

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

**Навчально-науковий інститут холоду, кріотехнологій та
екоенергетики
ім. В.С. Мартиновського**



**ВСЕУКРАЇНСЬКА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ
МОЛОДИХ ВЧЕНИХ ТА ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ**

**СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ТЕХНІКИ ТА
ЕКОЛОГО-ЕНЕРГЕТИЧНІ ПРОБЛЕМИ СУЧАСНОСТІ**

**STATE AND PROSPECTS OF LOW-TEMPERATURE TECHNOLOGY AND
CURRENT ENVIRONMENTAL AND ENERGY PROBLEMS**

14-15 квітня 2026 року

ЗБІРНИК ДОПОВІДЕЙ



Одеса - 2026

УДК 621.565; 621.

Стан і перспективи холодильної техніки та еколого-енергетичні проблеми сучасності.
Збірник доповідей – Одеса: ОНТУ, 2026. –178 с.

У збірнику наведені матеріали науково-технічної конференції молодих вчених, аспірантів та здобувачів вищої освіти «Стан і перспективи холодильної техніки та еколого-енергетичні проблеми сучасності», 14 по 15 квітня 2026 року та розглянуто різні аспекти науково-технічних питань, пов'язаних з проєктуванням, виготовленням та експлуатацією холодильного обладнання різного призначення, обладнання кондиціонування повітря, дослідженням робочих тіл та процесів в елементах холодильних та криогенних систем, застосуванням нано та когенераційних технологій, використанням холоду в харчових технологіях, застосуванням і впровадженням нетрадиційних джерел енергії та екологічної безпеки.

Матеріали, занесені до збірника, друкуються за авторськими оригіналами. За достовірність інформації відповідає автор публікації.

ПРЕЗИДІЯ ТА ОРГКОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

ГОЛОВА ПРЕЗИДІЇ

Іванченкова Л.В. – Ректор ОНТУ, д.е.н., професор

ЧЛЕНИ ПРЕЗИДІЇ

Єгоров Б.В. – Радник ректора, академік НААН України, д.т.н., професор

Ольшесвська О.В. – Проректор з наукової роботи та міжнародних зв'язків ОНТУ, к.т.н., доцент

Косой Б.В. – Директор навчально-наукового Інституту холоду, кріотехнологій та екоенергетики ім. В. С. Мартиновського ОНТУ, д.т.н., професор

ГОЛОВА ОРГКОМІТЕТУ

Хмельнюк М.Г. - завідувач кафедри холодильних установок і кондиціонування повітря ОНТУ, д.т.н., професор

ЗАСТУПНИК ГОЛОВИ ОРГКОМІТЕТУ

Жихарєва Н.В.- доцент кафедри холодильних установок і кондиціонування повітря ОНТУ, к.т.н., доцент

ЧЛЕНИ ОРГКОМІТЕТУ

Зімін О.В. – заступник директора навчально-наукового Інституту холоду, кріотехнологій та екоенергетики ім. В. С. Мартиновського ОНТУ, к.т.н., доцент

Симоненко Ю.М. - завідувач кафедри кріогенної техніки ОНТУ, д.т.н., професор

Гаркович О.Л. – завідувач кафедри екології, води та природоохоронних технологій ОНТУ, к.б.н., доцент

Семенюк Ю.В. – завідувач кафедри екоенергетики, термодинаміки та прикладної екології ОНТУ, д.т.н., професор

Тітлов О.С. – завідувач кафедри нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики ОНТУ, д.т.н., професор

Грудка Б.Г. - доцент кафедри кріогенної техніки ОНТУ, к.т.н., доцент

Когут В.О.- доцент кафедри холодильних установок і кондиціонування повітря ОНТУ, к.т.н., доцент

Тематичні напрями:

- · Сучасні проблеми холодильної і кріогенної техніки, систем кондиціонування повітря;
- · Інноваційні технічні рішення в низькотемпературній техніці;
- · Теплові насоси, акумулятори холоду, тепловикористовуючі холодильні машини, енергетичні і ресурсозберігаючі технології, нетрадиційні методи отримання холоду;
 - Термодинамічні та теплофізичні властивості робочих тіл;
 - Низькотемпературні технології в харчовій та переробній промисловості;
 - Теоретичні та експериментальні дослідження процесів тепломасообміну в апаратах холодильних машин;
 - Проблеми створення, дослідження і використання нових матеріалів в конструкціях апаратів холодильних і кріогенних машин і установок.
 - Нетрадиційні відновлювані джерела енергії;
 - Фізико-хімічні проблеми використання нових видів енергії;
 - Інноваційні технічні рішення для перетворювачів енергії;
 - Екологічні проблеми енергетики;
 - Енергетичні та екологічні проблеми холодильної техніки та харчової промисловості;
- · Екологічна безпека та технології захисту навколишнього середовища;
- Теплообмін та гідрогазодинаміка у нафтогазовій галузі;
- Енергозберігаючі технології у нафтогазовій галузі;
- Нанотехнології в енергетиці;
- Нанотехнології у харчовій промисловості.

Робочі мови конференції – українська, англійська.

ЗМІСТ

СЕКЦІЯ №1 – ХОЛОДИЛЬНІ УСТАНОВКИ ТА КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ

	стор
1 ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПЕРЕВЕДЕННЯ ПОБУТОВОГО ХОЛОДИЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ НА ОЗОНОБЕЗПЕЧНІ РЕЧОВИНИ	14
Шмодін О.О., здобувач вищої освіти Семенюк Д.П., професор кафедри інтегрованих електротехнологій та енергетичного машинобудування, ДБТУ, м. Харків,	
2 ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ЗБЕРЕЖЕННЯ СТРУКТУРИ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ ПРИ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНІЙ ОБРОБЦІ	18
Петренко О.В., кандидат технічних наук, доцентка, ДБТУ, м. Харків Єрмоленко Є.М., фахівець, м. Харків Єрмоленко О.В., бакалаврка, ДБТУ, м. Харків	
3 ТЕПЛОВІ НАСОСИ ЯК ІНСТРУМЕНТ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ЕНЕРГЕТИКИ ТА ЗНИЖЕННЯ ВУГЛЕЦЕВОГО СЛІДУ	20
Заруба Г.Г., аспірант ОНТУ Науковий керівник: Хмельнюк М. Г. ,д.т.н., проф.	
4 ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТРАНСФОРМАЦІЇ ТЕПЛОТИ В ТЕПЛОНАСОСНОМУ ЦИКЛІ	24
Босий М.В., старший викладач ЦНТУ м. Кропивницький Хомяк Н.І., Шуть А.О., Скрипниченко Д.О., Буркутенко А.С., Белецький І.О., здобувачі ЦНТУ м. Кропивницький	
5 ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ІОННОГО ПОТОКУ В ФІЛЬТРАЦІ СИСТЕМ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ	26
Моїсєєв В.В., аспірант ОНТУ Науковий керівник: Жихарєва Н.В., к.т.н., доц., ОНТУ м. Одеса	
6 ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕРЕРВНОСТІ ХОЛОДИЛЬНОГО ЛАНЦЮГА ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ АВТОНОМНИХ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИХ ХОЛОДИЛЬНИХ МОДУЛІВ	29
Манжос М.В., здобувач вищої освіти Якушенко Є.М., доцент кафедри інтегрованих електротехнологій та енергетичного машинобудування, ДБТУ, м. Харків	

