P. 23–29. doi: 10.20998/2079-0821.2021.02.10.
11. Russell T.F., & Wheeler M.F. (1983). Finite element and finite difference methods for continuous flows in porous media. In *The mathematics of reservoir simulation* (pp. 35–106). Society for Industrial and Applied Mathematics.
12. Qi M., Li M., Moghanloo R.G., & Guo T. (2021). A novel simulation approach for particulate flows during filtration. *AIChE Journal*, 67(4), e17136. DOI:10.1002/aic.17136.

УДК 553.982.2

Лубков М.В., доктор фіз.-мат. наук, професор, Мосійчук К.О., аспірантка

МЕТОД ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ У СЛАБОПРОНИКНИХ АНІЗОТРОПНИХ ПЛАСТАХ З МЕТОЮ ЗБІЛЬШЕННЯ НАФТОВІДДАЧІ

Об'єктом дослідження є фільтраційний процес у слабопроникних анізотропних пластах (САП). Робота присвячена оцінюванню процесу виснаження нафтоносного пласта, використовуючи за критерій розподіл пластового тиску поблизу системи видобувних та нагнітальних свердловин з урахуванням анізотропії проникності нафтової фази. В ході дослідження представлений комбінований метод чисельного моделювання на основі скінченно-елементного та методу кінцевих різниць, який дозволяє визначити значення пластового тиску в довільній точці розрахункової області.

Запропонований у даній роботі скінченно-елементно-різницевий метод, який дає змогу поєднувати переваги скінченно-елементного методу та методу скінченних різниць, для розв'язання нестационарної задачі п'єзопровідності з огляду на неоднорідний розподіл різних фільтраційних параметрів усередині деформованого пласта та на його межах дає змогу адекватно обчислити розподіл пластового тиску в реальних умовах експлуатації свердловин, що дає ряд переваг порівнюючи з існуючими методами. Встановлено, що вплив проникності нафтової фази у зсувному напрямку домінує над впливом проникності у осьових напрямках. Це пов'язано з тим, що з отриманої інформації, для ефективного використання анізотропних слабопроникних пластів необхідно розміщувати видобувні та нагнітальні свердловини в областях з відносно низькою анізотро-

пією проникності пласта, особливо уникати місць із наявністю зсувної проникності пласта. Таке важливе розташування свердловин, щоб з однієї сторони не відбувалось блокування нафти з боку пониженої проникності, а з іншої сторони не відбувалось швидке виснаження пласта з боку підвищеної проникності та не припинявся взаємний обмін між видобувною та нагнітальною свердловинами. При розміщенні системи видобувних та нагнітальних свердловин у анізотропних пластах нафтового родовища необхідно проведення системного аналізу навколишньої анізотропії пластів з метою такого їх розміщення, яка б забезпечувала ефективну динаміку процесів фільтрації навколо цих свердловин та збільшення нафтовіддачі.

Ключові слова: моделювання, слабопроникні анізотропні пласти (САП), нафтовіддача пластів, нагнітальні свердловини, комбінований метод, метод кінцевих різниць, метод кінцевих елементів.

Лубков М.В., доктор физ.-мат. наук, профессор, Мосийчук К.А., аспирантка

МЕТОД ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СЛАБОПРОНИЦАЕМЫХ АНИЗОТРОПНЫХ ПЛАСТАХ С ЦЕЛЮ УВЕЛИЧЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ

Объектом исследования является фильтрационный процесс в слабопроницаемых анизотропных пластах (САП). Работа посвящена оценке процесса истощения нефтеносного пласта, используя в качестве критерия распределение пластового давления вблизи системы добывающих и нагнетательных скважин с учетом анизотропии проницаемости нефтяной фазы. В ходе исследования представлен комбинированный метод численного моделирования на основе конечно-элементного и метода конечных разностей, который позволяет определить значение пластового давления в произвольной точке расчетной области.

Предложенный в данной работе конечно-элементно-разностный метод, который позволяет сочетать преимущества конечно-элементного метода и метода конечных разностей, для решения нестационарной задачи пьезопроводности с учетом неоднородного распределения различных фильтрационных параметров внутри деформированного пласта и на его границах позволяет адекватно вычислить распределение пластового давления в реальных условиях эксплуатации скважин, что дает ряд преимуществ по сравнению с существующими методами. Установлено, что влияние проницаемости нефтяной фазы в сдвиговом направлении доминирует над влиянием проницаемости в осевых направлениях. Это связано с тем, что из полученной информации, для эффективного использования анизотропных слабопроницаемых пластов необходимо размещать добывающие и нагнетательные скважины в областях с относительно низкой анизотропией проницаемости пласта, особенно избегать мест с наличием сдвиговой проницаемости пласта. Такое важное расположение скважин, чтобы с одной стороны не происходило блокирование нефти со стороны пониженной проницаемости, а с другой стороны не происходило быстрое истощение пласта со стороны повышенной проницаемости и не прекращался взаимный обмен между добывающей и нагнетательной скважинами. При размещении системы добывающих и нагнетательных скважин в анизотропных пластах нефтяного месторождения необходимо проведение системного анализа окружающей анизотропии пластов с целью такого их размещения, которая бы обеспечивала эффек-

тивную динамику процессов фильтрации вокруг этих скважин и увеличение нефтеотдачи.

Ключевые слова: моделирование, слабопроницаемые анизотропные пласты (САП), нефтеотдача пластов, нагнетательные скважины, комбинированный метод, метод конечных разностей, метод конечных элементов.

Lubkov M.V., Mosiichuk K.A.

NUMERICAL SIMULATION METHOD IN LOW PERMEABLE ANISOTROPIC RESERVOIRS IN ORDER TO INCREASE OIL RECOVERY

The object of study is the filtration process in weakly permeable anisotropic formations (SAP). The work is devoted to the evaluation of the process of oil-bearing formation depletion, using as a criterion the distribution of reservoir pressure near the system of production and injection wells, taking into account the anisotropy of the permeability of the oil phase. In the course of the study, a combined numerical modeling method based on the finite element and finite difference methods is presented, which allows determining the value of reservoir pressure at any point in the computational domain.

The finite-element-difference method proposed in this paper, which combines the advantages of the finite-element method and the finite-difference method to solve the nonstationary piezoelectric conductivity problem, taking into account the heterogeneous distribution of various filtration parameters within the deformed formation and at its boundaries, allows us to adequately calculate the distribution of reservoir pressure in real-world well operation conditions, which gives a number of advantages over existing methods. It was found that the effect of oil phase permeability in the shear direction dominates the effect of permeability in the axial directions. This is due to the fact that, according to the information obtained, for the effective use of anisotropic low-permeability formations, it is necessary to place production and injection wells in areas with relatively low anisotropy of formation permeability, especially to avoid areas with the presence of shear permeability of the formation. It is important to locate wells so that, on the one hand, there is no blockage of oil from the low permeability side, and, on the other hand, there is no rapid depletion of the formation from the high permeability side and the mutual exchange between the production and injection wells does not stop. When placing a system of production and injection wells in anisotropic formations of an oil field, it is necessary to conduct a systematic analysis of the surrounding anisotropy of the formations in order to place them in such a way that would ensure effective dynamics of filtration processes around these wells and increase oil recovery.

Keywords: modeling, low-permeability anisotropic reservoirs (ASP), oil recovery, injection wells, combined method, finite difference method, finite element method.

Чернявський А.В., Григоров А.Б., д. техн. н., професор

ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ПАЛИВА ДЛЯ СУДНОПЛАВСТВА, ОТРИМАНОГО З ВТОРИННОЇ ПОЛІМЕРНОЇ СИРОВИНИ

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",
Харків, Україна

Ключові слова: морське паливо; фракції; полімерна сировина; каталізатор; піроліз; цетановий індекс; кінематична в'язкість; сірка; елементний склад; теплота згоряння; шкідливі викиди.

Вступ. Під експлуатаційними властивостями палива прийнято розуміти його об'єктивні особливості, які проявляються у процесі його безпосереднього застосування у двигуні внутрішнього згоряння (ДВС). Процес згоряння палива в ДВС є основним і визначальним для його експлуатаційних властивостей, які, у свою чергу, істотно впливають на надійність та довговічність ДВС. Рівень експлуатаційних властивостей визначається відповідними показниками, прийняті значення яких здебільше залежать від якості сировини, рівня розвиненості та культури технології виробництва. Визначення цих показників необхідно здійснювати при вхідному та періодичному контролі якості палива, а особливо в тих випадках, коли здійснюється впровадження в експлуатацію нових видів та сортів палив.

Мета та постановка завдання дослідження. Промислове впровадження процесу виробництва палива для судноплавства з вторинної поліолефінової сировини (HDPE та PP) потребує його налаштування та регулювання, яке можна здійснювати за якістю отриманого кінцевого продукту – *marine gasoil* (MGO). Запропонований нами процес виробництва MGO складається з двох стадій: I стадія – протікання реакцій на суміші (1:1) цеолітвмісних каталізаторів Zn-H-ZSM-5/Fe-H-ZSM-5; II – на каталізаторі Ni-H-ZSM-5. Для визначення ефективності застосування цих каталізаторів у порівнянні з промисловим каталізатором H-ZSM-5 [1], а також регулювання процесу піролізу в цілому, необхідно здійснювати контроль якості продуктів за показниками, що характеризують експлуатаційні властивості, на кожній стадії процесу. Зважаючи на це, враховуючи вид полімерної сировини, для фракції з межами википання 180–360(380) °C – основи для виробництва палива для судноплавства, нами було здійснено визначення цетанового індексу (ЦІ, од.); кінематичної в'язкості при 40 °C (ν^{40} , мм²/с); вмісту сірки (S, ppm), алюмінію (Al, ppm) та кремнію (Si, ppm); співвідношення H:C; робочої теплоти згоряння (Q, МДж/кг).

Так, ЦІ характеризує самозаймання палива і здатність його до рівномірного горіння [2, 3]. У разі низького цетанового індексу відбувається запізнення самозаймання палива і швидке горіння (виникає «стук» у двигуні). Чим вище ЦІ палива, тим коротший період займання, і тим легше запускається двигун. Крім того, значно збільшується потужність двигуна. ЦІ можна підвищити за допомогою присадок, але при тривалому зберіганні такого палива його цетановий індекс знижується. Тому ці присадки слід додати до палива безпосередньо перед його застосуванням.

Кінематична в'язкість відноситься до числа найважливіших показників якості палив та має велике значення для забезпечення надійної роботи системи подачі палива, зокрема роботи паливного насосу. Наявність в паливі S визначає його екологічні властивості та може зумовлювати корозійний вплив палива на метали.

Вміст Al та Si в паливі необхідно визначати, в першу чергу, для контролю проведення технологічного процесу його виробництва. Так, при використанні каталізаторів, слід звертати увагу на їх здатність до стирання при якому, утворюється дрібний каталізаторний пил. Цей пил підхоплюється парами продуктів реакцій та може потрапляти до складу кінцевого продукту – морського палива, погіршуючи його експлуатаційні властивості. Враховуючи, що для отримання морського палива використовується цеолітний каталізатор матриця якого складається з $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, то в отриманому паливі необхідно визначати відповідні елементи. Також, ці елементи можуть потрапляти до товарного палива з сировини, яка часто може містити у своєму складі різні домішки, барвники тощо.

Відомо, що основну частину будь-якого моторного палива становлять вуглець (C) та водень (H), а їх співвідношення (H:C) впливає на утворення шкідливих забруднюючих викидів у вигляді CO_2 [4, 5]. Також зазначимо, що термін «декарбонізація» промисловості власне і полягає в системі заходів, що реалізуються під час виробництва палива та спрямовані на збільшення в ньому співвідношення H:C [6]. Ключовим моментом в реалізації декарбонізації морських палив, отриманих з вторинної полімерної сировини, є застосування в каталізаторах піролізу певних металів та їх співвідношення. Отже, чим вище співвідношення H:C, тим більш екологічним вважається паливо. Від співвідношення H:C, залежить і такий досить важливий експлуатаційний показник морського палива як його Q. Від цього показника залежить власне витрата палива [7]. Причому, кисень, азот, сірка, волога і негорючі мінеральні речовини, що входять до складу палива, є енергетичним баластом.

Таким чином, означені показники якості були обрані для визначення з огляду на те, що вони мають дуже важливе значення для експлуатації моторних палив, зокрема палив для судноплавства.

Експериментальні дослідження. Зазначимо, що під час проведення експериментальних досліджень в лабораторних умовах нами досліджувалися фракції, отримані на каталізаторі H-ZSM-5 (Проба №1); Zn-H-ZSM-5/Fe-H-ZSM-5 (Проба № 2); Zn-H-ZSM-5/Fe-H-ZSM-5, Ni-H-ZSM-5 (Проба №3). Розрахунок ЦІ для означених проб здійснювався в залежності від температури початку кипіння ($t_{п.к.}$, °C) фракції за формулою, наведеною в роботі [8]. Для цього, у відповідності до ASTM D4052-22 було визначено густину при 15 °C та за ASTM D86 температуру кипіння 50 % (за об'ємом) фракції п.к-360(380) °C. Визначення v^{40} проходило за ISO 3104, вміст сірки – за ISO 14596, Al та Si – за допомогою оптико-емісійного спектрометру з індуктивно зв'язаною плазмою Agilent 5900 ICP-OES. Співвідношення H:C визначалося за ASTM D1838, а теплота згоряння за ASTM D240. Результати визначення наведених вище показників якості згідно стандартизованих методик представлені на рис. 1–4.

Цетановий індекс (ЦІ, од.) фракцій каталітичного піролізу полімерної сировини (див. рис. 1) з підвищенням їх $t_{п.к.}$ на 80 °C підвищується на 15–19 од. Величина ЦІ фракцій напряму пов'язана з вмістом ароматичних вуглеводнів в фракції, які негативно впливають на такий важливий експлуатаційний показник палива, як його самозаймистість у дизельних двигунах. Відомо, що чим вище вміст ароматичних вуглеводнів в фракції або паливі, тим нижче величина цетанового індексу [9, 10].

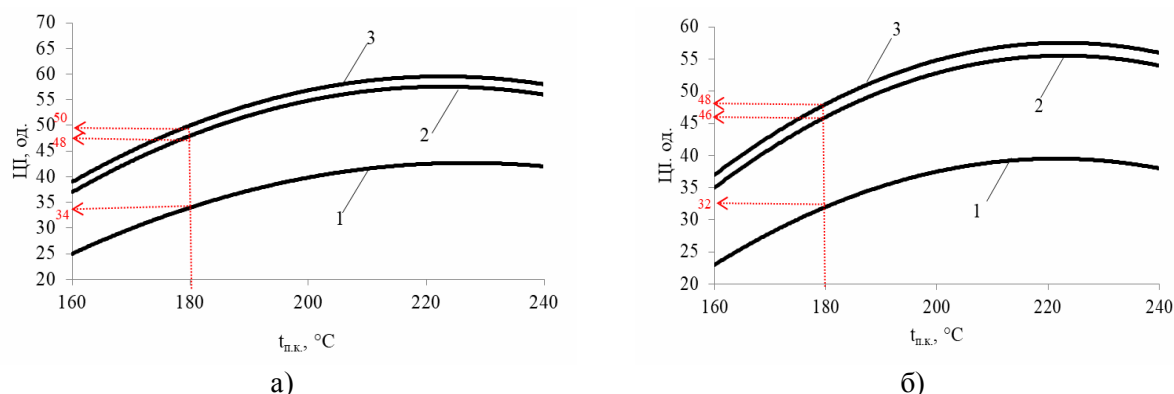


Рисунок 1 – Залежність ρ від $t_{п.к.}$ для HDPE (а) та PP (б):
1 – Проба №1; 2 – Проба №2; 3 – Проба №3

Вміст ароматичних сполук в отриманих фракціях досліджувався з використанням газової хромато-мас-спектрометрії (ГХ/МС), яка сьогодні широко використовується для кількісного визначення окремих компонентів у складних сумішах [11, 12].