7	СУЧАНІ ПРОБЛЕМИ VRF-СИСТЕМ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ: РЕГУЛЯТОРНІ, РИНКОВІ Й ТЕХНІЧНІ ВИКЛИКИ	31
	Геніх К.В., магістрант; ОНТУ м. Одеса Науковий керівник: Когут В.О., к.т.н., доц. ОНТУ	
8	ВІДТАЙКА ВИПАРНИКІВ ГАРЯЧИМ ГАЗОМ У КОМЕРЦІЙНИХ ХОЛОДИЛЬНИХ СИСТЕМАХ	33
	Смілик М.М., PhD аспірант; Харків, ДБТУ Потапов В.О., д.т.н., проф., Харків, ДБТУ Кучма М.С., здобувач освіти, ВСП «Харківський фаховий коледж харчової промисловості ДБТУ»	
9	COMPARISON OF CHARGING TIME OF EUTECTIC THERMAL ENERGY ACCUMULATORS IN THE AVERAGE TEMPERATURE RANGE	36
	Serhii Kolesnik, student, SBTU, Kharkiv Volodymyr Potapov, professor, SBTU, Kharkiv	
10	ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІ КОНТАКТНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ В СИСТЕМАХ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ	38
	Овчинников М.К. асп ОНТУ. Меріков М.М., ЗВО бакалавр ОНТУ Наукові керівники: Жихарева Н. В., к.т.н. доц., ОНТУ Когут В.О. к.т.н. доц., ОНТУ	
11	ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ У РІЗНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ	40
	Погожий Л.А., ЗВО Лужанська Г.В., доц., к.т.н. Національний університет «Одеська політехніка»	
12	ВИКОРИСТАННЯ ВЕУ ДЛЯ НАФТОВИХ ПЛАТФОРМ	42
	Ляхов С.Д.,ЗВО Лужанська Г.В., доц., к.т.н. Національний університет «Одеська політехніка»	
13	ТЕПЛОВА ІЗОЛЯЦІЯ ХОЛОДОПРОВІДІВ	46
	Лукашенко О.В.,ЗВО Губар Л.Б., ст. викладач Національний університет «Одеська політехніка»	
14	АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМБІНОВАНОЇ CO₂-ХОЛОДИЛЬНОЇ СИСТЕМИ	48
	Трандафілов В.В., доцент (докторант), кафедра ХУКП Одеський національний технологічний університет, м. Одеса Науковий консультант : Хмельнюк М. Г. ,д.т.н., проф.	

- | | | |
|----|--|----|
| 15 | <p>МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ З ВПРОВАДЖЕННЯМ ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ МОДУЛІВ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЇ</p> <p>Єфремов І. Ю., магістрант ОНТУ
 Науковий керівник: Жихарева Н. В., к.т.н. доц. ОНТУ</p> | 50 |
| 16 | <p>РОЗРОБКА КОМПЛЕКСНОЇ СИСТЕМИ ПРЕЦИЗІЙНОГО МІКРОКЛІМАТУ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОЗМІРНОЇ СТАБІЛЬНОСТІ ГІГРОСКОПІЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ</p> <p>Висотенко Д. В., магістрант ОНТУ
 Науковий керівник: Жихарева Н. В., к.т.н. доц.</p> | 51 |
| 17 | <p>ДОСЛІДЖЕННЯ БУСТЕРНОЇ ТРАНСКРИТИЧНОЇ ХОЛОДИЛЬНОЇ СИСТЕМИ НА CO₂ З МУЛЬТИЕЖЕКТОРНИМ БЛОКОМ</p> <p>Фоменко Г.А., здобувач СВО Бакалавр ІХКЕ ОНТУ
 Науковий керівник: Трандафілов В.В.к.т.н. доц. ОНТУ</p> | 53 |
| 18 | <p>METHODOLOGICAL ASPECTS OF INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF CLEANROOM HVAC SYSTEMS THROUGH OPTIMIZATION OF MULTI-STAGE FILTRATION AND THERMOPHYSICAL PROCESSES</p> <p>Briushcov K. Master's Degree Student ONUT/city.Odesa
 Supervisor, Associate Professor: Zhykharieva Nataliia ONUT</p> | 54 |
| 19 | <p>ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ КОНДИЦІОНУВАННЯ ТА ОЧИЩЕННЯ ПОВІТРЯ В ЛІКАРНЯХ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ РИЗИКУ ВНУТРІШНЬО ЛІКАРНЯНИХ ІНФЕКЦІЙ</p> <p>Копитін В.О., ЗВО бакалавр ІХКЭ ОНТУ, Одеса
 Науковий керівник: Жихарева Н. В., к.т.н. доц.</p> | 55 |
| 20 | <p>ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ХОЛОДИЛЬНОЇ СИСТЕМИ ПТАХОФАБРИКИ</p> <p>Ходаков М.О., ЗВО бакалавр ОНТУ
 Науковий керівник: Жихарева Н. В., к.т.н. доц., ОНТУ</p> | 59 |
| 21 | <p>IMPROVEMENT OF AIR TREATMENT METHODS AND AIR DISTRIBUTION SYSTEMS IN THE APPLICATION OF MULTI-ZONE SPLIT SYSTEMS</p> <p>Vorobjov M. Master's Degree Student ONUT:
 Supervisor, Associate Professor: Zhykharieva N.</p> | 61 |

- 22 **НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ХАРЧОВІЙ ТА ПЕРЕРОБНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ** 62
Казімір О.В., магістрант ОНТУ
Науковий керівник: Жихарева Н. В., к.т.н. доц. ОНТУ
- 23 **ОСНОВНІ БАР'ЄРИ ВПРОВАДЖЕННЯ ХОЛОДИЛЬНИХ СИСТЕМ НА CO₂ (R744) ТА АРХІТЕКТУРА ДІАГНОСТИКИ НЕСПРАВНОСТЕЙ** 64
Кушнір В.О., аспірант, ОНТУ
Науковий керівник: Яковлева О.Ю., к.т.н., доц.
- 24 **ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ХОЛОДИЛЬНИХ УСТАНОВОК НА R744 ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕХНОЛОГІЇ PRESSURE EXCHANGER** 67
Михайлицький М.Є., студент ОНТУ, м. Одеса
Науковий керівник: Яковлева О.Ю., к.т.н., доц.
- 25 **ПРАКТИЧНИЙ ДОСВІД ВИКОРИСТАННЯ АДІАБАТИЧНО-ВИПАРНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ДРАЙКУЛЕРІВ ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИН** 69
Книш С.В.¹, аспірант, Желіба Ю.В.¹, Книш А.С.¹, Желіба Т.О.²
¹Одеський національний технологічний університет, м. Одеса
²НУ «Одеська політехніка», м. Одеса
- 26 **ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ В АВТОМОБІЛЯХ** 71
Гудз О.А., бакалавр ОНТУ Римский О. Є. бакалавр ОНТУ
Наукові керівники: Жихарева Н. В., к.т.н. доц., ОНТУ Когут В.О. к.т.н. доц., ОНТУ

СЕКЦІЯ №2 –НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНІ ХОЛОДИЛЬНІ І КРІОГЕННІ МАШИНИ

- 1 ДОСЛІДЖЕННЯ СОРБЦІЙНОГО ПОДІЛУ НЕОНУ НА ІЗОТОПИ МЕТОДОМ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ХРОМАТОГРАФІЇ** 73
Терещенко О.В., бакалавр ОНТУ, м. Одеса
Науковий керівник: Симоненко Ю.М., д.т.н., проф.
- 2 БАТАРЕЯ КАРНО – ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В СИСТЕМАХ ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ** 75
Довгаль Є.В., Стоян Г.О., Кісса Д.В., Кушніров Д.О., бакалаври ОНТУ, м. Одеса
Науковий керівник: Морозюк Л.І., д.т.н., проф.
- 3 АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ОДНОЧАСНОГО ВИРОБНИЦТВА ЕНЕРГІЇ І ХОЛОДУ** 77
Опарівський Н.В., аспірант ОНТУ, м. Одеса
Науковий керівник: Грудка Б.Г., к.т.н., доцент кафедри кріогенної техніки ОНТУ
- 4 ВИКОРИСТАННЯ ХОЛОДУ У ВИНОРОБНІЙ ПРОМИСЛОВOSTІ** 79
Яцзяк В.С., бакалавр ОНТУ, м. Одеса
Науковий керівник: Яковлев Ю.О., к.т.н., доц.
- 5 ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ХОЛОДУ В МЕДИЦИНІ** 81
Пугач В.О., бакалавр ОНТУ, м. Одеса
Науковий керівник: Яковлев Ю.О., к.т.н., доц.
- 6 СИСТЕМА ТРИГЕНЕРАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ МІКРОТУРБИНИ, ПАРОКОМПРЕСОРНОЇ ТА ЕЖЕКТОРНОЇ ХОЛОДИЛЬНОЇ МАШИН** 82
Грудка Я.Г., бакалавр ОНТУ, м. Одеса
Науковий керівник: Басов А.М. к.т.н., доц.
- 7 ВИКОРИСТАННЯ ХОЛОДУ В БУДІВЕЛЬНІЙ ТЕХНІЦІ** 84
Батістік М.Д., бакалавр ОНТУ, м. Одеса
Науковий керівник: Яковлев Ю.О., к.т.н., доц.

СЕКЦІЯ №3 –ЕКОЛОГІЯ. ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

- 1 **БІОКОНВЕРСІЯ РЕСТОРАННИХ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ЛИЧИНОК МУХИ ЧОРНА ЛЬВИНКА (*HERMETIA ILLUCENS*): ТЕХНОЛОГІЧНІ ПЕРЕВАГИ ТА ВИКЛИКИ** 87
Прилуцький В., аспірант, Крусір Г.В., проф. каф. ЕВтаПТ ОНТУ, Сагдєєва О.А., доц. каф. ЕВтаПТ ОНТУ, м. Одеса
- 2 **РОЗВИТОК НЕЗАЛЕЖНОГО ЕКОЛОГІЧНОГО АУДИТУ В УКРАЇНІ: ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ** 89
Мащенко Г.А., студентка, ОНТУ, м. Одеса
Науковий керівник: – Мадані М.М доцент, ОНТУ
- 3 **ЗЕЛЕНІ ТЕХНОЛОГІЇ У ВИРОБНИЦТВІ МІНЕРАЛЬНИХ ВОД - ШЛЯХ ДО ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПІДПРИЄМСТВА** 91
Стоянова С.І., здобувач СВО «Бакалавр», ОНТУ, м. Одеса,
Науковий керівник: Коваленко О.О., д.т.н., професор, ОНТУ
- 4 **МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕПЛО- І МАСОПЕРЕНОСУ ПРИ КРИСТАЛІЗАЦІЙНОМУ ОПРІСНЕННІ РОЗЧИНУ $\text{NaCl-H}_2\text{O}$** 92
Василів Б.О., аспірант, ОНТУ
Науковий керівник: Дорошенко В.М., професор кафедри НТІТ

СЕКЦІЯ №4 –ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА, НАФТОГАЗОВА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

- | | | |
|---|--|-----|
| 1 | ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ МІКРОХВИЛЬОВОЇ ЕНЕРГІЇ У ПРОЦЕСАХ СПІКАННЯ ТЕХНІЧНОЇ КЕРАМІКИ | 95 |
| | Борец С. О., аспірант, ОНТУ, м. Одеса,
Тортіка Д. М., аспірант, ОНТУ, м. Одеса,
Науковий керівник: Башкова І.Л., професор ОНТУ | |
| 2 | ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ МІКРОХВИЛЬОВОГО НАГРІВУ РОСЛИННОГО МАТЕРІАЛУ В ПРОЦЕСАХ КОМБІНОВАНОЇ ЕКСТРАКЦІЇ | 97 |
| | Фатєєва К.О., аспірант, ОНТУ, м. Одеса
Комендант С.Г. аспірант, ОНТУ, м. Одеса
Науковий керівник: Волгушева Н.В. , доцент ОНТУ | |
| 3 | ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ МІКРОХВИЛЬОВОЇ РЕГЕНЕРАЦІЇ НА ТЕПЛОАКУМУЛЮВАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ ЦЕОЛІТІВ | 99 |
| | Гречановський А.П. аспірант, ОНТУ, м. Одеса,
Крятов А.Г., аспірант, ОНТУ, м. Одеса,
Науковий керівник: Башкова І.Л., професор ОНТУ | |
| 4 | МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ГІБРИДНИХ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ | 100 |
| | Єрохін Д. М., аспірант, ОНТУ, м. Одеса, | |
| 5 | ПОРІВНЯННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ЯВНОГО ТА ПРИХОВАНОГО АКУМУЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ У ТЕПЛИЦЯХ | 104 |
| | Писаревський І.О. аспірант, ОНТУ, м. Одеса,
Науковий керівник: Башкова І.Л., професор ОНТУ | |
| 6 | УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ АБСОРБЦІЙНОГО ХОЛОДИЛЬНОГО УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ РОБОТИ В НЕСТАБІЛЬНИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ УМОВАХ | 105 |
| | Сатир Н.С., аспірант ОНТУ, Тітлов О.С., д.т.н, професор ОНТУ , Дорошенко В.М., д.т.н, професор ОНТУ | |
| 7 | ВЛАСТИВОСТІ ВИСОКОВ'ЯЗКОЇ НАФТИ | 108 |
| | Сагала В.В., здобувач СВО Магістр, ОНТУ, м. Одеса,
Науковий керівник: Кологрівов М.М., к.т.н., доцент ОНТУ | |

- | | | |
|----|--|-----|
| 8 | МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ КОНДУКТИВНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ
Густяков С.О. бакалавр ОНТУ, Чута О.В. бакалавр ОНТУ, Одеса
Науковий керівник Волчок В.О., ст. викл. ОНТУ | 110 |
| 9 | ЗАСТОСУВАННЯ ЕНЕРГІЇ МІКРОХВИЛЬОВОГО ПОЛЯ У ПРОЦЕСІ ВИГОТОВЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ГРАДІЄНТНИХ МАТЕРІАЛІВ
Волгушева Н.В., доцент, ОНТУ, м. Одеса,
Тортіка Д.М., аспірант, ОНТУ, м. Одеса, | 112 |
| 10 | РОЗРОБКА СИСТЕМ ОТРИМАННЯ ВОДИ З АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В ОДЕСЬКІЙ ОБЛАСТІ
Годик К.О., аспірант, Тітлов О.С., д.т.н, професор, Дорошенко В.М., д.т.н, професор, ОНТУ, м. Одеса, Україна | 114 |
| 11 | РОЗРОБКА СИСТЕМ ОТРИМАННЯ ВОДИ З АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В ОДЕСЬКІЙ ОБЛАСТІ
Годик К.О., аспірант, Тітлов О.С., д.т.н, професор, Біленко Н.О. PhD, доцент, Осадчук Є.О., к.т.н., доцент, ОНТУ, м. Одеса, Україна | 115 |
| 12 | УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОМАСООБМІНУ В СИСТЕМАХ ГЕНЕРАЦІЇ АТМОСФЕРНОЇ ВОДИ З МЕТОЮ ЗНИЖЕННЯ ПИТОМИХ ЕНЕРГОВИТРАТ
Агатій І.В., аспірант, Тітлов О.С., д.т.н., проф. Нікітін Д.М., д.т.н., проф. ОНТУ, м. Одеса, Україна | 119 |
| 13 | РОЗРОБКА СИСТЕМ ОТРИМАННЯ ВОДИ З АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В СКЛАДІ СИСТЕМ ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ В КЛІМАТИЧНИХ УМОВАХ ОДЕСЬКОЇ ОБЛАСТІ
Годик К.О., асп, Білий О.С., асп., Тітлов О.С., Осадчук Є.О., к.т.н., доцент, ОНТУ, м. Одеса, Україна | 122 |
| 14 | MODELING THE PROCESS OF HEAT GENERATION UNDER STATIC CONDITIONS DURING AN EXOTHERMIC CHEMICAL REACTION
Volodymir Doroshenko, graduate student, Oleksandr Titlov, Doctor of Technical Sciences, Professor Odesa National University of Technology (Ukraine) | 128 |
| 15 | ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ ТЕПЛОВОЇ КАМЕРИ У СКЛАДІ ПОБУТОВОГО ПРИЛАДУ КОМБІНОВАНОЇ ТЕРМІЧНОЇ ДІЇ
Дмитренко Д.В., аспірант, Тітлов О.С., д.т.н, професор, ОНТУ, м. Одеса, Україна | 133 |