Згідно з ISO 8217:2017 ρ морських дистильяних палив марок DMA, DFA, DMZ, DFZ повинен бути не нижче за 40 од. Як видно з представлених залежностей, фракції, які отримані на каталізаторі Zn-H-ZSM-5/Fe-H-ZSM-5 та Zn-H-ZSM-5/Fe-H-ZSM-5, Ni-H-ZSM-5 та мають $t_{п.к.}$ на рівні 180 °C повністю відповідають цьому критерію. І, навпаки, фракція, що отримана на промисловому каталізаторі H-ZSM-5 внаслідок високого вмісту ароматичних вуглеводнів (до 30 %) та низького вмісту нафтових вуглеводнів (до 13 %), не відповідає цьому критерію.

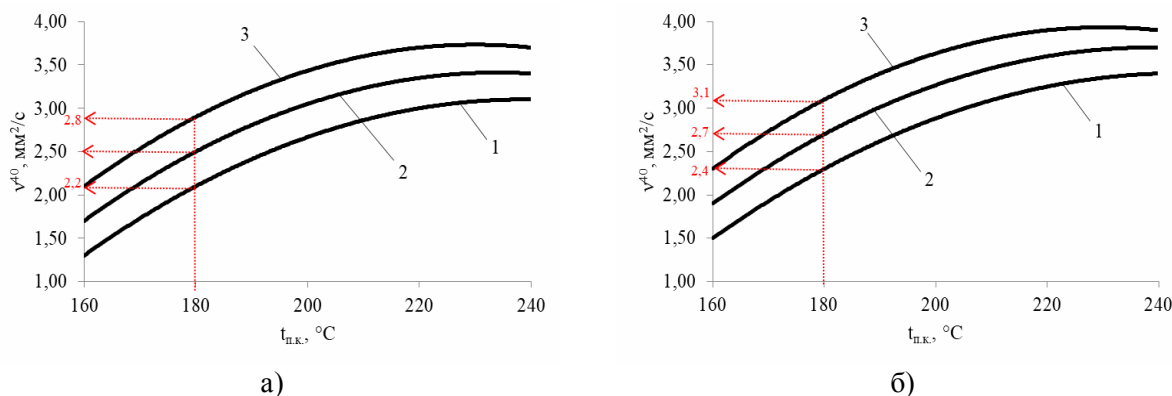


Рисунок 2 – Залежність ν^{40} від $t_{п.к.}$ для HDPE (а) та PP (б):
1 – Проба №1; 2 – Проба №2; 3 – Проба №3

Кінематична в'язкість фракцій каталітичного піролізу полімерної сировини (див. рис. 2) з підвищенням їх $t_{п.к.}$ на 80 °C, збільшується на 1,6–1,9 мм²/с. Причому, максимальними значеннями кінематичної в'язкості характеризуються фракції, отримані на каталізаторах Zn-H-ZSM-5/Fe-H-ZSM-5, Ni-H-ZSM-5. Фракції, отримані з PP, характеризуються де-що вищими значеннями кінематичної в'язкості (на 0,2–0,3 мм²/с) ніж фракції, отримані з HDPE. Фракції, отримані на каталізаторі Zn-H-ZSM-5/Fe-H-ZSM-5 мають меншу кінематичну в'язкість ніж фракції отримані на каталізаторах Zn-H-ZSM-5/Fe-H-ZSM-5, Ni-H-ZSM-5. Отримані результати, пояснюється з огляду на тісний вза-

ємний зв'язок між кінематичною в'язкістю та молекулярною масою вуглеводнів, що входять до складу фракцій. Відомо, що чим вища молекулярна маса фракції, що складається з молекулярних мас компонентів, тим вища її кінематична в'язкість [13].

Вміст S, Al та Si в отриманих фракціях знаходиться на рівні нижчому, ніж поріг визначення. Але слід розуміти, що при реалізації даної технології на сумішах полімерів, які поступають з сміттєзвалищ та мають в своєму складі різні барвники та домішки, вміст сірки в рідких продуктах піролізу може доходити до 300 ppm, а вміст Al+Si – до 60 ppm.

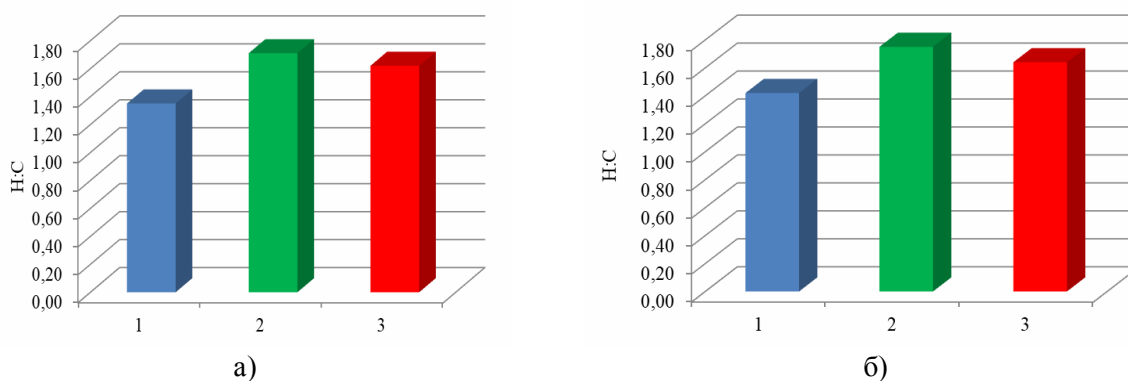


Рисунок 3 – Результати визначення Н:С для HDPE (а) та PP (б):
1 – Проба №1; 2 – Проба №2; 3 – Проба №3

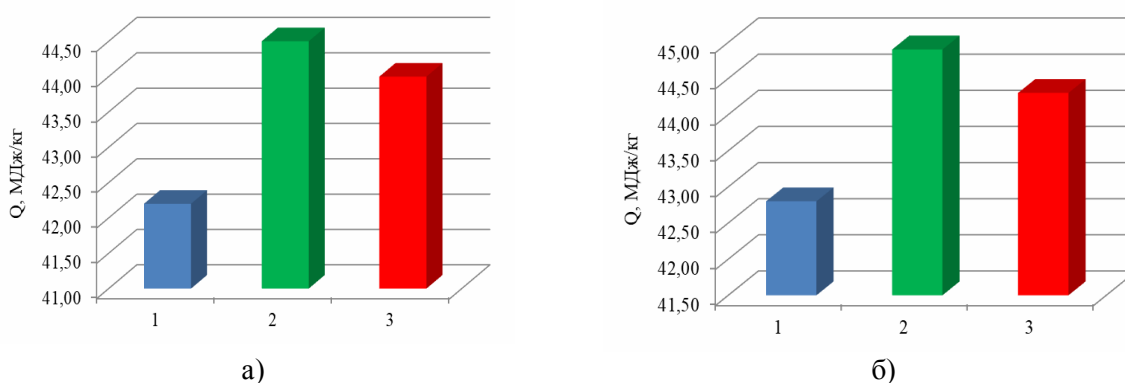


Рисунок 4 – Результати визначення Q для HDPE (а) та PP (б):
1 – Проба №1; 2 – Проба №2; 3 – Проба №3

Як видно з рис. 3, для HDPE і PP фракції, які отримані на промисловому катализаторі H-ZSM-5, характеризуються мінімальною величиною Н:С – 1,35 та 1,42, відповідно. І, навпаки, фракції, які отримані на катализаторі Zn-H-ZSM-5/Fe-H-ZSM-5 володіють максимальною величиною співвідношення Н:С: для HDPE – 1,71; для PP – 1,75. Фракції, отримані в дві стадії на катализаторах Zn-H-ZSM-5/Fe-H-ZSM-5, Ni-H-ZSM-5 за величиною співвідношення Н:С займають проміжне значення між наведеними вище фракціями. Це зумовлено, насамперед, хімічними реакціями вуглеводнів (синтез, диспропорціювання водню тощо), що протікають на активних центрах катализаторів.

Виділення теплоти при згорянні отриманих фракцій (див. рис. 4) буде визначатися, головним чином, співвідношенням Н:С, збільшення частки Н зумовлює підви-

щення теплоти згоряння фракції, зважаючи на те, що теплота згоряння Н (≈ 120 МДж/кг) дець в 3,6 рази вище теплоти згоряння С (≈ 33 МДж/кг) [14].

Висновки. Проведені експериментальні дослідження показали, що за величиною ЦІ (48–50 од.) та ν^{40} (2,8–3,1 мм²/с) фракції з межами википання 180–360(380) °С, які отримані піролізом полімерної сировини по запропонованій нами двохстадійній технології (на каталізаторах Zn-H-ZSM-5/Fe-H-ZSM-5, Ni-H-ZSM-5) можна віднести до марок дистильованих морських палив DMA, DFA, DMZ, DFZ (ISO 8217:2017). Також ці фракції характеризувалися досить високим співвідношенням Н:С (для HDPE – 1,62; для PP – 1,64) та робочою теплою згоряння (для HDPE – 44,0 МДж/кг; для PP – 44,3 МДж/кг).

Таким чином, отримані нами фракції з межами википання 180–360(380) °С, можуть використовуватися в якості палив для судноплавства, які, у свою чергу, будуть відповідати сучасним екологічним тенденціям щодо декарбонізації промисловості, прийнятим в країнах Європейського Союзу.

Література

1. P. Terzioğlu S. Synthesis and characterization of ZSM-5 zeolite from wheat hull ash / S. Terzioğlu, M. Yücel, S. Öztürk, K. Ozdemir, M. Polat, M. Tanoglu // Proceedings of the 1st International Porous and Powder Materials Symposium and Exhibition (PPM '13). – 2013. – P. 292–296.
2. Bazarov B.I. Method For Determining The Cetan Numbers Of Synthetic Diesel Fuel / B.I. Bazarov, O.Z. Odilov, N.I. Otabayev, P.R. Fayziev // Journal of Positive School Psychology. – 2022. – Vol. 6. – No. 9. P. 3827–3833.
3. Dianne Luning Prak. Cetane number, derived cetane number, and cetane index: When correlations fail to predict combustibility/ Dianne Luning Prak, JayCooke, Terrence Dickerson, Andy Mc Daniel, Jim Cowart// Fuel. – 2021. – Vol.289. – 119963.
4. Aylin Çiğdem Köne. Forecasting of CO2 emissions from fuel combustion using trend analysis / Aylin Çiğdem Köne, Tayfun Büke // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2010. – P. 2906–2915.
5. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China / Zhu Liu, Dabo Guan, Wei Wei, Steven J. Davis // Nature. – 2015. – Vol. 524. – P. 335–338.
6. Mariana Andrei. Decarbonization of industry: Guidelines towards a harmonized energy efficiency policy program impact evaluation methodology / Mariana Andrei, Patrik Thollander, Inge Pierre, Bernard Gindroz, Patrik Rohdin // Energy Reports. – 2021. – Vol.7. – P. 1385–1395.
7. Téré D., Christian T., Kayaba H., Boubou B., Sayouba S., Tizane D., Jean K., Oumar S., Belkacem Z., Antoine B. Evaporation and Combustion of a Drop of Liquid Fuel-A Review // Smart Grid and Renewable Energy. – 2022. – Volume 13. – P. 28–54.
8. Heni Fidyayuningrum, Rois Fatoni, Kun Harismah. Characteristics of Cetane index of traditional diesel oil in Wonocolo district, Bojonegoro // International Energy Conference ASTECHOVA. – 2020. – 040003.
9. Yoshiyuki Kidoguchi, Changlin Yang, Ryoji Kato, Kei Miwa. Effects of fuel cetane number and aromatics on combustion process and emissions of a direct-injection diesel engine // JSAE Review. – 2000. – Volume 21. – Issues 4. – P. 469–475.

10. Sharafutdinov V.I. Dependence of Cetane Index on Aromatic Content in Diesel Fuels / V.I. Sharafutdinov, Dicho Stratiev, Ivelina Shishkova, Rosen Dinkov // Gas European Magazine. – 2012. Vol. – 38. – No 3. – P. 148–152.
11. Sparkman D.O. Gas Chromatography and Mass Spectrometry: A Practical Guide / Sparkman D.O., Penton Z., Kitson F.G. Academic Press, 2011. – 632 p.
12. Jones M. Gas Chromatography-Mass Spectrometry / M. Jones // American Chemical Society. – 2019.
13. Donald F. Schneider. Select the Right Hydrocarbon Molecular Weight Correlation. Chemical Engineer Stratus Engineering, Inc., 1998. – 20 p.
14. Smith D.K. Chemistry data book / D.K. Smith. The University of York, 2011. – 106 p.

УДК 662.7

Чернявський А.В., Григоров А.Б.

ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ПАЛИВА ДЛЯ СУДНОПЛАВСТВА, ОТРИМАНОГО З ВТОРИННОЇ ПОЛІМЕРНОЇ СИРОВИНИ

В статті обґрунтовано необхідність визначення експлуатаційних властивостей палива для судноплавства, отриманого з вторинної поліолефінової (HDPE та PP) сировини шляхом каталітичного піролізу. Оцінювати експлуатаційні властивості палива для судноплавства – marine gasoil (MGO) пропонується за значенням цетанового індексу (ЦІ, од.), співвідношення Н:С, робочої теплоти згоряння (Q , МДж/кг).

З огляду на запропоновану нами схему каталітичного піролізу полімерної сировини, яка складається з двох стадій (І стадія – протікання реакцій на суміші (1:1) цеолітвмісних каталізаторів Zn-H-ZSM-5/Fe-H-ZSM-5; II стадія – протікання реакцій на каталізаторі Ni-H-ZSM-5), виникає необхідність визначати наведені вище показники якості продуктів реакції (фракцій з межами википання п.к.-360(380) °C) після кожної стадії процесу. Також додатково нами були визначені показники якості і для фракцій, отриманих на промисловому каталізаторі H-ZSM-5. Запропонована програма досліджень, з одного боку, дозволяє визначити ефективність процесу піролізу з обраними каталізаторами у порівнянні з промисловою технологією, з іншого – дозволить корегувати процес в напрямку отримання кінцевого продукту рівня якості, який відповідає вимогам до MGO, представленим в ISO 8217:2017.

Проведені дослідження показали, що за величиною ЦІ (48–50 од.) та v^{40} (2,8–3,1 мм²/с) фракції з межами википання 180–360(380) °C, які отримані піролізом полімерної сировини по запропонованій нами двохстадійній технології (на каталізаторах Zn-H-ZSM-5/Fe-H-ZSM-5, Ni-H-ZSM-5) можна віднести до марок дистильтних морських палив DMA, DFA, DMZ, DFZ (ISO 8217:2017). Дані фракції також характеризуються високим співвідношенням Н:С (для HDPE – 1,62; для PP – 1,64) та робочою теплотою згоряння (для HDPE – 44,0 МДж/кг; для PP – 44,3 МДж/кг), що дає змогу використовувати їх в якості палив для судноплавства.

Ключові слова: морське паливо; фракції; полімерна сировина; каталізатор; піроліз; цетановий індекс; кінематична в'язкість; сірка; елементний склад; теплота згоряння; шкідливі викиди.

Чернявський А.В., Григоров А.Б.

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТОПЛИВА ДЛЯ СУДОХОДСТВА, ПОЛУЧЕННОГО ИЗ ВТОРИЧНОГО ПОЛИМЕРНОГО СЫРЬЯ

В статье обоснована необходимость определения эксплуатационных свойств топлива для судоходства, полученного из вторичного полиолефинового (HDPE и PP) сырья путем каталитического пиролиза. Оценивать эксплуатационные свойства топлива для судоходства – marine gasoil (MGO), предлагается по значению цетанового индекса (ЦИ, ед.), соотношения Н:С, рабочей теплоты сгорания (Q, МДж/кг).

Учитывая предложенную нами схему каталитического пиролиза полимерного сырья, которая состоит из двух стадий (I стадия – протекание реакций на смеси (1:1) цеолитсодержащих катализаторов Zn-H-ZSM-5/Fe-H-ZSM-5; II стадия – протекание реакций на катализаторе Ni-H-ZSM-5), возникает необходимость определять приведенные выше показатели качества продуктов реакции (фракций с пределами выкипания п.к.-360(380) °C) после каждой стадии процесса. Также дополнительно нами были определены показатели качества и для фракций, полученных на промышленном катализаторе H-ZSM-5. Предложенная программа исследований, с одной стороны, позволяет определить эффективность процесса пиролиза с выбранными катализаторами по сравнению с промышленной технологией, с другой – позволит корректировать процесс в направлении получения конечного продукта с уровнем качества, отвечающего требованиям к MGO, представленным в ISO 8217:2017.

Проведенные исследования показали, что по величине ЦИ (48–50 ед.) и v^{40} (2,8–3,1 мм²/с) фракции с пределами выкипания 180–360(380) °C, которые получены пиролизом полимерного сырья по предложенной нами двухстадийной технологии (на катализаторах Zn-H-ZSM-5/Fe-H-ZSM-5, Ni-H-ZSM-5), можно отнести к маркам дистиллятных морских топлив DMA, DFA, DMZ, DFZ (ISO 8217:2017). Данные фракции также характеризуется высоким соотношением Н:С (для HDPE – 1,62; для PP – 1,64) и рабочей теплотой сгорания (для HDPE – 44,0 МДж/кг; для PP – 44,3 МДж/кг), что позволяет использовать их в качестве топлив для судоходства.

Ключевые слова: морское топливо; фракции; полимерное сырье; катализатор; пиролиз; цетановый индекс; кинематическая вязкость; сера; элементный состав; теплота сгорания; вредные выбросы.

Chernyavsky A.V., Grigorov A.B.

PERFORMANCE PROPERTIES OF MARINE FUEL DERIVED FROM SECONDARY POLYMER RAW MATERIALS

The article substantiates the need to determine the operational properties of shipping fuel obtained from secondary polyolefin (HDPE and PP) raw materials by catalytic pyrolysis. It is proposed to evaluate the operational properties of fuel for shipping – marine gasoil (MGO) by the value of the cetane index (CI, unit), H:C ratio, working heat of combustion (Q, MJ/kg).

In view of the scheme of catalytic pyrolysis of polymeric raw materials proposed by us, which consists of two stages (I stage - the course of reactions on a mixture (1:1) of zeolite-containing catalysts Zn-H-ZSM-5/Fe-H-ZSM-5; II stage – the course of reactions on the Ni-H-ZSM-5 catalyst), it is necessary to determine after each stage of the process the quality indicators of the reaction products (fractions with boiling points of -360(380) °C) given above. Also, additionally, we determined the quality indicators for the fractions obtained on the H-ZSM-5 industrial catalyst. The proposed research program, on the one hand, allows to determine the efficiency of the pyrolysis process with the selected catalysts in comparison with industrial technology, on the other hand, it will allow to adjust the process in the direction of obtaining a final product of a quality level that meets the requirements for MGO presented in ISO 8217:2017.

The conducted studies showed that by the value of CI (48-50 units) and v^{40} (2,8–3,1 mm²/s) the fractions with boiling points of 180–360(380) °C, which were obtained by pyrolysis of polymer raw materials according to the two-stage technology proposed by us (on Zn-H-ZSM-catalysts 5/Fe-H-ZSM-5, Ni-H-ZSM-5) can be attributed to the brands of distillate marine fuels DMA, DFA, DMZ, DFZ (ISO 8217:2017). These fractions are also characterized by a high H:C ratio (for HDPE – 1.62; for PP – 1.64) and working heat of combustion (for HDPE – 44.0 MJ/kg; for PP – 44.3 MJ/kg), which makes it possible to use them as fuels for shipping.

Keywords: marine fuel; fractions; polymer raw materials; catalyst; pyrolysis; cetane index; kinematic viscosity; sulfur; elemental composition; heat of combustion; harmful emissions.

Дзевочко О.М., к.техн. наук, доцент, Подустов М.О., д.техн.наук, професор,
Дзевочко А.І., к.техн.наук

РОЗРОБКА НОВОЇ АПАРАТУРНО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ПРОЦЕСУ СУЛЬФАТУВАННЯ СУМІШЕЙ ОРГАНІЧНИХ РЕЧОВИН

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Ключові слова: апаратурно-технологічна схема, сульфатування, суміш, органічна речовина.

Вступ. Поверхнево-активна речовина (ПАР) на основі вищих спиртів фр. $C_{12} - C_{14}$ знаходить основне використання в широкому спектрі засобів особистої гігієни, таких як шампуні, піноутворюючі засоби для ван, зубні паста, рідина для миття посуду, делікатні засоби для прання білизни [1, 2] та ін. Використання ПАР на основі суміші вищих спиртів фр. $C_{12} - C_{14}$ та моноетаноламідів вищих жирних спиртів кокосової олії [3] дає можливість значно покращити якісні характеристики засобів особистої гігієни.

Аналіз літературних даних. Огляд літератури [4–9] показує, що процесу отримання поверхнево-активних речовин приділяють у світі значну увагу. В літературі [10] повністю наведено опис апаратури на окремих етапах отримання ПАР, зокрема і на етапі процесу сульфатування. Автор підтверджує, що для процесу сульфатування рекомендується використовувати трубчасті плівкові абсорбери. Автори [11] на базі трубчастого плівкового абсорбера провели значну кількість експериментальних даних з визначенням основних технологічних параметрів процесу сульфатування. Однак даних з сульфатування сумішей органічних речовин недостатньо. Такі дослідження дадуть можливість значно покращити якість продуктів косметичної промисловості, що випускаються.

Мета роботи. Розрахувати промисловий трубчастий плівковий абсорбер для сульфатування двокомпонентної суміші органічних речовин і на його основі розробити нову апаратурно-технологічну схему процесу сульфатування.

Основна частина. Основним елементом апаратурно-технологічної схеми процесу сульфатування сумішей органічних речовин є трубчастий плівковий абсорбер. Згідно проведених раніше досліджень [11] було показано, що для сульфатування двокомпонентних сумішей органічних речовин на основі вищих спиртів фр. $C_{12} - C_{14}$ та моноетаноламідів вищих жирних кислот кокосової олії необхідно використовувати трубчастий плівковий абсорбер [9], який має двоступінчате охолодження – верхня частина 1/3 довжини абсорбера, нижня частина 2/3 довжини абсорбера. Швидкість газоповітряного потоку планується підтримувати на рівні $V_r = 20$ м/с, мольне співвідношення реагентів 1,08 : 1,0, концентрація триоксиду сірки в газоповітряному потоці – 3,7 %, температура вихідних реагентів : рідинної фази – 313 К, газоповітряного потоку – 303 К, охолоджувальної води – 293 К.

Виходячи з таких вихідних даних був проведений розрахунок трубчастого плівкового абсорбера. Дані розрахунку наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати розрахунку промислового трубчастого абсорбера для сульфатування двокомпонентної суміші органічних речовин

Параметр	Показник
Продуктивність установки, т/рік	5000
Витрата суміші органічних речовин, м ³ /год	0,651
Лінійна щільність зрошування, м ² /с	$0,82 \cdot 10^{-4}$
Швидкість газоповітряного потоку в трубах, м/с	20
Концентрація триоксиду сірки в газоповітряному потоці	3,7
Мольне співвідношення реагентів	1,08 : 1,0
Початкова температура рідинної фази на вході в абсорбер, К	313
Кінцева температура рідинної фази на виході з абсорбера, К	305
Температура охолоджувальної води на вході в абсорбер, К	293
Внутрішній діаметр труб, м	0,037
Довжина реакційних труб, м	5,5
Товщина стінки труб, м	0,0025
Кількість труб, шт	19
Поверхня теплообміну верхньої секції, м ²	4,28
Поверхня теплообміну нижньої секції, м ²	8,56
Загальний діаметр абсорбера, м	0,5
Загальна висота абсорбера, м	7
Кінцевий ступінь сульфатування, %	97,9
Кольоровість отриманих продуктів, j , одиниць за йодною шкалою	1

Розрахунок промислового трубчастого абсорбера проводився згідно з розробленим алгоритмом та програмою на мові MatLab. В програмі був використаний ітераційний метод та реалізований розрахунок абсорбера на задану продуктивність за кількістю продуктів, що сульфатуються.

В трубчастому плівковому абсорбері труби розподіляються по його перетину за трикутною схемою (схема рівнобічних трикутників) [12].

Кількість труб для їх розташування за такою схемою розраховується за формулою:

$$n_{\text{тр}} = 3 \cdot a_N \cdot (a_N + 1) + 1, \quad (1)$$

де a_N – порядковий номер шестикутника рахуючи від центру.

Враховуючи конструктивні особливості системи плівкоутворення, відстань між центрами труб реактора сульфатування більша, ніж загальноприйнята, і розраховується за формулою:

$$S = 2 \cdot d_{\text{тр}}, \quad (2)$$

де $d_{\text{тр}}$ – зовнішній діаметр труб, м.

Розрахувавши кількість труб в залежності від номера шестикутника були одержані наступні результати (табл. 2)

Таблиця 2 – Розрахунок кількості труб

a_N	1	2	3	4
$n_{\text{тр}}$	7	19	37	61

З табл. 2 можна бачити, що значення кількості труб $n_{\text{тр}} = 19$ при $a_N = 2$.

Товщина трубної решітки складе:

$$\delta_{\min} \geq 5 = 1 \cdot d_{\text{тр}}, \quad (3)$$

тобто $\delta = 40$ мм.

В результаті розрахунку на трубній решітці розташовано 19 трубок діаметром 0,037/0,042, діаметр трубної решітки 0,5 м, площа трубного простору складає 0,0204 м², площа міжтрубного простору 0,1384 м².

Компанування трубного пучку в трубній решітці наведена на рис. 1.

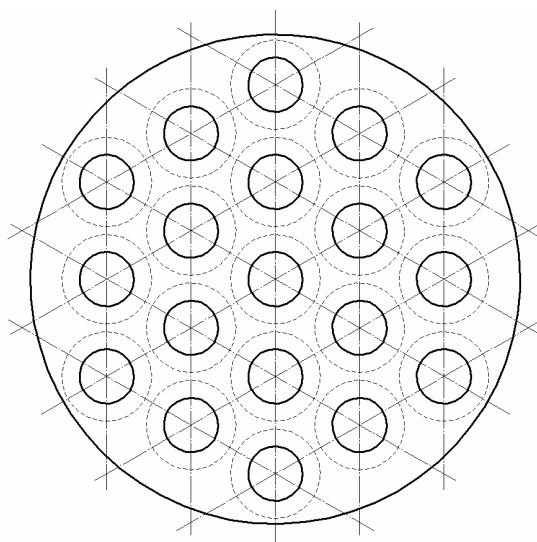


Рисунок 1 – Компонування 19 труб в трубному пучку

Були розглянуті основні конструктивні особливості трубчастого плівкового абсорбера згідно рекомендацій за літературними даними [9]. На рис. 2 наведено загальний вигляд абсорбера в зібраному стані.

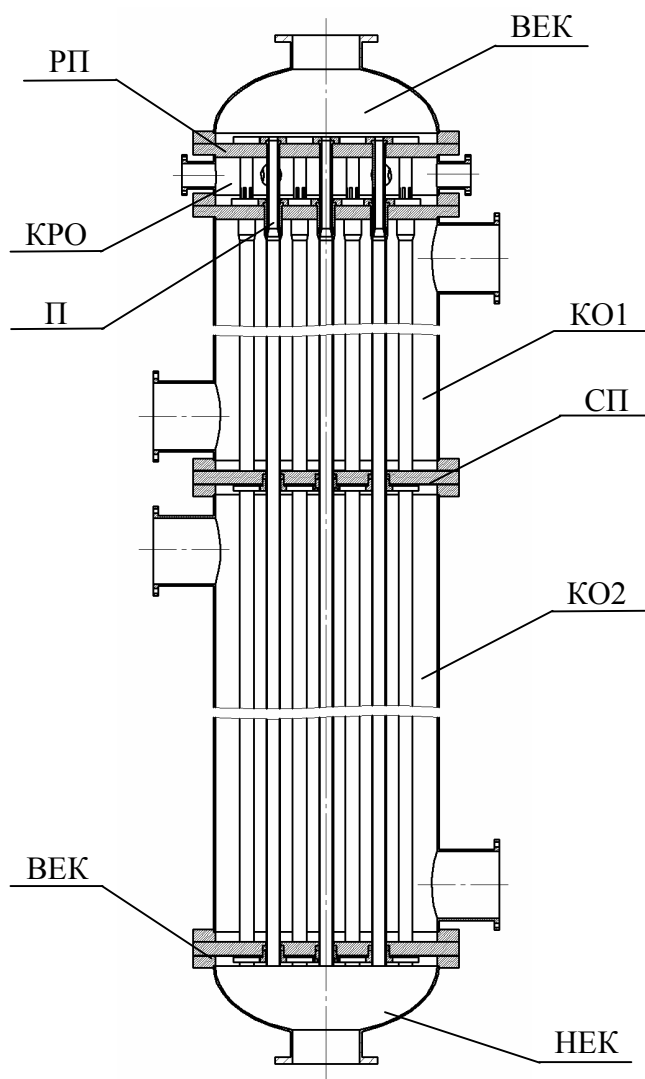


Рисунок 2 – Загальний вигляд абсорбера в складеному (зібраному) стані

Як можна побачити з рис. 2 абсорбер складається з таких основних елементів, це – верхньої еліптичної кришки (БЕК), розподільчої плити (РП) газоповітряного потоку (сульфатуючого агенту), камери для розподілу суміші органічних речовин (КРО), плівкоутворювачів (П), двох камер охолодження (КО1 та КО2) з роздільними проміжними сальниковими плитами (СП) та нижньої еліптичної кришки (НЕК).

На основі промислового трубчастого плівкового абсорбера була запропонована нова апаратурно-технологічна схема (рис. 3), яка забезпечить високу якість зотриманого продукту, значне зменшення шкідливих викидів, зниження питомих показників ресурсо- та енергоемності.