- | | | |
|----|--|-----|
| 16 | <p>РОЗРОБКА АВТОНОМНИХ ГЕЛІОСИСТЕМ ПЕРІОДИЧНОЇ ДІЇ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ ВОДИ З АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ</p> <p>Кравченко В.В., аспірант, Тітлов О.С., д.т.н, професор, д.т.н., професор Нікітін Д.М.
ОНТУ, м Одеса, Україна</p> | 137 |
| 17 | <p>ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМ АКУМУЛЮВАННЯ ЧУТЛИВОЇ ТА ПРИХОВАНОЇ ТЕПЛОТИ ДЛЯ ТЕПЛИЧНИХ ЗАСТОСУВАНЬ</p> <p>Писаревський І.О., аспірант ОНТУ, Мукмінов І.І., PhD ОНТУ</p> | 139 |
| 18 | <p>АНАЛІЗ ПОТЕНЦІАЛУ ВТОРИННИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ</p> <p>Арику А.В., ст. викладач, ОНТУ, м. Одеса
Писаревський І.О., аспірант, ОНТУ, м. Одеса</p> | 142 |
| 19 | <p>АКТУАЛЬНІСТЬ ТА ПРОБЛЕМАТИКА ДОСЛІДЖЕННЯ УДОСКОНАЛЕННЯ АБСОРБЦІЙНИХ ХОЛОДИЛЬНИХ ПРИЛАДІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТЕПЛОВИХ ТРУБ І ДВОФАЗНИХ ТЕРМОСИФОНІВ</p> <p>Сугер В.В., аспірант, Тітлов О.С., д.т.н, професор, Дорошенко В.М., д.т.н, професор, ОНТУ, м. Одеса, Україна</p> | 144 |
| 20 | <p>АБСОРБЦІЙНА ХОЛОДИЛЬНА МАШИНА НА НОВИХ РОБОЧИХ СУМІШАХ</p> <p>Пономарьов К.М., PhD, Березовська Л.В., PhD, Тітлов О.С., д.т.н, професор, ОНТУ, м. Одеса, Україна</p> | 146 |
| 21 | <p>АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВ ПОПЕРЕДНЬОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ НА КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЯХ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВІДІВ</p> <p>Фелонюк С.А., аспірант, Тітлов О.С., д.т.н., професор
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна</p> | 149 |
| 22 | <p>АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВ ЗАСТОСУВАННЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ СЕПАРАЦІЇ ПРИРОДНОГО ГАЗУ</p> <p>Волчок В.О., к.т.н., Чернявська А.С., СВО «Бакалавр»
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса</p> | 153 |
| 23 | <p>АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ МІКРОХВИЛЬОВОГО НАГРІВУ ВИСОКОВ'ЯЗКИХ НАФТОПРОДУКТІВ</p> <p>Волгушева Н. В., к.т.н, доц., Альтман Е. І. к.т.н, доц.
Одеський національний технологічний університет</p> | 154 |
| 24 | <p>АНАЛІЗ СХЕМ ПРИЄДНАННЯ СИСТЕМИ ВОДЯНОГО ОПАЛЕННЯ ДО ТЕПЛОВОЇ МЕРЕЖІ</p> <p>Волчок В.О., к.т.н., Коростельов К.І., СВО «Бакалавр»
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса</p> | 155 |

25	СУШІННЯ ЦЕОЛІТІВ 13Х В МІКРОХВИЛЬОВОМУ ПОЛІ	158
	Бошкова І.Л., д.т.н., проф., Гречановський А.П., аспірант Одеський національний технологічний університет	
26	СПІКАННЯ ТЕХНІЧНОЇ КЕРАМІКИ З ЗАСТОСУВАННЯМ ЕНЕРГІЇ МІКРОХВИЛЬОВОГО ПОЛЯ	160
	Борец С. О., аспірант, Тортіка Д. М., аспірант, Комендант С. Г., аспірант Одеський національний технологічний університет	
27	ВДОСКОНАЛЕННЯ КОМБІНОВАНОГО ТЕПЛООБМІНУ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ЗАБРУДНЕНИХ ҐРУНТІВ	162
	Воробйов Н.О., аспірант Одеський національний технологічний університет	
28	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СОНЯЧНОГО ПОВІТРЯНОГО КОЛЕКТОРА З РІЗНИМИ ТИПАМИ ПРОЗОРОГО ПОКРИТТЯ	164
	Єрохін Д.М., аспірант Одеський національний технологічний університет	
29	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СПІКАННЯ ОКСИДУ АЛЮМІНІЮ В МІКРОХВИЛЬОВОМУ ПОЛІ НА ЕТАПІ СУШІННЯ	166
	А. Г. Крятов, аспірант Одеський національний технологічний університет	
30	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ ТЕПЛОЄМНОСТІ ПОРОШКІВ НАНОЧАСТИНОК CuO МЕТОДОМ МОНОТОННОГО НАГРІВАННЯ В АДІАБАТНОМУ КАЛОРИМЕТРІ	170
	Желєзний В.П. , Квасницький Б.А. , Івченко Д.О. , Халак В.Ф. , Глек Я.О.	
31	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФУЛЕРЕНУ C_{60} НА ТЕПЛООБМІН ТЕТРАЛІНУ ПРИ ВИМУШЕНІЙ КОНВЕКЦІЇ	173
	Желєзний В.П. , Шумський О.А. , Борисов В.О. , Івченко Д.О. , Халак В.Ф. , Глек Я.О.	

СЕКЦІЯ №1 – ХОЛОДИЛЬНІ УСТАНОВКИ ТА КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ

УДК 621.567:621.564

ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПЕРЕВЕДЕННЯ ПОБУТОВОГО ХОЛОДИЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ НА ОЗОНОБЕЗПЕЧНІ РЕЧОВИНИ

Шмодін О.О., здобувач вищої освіти

Семенюк Д.П., професор кафедри інтегрованих електротехнологій та енергетичного машинобудування, ДБТУ, м. Харків, dmitriy.semeniuk@gmail.com

Щорічно у світі виробляється приблизно 100 млн побутових холодильників та морозильників. Типовий пристрій оснащується герметичною парокомпресійною холодильною машиною з асинхронним двигуном потужністю 50-250 Вт (або з недавніх пір – лінійним індукторним двигуном), в якій міститься від 50 до 250 г холодоагенту. В окремих пристроях застосовуються альтернативні технології, наприклад у готельних мінібарах — абсорбційні холодильні машини. Розкид термінів служби систем, встановлених у всьому світі, надзвичайно широкий. Середній термін служби складає від 9 до 19 років експлуатації. У силу тривалого терміну служби виробів та великих річних обсягів виробництва загальна кількість побутових холодильних систем у світі оцінюється у 1,5–1,8 млрд. одиниць.

У секторі побутового холодильного обладнання до 2002–2003 років широко застосовувалися R-11 – як спінювач теплоізоляції і R-12 – як холодоагент. Застосування цих речовин було повністю припинено в країні наприкінці 2000 р. відповідно до зобов'язань України щодо Монреальського протоколу щодо речовин, що руйнують озоновий шар (Монреальський протокол), але їх споживання в секторі зберігалось як за рахунок створених самими підприємствами – виробниками побутової холодильної техніки запасами, і запасами, сформованими підприємствами – виробниками речовин, та його дочірніми структурами. Відмова від R-11 та перехід на R-141b виявився для підприємств сектору некритично витратним заходом через те, що ця заміна практично не супроводжувалася технологічним переозброєнням. У зв'язку з тим, що використання мотор-компресорів, сконструйованих для R-12, неможливе навіть у разі застосування найближчого до нього за фізико-хімічними та термодинамічними властивостями альтернативного холодоагенту R-134a, багатьма підприємствами було обрано шлях поетапної конверсії.