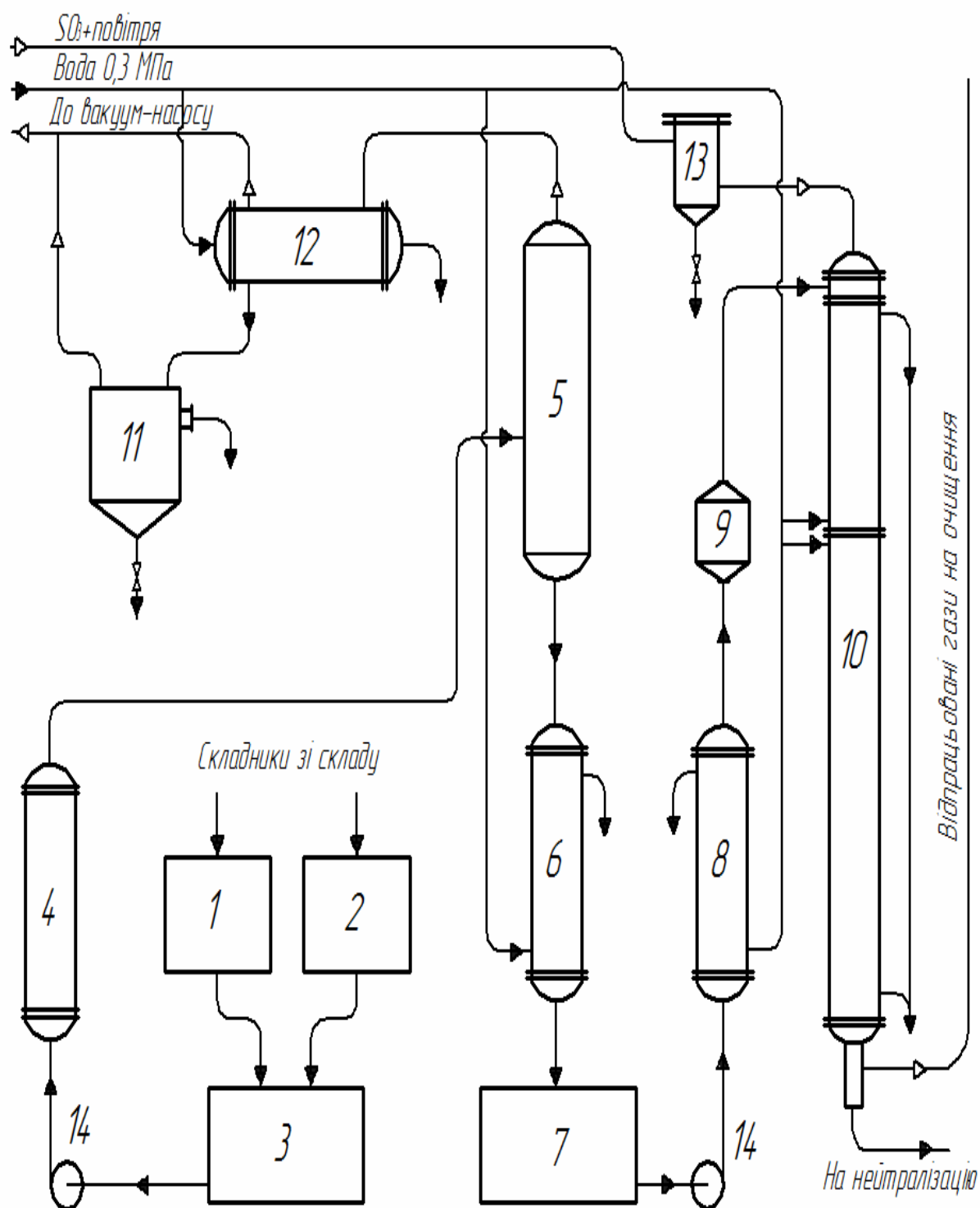


Рисунок 3 – Принципова апаратурно-технологічна схема процесу сульфатування двохкомпонентних сумішей органічних речовин газоподібним триоксидом сірки
 1 – 2 – ємності з окремими складниками; 3 – ємність для початкової речовини (суміш органічних речовин); 4 – підігрівач початкової речовини; 5 – вакуумосушувач; 6 – охолоджувач; 7 – ємність для осушеної початкової речовини; 8 – холодильник-термостат; 9 – фільтр; 10 – трубчастий плівковий абсорбер; 11 – барометрична ємність; 12 – конденсатор; 13 – краплевідбійник; 14 – насоси

Були проведені розрахунки основних техніко-економічних та екологічних показників від впровадження результатів досліджень. В табл. 3 показано, що реалізація запропонованої схеми відділення сульфатування продуктивністю 5 тис. т/рік поверхнево-активних речовин сприяє підвищенню ресурсоощадних показників виробництва: по органічній речовині за рахунок збільшення ступеня сульфатування з 91,4 % до 97,9 %, тобто на 6,5 %. Це дає можливість знизити витратні коефіцієнти з 0,779 т до 0,7 т органічних речовин на 1 т ПАР, використано суміші органічних речовин з більш низькою ціною, зменшено витрати на зовнішню електроенергію на 100 %.

Висновки

1. Проведено розрахунок конструкції промислового трубчастого плівкового абсорбера для здійснення процесу сульфатування двокомпонентних сумішей органічних речовин продуктивністю 5 тис. т/рік поверхнево-активних речовин.

2. Розроблена нова апаратно-технологічна схема енерго- та ресурсоощадного відділення сульфатування органічних речовин виробництва ПАР на базі промислового трубчастого плівкового абсорбера, що дозволяє за рахунок підвищеного ступеня сульфатування на рівні 97,9 % зменшити витрату органічної речовини на 9,3 % мас., тобто з 0,779 до 0,7 т. на 1 т. готового продукту.

Таблиця 3 – Техніко-економічні та екологічні показники процесу сульфатування в каскаді реакторів з мішалками і запропонованому трубчастому плівковому абсорбері на 1 т ПАР

№ п/п	Найменування	Кількісні характеристики, кг	
		Каскад реакторів з мішалками	Трубчастий плівковий абсорбер
1	Витрата органічної речовини	779	700
2	Кількість газоподібних викидів органічних речовин при використанні ПАР	71,6	10,8
3	Витрати електроенергії	85,2 кВт·год	–

Література

1. Аналіз ринку побутової хімії в Україні. 2021 рік. URL : <https://proconsulting.ua/ua/issledovanie-rynka/analiz-rynka-bytovoj-himii-v-ukraine-2021-god>.
2. Аналіз ринку рідкої побутової хімії в Україні. 2022 рік. URL : <https://proconsulting.ua/ua/issledovanie-rynka/analiz-rynka-zhidkoj-bytovoj-himii-v-ukraine-2022-god>.
3. Дзевочко О.М., Подустов М.О. Дослідження процесу сульфатування органічних речовин газоподібним триоксидом сірки. Інтегровані технології та енергозбереження. Харків : НТУ «ХПІ». 2018. № 2. С. 50–55.

4. Dabir B. Riazi M. R., Davoudirad H. R. Modelling of Falling Film Reactors. Chem. Engng. Sci. 1996. No. 51. P. 2553–2558.
5. Talens F.L. The modeling of falling film chemical reactor. Chem. Eng. Sci. 1999. Vol. 54, No. 12. PP. 1871–1881.
6. Akanksha P., Pant K.K., Srivastava V.K. Modelling of sulphanation of tridecylbenzene in a falling film reactor. Math. Comp. Model. 2007. Vol. 46, No. 9–10. P. 1332–1344.
7. Roberts D.W. Optimization of linear alkyl benzene sulfonation process for surfactant manufacture. Org. Process Res. Dev. 2003. Vol. 7, P. 172–184.
8. Federico I. Talens-Alessen. The modelling of falling film chemical reactors. Chem. Engng. Sci. 1999. Vol. 54. P. 1871–1881.
9. Дзевочко О.М., Подустов М.О., Дзевочко А.І. Дослідження теплових і масообмінних процесів в газорідних плівкових абсорберах у технології поверхнево-активних речовин. Інтегровані технології та енергозбереження. 2021. № 3. С. 3–16.
10. Norman C. Foster PhD., P.E. Sulfonation and Sulfation. The Chemithon Corporation. 2009. 27 p.
11. Gutierrez G.Y., Mans T.C. Improved mathematical model for a falling film sulfonation reactor. Ind. Eng. Chem. Res. 1988. Vol. 27, No. 9. P. 1701–1707.
12. Остапчук М.В., Рибак А.І. Системи технологій (за видами діяльності). Навчальний посібник. Київ : ЦУП. 2003. 888 с.

Bibliography (transliterated)

1. Analiz rynku pobutovoi khimii v Ukraini. 2021 rik. URL : <https://proconsulting.ua/ua/issledovanie-rynka/analiz-rynka-bytovoj-himii-v-ukraine-2021-god>.
2. Analiz rynku ridkoї pobutovoi khimii v Ukraini. 2022 rik. URL : <https://proconsulting.ua/ua/issledovanie-rynka/analiz-rynka-zhidkoj-bytovoj-himii-v-ukraine-2022-god>.
3. Dzevochko O.M., Podustov M.O. Doslidzhennia protsesu sulfatuvannia orhanichnykh rehovyn hazopodibnym tryoksydom sirky. Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia. Kharkiv : NTU KhPI. 2018. № 2. P. 50–55.
4. Dabir B. Riazi M. R., Davoudirad H. R. Modelling of Falling Film Reactors. Chem. Engng. Sci. 1996. No. 51. P. 2553–2558.
5. Talens F.L. The modeling of falling film chemical reactor. Chem. Eng. Sci. 1999. Vol. 54, No. 12. P. 1871–1881.
6. Akanksha P., Pant K.K., Srivastava V.K. Modelling of sulphanation of tridecylbenzene in a falling film reactor. Math. Comp. Model. 2007. Vol. 46, No. 9–10. P. 1332–1344.
7. Roberts D.W. Optimization of linear alkyl benzene sulfonation process for surfactant manufacture. Org. Process Res. Dev. 2003. Vol. 7, P. 172–184.
8. Federico I. Talens-Alessen. The modelling of falling film chemical reactors. Chem. Engng. Sci. 1999. Vol. 54. P. 1871–1881.
9. Dzevochko O.M., Podustov M.O., Dzevochko A.I. Doslidzhennia teplovykh i masoobminnykh protsesiv v hazoridnykh plivkovykh absorberakh u tekhnolohii poverkhnevo-aktyvnykh rehovyn. Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia. Kharkiv : NTU KhPI. 2021. № 3. P. 3–16.

10. Norman C. Foster PhD., P.E. Sulfonation and Sulfation. The Chemithon Corporation. 2009. 27 p.

11. Gutierrez G.Y., Mans T.C. Improved mathematical model for a falling film sulfonation reactor. Ind. Eng. Chem. Res. 1988. Vol. 27, No. 9. P. 1701–1707.

12. Ostapchuk M.V., Rybak A.I. Systemy tekhnolohii (za vydamy diialnosti). Navchalnyi posibnyk. Kyiv : TsUP. 2003. 888 p.

УДК 661.185 : 66.02

Дзевочко О.М., к. техн. наук, доцент, Подустов М.О., д. техн. наук, професор,
Дзевочко А.І., к. техн. наук

РОЗРОБКА НОВОЇ АПАРАТУРНО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ПРОЦЕСУ СУЛЬФАТУВАННЯ СУМІШЕЙ ОРГАНІЧНИХ РЕЧОВИН

В статті наведено, що поверхнево-активні речовини на основі вищих спиртів фр. $C_{12} - C_{14}$ знаходять основне використання в широкому спектрі засобів особистої гігієни, таких як шампуні, піноутворювачі для ван, зубні пасти, рідина для миття посуду, делікатні засоби для прання білизни. Використання ПАР на основі суміші вищих спиртів фр. $C_{12} - C_{14}$ та моноетаноламідів вищих жирних кислот кокосової олії дає можливість значно покращити якісні характеристики засобів особистої гігієни.

Наведено, що сновним елементом апаратно-технологічної схеми процесу сульфатування сумішей органічних речовин є трубчастий плівковий абсорбер.

Показано, що для сульфатування двохкомпонентних сумішей органічних речовин на основі вищих спиртів фр. $C_{12} - C_{14}$ та моноетаноламідів вищих жирних кислот кокосової олії необхідно використовувати трубчастий плівковий абсорбер, який має двоступінчасте охолодження – верхня частина 1/3 довжини абсорбера, нижня частина 2/3 довжини абсорбера. Швидкість газоповітряного потоку підтримується на рівні $V_{\Gamma} = 20$ м/с, мольне співвідношення реагентів 1,08 : 1,0 концентрація триоксиду сірки в газоповітряному потоці – 3,7 % об., температура вихідних реагентів: рідинної фази – 313 К, газоповітряного потоку – 303 К, охолоджувальної води – 293 К. Виходячи з таких початкових даних був розрахований промисловий трубчастий абсорбер. Наведені дані такого розрахунку.

Наведено, що розрахунок промислового трубчастого плівкового абсорбера проводився згідно з розробленим алгоритмом та програмою на мові MatLab, в програмі використано ітераційний метод розрахунку.

Наведено розрахунок кількості труб промислового абсорбера.

Показано, що абсорбер складається з таких основних елементів – верхньої еліптичної кришки, розподільчої плити газоповітряного потоку, камери для розподілу суміші органічних речовин, плівкоутворювачів, двох камер охолодження, нижньої еліптичної кришки.

Наведено, що на основі промислового трубчастого плівкового абсорбера розроблена та приведена нова апаратно-технологічна схема.

Наведено основні техніко-економічні та екологічні показники від впровадження такої апаратурно-технологічної схеми.

Ключові слова: апаратурно-технологічна схема, сульфатування, суміш органічних речовин.

Дзевочко А.М., к.техн.наук, доцент, Подустов М.А, д.техн.наук, професор,
Дзевочко А.И., к.техн.наук.

РАЗРАБОТКА НОВОГО АПАРАТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СХЕМЫ ПРОЦЕССА СУЛЬФАТИРОВАНИЯ СМЕСЕЙ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

В статье указано, что поверхностно-активные вещества на основе высших спиртов фр. $C_{12} - C_{14}$ находят основное использование в широком спектре средств личной гигиены, таких как шампуни, пенообразователи для ванн, зубные пасты, жидкость для мытья посуды, деликатные средства для стирки белья. Использование ПАВ на основе смеси высших спиртов фр. $C_{12} - C_{14}$ и моноэтаноламидов высших жирных кислот кокосового масла дает возможность существенно улучшить качественные характеристики средств личной гигиены.

Приведено, что основным элементом аппаратно-технологической схемы процесса сульфатирования смесей органических веществ является трубчатый пленочный абсорбер.

Показано, что для сульфирования двухкомпонентных смесей органических веществ на основе высших спиртов фр. $C_{12} - C_{14}$ и моноэтаноламидов высших жирных кислот кокосового масла необходимо использовать трубчатый пленочный абсорбер, имеющий двухступенчатое охлаждение – верхняя часть $1/3$ длины абсорбера, нижняя часть $2/3$ длины абсорбера. Скорость газовой воздушного потока поддерживается на уровне $V_{г} = 20$ м/с, мольное соотношение реагентов 1,08:1,0 концентрация триоксида серы в газовой воздушном потоке – 3,7% об. температура исходных реагентов: жидкой фазы – 313 К, газовой воздушного потока – 303 К, охлаждающей воды – 293 К. Исходя из таких исходных данных был рассчитан промышленный трубчатый абсорбер. Представлены данные такого расчета.

Приведено, что расчет промышленного трубчатого пленочного абсорбера производился согласно разработанному алгоритму и программе на языке MatLab, в программе использован итерационный метод расчета.

Представлен расчет количества труб промышленного абсорбера.

Показано, что абсорбер состоит из следующих основных элементов – верхней эллиптической крышки, распределительной плиты газовой воздушного потока, камеры для распределения смеси органических веществ, пленкообразователей, двух камер охлаждения, нижней эллиптической крышки.

Представлено, что на основе промышленного трубчатого пленочного абсорбера разработана и приведена новая апаратурно-технологическая схема.