Для виробництва нового побутового холодильного обладнання, а також ретрофіту та сервісного обслуговування побутового обладнання, що перебуває в експлуатації, досить широко застосовувалися сумішеві холодоагенти на основі ГХФВ, які не потребують заміни компресора та мінеральної олії ХФ12-16. Також було поширено застосування ряду озонобезпечних сумішевих холодоагентів на основі ГФВ (R-134a, R-152a, R-218) і вуглеводнів (ізобутан – R-600a, бутан – R-600) для використання в холодильному обладнанні, що діє, як

замінник R-12. На території України є велика кількість юридичних осіб та індивідуальних підприємств, які надають послуги з ремонту обладнання, що знаходяться в експлуатації. Ремонт побутового холодильного обладнання, що перебуває в експлуатації, в Україні має складнощі зважаючи на досить широку номенклатуру холодоагентів, що застосовуються і двома видами масла, несумісними один з одним (мінеральне і синтетичне). У значній кількості випадків ремонт побутових холодильників та морозильників виявляється недоцільним у зв'язку з тим, що його вартість може досягати 30-40% від ціни нового агрегату аналогічного класу в озонобезпечному виконанні. Враховуючи значний вік основної частини побутового холодильного обладнання, що працює на ХФВ (від 15 до 50 і більше років), щорічно ремонту з повною заміною холодоагенту потребує досить значна кількість холодильних агрегатів. З урахуванням типової норми заправки, загальний річний обсяг R-12 чи його замінників, необхідний для забезпечення функціонування обладнання старого зразка, становить досить значну величину. При цьому реальний рівень споживання цих речовин може суттєво відрізнитись від зазначених обсягів (відмова власників від ремонту, втрати при заправці, рециклінг холодоагенту тощо).

Ситуація з наявністю в експлуатації побутового холодильного обладнання, що містить ГХФВ дещо інша: вищевказані суміші холодоагенти застосовувалися як заміна R-12 лише на українських підприємствах, а зарубіжними компаніями конверсію на озонобезпечні холодоагенти було здійснено в більшості випадків ще до 2000 р. Враховуючи технологічну складність та економічну недоцільність вилучення з холодильного контуру побутового холодильного обладнання та подальшого поділу на окремі компоненти за допомогою ректифікації сумішових холодоагентів на основі ГХФВ пропонується організувати їх 100% знищення в рамках системи збору та утилізації побутового холодильного обладнання. У побутовому обладнанні приблизно з 2002–2003 років стали використовувати замість R-11 R-141b як спінювач теплоізоляції. Беручи до уваги, що R-11 і R-141b, технічно складно витягти з пінополіуретану і регенерувати (відновити), доцільно розглянути можливість їх 100%-го збору та утилізації, що відповідає практиці, яка склалася в розвинених країнах. Практично у всіх побутових холодильниках, що виробляються у світі, використовуються нові холодоагенти, що не містять озоноруйнівних речовин. Основними холодоагентами в даний час є ізобутан (R-600a) та R-134a. Більше 50% побутових холодильних пристроїв, що випускаються в даний час у світі, містить R-600a, практично всі інші – R-134a. Таким чином, у розвинених країнах, щорічно споживається близько 3,8 тис. т., а в країнах, що розвиваються – 7,7 тис. т. R-134a. Причина такої різниці полягає в регіональних відмінностях: R-600a більш поширений в Європі. Виробництво пристроїв, що працюють на R-600a, широко поширене в Азії, трохи менше – в Південній та Центральній Америці та Південній Африці, практично відсутнє в Північній Америці і починає зростати в Австралії. З розвитком технологій продовжується поступове внесення змін до конструкції виробів, метою якого є перехід від R-134a на R-600a. Після виведення R-12 з обігу, R-134a став основним холодоагентом, який використовується в побутових холодильних пристроях. Цей холодоагент відноситься до класу безпеки A1 (низькотоксична та важкогорюча речовина) і, отже, не становить загрози для безпечної експлуатації побутового обладнання. R-134a має практично такі ж показники

енергоефективності, як і R-12, проте постійне вдосконалення холодильних агрегатів, що працюють на R-134a, призвело до значного зростання їх ефективності.

R-600a є основною альтернативою R-134a. При впровадженні R-600a 1994 р. у Європі спостерігалось занепокоєння його високою горючістю. Однак, завдяки зменшенню кількості холодоагенту в побутових холодильниках, питання було закрито. До цього часу не було розроблено нових альтернатив, які мають таку ж енергоефективність і конкурентну ціну. З урахуванням законодавчих вимог щодо безпеки (наприклад, стандарту IEC 60335–2–89) R-600a ідеально підходить для побутових холодильників, оскільки при його використанні підвищуються показники енергоефективності та знижується рівень шуму (порівняно з обладнанням, що працює на R-134a). Вартість R-600a нижча, ніж R-134a, однак збільшення розміру компресорів і необхідність дотримуватися встановлених вимог до безпеки спричиняють додаткові капіталовкладення та збільшення виробничих витрат. Загалом істотних перешкод для використання R-600a немає, що підтверджується наявністю на ринку на сьогоднішній день понад 500 млн. побутових холодильників, що працюють на цьому холодоагенті. Однак у деяких регіонах (наприклад, США) R-600a практично не використовується, чому може бути кілька причин. Це загальні проблеми забезпечення суспільної безпеки (або її сприйняття) та помилки щодо безпеки та аварій, пов'язаних з його горючістю, що знаходять відображення в обмежувальних національних стандартах та небажанні ініціювати поширення R-600a у регіоні. Незважаючи на те, що законодавство США досі обмежує використання R-600a, у 2011 р. Агентство з охорони навколишнього середовища (EPA) включило R-600a та суміш вуглеводнів (R-441A) до Політики нових значущих альтернатив (SNAP) для побутових та малих комерційних (торгових) холодильників та морозильників. R-600a є практично стандартним холодоагентом, що використовується в побутових холодильниках та морозильниках у Європі. Щорічно у світі виробляється понад 50 млн. приладів, що працюють на R-600a. Підвищення енергоефективності значно зменшило вплив побутових холодильників на клімат завдяки зниженню прямих (викиди холодоагенту) та непрямих (викиди CO₂, пов'язані із споживанням електроенергії) викидів.

Використання R-1234yf в побутових холодильниках і морозильниках технічно можливе і може бути проміжним етапом при переході від R-134a до R-600a в деяких країнах, так як тиск і потужність R-1234yf трохи нижче, ніж у R-134a, що полегшує застосування цього холодоагенту в країнах, де діють суворі обмеження на використання R-600a. Почалися дослідження можливостей використання R-1234yf замість R-134a, але ці розробки не розглядаються як першочергове завдання (на відміну від використання в автомобільних кондиціонерах). Згідно з попередніми оцінками ефективність R-1234yf може бути такою самою, як у R-134a, проте на практиці вона часто трохи нижче.

В даний час двоокис вуглецю – R-744 (включаючи транскритичні системи) є єдиною перспективною альтернативою, придатною для використання у звичайних парокомпресійних побутових холодильниках. Додаткові витрати можуть бути пов'язані з великою вагою матеріалів, необхідних для забезпечення мінімального рівня ефективності, зокрема морозильників у будь-яких кліматичних умовах або холодильників та морозильників у теплом кліматі. Однак через використання більшості таких пристроїв всередині приміщень вплив температури зовнішнього повітря на температуру навколишнього середовища та

ефективність системи вже не має колишнього значення. Вища вартість також обумовлена конструкцією випарника, який повинен відповідати високому тиску R-744. Основні перешкоди для використання R-744 пов'язані з великими витратами на матеріали, що знижує конкурентоспроможність обладнання, що працює на ньому. Крім того, є додаткові перешкоди, наприклад, загальне побоювання перед високим тиском, вплив національних та міжнародних стандартів, вимоги яких збільшують вартість кінцевого продукту, відсутність навчальних матеріалів та висока вартість сервісного обладнання.