Приведены основные технико-экономические и экологические показатели внедрения такой апаратурно-технологической схемы.

Ключевые слова: апаратурно-технологическая схема, сульфатирование, смесь органических веществ.

Dzevochko O., Podustov M., Dzevochko A.

DESIGNING OF A NEW HARDWARE AND TECHNOLOGICAL SCHEME OF THE PROCESS OF ORGANIC SUBSTANCES MIXTURES SULPHING

The article states that surfactants based on higher alcohols fr. C_{12} - C_{14} are mainly used in a wide range of personal hygiene products, such as shampoos, foaming agents for baths, toothpastes, dishwashing liquid, and delicate laundry detergents. The use of surfactants based on a mixture of higher alcohols fr. C_{12} - C_{14} and monoethanolamides of higher fatty acids of coconut oil makes it possible to significantly improve the quality characteristics of personal hygiene products.

It is stated that the main element of the apparatus and technological scheme of the sulfation process of mixtures of organic substances is a tubular film absorber.

It is shown that for the sulfation of two-component mixtures of organic substances based on higher alcohols fr. C_{12} - C_{14} and monoethanolamides of higher fatty acids of coconut oil must use a tubular film absorber, which has two-stage cooling - the upper part 1/3 of the length of the absorber, the lower part 2/3 of the length of the absorber. The speed of the gas-air flow is maintained at $V_g = 20$ m/s, the molar ratio of reagents is 1.08 : 1.0, the concentration of sulfur trioxide in the gas-air flow is 3.7% vol., the temperature of the initial reactants: liquid phase is 313 K, gas-air flow is 303 K, cooling water - 293 K. Based on such initial data, an industrial tubular absorber was calculated. The data of such a calculation are given.

It is stated that the calculation of the industrial tubular film absorber was carried out according to the developed algorithm and program in the MatLab language, the iterative method of calculation was used in the program.

The calculation of the number of pipes of an industrial absorber is given.

It is shown that the absorber consists of the following main elements - an upper elliptical cover, a gas-air flow distribution plate, a chamber for distributing a mixture of organic substances, film formers, two cooling chambers, and a lower elliptical cover.

It is stated that on the basis of an industrial tubular film absorber, a new equipment and technological scheme has been designed and presented.

The main technical, economic and environmental indicators of the implementation of such a hardware and technological scheme are presented.

Keywords: equipment and technological scheme, sulfation, mixture of organic substances.

Снурніков Д.В., аспірант, Красніков І.Л., к.техн.н., доцент,
Бабіченко А.К., к.техн.н., доцент

ДОСЛІДЖЕННЯ ВОДОГРІЙНОГО КОТЛА СИСТЕМИ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Ключові слова: система централізованого теплопостачання, водогрійний котел, математична модель, комп'ютерно-інтегрована технологія

Вступ

Системи централізованого теплопостачання (СЦТ) є перспективним та ефективним способом забезпечення тепловою енергією населення та інших споживачів в країнах із перехідною економікою та європейських країнах. Загалом у країнах ЄС частка СЦТ становить 13 % і планується доведення її частки до 50 % до 2050 року [1].

В Україні за останні десятиріччя рівень централізованого теплопостачання скоротився, але при цьому остається одним із найвищих у Європі [2]. При цьому, існуючі на сьогоднішній день в Україні СЦТ значною мірою вичерпали свій ресурс роботи та не відповідають сучасним вимогам та тенденціям. Однією із таких типових для великих міст України є система централізованого теплопостачання Роганського житлового масиву міста Харкова.

Системи централізованого теплопостачання працюють в умовах постійної зміни теплового навантаження, що пов'язано як з нестаціонарністю параметрів об'єкта керування так із невизначеністю зовнішніх збурень, основні з яких обумовлені кліматичними умовами та змінною структурою споживаного теплового навантаження [3]. За таких обставин, як відомо [4,5], забезпечення необхідного режиму теплопостачання найбільш ефективно може бути реалізовано із застосуванням комп'ютерно-інтегрованих технологій, що вимагає проведення досліджень, аналізу СЦТ як об'єкта керування та розробки математичної моделі одного з найважливіших її складових – водогрійного котла.

Мета досліджень

Створення математичної моделі водогрійного котла СЦТ великого міста, як основної складової технічної структури комп'ютерно-інтегрованої системи керування, що забезпечує можливість прийняття рішень щодо визначення необхідного режиму теплопостачання в умовах існуючих невизначеностей.

Аналіз об'єкту та методика проведення досліджень

Об'єктом дослідження є СЦТ Роганського житлового масиву м. Харкова. Вона є складною ієрархічною структурою та включає дві районні котельні, магістральні теплові мережі, центральні теплові пункти на групи будівель, внутрішньоквартальні розподільні теплові мережі, індивідуальні теплові пункти та системи опалення з опалюва-

льними приладами споживачів теплової енергії. Основна тепла енергія виробляється в водотрубних парових котлах ДКВР-20-13 та водогрійних газових котлах КВГ-6,5-150.

Котел є інерційним, багатопараметричним об'єктом керування з розподіленими параметрами. Вибір структури математичної моделі котла залежить від поставлених завдань моделювання. Математична модель котла як об'єкта керування повинна бути якнайбільше адекватна характеристикам промислової установки. Для синтезу комп'ютерної технології управління такими складними об'єктами доцільно використати статистичні моделі у вигляді лінійних поліномів [6].

Дослідження роботи водогрійного котла проводилось за даними пасивного експерименту. Для відсіювання неякісних експериментальних даних розраховувалися середньоквадратичне відхилення результату вимірювань і абсолютне значення відхилення поточного параметра від його середнього значення $\bar{x}_i$.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x}_i)^2}{N}}, \quad (1)$$

де x_i – поточне значення параметра; $\bar{x}_i$ – середнє значення параметра; N – кількість вимірів у вибірці.

Усі експериментальні дані, значення яких перевищувало вираз $\sigma > 3\bar{x}_i$, виключалися з розгляду. Дані, що залишилися, відповідали нормальному закону розподілу з ймовірністю не менше 95 % [7].

Перевірка гіпотези щодо нормальності розподілів експериментальних даних здійснювалася за критерієм Колмогорова-Смирнова, який використовує порівняння двох емпіричних функцій розподілу [8].

За результатами експериментальних даних розраховували накопичені частоти $P_0(x)$ і очікувані накопичені частоти $S(x)$ для нормального розподілу, потім вибиралося максимальне значення $P_0(x)-S(x)$, за допомогою якого і визначався критерій згоди Колмогорова-Смирнова D . Отримане значення порівнювалося з критичним, взятим із таблиць [9]. Результати зазначеного порівняння дозволили зробити висновок, що з ймовірністю 95 % можна прийняти гіпотезу про нормальний розподіл основних змінних об'єкту, що розглядається.

На основі наявних апріорних даних про об'єкт була прийнята математична модель у вигляді лінійного полінома наступного виду [10].

$$y^P = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_nx_n, \quad (2)$$

де y^P – залежна (вихідна) змінна; $x_1, x_2, \dots, x_n$ – незалежні змінні (фактори); b_0 – вільний член рівняння; $b_1, b_2, \dots, b_n$ – коефіцієнти регресії; n – кількість незалежних змінних.

Оцінювання параметрів лінійної регресії (2) проводилось методом найменших квадратів (МНК), який дозволяє отримати такі оцінки параметрів $b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$, при

Умова МНК у матричній формі записується так

$$F = (Y - XB)^T (Y - XB) \rightarrow \min. \quad (6)$$

Диференціюючи функцію (6) по матриці B і прирівнюючи перші частинні похідні по B до нуля отримаємо наступне рівняння

$$\frac{\partial F}{\partial B} = -2X^T Y + 2X^T YXB = 0. \quad (7)$$

Звідси отримаємо формулу для знаходження матриці параметрів моделі виду (2).

$$B = (X^T X)^{-1} (X^T Y), \quad (8)$$

де X^T – транспонована матриця; $(X^T X)^{-1}$ – зворотна матриця.

Для оцінки статистичної значущості коефіцієнтів регресії використовується t -критерій Стюдента. З табличним значенням порівнюється відношення значення коефіцієнта b_i та його випадкової помилки m_{bi}

$$t_{bi} = \frac{|b_i|}{m_{bi}}. \quad (9)$$

Випадкові помилки параметрів лінійної регресії визначаються за формулою

$$m_{bi} = \sqrt{\frac{\sum_{u=1}^N (y_u - y^p)^2 / (N - 2)}{\sum_{u=1}^N (x_{ui} - \bar{x}_i)^2}}, \quad (10)$$

де y_u, x_{ui} – експериментальні дані; y^p – розрахункові дані; $\bar{x}_i$ – середні дані.

Практична значущість рівняння множинної регресії оцінюється за допомогою коефіцієнту детермінації R^2 , який характеризує тісноту лінійного кореляційного зв'язку між однією випадковою величиною y та деякою множиною випадкових величин x_i . Коефіцієнт детермінації показує частку дисперсії результативної ознаки y , яка пояснюється регресією, у загальній дисперсії результативної ознаки [12].

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{u=1}^N (y_u - y^p)^2}{\sum_{u=1}^N (y_u - \bar{y})^2}. \quad (11)$$

Якість рівняння множинної регресії в цілому оцінюється за допомогою F -критерію Фішера. При відсутності паралельних дослідів розрахувати дисперсію відтворюваності (досвіду) неможливо. Тому замість перевірки адекватності проводиться оцінка якості апроксимації дослідних точок прийнятим рівнянням регресії, тобто перевіряється, чи має сенс це рівняння. Така перевірка досягається порівнянням залишкової дисперсії $D_{\text{ЗЛ}}^2$ та дисперсії відносно середнього D_y^2 , які розраховуються за формулами [12].

$$D_{\text{ЗЛ}}^2 = \frac{1}{f} \sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - y_u^p)^2 ; \quad (12)$$

$$D_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{u=1}^N (y_u - \bar{y})^2 . \quad (13)$$

Рівняння регресії має сенс, якщо дисперсії відносно середнього D_y^2 суттєво більше ніж залишкова дисперсія $D_{\text{ЗЛ}}^2$. Критерій Фішера в даному випадку має вид такого відношення

$$F = \frac{D_y^2}{D_{\text{ЗЛ}}^2} . \quad (14)$$

Рівняння регресії має сенс за наступної умови

$$F > F_{T(f_1, f_2)} , \quad (15)$$

де F_T – значення критерія Фішера, яке знаходять по таблицям розподілення Фішера для рівнів вільності $f_1 = N - 1$ і $f_2 = N - n - 1$ при заданому рівні значущості.

Результати досліджень

В результаті проведеного пасивного експерименту на котельній установці Роганського житломасиву м. Харкова було отримано масиви експериментальних даних погодинної роботи котла КВГ-6,5-150 у кількості 215 вимірювань. Для визначення статистичних характеристик можна обмежитися обробкою однієї реалізації на досить великому інтервалі часу замість проведення багатьох експериментів [12]. Експериментальні дані вважаємо ергодичними.

Для котла КВГ-6,5-150 були отримані експериментальні дані за такими параметрами:

Вхідні параметри (фактори):

x_1 – температура зовнішнього повітря, °С;

x_2 – температура теплоносія перед котлом, °С;

x_3 – витрата теплоносія в котел, м³/год;

x_4 – витрата природного газу, м³/год;

Вихідний (залежний параметр)

y – температура теплоносія після котла, °C.

Основні статистичні дані та результати їх обробки наведені в табл.1.

В результаті обробки даних пасивного експерименту за МНК згідно наведеної вище методики отримуємо лінійну багатопараметричну регресійну математичну модель для керованої вихідної змінної котла

$$y^P = 73,16 + 0,814x_1 + 0,736x_2 - 0,109x_3 + 0,026x_4.$$

Результати оцінки статистичної значущості коефіцієнтів регресії та параметри якості отриманого рівняння наведені в табл.2

Таблиця 1 – Основні параметри експериментальних даних

Показники режимів роботи котла	Температура зовнішнього повітря x_1 , °C	Температура теплоносія перед котлом x_2 , °C	Витрата теплоносія в котел x_3 , м ³ /год	Витрата природного газу x_4 , м ³ /год	Температура теплоносія після котла y , °C
Верхній	0,5	83	82	710	130
Нижній	-16	63	65	600	108
Статистичні показники					
Дисперсія	17.99	12.15	23.509	1520	54.77
Математичне очікування	-6.615	60.67	69	659.47	121.1

Таблиця 2 – Значення критеріїв Стюдента, Фішера і коефіцієнта детермінації

Умовна позначка параметра	t -критерій Стюдента розрахунковий	t -критерій Стюдента табличний	Коефіцієнт детермінації	Критерій Фішера розрахунковий	Критерій Фішера табличний
x_1	6,39	1,972	0,9558	24,7	1,14
x_2	4,754				
x_3	2,651				
x_4	2,841				

Як можна побачити із даних наведених в табл. 2 розрахункові значення t -критеріїв Стюдента перевищують табличне значення. Тобто гіпотезу про несуттєвість коефіцієнтів регресії можна відхилити та усі коефіцієнти є значущими.

Висновки

Таким чином, за результатами проведеного пасивного експерименту на водогрійному котлі, що входить до складу СЦТ великого міста, отримане рівня математич-

ної моделі, що пов'язує основний показник роботи котла (температуру теплоносія на виході) з факторами, які змінюються в процесі його нормальної експлуатації.

Перевірка отриманого рівняння регресії показала, що значення критерія детермінації $R^2=0,9558$ перевищує допустиме значення 0,8, а фактичне значення критерію Фішера значно перевищує табличне значення. Отже можна зробити висновок, що зв'язок між змінними в регресійному рівнянні суттєвий і отримане рівняння можна використовувати для практичних розрахунків при синтезі технічної структури комп'ютерно-інтегрованої системи керування.

Література

1. Derii V.O. Trends in the development of the district heating systems of Ukraine. The problems of general energy, 2021, 1(64): 52–59 doi: <https://doi.org/10.15407/pge2021.01.052>.
2. Перехід України на відновлювану енергетику до 2050 року / О. Дячук, М. Чепелєв, Р. Подолець, Г. Трипольська та ін. ; за заг. ред. Ю. Огаренко та О. Алієвої // Пред-во Фонду ім. Г. Бюлля в Україні.– Київ : Вид-во ТОВ «АРТ КНИГА», 2017.– 88 с.
3. Serafeim Moustakidis, Ioannis Meintanis, George Halikias, Nicos Karcianas, 2019. An Innovative Control Framework for District Heating Systems: Conceptualisation and Preliminary Results, Resources, 8(1), 27; <https://doi.org/10.3390/resources8010027>.
4. Identification of heat exchange process in the evaporators of absorption refrigerating units under conditions of uncertainty / Babichenko A., Babichenko J., Kravchenko Y., Velma S., Krasnikov I., Lysachenko I. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 1, Issue 2 (91). P. 21–29. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.121711>.
5. Никифоров А.С. Приходько Е.В., Кинжибекова А.К. Энергосбережение при эксплуатации теплогенерирующих установок: монография. – Павлодар: Кереку, 2015.– 187 с.
6. Компьютерно-интегрированная система автоматизации технологических объектов управления централизованным теплоснабжением: монография / А. А. Бобух, Д. А. Ковалёв; Харьк. нац. ун-т гор. хоз-ва им. А. Н. Бекетова. – Х. : ХНУГХ, 2013. – 226 с.
7. Основи наукових досліджень: навч. посіб. / А.К. Бабіченко, М.О. Подустов, В.І. Вельма, Ю.А. Бабіченко, Я.О. Кравченко, І.Л. Красніков; за ред. А.К. Бабіченка. – Х.: НТУ «ХПІ», НФаУ, 2021. – 133 с.
8. Бідюк П. І. Ймовірно-статистичні методи моделювання і прогнозування : монографія / П. І. Бідюк, О. П. Гожий. – Миколаїв : Чорноморський державний університет ім. Петра Могили, 2014. – 440 с.
9. Сиденко В. М. Основы научных исследований / В. М. Сиденко, И. М. Грушко. – Х. : Вища школа, 1978. – 200 с.
10. Кобильник Т.П. Методичні аспекти навчання множинного лінійного регресійного аналізу з використанням статистичного середовища R. Фізико-математична освіта. 2018. Випуск 1(15). С. 57–62.
11. Літнарівич Р.М. Побудова і дослідження математичної моделі за джерелами експериментальних даних методами регресійного аналізу. Навчальний посібник, МЕГУ, Рівне, 2011.–140 с.