З урахуванням вищевикладеного слід зазначити, що всі підприємства сектору побутового холодильного обладнання, що належать закордонним компаніям-виробникам холодильної техніки, здійснили поетапну відмову від використання як холодоагент R-134a на користь R-600a. На цей час переважна більшість виробників побутового холодильного обладнання у світі відмовилася від використання R-141b як спінюючого агента і перейшли на циклопентан. Переходячи на циклопентан, підприємство отримує цілу низку переваг, таких як: істотне підвищення якості та класу енергоспоживання побутової холодильної техніки, що випускається, освоєння сучасних технологій, що не здійснюють негативного впливу на озоновий шар і клімат Землі.

Підсумовуючи, можна сказати наступне. Значна частина підприємств сектору побутового холодильного обладнання в основному застосовує як холодоагент ізобутан R-600a (більше половини нових холодильників та морозильників, що виробляються у світі) та R-134a (інші). R-600a залишається основною альтернативою R-134a. Завдяки використанню в холодильному контурі невеликої кількості холодоагенту (близько 65 г) виключено проблему його швидкої займистості. До цього часу не було розроблено нових альтернатив, які мають таку ж енергоефективність і конкурентоспроможну ціну. Маючи нижчу вартість, ніж R-134a, R-600a вимагає додаткових капіталовкладень для збільшення розміру компресорів. Також можуть зрости виробничі витрати на виконання вимог до безпеки систем. Почалися дослідження можливостей застосування R-1234yf замість R-134a, проте ці розробки не розглядаються як першочергове завдання. Найменша в порівнянні з R-600a займистість дозволяє знайти застосування R-1234yf у країнах із суворими обмеженнями на використання R-600a (Україна до них не відноситься). Розглядається також можливість використання R-744 (CO₂), проте це потребує суттєвих додаткових витрат. Споживання в секторі побутового холодильного обладнання R-134a, як холодоагент ймовірно буде завершено в недалекому майбутньому, що обумовлено більшою енергоефективністю, і меншою ціною R-600a.

Список інформаційних джерел

1. Монреальський протокол про речовини, що руйнують озоновий шар. Офіційна сторінка. Електронний ресурс. Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_215#Text.
2. Європейське агентство з охорони довкілля. Офіційна сторінка. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://www.eionet.europa.eu/gemet/uk/concept/2997>.

УДК 664.8.037:621.56

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ЗБЕРЕЖЕННЯ СТРУКТУРИ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ ПРИ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНІЙ ОБРОБЦІ

Петренко О.В., кандидат технічних наук, доцентка, ДБТУ, м. Харків

Єрмоленко Є.М., фахівець, м. Харків

Єрмоленко О.В., бакалаврка, ДБТУ, м. Харків, mnix.aleksandra@gmail.com

Низькотемпературна обробка харчових продуктів є одним із найбільш ефективних способів забезпечення їх тривалого зберігання та збереження споживчих властивостей. Разом з тим традиційне заморожування, яке широко застосовується у харчовій промисловості для м'ясної, рибної, плодово-овочевої та кулінарної продукції, супроводжується рядом недоліків. Головним із них є формування великих кристалів льоду, що призводить до руйнування клітинної структури продукту, втрат вологи та погіршення органолептичних характеристик після розморожування [1; 2].

Традиційне повільне заморожування характеризується низькою швидкістю тепловідведення, що призводить до формування великих кристалів льоду та значному ушкодженню клітинних структур продукту. З метою прискорення процесу та покращення якості продукту у харчовій промисловості широко застосовуються методи швидкого заморожування, зокрема шокове та індивідуальне швидке заморожування (IQF). Шокове заморожування передбачає інтенсивний теплообмін за рахунок сильного повітряного потоку при температурах від -18°C до -40°C , що дозволяє суттєво зменшити розмір кристалів льоду та знизити ступінь руйнування тканин. У свою чергу, технологія IQF забезпечує заморожування окремих частинок продукту у зваженому або рухомому стані, що запобігає їх злипанню та сприяє збереженню форми і товарного вигляду продукції [1].

Разом з тим, незважаючи на покращення якості продукції порівняно з повільним заморожуванням, зазначені методи характеризуються значними енерговитратами, обумовленими необхідністю за рахунок підвищення швидкості циркуляції холодоагенту та підтримання стабільних низькотемпературних режимів. Це зумовлює актуальність подальшого розвитку інноваційних технологій, спрямованих не лише на збереження структури продукту, але й на підвищення енергоефективності процесів заморожування.

Більшість сучасних досліджень спрямовані на зменшення негативного впливу процесу заморожування на структуру продуктів та підвищення ефективності технологічних процесів. Одним із перспективних напрямів є застосування технології Acoustic Extra Freezing (AEF). Суть методу полягає у впливі акустичних хвиль на продукт у процесі фазового переходу, що забезпечує формування дрібних рівномірно розподілених кристалів льоду. Це дозволяє мінімізувати ушкодження клітинних мембран, знизити втрати маси до 2% та зберегти текстуру і смакові властивості продукту на високому рівні. Крім того, дана технологія може бути інтегрована у різні типи холодильного обладнання, включаючи тунельні та спіральні установки. Застосування AEF є особливо ефективним для продуктів з високим вмістом вологи, таких як м'ясо, риба та ягоди, де збереження клітинної структури визначає якість продукції

після розморожування. Зменшення розміру кристалів льоду також сприяє скороченню втрат маси при дефростації, що має важливе значення для підприємств харчової промисловості [2; 3].

Не менш перспективним та важливим методом заморожування є ізохоричне заморожування (Isochoric freezing), яке здійснюється у герметично замкненому об'ємі при сталому об'ємі системи. За таких умов процес кристалізації відбувається більш рівномірно, що сприяє зменшенню механічного ушкодження тканин продукту та підвищує енергоефективність процесу заморожування. Додатковою перевагою даного методу є можливість часткового пригнічення мікробіологічних процесів без суттєвого порушення структури продукту, що особливо важливо для зберігання чутливих до заморожування харчових продуктів [4].

Ще одним, додатковим, способом підвищення ефективності процесу є використання попередньої обробки імпульсним електричним полем (Pulsed Electric Field, PEF). Така обробка підвищує проникність клітинних мембран, що забезпечує більш рівномірне формування кристалів льоду та скорочує тривалість заморожування. Застосування PEF також сприяє інтенсифікації тепломасообмінних процесів, що дозволяє знизити енергетичні витрати та підвищити ефективність технологічних ліній. [5].

Таким чином, застосування сучасних технологій, зокрема AEF, ізохоричного заморожування та PEF-обробки, дозволяє значно зменшити негативний вплив низьких температур на структуру харчових продуктів. Це забезпечує збереження їх якості, зниження втрат маси та підвищення ефективності технологічних процесів у харчовій промисловості. Для більш зручного порівняння основних методів заморожування їх сформовано в табл. 1

Таблиця 1
Порівняльна характеристика методів заморожування

Показник	Традиційне	Шокове	IQF	AEF	Isochoric	PEF
Швидкість заморожування	Повільне	Дуже швидке	Швидке	Середнє	Середнє	Прискорює
Розмір кристалів льоду	Великі	Маленькі	Дрібні	Дуже дрібні,	Дрібні	Зменшує утворення великих кристалів
Збереження структури та текстури	Низьке	Середнє	Високе	Дуже високе	Високе	Високе
Втрата вологи	До 20%	5–10%	3–5%	1-2%	23%	1–2%
Застосування	М'ясо, риба, овочі, фрукти	М'ясо, риба, готові страви	Ягоди, овочі, морепродукти	Високовологі продукти, м'ясо, риба	Чутливі до заморожування продукти, готові страви	Підготовка продукту до швидкого заморожування

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Шутюк В.В., Бессараб О.С., Душак О.В., Ємцев В.І. Холодильні технології: навч. посіб. – Київ: НУХТ, 2022. – 172 с.
2. Sun D.-W. Acoustic freezing of foods: principles, technologies and applications. Trends in Food Science & Technology. 2020.
3. Zhang Y., Wang X., Li D., et al. Effects of acoustic extra freezing on quality of frozen foods. Journal of Food Engineering. 2021.
4. Goldstein J., et al. Isochoric freezing in food preservation. Food Research International. 2019.
5. Toepfl S., Heinz V., Knorr D. Pulsed electric fields in food processing and freezing applications. Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2018.