12. Бондарь, А.Г. Математическое моделирование в химической технологии : Учеб. / А.Г. Бондарь. – К. : Вища шк., 1973. – 280 с.

Bibliography (transliterated)

1. Derii V.O. Trends in the development of the district heating systems of Ukraine. The problems of general energy, 2021, 1(64): 52–59 doi: <https://doi.org/10.15407/pge2021.01.052>.
2. Perekhid Ukrainy na vidnovliuvannu enerhetyku do 2050 roku / O. Diachuk, M. Chepeliev, R. Podolets, H. Trypolska ta in. ; za zah. red. Yu. Oharenko ta O. Aliievoi // Pred-vo Fondu im. H. Bolliia v Ukraini. – Kyiv : Vyd-vo TOV «ART KNYHA», 2017. – 88 p.
3. Serafeim Moustakidis, Ioannis Meintanis, George Halikias, Nicos Karcianas, 2019. An Innovative Control Framework for District Heating Systems: Conceptualisation and Preliminary Results, Resources, 8(1), 27; <https://doi.org/10.3390/resources8010027>.
4. Identification of heat exchange process in the evaporators of absorption refrigerating units under conditions of uncertainty / Babichenko A., Babichenko J., Kravchenko Y., Velma S., Krasnikov I., Lysachenko I. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 1, Issue 2 (91). P. 21–29. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.121711>.
5. Nykyforov A.S. Prykhodko E.V., Kynzhybekova A.K. Enerhosberezhenye pry ekspluatatsyy teploheneryuiushchykh ustanovok: monohrafiya. – Pavlodar: Kereku, 2015. – 187 p.
6. Kompiuterno-yntehryrovannaia systema avtomatyzatsyy tekhnolohycheskykh ob'ektov upravleniya tsentralyzovannym teplosnabzhenyem: monohrafiya / A. A. Bobukh, D. A. Koval'ev; Khark. nats. un-t hor. khoz-va ym. A. N. Beketova. – Kh. : KhNUHKh, 2013. – 226 p.
7. Osnovy naukovykh doslidzhen: navch. posib. / A.K. Babichenko, M.O. Podustov, V.I. Velma, Yu.A. Babichenko, Ya.O. Kravchenko, I.L. Krasnikov; za red. A.K. Babichenka. – Kh.: NTU «KhPI», NFaU, 2021. – 133 p.
8. Bidiuk P. I. Ymovirnisno-statystychni metody modeliuvannia i prohnozuvannia : monohrafiia / P. I. Bidiuk, O. P. Hozhyi. – Mykolaiv : Chornomorskyi derzhavnyi universytet im. Petra Mohyly, 2014. – 440 p.
9. Sidenko V. M. Osnovy nauchnykh issledovaniy / V. M. Sidenko, I. M. Grushko. – H. : Vischa shkola, 1978. – 200 p.
10. Kobyl'nyk T.P. Metodychni aspekty navchannia mnozhynnoho liniinoho rehresiinoho analizu z vykorystanniam statystychnoho seredovyscha R. Fyzyko-matematychna osvita. 2018. Vypusk 1(15). P. 57–62.
11. Litnarovych R.M. Pobudova i doslidzhennia matematychnoi modeli za dzherelamy eksperymentalnykh danykh metodamy rehresiinoho analizu. Navchalnyi posibnyk, MEHU, Rivne, 2011.– 140 p.
12. Bondar, A.G. Matematicheskoe modelirovanie v himicheskoy tehnologii : Ucheb. / A.G. Bondar. — K. : Vischa shk., 1973. – 280 p.

УДК 621.182

Снурніков Д.В., аспірант, Красніков І.Л., к.техн.н., доцент,
Бабіченко А.К., к.техн.н., доцент

ДОСЛІДЖЕННЯ ВОДОГРІЙНОГО КОТЛА СИСТЕМИ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

Проведено аналіз умов функціонування типової системи централізованого теплопостачання великого міста, зокрема водогрійного газового котла. Показано, що котел, як основний об'єкт керування, працює в умовах постійної зміни зовнішнього теплового навантаження, що обумовлює внаслідок їх випадкового характеру дії низку невизначеностей. Обґрунтована доцільність математичного опису невизначеностей з використанням стохастичного методу, як найбільш апробованого в практичних умовах.

За результатами проведеного пасивного експерименту на водогрійному газовому котлі КВГ-6,5-150 системи централізованого теплопостачання одного з районів м. Харкова був отриманий масив погодинних експериментальних даних, що відображають основні показники роботи водогрійного котла. В результаті обробки даних методом найменших квадратів отримана математична модель котла у вигляді лінійного рівняння регресії, яке відображає зв'язок температури теплоносія на виході котла із температурою навколишнього повітря, температурою теплоносія на вході в котел і з витратами природного газу і теплоносія в котел.

Виконана перевірка отриманого рівняння регресії за статистичним критерієм Стьюдента, яка підтвердила значущість усіх коефіцієнтів регресійної моделі.

Проведена оцінка щодо практичної значущості рівняння множинної регресії за допомогою коефіцієнту детермінації. Якість рівняння множинної регресії в цілому оцінювалась за допомогою F -критерію Фішера. Так як паралельні опити не проводились, то замість перевірки адекватності проводилась оцінка якості апроксимації дослідних точок прийнятим рівнянням регресії, тобто перевірялось, чи має сенс це рівняння. Така перевірка проводилась порівнянням залишкової дисперсії та дисперсії відносно середнього.

Результати розрахунків показали, що значення критерія детермінації значно перевищує допустиме значення, а фактичне значення критерію Фішера суттєво перевищує табличне. Отримані показники дозволили зробити висновок, що зв'язок між змінними в регресійній моделі суттєвий, а запропонований стохастичний метод та отримане рівняння множинної лінійної регресії можна використовувати для прийняття рішень в процесі синтезу технічної структури комп'ютерно-інтегрованої системи керування об'єктами централізованої системи теплопостачання.

Ключові слова: система централізованого теплопостачання, водогрійний котел, математична модель, комп'ютерно-інтегрована технологія.

Снурников Д.В., аспирант, Красников И.Л., к.техн.н., доцент,
Бабиченко А.К., к.техн.н., доцент

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДОГРЕЙНОГО КОТЛА СИСТЕМЫ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Проведен анализ условий функционирования типовой системы централизованного теплоснабжения большого города, в частности, водогрейного газового котла. Показано, что котел как основной объект управления работает в условиях постоянной смены внешней тепловой нагрузки, что приводит вследствие их случайного характера к возникновению ряда неопределенностей. Обоснована целесообразность математического описания неопределенностей с использованием стохастического метода как наиболее апробированного в практических условиях.

По результатам проведенного пассивного эксперимента на водогрейном газовом котле КВГ-6,5-150 системы централизованного теплоснабжения одного из районов Харькова был получен массив почасовых экспериментальных данных, отражающих основные показатели работы водогрейного котла. В результате обработки данных методом наименьших квадратов получена математическая модель котла в виде линейного уравнения регрессии, отражающего связь температуры теплоносителя на выходе котла с температурой окружающего воздуха, температурой теплоносителя на входе в котел и с расходами природного газа и теплоносителя в котел.

Выполнена проверка полученного уравнения регрессии по статистическому критерию Стьюдента, подтвердившая значимость всех коэффициентов регрессионной модели.

Проведена оценка практической значимости уравнения множественной регрессии с помощью коэффициента детерминации. Качество уравнения множественной регрессии в целом оценивалось с помощью *F*-критерия Фишера. Так как параллельные опросы не проводились, то вместо проверки адекватности проводилась оценка качества аппроксимации опытных точек принятым уравнением регрессии, то есть проверялось, имеет ли смысл это уравнение. Такая проверка проводилась сравнением остаточной дисперсии и дисперсией относительно среднего.

Результаты расчетов показали, что значение критерия детерминации значительно превышает допустимое значение, а фактическое значение критерия Фишера существенно превышает табличное. Полученные показатели позволили сделать вывод, что связь между переменными в регрессионной модели существенна, а предложенный стохастический метод и полученное уравнение множественной линейной регрессии можно использовать для принятия решений в процессе синтеза технической структуры компьютерно-интегрированной системы управления объектами централизованной системы теплоснабжения.

Ключевые слова: система централизованного теплоснабжения, водогрейный котел, математическая модель, компьютерно-интегрированная технология.

Snurnykov D.V, Krasnikov I.L., Babichenko A.K.

STUDY OF A DISTRICT HEATING SYSTEM WATER BOILER AS A OBJECT OF CONTROL

The analysis of the operating conditions of a typical district heating system, in particular, a hot water gas boiler, was carried out. It is shown that the boiler, as the main control object, operates under conditions of constant change in external heat load, which, due to their random nature, leads to a number of uncertainties. The expediency of the mathematical description of uncertainties using the stochastic method as the most tested in practical conditions is substantiated.

According to the results of the passive experiment on the hot water gas boiler KVG-6.5-150 of the district heating system of one of the districts of Kharkov, an array of hourly experimental data was obtained, reflecting the main performance indicators of the hot water boiler. As a result of data processing by the least squares method, a mathematical model of the boiler was obtained in the form of a linear regression equation, reflecting the relationship between the temperature of the coolant at the boiler outlet and the ambient air temperature, the temperature of the coolant at the inlet to the boiler and with the flow rates of natural gas and coolant to the boiler.

The obtained regression equation was verified by Student's t-test, which confirmed the significance of all coefficients of the regression model.

The practical significance of the multiple regression equation was assessed using the coefficient of determination. The quality of the multiple regression equation as a whole was assessed using Fisher's F-test. Since parallel surveys were not conducted, instead of checking the adequacy, the quality of the approximation of the experimental points by the accepted regression equation was assessed, that is, it was checked whether this equation makes sense. Such a test was carried out by comparing the residual variance and the variance relative to the mean.

The calculation results showed that the value of the coefficient of determination significantly exceeds the allowable value, and the actual value of the Fisher criterion significantly exceeds the table value. The obtained indicators led to the conclusion that the relationship between the variables in the regression model is significant, and the proposed stochastic method and the multiple linear regression equation can be used to make decisions in the process of synthesizing the technical structure of a computer-integrated control system for objects of a district heating system.

Keywords: district heating system, hot water boiler, mathematical model, computer-integrated technology

Селіхов Ю.А., к.техн.н., професор, Горбунов К.О., к.техн.н., професор

ІНТЕГРАЦІЯ РОБОТИ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

Постановка задачі. Загальновідомо, що людство на свої потреби використовує переважно традиційні (не відновлювані) енергетичні ресурси (ЕР), запаси яких обмежені. До них належать: газ, нафта, вугілля, уран. Ці джерела енергії дешевші порівняно з іншими джерелами енергії тому, що вартість видобутку та транспортування їх значно дешевша. Світова спільнота почала усвідомлювати, що запаси викопних енергоносіїв не безмежні. Останні 30 років помітно посилилася увага до пошуку та освоєння нетрадиційних джерел енергії, які відрізняються від копалин органічних ресурсів своїми величезними запасами. Поруч із невичерпністю для нетрадиційних джерел характерне різке скорочення шкідливого на екологію таких викидів: діоксиду вуглецю CO_2 , оксидів сірки, азоту, твердих частинок та інших. [1–4].

Тому застосування нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії, економія органічного палива, яке потрібне для нагрівання теплоносія до $95\text{ }^\circ\text{C}$, покращення екологічної ситуації району споживання теплової енергії за рахунок зниження обсягів викидів забруднюючих речовин, до яких належать продукти згоряння традиційних видів енергії, – органічного палива, яке використовується для виробництва теплової енергії в котельному устаткуванні, виробництва електроенергії за допомогою вітроелектрогенераторів є актуальними завданнями.

Ключові слова: енергетичні ресурси, відновлювані джерела енергії, органічне паливо, автоматизована теплоенергетична установка, електроенергія, гаряча вода, гаряче повітря, опалення, приватне домоволодіння, електричний водонагрівник, геотермальний тепловий насос, вітроелектрогенератор, котельня малої потужності.

Мета роботи. У цій роботі авторами пропонується розроблена та впроваджена вдосконалена автоматизована теплоенергетична установка для постачання: електроенергією, гарячою водою, гарячим повітрям та опаленням приватного домоволодіння. Для вирішення вищевказаних завдань нами було розроблено схему попереднього нагріву теплоносія за рахунок застосування електричного водонагрівника з тепловою потужністю 54 кВт, теплового насоса [5, 6], вітроелектрогенератора [7] з електричною потужністю 50 кВт, який виробляє електроенергію для роботи всього електрообладнання у приватному домоволодінні та акумуляторів [8, 9] електроенергії та теплоти.

Матеріали та методи. Застосування електричного водонагрівника дозволило збільшити швидкість подачі гарячої води до будинку. У геотермальних ґрунтових теплових насосах використовується тепла енергія, накопичена в ґрунті за рахунок нагрівання його сонцем або іншими джерелами енергії. Ґрунт має властивість зберігати сонячне тепло протягом тривалого часу, що веде до відносно рівномірного рівня температури джерела тепла протягом усього року. Це забезпечує експлуатацію теплового насоса із високим коефіцієнтом потужності. Нами було здійснено розрахунок потужності теплового насоса для системи опалення приватного будинку. Було обрано тепловий на-

сос «грунт – вода» [5, 6] із горизонтальним розташуванням теплового колектора. Замість батарей опалення застосовуємо теплу підлогу (труби ПВХ). Авторами була розроблена нова технологічна схема теплоенергетичної установки для гарячого водопостачання та опалення [10–13] приватного домоволодіння. Зробимо опис роботи нової технологічної схеми, яка представлена на рис. 1. Нова теплоенергетична установка може працювати цілий рік. У холодну пору року установка працює в такий спосіб. Вода з температурою 5–7 °С теплового контуру теплового насоса циркуляційним насосом 17 подається в другий контур випарника теплового насоса, де нагріває холодоагент першого контуру, який перетворюється на пару. Пара холодоагенту надходить у компресор, де стискається до високого тиску та температури 160 °С. Далі пара надходить у конденсатор теплового насоса, де віддає своє тепло другому контуру конденсатора, в який подається вода циркуляційним насосом 9 з бака-акумулятора 8 або циркуляційним насосом 6 від користувача 20.

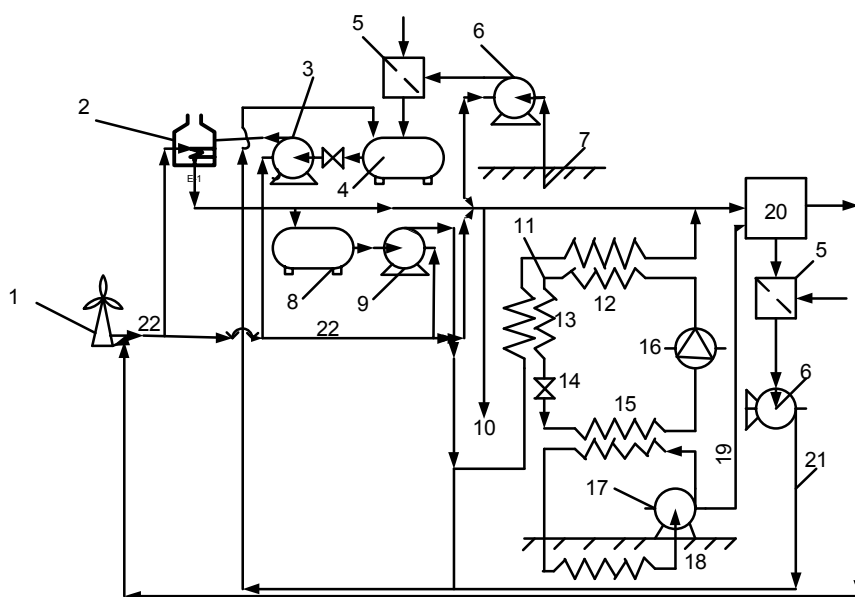


Рисунок 1 – Технологічна схема теплоенергетичної установки

- 1 – Вітроелектрогенератор; 2 – Електричний водонагрівник;
 3 – Відцентровий насос; 4 – Бак-акумулятор; 5 – Установки хімоводоочищення;
 6 – Відцентровий насос; 7 – Свердловина; 8 – Бак-акумулятор; 9 – Відцентровий насос;
 10 – Аварійний злив теплоносія з установки; 11 – Ґрунтовий тепловий насос («грунт-вода»);
 12 – Конденсатор; 13 – Охолоджувач; 14 – Дросельний вентиль; 15 – Випарник;
 16 – Компресор; 17 – Відцентровий насос; 18 – Тепловий контур ґрунтового теплового насоса;
 19 – Трубопровід подачі холодної теплоносії (режим кондиціювання);
 20 – Приватне домоволодіння; 21 – Трубопровід оборотної води; 22 – Лінії електропередач

Таким чином, вода нагрівається спочатку у другому контурі охолоджувача, а потім у другому контурі конденсатора і надходить до користувача з температурою 75 °С. У разі аварійної ситуації є можливість випустити теплоносії у каналізацію (злив води із системи). Таким чином, тепла енергія енергетичної установки гарячого водопостачання [14, 15] складалася з теплової енергії встановленої електричним водонагрівником, теплової енергії теплового насоса і розраховувалася за рівнянням

$$Q_T = Q_1 + Q_2. \quad (1)$$

Значення кількості використаної теплоти для попереднього підігріву води визначали за формулою

$$Q_1 = G_B \cdot \rho_B \cdot c_B \cdot (t_B'' - t_B'), \quad (2)$$

де G_B – загальна витрата води, що підігрівається, м³/с; ρ_B – щільність води, кг/м³; c_B – питома теплоємність води, кДж/(м³·К); t_B' , t_B'' – температура холодної та підігрітої води, відповідно, °С.

Значення кількості використаної теплоти в тепловому насосі визначали за формулою

$$Q_2 = \xi \cdot N_{\text{ЕЛ}}, \quad (3)$$

де ξ – коефіцієнт перетворення теплового насоса; $N_{\text{ЕЛ}}$ – енергія, витрачена для реалізації циклу теплового насоса.

Економію палива у котлоагрегатах за рахунок використання такої системи можна розрахувати за допомогою рівнянь теплового балансу (1–3). Річна економія умовного палива становитиме, т. у. п./рік

$$\Delta B_{\text{рік}} = \frac{Q_{\text{рік}}}{Q_H^P \cdot \eta_K}, \quad (4)$$

де $Q_H^P = 29,33$ МДж/кг – теплотворна здатність умовного палива; $Q_{\text{рік}}$ – річна кількість утилізованої теплоти, МДж/рік; η_K – коефіцієнт корисної дії котла.

Економія органічного палива дорівнює, т/рік (тис. м³/рік):

$$\Delta B = \Delta B_{\text{рік}} \cdot \frac{29,33}{1000 \cdot Q_H^P}. \quad (5)$$

Річна економія за рахунок скорочення витрати первинного палива для підігріву води складе для котельні, грн/рік

$$E_{\Pi} = \Delta B \cdot \Pi_{\Pi}, \quad (6)$$

де Π_{Π} – вартість первинного палива, грн/т (грн/1000 м³).

Термін окупності енергетичної установки гарячого водопостачання та опалення приватного будинку становитиме, рік.

$$T = S_C / (Q_T \cdot C_T), \quad (7)$$

S_C – питома вартість теплоенергетичної системи гарячого водопостачання, грн./м²;
 Q_T – річна кількість теплоти, яка вироблена теплоенергетичною установкою, Гкал/м²;
 C_T – вартість теплоти від традиційного енергоджерела, грн/Гкал.

Висновки. Нова теплоенергетична установка забезпечує приватне домоволодіння електроенергією, гарячим водопостачанням, опаленням та гарячим повітрям у необхідному діапазоні температур для комфортного проживання. Спільно з вітроелектрогенератором, електричним водонагрівником використовується тепловий насос, акумулятори електроенергії та теплоти, що дозволяє: зменшити собівартість теплової енергії за рахунок зниження матеріаломісткості та витрат на обладнання, економити органічне паливо, виробляти електроенергію та надлишок її віддавати в державну електромережу; зменшити теплове навантаження та забруднення навколишнього середовища. Термін окупності теплоенергетичної установки становив 1,6 року. Система автоматизації дозволяє керувати установкою без втручання людини

Література

1. Лосюк Ю.А., Кузьмич В.В. Нетрадиционные источники энергии – Мн.: УП «Технопринт», 2005. – 234 с.
2. Селихов Ю.А., Ведь В.Е., Бухкало С.И., Костин В.М. Конструкционные особенности увеличения эффективности работы гелиоустановок. Экотехнологии и ресурсосбережение. – Киев: Типография НАН Украины, № 3, 2004. – С. 70–75.
3. Yuriy A. Selikhov, Victor A. Kotsarenko, Jiří J. Klemeš, Petro O. Kapustenko / The Performance of Plastic Solar Collector as Part of Two Contours Solar Unit/ CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS VOL. 70, 2018, С. 2053–2058, Copyright © 2018, AIDIServizi S.r.l.
4. Ветошкин А.Г. Процессы инженерной защиты окружающей среды (теоретические основы) / А.Г. Ветошкин, Учебное пособие. – Пенза: Изд-во Пенз. технол. ин-та, 2004. – 398 с.
5. Рей Д., Макмайл Д. Тепловые насосы: Пер. с англ. – М.: Энергоиздат, 1982. – 224 с.
6. Овчаренко В.А. Овчаренко А.В. Використання теплових насосів //Холод М+Т, 2006, №2 С. 34–36.
7. Вітроенергетика [Електронний ресурс] : навч. посіб. / Головка В. М. ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 5,5 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 88 с.
8. Накопители энергии: учеб. пособие для вузов / Д.А. Бут, Б.Л. Алиевский, С.Р. Мизюрин, П.В. Васюкевич: Под ред. Д.А. Бута. – М.: Энергоатомиздат. 1991. – 400 с.
9. Хрусталева Д.А. Аккумуляторы. – М.: Изумруд, 2003. – 224 с.
10. Отопление / В.Н. Богословский, А.Н. Сканава, Изд-во – М.: Стройиздат, 1991. – 736 с.
11. Особливості проектування сучасних систем водяного опалення. – К.: П ДП «Такі справи», 2003. – 176 с.
12. Klemeš J.J., Arsenyeva O., Kapustenko P., Tovazhnyanskyy L. Compact Heat Exchangers for Energy Transfer Intensification: Low Grade Heat and Fouling Mitigation. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2015; pp. 11–112.

13. Selikhov Yu.A., 2006, Helios water heater. Patent of Ukraine #75178, Bulletin #3. (in Ukrainian).

14. Yuriy A. Selikhov, Jiří Jaromír Klemeš, Petro Kapustenko, Olga Arsenyeva/ The study of flat plate solar collector with absorbing elements from a polymer material/ Energy Volume 256, 1 October 2022, 124677, pp. 2056–2071 © 2022 ООО «Эльзевир».

15. Даффи Дж., Бекман У.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. –М.: Мир, 1977. – 420 с.

Bibliography (transliterated)

1. Losiuk Yu.A., Kuzmych V.V. Netradytsyonnie ystochnyky enerhyy – Mn.: UP «Tekhnoprynt», 2005. – 234 p.

2. Selykhov Yu.A., Ved V.E., Bukhkalov S.Y., Kostyn V.M. Konstruktsyonnie osobennosti uvelycheniya efektyvnosti raboti helyoustanovok. Ekotekhnolohyy y resur-sosberezhenye.– Kyev: Typohrafiya NAN Ukrayni, № 3, 2004. – P. 70–75.

3. Yuriy A. Selikhov, Victor A. Kotsarenko, Jiří J. Klemeš, Petro O. Kapustenko / The Performance of Plastic Solar Collector as Part of Two Contours Solar Unit/ CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS VOL. 70, 2018, P. 2053–2058, Copyright © 2018, AIDIServizi S.r.l.

4. Vetoshkyn A.H. Protsessi ynzhenernoї zashchyti okruzhaiushchei sredi (teoretycheskiye osnovy) / A.H. Vetoshkyn, Uchebnoe posobyе. – Penza: Yzd-vo Penz. tekhnol. un-ta, 2004. – 398 p.

5. Rei D., Makmaikl D. Teplovie nasosi: Per. s anhl. – M.:Enerhoizdat, 1982. – 224 p.

6. Ovcharenko V.A. Ovcharenko A.V. Vykorystannia teplovykh nasosiv //Kholod M+T, 2006, №2 P. 34–36.

7. Vitroenerhetyka [Elektronnyi resurs] : navch. posib. / Holovko V. M. ; KPI im. Ihoria Sikorskoho. – Elektronni tekstovi dani (1 fail: 5,5 Mbait). – Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2019. – 88 p.

8. Nakopytely enerhyy: ucheb. posobyе dlia vuzov / D.A. But, B.L. Alyevskiy, S.R. Myziuryn, P.V. Vasiukevych: Pod red. D.A. Buta. – M.: Enerhoatomyzdat. 1991. – 400 p.

9. Khrustalev D.A. Akkumuliatori. – M.: Yzumrud, 2003. – 224 p.

10. Otoplenye / V.N. Bohoslovskiy, A.N. Skanavy, Yzd-vo – M.: Stroiyzdat, 1991. – 736 p.

11. Osoblyvosti proektuvannia suchasnykh system vodianoho opalennia. – K.: II DP «Taki spravy», 2003. – 176 p.

12. Klemeš J.J., Arsenyeva O., Kapustenko P., Tovazhnyanskyy L. Compact Heat Exchangers for Energy Transfer Intensification: Low Grade Heat and Fouling Mitigation. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2015; pp. 11–112.

13. Selikhov Yu.A., 2006, Helios water heater. Patent of Ukraine #75178, Bulletin #3. (in Ukrainian).

14. Yuriy A. Selikhov, Jiří Jaromír Klemeš, Petro Kapustenko, Olga Arsenyeva/ The study of flat plate solar collector with absorbing elements from a polymer material/ Energy Volume 256, 1 October 2022, 124677, pp. 2056–2071 © 2022 ООО «Elzevir».

15. Daffy Dzh., Bekman U.A. Teplovie protsessy s yspolzovanyem solnechnoi enerhyy. –М.: Мир, 1977. – 420 p.

УДК 662.997

Селіхов Ю.А., к.техн.н., професор, Горбунов К.О., к.техн.н., професор

ІНТЕГРАЦІЯ РОБОТИ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ

Основним мотивом прискореного розвитку відновлюваної енергетики в Європі, США та багатьох інших країнах є прагнення держав до енергетичної незалежності та екологічної безпеки. Поштовхом до використання нових технологій у застосуванні енергії нетрадиційних джерел послужили два фактори: енергетична криза початку 70-х років та підвищення вимог до охорони навколишнього середовища. Досвід, накопичений різними країнами у використанні електричних нагрівників, теплових насосів та вітро-електрогенераторів, демонструє високі можливості простого перетворення цих видів енергії на теплову енергію та електроенергію, які можуть успішно використовуватися для постачання: електроенергії, гарячою води, гарячого повітря, опалення у приміщеннях державних та приватних будівель, а також забезпеченню різноманітних технологічних та побутових потреб не тільки в різних галузях промисловості, а й у тому числі на підприємствах агропромислового комплексу України.

У цій роботі авторами пропонується розроблена та впроваджена вдосконалена автоматизована теплоенергетична установка для постачання: електроенергією, гарячою водою, гарячим повітрям та опаленням приватного домоволодіння. Для вирішення вищевказаних завдань була розроблена схема попереднього нагріву теплоносія за рахунок застосування: електричного водонагрівника з тепловою потужністю 54 кВт, теплового насоса та вітроелектрогенератора з електричною потужністю 50 кВт, який виробляє електроенергію для роботи всього електроустаткування в приватному домоволодінні та акумуляторів електроенергії та теплоти. Система автоматизації дозволяє керувати установкою без втручання людини. Робота цієї установки дає змогу економити органічне паливо, яке пішло б на нагрівання теплоносія до необхідної температури в котельні малої потужності.

Ключові слова: енергетичні ресурси, відновлювані джерела енергії, органічне паливо, автоматизована теплоенергетична установка, електроенергія, гаряча вода, гаряче повітря, опалення, приватне домоволодіння, електричний водонагрівник, геотермальний тепловий насос, вітроелектрогенератор, котельня малої потужності.

Селихов Ю.А., к.техн.н., профессор, Горбунов К.А., к.техн.н., профессор

ИНТЕГРАЦИЯ РАБОТЫ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Основным мотивом ускоренного развития возобновляемой энергетики в Европе, США и многих других странах является стремление государств к энергетической независимости и экологической безопасности. Толчком к использованию новых технологий в применении энергии нетрадиционных источников послужили два фактора: энергетический кризис начала 70-х годов и повышение требований к охране окружающей среды. Опыт, накопленный разными странами в использовании тепловых насосов и ветро-электрогенераторов, демонстрирует высокие возможности простого превращения этих видов энергии в тепловую энергию и электроэнергию, которые могут успешно использоваться для снабжения: электроэнергией, горячей водой, горячим воздухом, отоплением в помещениях государственных и частных домовладений, а также обеспечению раз-

ного рода технологических и бытовых потребностей не только в разных отраслях промышленности, но и в том числе на предприятиях агропромышленного комплекса Украины.

В данной работе авторами предлагается разработанная и внедренная усовершенствованная автоматизированная теплоэнергетическая установка для снабжения: электроэнергией, горячей водой, горячим воздухом и отоплением частного домовладения. Для решения вышеуказанных задач была разработана схема предварительного нагрева теплоносителя за счет применения: электрического водонагревателя с тепловой мощностью 54 кВт, теплового насоса и ветроэлектростанции с электрической мощностью 50 кВт, который производит электроэнергию для работы всего электрооборудования в частном домовладении и аккумуляторов электроэнергии и теплоты. Система автоматизации позволяет управлять установкой без вмешательства человека. Работа этой установки дает возможность экономить органическое топливо, которое пошло бы на нагрев теплоносителя до необходимой температуры в котельной малой мощности.