УДК 621.577.012-837

ТЕПЛОВІ НАСОСИ ЯК ІНСТРУМЕНТ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ЕНЕРГЕТИКИ ТА ЗНИЖЕННЯ ВУГЛЕЦЕВОГО СЛІДУ

Заруба Г.Г., аспірант ОНТУ, hlib.zaruba@gmail.com

Хмельнюк М.Г., д.т.н., проф. ОНТУ

Вступ. Теплові насоси (ТН) є однією з ключових технологій переходу до низьковуглецевої енергетики, дозволяючи ефективно використовувати відновлювані та низькопотенційні джерела тепла – повітря, воду та ґрунт – для опалення та гарячого водопостачання. Їхня робота базується на переносі тепла за допомогою меншої кількості електроенергії, що забезпечує високий коефіцієнт перетворення (COP).

Згідно з оглядом Żelazna і Pawłowski (2025), сезонний COP сучасних систем зазвичай становить близько 2,8-3,5 для повітряних ТН, до 4,5 для водяних і до 5,0 для геотермальних установок, що дозволяє виробляти в 3-5 разів більше тепла на кожен спожитий кіловат-годину електроенергії [1]. Це значно знижує споживання первинної енергії та викиди парникових газів у порівнянні з традиційними системами опалення. Додатково, ТН легко інтегруються з відновлюваними джерелами енергії та системами акумулювання тепла, що робить їх важливим інструментом для досягнення стратегії збереження сталого клімату та підвищення надійності енергетичних систем.

Екологічний аспект і вибір холодоагентів. Перехід на екологічні холодоагенти є важливою частиною стратегії зниження впливу холодильних систем та систем кондиціонування на клімат. В останні роки спостерігається активний перехід від традиційних холодоагентів з високим потенціалом глобального потепління (GWP), таких як R410A, до альтернатив з низьким GWP. Згідно з даними Європейського форуму виробників холодоагентів (EFCTC), частка холодоагентів з низьким значенням GWP в обсязі поставок до Європейського Союзу досягла приблизно 55% в 2023 році. Це свідчить про сталий інтерес і готовність галузі до екологічно безпечних рішень [2].

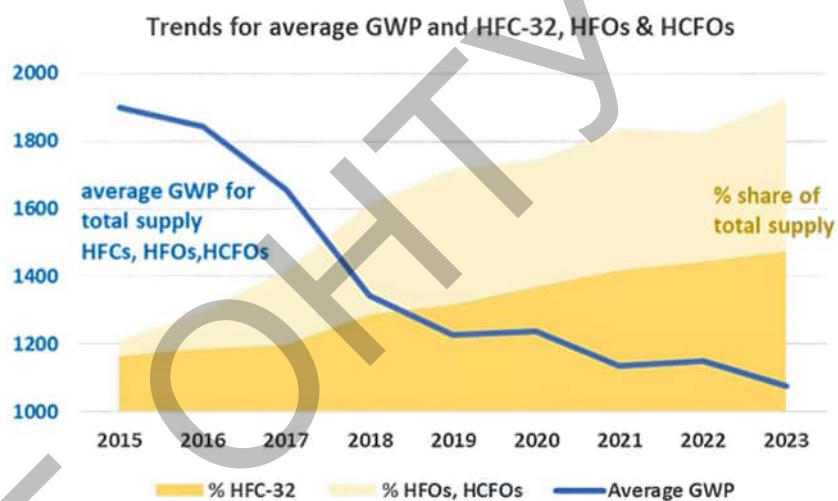


Рисунок 1 – Графік тенденцій середнього значення GWP та розповсюдження HFC-32, HFO та HCFO [2]

Порівняльні дослідження показують, що заміна R410A на альтернативи з низьким GWP, такі як R32, R452B, R454B і R466A, може не тільки знизити кліматичний вплив, але і зберегти або навіть поліпшити енергетичну ефективність систем. Однак ефективність цих замінників залежить від різних факторів, включаючи конструкцію теплообмінників, кліматичну зону та умови експлуатації. Наприклад, у тепліших кліматичних зонах ефективність може бути вищою через вищі робочі температури, тоді як у холодних регіонах можуть знадобитися додаткові заходи для забезпечення надійної роботи системи.

Європейські тенденції. За даними European Heat Pump Association (EHPA), до вересня 2024 року в Європі було встановлено близько 24 млн теплових насосів, що дозволяє щорічно уникати приблизно 5,5 млрд м³ споживання природного газу і скорочувати викиди CO₂ на близько 45 млн тонн, що становить близько 4,9% від загальних викидів будівель ЄС. З огляду на амбітні плани щодо встановлення 60 млн ТН до 2030 року, скорочення викидів вуглекислого газу може скласти 112 млн тонн/рік, а споживання природного газу скоротитися на 13,7 млрд кубічних метрів на рік.

Продажі теплових насосів у 2023 році склали близько 3,02 млн установок за вибіркою 21 країни Європи, що свідчить про стабільний попит на цей вид енергоефективного обладнання в регіоні. Однак уже у першій половині 2024 року спостерігалася різке падіння попиту на 47 % порівняно з аналогічним періодом 2023 року. Таке зниження обумовлене одразу кількома факторами, серед яких зниження цін на газ,

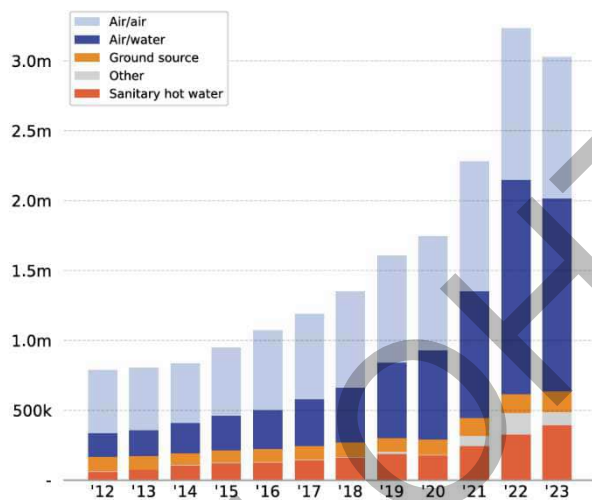


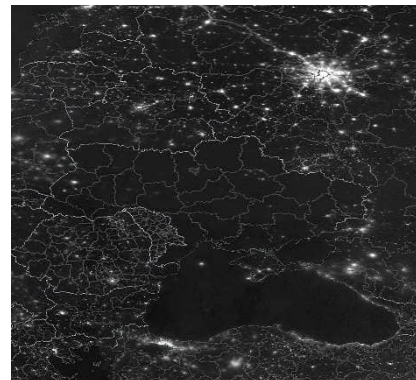
Рисунок 2 - Розвиток продажів за роками та типами теплових насосів (основна функція опалення) [3]

високі ставки кредитів для населення та бізнесу, а також уповільнення реалізації державних програм субсидій. За підсумками повного 2024 року очікується, що зниження продажів складе приблизно 20–25 %, залежно від конкретної країни, що вказує на очевидну потребу в коригуванні існуючих політик стимулювання, а також активізації інформаційних кампаній для підтримки попиту та підвищення обізнаності споживачів [3].