Ключевые слова: энергетические ресурсы, возобновляемые источники энергии, органическое топливо, автоматизированная теплоэнергетическая установка, электроэнергия, горячая вода, горячий воздух, отопление, частное домовладение, электрический водонагреватель, геотермальный тепловой насос, ветроэлектростанция, персональный компьютер, котельная малой мощности.

Selikhov Yu.A., Gorbunov K.A.

INTEGRATION OF THE OPERATION OF A HEAT AND POWER PLANT

The main motive for the accelerated development of renewable energy in Europe, the United States and many other countries is the desire of states for energy independence and environmental security. The impetus for the use of new technologies in the use of energy from non-traditional sources was two factors: the energy crisis of the early 70s and the increasing requirements for environmental protection. The experience gained by different countries in the use of heat pumps and wind power generators demonstrates the high possibilities of easily converting these types of energy into thermal energy and electricity, which can be successfully used to supply: electricity, hot water, hot air, heating in the premises of public and private households, and as well as providing various kinds of technological and domestic needs not only in different industries, but also at the enterprises of the agro-industrial complex of Ukraine. In this paper, the authors propose a developed and implemented improved automated heat and power plant for supplying: electricity, hot water, hot air and heating for private households. To solve the above problems, a scheme was developed for preheating the coolant through the use of: an electric water heater with a thermal power of 54 kW, a heat pump and a wind power generator with an electrical power of 50 kW, which produces electricity for the operation of all electrical equipment in private households and batteries of electricity and heat. The automation system allows you to control the installation without human intervention. The operation of this installation makes it possible to save organic fuel, which would be used to heat the coolant to the required temperature in a low-power boiler house.

Keywords: energy resources, renewable energy sources, fossil fuel, automated thermal power plant, electricity, hot water, hot air, heating, private household, electric water heater, geothermal heat pump, wind power generator, personal computer, low power boiler house.

Oleg B. Anipko, Dr of Sc. Professor

SPATIAL INTERPRETATION OF A. EINSTEIN'S ENERGY EQUATION

Kharkov National university Air force

Keywords: Einstein's theory, macro objects, micro systems, mass and energy.

It is known that A. Einstein's theory is well applicable for macro objects. However, for micro systems it does not give valid results. Quantum theory is used for such systems. It is based on a probabilistic approach to determining the state of a microparticle. Apparently, this is where the contradictory theories lie. On the one hand, the deterministic energy equation, and on the other, the De Broglie and Heisenberg equations.

The totality of all physical processes is described by four interrelated components – energy, substance (matter), space, time.

In the energy equation

$$E = m c^2. \quad (1)$$

ENERGY SUBSTANCE TIME

As you can see, there is no space component in the structure of the equation.

On the other hand, quantum theory is based on the De Broglie equation and the Heisenberg uncertainty relation. It is believed that the wave and corpuscular properties of an object complement each other. The connection between waves and particles can only be described statistically – the square of the amplitude of a wave at a given location in space determines the intensity of the wave and the probability of finding a particle at that location. Moreover, the probability of finding a particle is maximum where the amplitude of the particle is maximum. The Heisenberg uncertainty relations are universal. They are performed whenever an attempt is made to measure precise position or momentum. However, refining the position leads to an increase in the inaccuracy of the pulse, and vice versa. Note that at low energies, the De Broglie wavelength will be very small. So, in optics, at small wavelengths, wave properties can be neglected and the concept of a light beam can be used. Thus, in quantum mechanics at small wavelengths, the wave properties are insignificant and therefore the motion can be described by a trajectory.

At the same time, quantum mechanics establishes strict rules by which to determine which variables are complementary and which are joint.

In quantum mechanics, the division of total energy into kinetic and potential does not make sense, since the first depends on the momentum, and the second on the coordinates.

From the above brief critical analysis it can be seen that quantum mechanics is a set of postulates that determine the experience of determining the properties of a micro-object.

Based on the unity of physical nature, it is of interest to create such a theory that was equally applicable to both macro and micro systems.

Consider the energy equation (1) as applied to a hydrogen atom – a nucleus and one electron. Using the classical model, we will consider a nucleus with a diameter d_n , located inside a sphere with a diameter d_s – the diameter of the electron orbit.

The electron energy will be determined by equation (1). However, his position will not be determined by the probability of his position. At the same time, it will necessarily be in a spherical region with a thickness of $(d_h - d_s) / 2$. The mass of an electron is known, its charge is known. Thus, it can be argued that the energy of the electron is in this spherical space. The volume of this space

$$V_o = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d_s - d_e}{2} \right)^3. \quad (2)$$

Returning to equation (1) and dividing the left and right sides by V_o , then

$$\frac{E}{V_o} = \frac{m}{V_o} C^2. \quad (3)$$

It is obvious that on the left side we got the specific energy of space $(\frac{E}{V_o})$, and on the right side $\frac{m}{V_o}$ the ratio is the density of matter for a space with a volume V_o .

From (3) it can be seen that the greater the density of matter, the greater the specific energy. Indeed, the more electrons there are in a spherical shell, the greater the density of matter in it. Accordingly, each of them carries an elementary charge, therefore, the more of them, them more energy.

Further, at a constant mass, an increase in V_o (expansion of space) leads to a decrease in specific energy. And vice versa. Compression of space, its high density.

They talk about high specific energy.

The developed approach should be considered legitimate also because so far it has not been possible to "see" the electron. Experiments only fix a certain energy in a certain space. However, one should not belittle the importance of the planetary model of the atom (the nucleus around which the electron rotates) should not be. However, the concept of an electron is inextricably linked with some space around the nucleus, which is determined by the energy level.

It is known that an electron can move from one energy level to another. In this case, the energy difference is $\Delta E = E_2 - E_1$, for such a transition

$$\Delta t \Delta E \geq h. \quad (4)$$

Where Δt is the duration of the time interval in which this transition occurred, but not the duration of the transition itself.

In the case of the transition of an electron in an atom from state E_2 to state E_1 , due to the finite width of the energy level of the excited atom. $\Delta E \neq 0$ In this case, is the lifetime of an atom in an excited state relative to the transition from E_2 to E_1 .

We emphasize once again that deviations in the measurements of the position and momentum of an object are not ordinary measurement errors that do not allow fixing the measured quantities with a certain accuracy. The theory explains this by the quantum mechanical nature of the object. But the researcher himself endowed the object with these properties, taking a quantum mechanical model for research. Moreover, the measuring device it-

self is a quantum mechanical object. The parameters characterizing its dynamic state are precisely determined by the uncertainty relations. It is obvious that a certain vicious circle is obtained.

Similar reasoning can be carried out for other atoms with different shell shapes. Given that they are not spherical, it is necessary to correctly determine the space in which the electron is located.

Thus, expression (3) rewritten as

$$E_v = \rho_m C^2. \quad (5)$$

where E_v is the specific energy of space, and ρ_m – is the density of matter in this space, allows you to combine energy, space, time and matter into a single pattern.

Where should further research be directed?

Apparently, first of all, it is necessary to estimate the geometric volumes of the energy shells. After that, determine the corresponding specific energy and identify their maximum and minimum values. Then, compare them with macro objects. There may not be a direct correspondence here, but the scale can be identified.

Similarly, investigate the density of matter in the shells and compare with the values ρ_m of macroobjects. Scale factors can also be identified here. The values of these scales can reveal a regular relationship between E_v and ρ_m .

Conclusion

An improved Einstein equation has been obtained, containing the relationship between energy, space, matter (matter) and time. It is obtained by passing to relative values E_v and ρ_m (related to the corresponding space) – the specific energy and density of the substance.

The application of the developed approach will allow obtaining scale factors for micro and macro objects. Their existence is a sign of the unity of the laws of the universe. On the other hand, this will make it possible to apply the similarity theory in the study of new objects. The numerical values of the specific energy and density of matter for well-studied objects can become criteria for determining the properties of the objects under study.

In general, the proposed approach is new. Its application can correct known ideas about physical objects and avoid uncertainty for micro systems.

Bibliography

The publication does not contain references to sources, since the equations and provisions used are fundamental and are contained in any reference book on physics.

УДК 514.822

Аніпко О.Б.

ПРОСТОРА ІНТЕРПРИТАЦІЯ РІВНЯННЯ ЕНЕРГІЇ А. ЕЙНШТЕЙНА

Відомо, що теорія А.Ейнштейна хорошо застосовується для макрооб'єктів. Однак, для мікро систем вона не дає дійсних результатів. Сукупність фізичних процесів

описується чотирма взаємопов'язаними складовими – енергія, речовина (матерія), простір, час.

У структурі рівняння енергії відсутня складова простору. Виходячи з єдності фізичної природи, цікавить створення такої теорії, яка була однаково застосовна як до макро, так і мікро систем.

Запропоновано інтерпретацію цього рівняння, що містить обсяг простору з певною масою і енергією. Отриманий вираз, що містить питому енергію простору, і щільність матерії у цьому просторі, дозволяє об'єднати енергію, простір, час і речовину в єдину закономірність. Визначено напрями перспективних досліджень із використанням розробленої інтерпретації рівняння енергії.

Ключові слова: теорія Ейнштейна, макрооб'єкти, мікросистеми, маса та енергія.

Анипко О.Б.

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИНТЕРПРИТАЦИЯ УРАВНЕНИЯ ЭНЕРГИИ А. ЭЙНШТЕЙНА

Известно, что теория А.Эйнштейна хорошо применима для макро объектов. Однако, для микро систем она не дает действительных результатов. Совокупность всех физических процессов описывается четырьмя взаимосвязанными составляющими – энергия, вещество (материя), пространство, время. В структуре уравнения энергии отсутствует составляющая пространства. Исходя из единства физической природы, представляет интерес создание такой теории, которая была равно применима как к макро, так и микро системам.

Предложена интерпретация этого уравнения которая содержит объем пространства с определенной массой и энергией. Полученное выражение, содержащее удельную энергию пространства, и плотность материи в этом пространстве, позволяет объединить энергию, пространство, время и вещество в единую закономерность. Определены направления перспективных исследований с использованием разработанной интерпретации уравнения энергии.

Ключевые слова: теория Эйнштейна, макрообъекты, микросистемы, масса и энергия.

Oleg B. Anipko

SPATIAL INTERPRITATION OF A. EINSTEIN'S ENERGY EQUATION

It is known that A. Einstein's theory is well applicable for macro objects. However, for micro systems it does not give valid results. The totality of all physical processes is described by four interrelated components – energy, substance (matter), space, time. There is no space component in the structure of the energy equation. Based on the unity of physical nature, it is of interest to create such a theory that was equally applicable to both macro and micro systems.

An interpretation of this equation is proposed which contains the volume of space with a certain mass and energy. The resulting expression containing the specific energy of space, and the density of matter in this space, allows you to combine energy, space, time and matter into a single pattern. The directions of perspective researches are determined using the developed interpretation of the energy equation.

Keywords: Einstein's theory, macro objects, micro systems, mass and energy.

«ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ»**Щоквартальний науково-практичний журнал**

Редколегією до опублікування приймаються статті, написані **державною чи англійською мовами**, за наступними науковими напрямками:

- ✓ *енергетика та енергозбереження; енерготехнологія енергоємних галузей промисловості; нетрадиційна енергетика; ресурсозбереження; енергетика та навколишнє середовище;*
- ✓ *тепловикористовуючі установки; моделювання процесів промислового обладнання; процеси та апарати різних галузей промисловості (хімічної, харчової, медичної та ін.);*
- ✓ *застосування ЕОМ в технологічних процесах; автоматизовані системи управління та обробки інформації;*
- ✓ *тепло- і масообмінні процеси та обладнання спеціальної техніки; теплові процеси та кріогенне устаткування медичного призначення;*
- ✓ *електроенергетика; обладнання електростанцій і передача електроенергії;*
- ✓ *економічні аспекти енергетики й промислової екології; комерційний інжиніринг, реінжиніринг та технологічний менеджмент, а також інших напрямкам на межі різних галузей знань.*

Матеріали до опублікування в кожний наступний номер приймаються до 20 числа останнього місяця попереднього кварталу. Рукописи авторам не повертаються.

Електронна версія статті повинна бути підготовлена у редакторі текстів MS Word for Windows версій 97, XP, 2000 або 2003. Сама стаття повинна бути роздрукована у 2-х примірниках. До матеріалів повинні додаватися експертний висновок про можливість опублікування матеріалів у відкритій пресі та рецензія доктора наук за профілем статті.

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТТІ:

Розмір бумаги А4 (210х297 мм); ліве і праве поля – 25 мм, верхнє і нижнє – 30 мм; рекомендований шрифт Times New Roman Суг; розмір шрифту – 12; міжрядковий інтервал – 1.

ПОРЯДОК РОЗМІЩЕННЯ МАТЕРІАЛУ:

- безпосередньо під верхньою межею зліва ВЕЛИКИМИ ЛІТЕРАМИ друкується УДК статті;
- пропустивши один рядок, по центру друкуються прізвища та ініціали авторів із зазначенням наукових ступенів та посади;
- пропустивши один рядок, по центру напівжирним шрифтом ВЕЛИКИМИ ЛІТЕРАМИ друкується назва статті;
- нижче, пропустив одну строку, друкується назва організації, де працюють автори статті;
- після розміщуються ключові слова;
- пропускається один рядок і з абзацу (1,25 см) друкується основний текст, відформатований по ширині сторінки;
- перед і після формул і рівнянь має бути відстань в один порожній рядок до тексту з інтервалом 1;
- формули і рівняння повинні бути вирівняні по центру;
- номери формул і рівнянь повинні бути вирівняні по правому краю;
- розмір шрифту формул і рівнянь для основного тексту – 12 пт.;
- рисунки, схеми і графіки повинні бути виконані в чорно-білому зображенні;
- пропустивши один рядок, приводиться список літератури, оформлений у відповідності до вимог ДСТУ. Згідно вимогам МОН України кількість літературних джерел повинна бути не менш за 12.
- далі розміщується транслітерація списку літератури;
- у кінці статті на трьох мовах (українська, російська та англійська) повинні бути надруковані УДК, автори, назва і анотація. Мінімальна кіль-

кiсть символiв кожної анотації – 1800 знаків.

Окремо в редколегію подаються відомості про авторів з їх адресами Email.

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ

Україна, 61002,
Харків-2, вул. Кирпичова, 2,
НТУ «ХП», редколегія журналу
«Інтегровані технології та енергозбереження»,
технічний редактор: к.техн.н., професор Горбунов К.О.

Тел. (057) 707-69-58.

Факс (057) 720-22-95.

Email: gor.kona2016@gmail.com

**СТАТТІ, ОФОРМЛЕНІ НЕ ВІДПОВІДНО ДО ВИМОГ,
РЕДКОЛЕГІЯ НЕ РОЗГЛЯДАЄ ТА НЕ РОЗМІЩУЄ У ЖУРНАЛІ**

**НА ЖУРНАЛ ВІДКРИТО ПЕРЕДПЛАТА
В ПОШТОВИХ ВІДДІЛЕННЯХ УКРАЇНИ**

Індекс видання: **22786**

Індекс видання: **46738** – тільки для Донецька та Луганська

Наукове видання

Щоквартальний науково-практичний журнал

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

1'2023

Технічний редактор *К. О. Горбунов*

Підп. до друку 15.03.2023 р. Формат 60 × 84 1/8. Папір офсетний.
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 6,2. Наклад 300 пр. 1-й з-д 1–50.
Зам. № . Ціна договірна.

Видавець і виготовлювач
Видавничий центр НТУ «ХП»,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків-2, 61002

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5478 від 21.08.2017 р.