Ситуація в Україні. Згідно з дослідженням Trypolska G. та ін. (2024), станом на 2018 рік в Україні сумарна встановлена потужність теплових насосів становила близько 4,6 МВт, а в 2020 році вони забезпечили близько 52 тис. тонн нафтового еквівалента (тне) теплової енергії (близько 36 тис. тне аеротермальні, близько 10 тис. тне геотермальні, близько 6 тис. тне гідротермальні). Теоретичний тепловий потенціал країни оцінюється як 6 293 тис. тне/рік для ґрунту і 6 307 тис. тне/рік для повітря. Вартість установки системи ТН для будинку 100-300 м² при цьому становить близько €10-15 тис. [4].

Ці дані вказують на високий потенціал розвитку ринку, але також на необхідність заходів щодо стимулювання попиту, зокрема, субсидій, пільгових кредитів, програм навчання монтажників і сервісних інженерів. Водночас енергетична та тепла інфраструктура України серйозно постраждала в ході повномасштабних військових дій: пошкоджено електростанції, ТЕЦ, розподільчі мережі, газопроводи та системи централізованого теплопостачання. Це призвело до частих відключень електроенергії та тепла, перебоїв з газопостачанням, зростання цін на енергоносії та підвищення енергетичної вразливості країни [5].

У таких умовах децентралізовані рішення, такі як теплові насоси, можуть відіграти ключову роль у підвищенні стійкості енергетичної системи: вони знижують залежність від імпорту природного газу, можуть працювати в поєднанні з локальною генерацією (наприклад, сонячними панелями), підвищують енергоефективність будівель і зменшують навантаження на централізовану інфраструктуру. Розвиток



ринку ТН міг би сприяти як відновленню, так і модернізації сектора теплопостачання, роблячи його більш стійким до зовнішніх факторів.

Рисунок 3 - Відсутність світла вночі після масованих ударів проти об'єктів критичної інфраструктури України добре помітна з супутника NASA, 24 листопада 2022 року

Висновки. Теплові насоси вже сьогодні відіграють важливу роль у підвищенні енергоефективності будівель та скороченні викидів парникових газів. Їх висока продуктивність і можливість інтеграції з відновлюваними джерелами енергії роблять їх ключовим інструментом переходу до низьковуглецевої енергетики. Європейська практика підтверджує значний ефект впровадження ТН: скорочення споживання природного газу на мільярди кубометрів і зменшення викидів CO₂ на десятки мільйонів тонн щорічно.

Разом з тим:

- в Європі спостерігається уповільнення продажів теплових насосів у 2024 році, що підкреслює необхідність довгострокової і стабільної політики субсидування і підтримки;
- перехід на екологічні низько-GWP холодоагенти активно розвивається, але вимагає адаптації систем і підготовки фахівців;
- в Україні ринок ТН стикається з труднощами через пошкодження інфраструктури, але технологія має високий потенціал для підвищення стійкості енергосистем і зниження залежності від імпорту газу.

Комплексна робота з розвитку ринку, впровадження технологічних інновацій та адаптації нормативно-правової бази дозволить повною мірою використовувати потенціал теплових насосів для декарбонізації теплового сектора та підвищення стійкості енергетичної системи.

Список інформаційних джерел:

1. Żelazna A., Pawłowski A. Review of the Role of Heat Pumps in Decarbonization of the Building Sector // *Energies*. 2025., вип. 13 Т. 18. С. 3255.
2. Lower GWP F-gases now 55% of the total HFC/HFO/HCFO supply in the EU // *Fluorocarbons*: [Веб-сайт]. Брюссель, 2024. URL: <https://www.fluorocarbons.org/news/lower-gwp-f-gases-now-55-of-the-total-hfc-hfo-hcfo-supply-in-the-eu/> (дата звернення: 14.03.2026).
3. Europe avoiding 5.5 billion cubic metres of gas with heat pumps // *European Heat Pump Association*: [Веб-сайт]. Брюссель, 2024. URL: <https://www.ehpa.org/news-and-resources/press-releases/europe-avoiding-5-5-billion-cubic-metres-of-gas-with-heat-pumps/> (дата звернення: 14.03.2026).
4. Advancing Heat Pump Adoption in Ukraine's Low-Carbon Energy Transition / Trypolska G. та ін. // *Energies*. 2024., вип. 23 Т. 17. С. 6110.
5. Ukraine's energy system under attack // *International Energy Agency*: [Веб-сайт]. Париж, 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/ukraines-energy-security-and-the-coming-winter/ukraines-energy-system-under-attack> (дата звернення: 14.03.2026).

УДК: 621.577:658

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТРАНСФОРМАЦІЇ ТЕПЛОТИ В ТЕПЛОНАСОСНОМУ ЦИКЛІ

Босий М.В., старший викладач ЦНТУ м. Кропивницький, bosiy_mv@ukr.net,
Хомяк Н.І., Шуть А.О., Скрипниченко Д.О., Буркутенко А.С., Белецький І.О.,
здобувачі ЦНТУ м. Кропивницький

Наразі застосування теплових насосів (ТН) для постачання тепла є актуальним питанням, завдяки перевагам перед традиційними технологіями постачання теплоти, що дуже широко обговорюється як на міжнародних конференціях, так і висвітлюється в періодичних наукових виданнях [1-5].

ТН – перспективний напрямок розвитку новітнього постачання тепла, що знаходиться в центрі уваги європейських країн, як Швейцарії, Німеччині, Франції, Австрії, Норвегії, Швеції, Фінляндії, а також і в Україні.

Екологічно ефективним видом постачання тепла є використання енергії землі, яка знаходиться у ґрунті і воді. ТН типу ТН «Г-В» та ТН «В-В» працюють з високими показниками ефективності. В опалювальний період ТН заощаджують більше енергоресурсів, ніж традиційні системи постачання тепла [1-5]. Уряд України натеper стимулює розвиток альтернативної енергетики, зокрема теплових насосів [2].

Для дослідження енергоефективності ТН в системах постачання тепла при застосуванні, наприклад, енергії ґрунту або води, використовували термодинамічний ексергетичний метод дослідження з визначенням коефіцієнта перетворення теплоти ТН (COP) і ексергетичного ККД ТН [1-5].

На рис. 1 наведено принципову схему циклу ТН для системи постачання тепла.

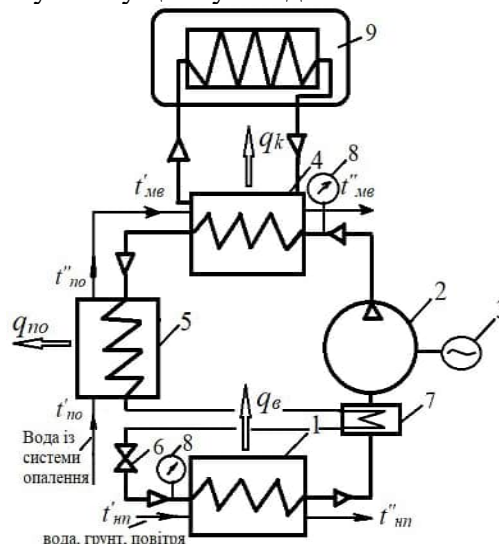


Рис. 1. Принципова схема ТН для системи постачання тепла

1 – випарник; 2 – компресор; 3 – електродвигун; 4 – конденсатор; 5 – охолоджувач; 6 – дросель;
7 – перегрівач; 8 – манометри; 9 – система постачання тепла

Термодинамічний аналіз проведено для ТН «В-В», «Г-В» і «П-В», робочий агент пропан, а джерелом енергії є вода, повітря, ґрунт. Для теплоносія енергії води, ґрунту, повітря

приймаємо на вході у випарник $T'_{\text{нт}} = 283 \text{ K}$, на виході з випарника $T''_{\text{нт}} = 279 \text{ K}$, $T'''_{\text{нт}} = 278 \text{ K}$, $T''_{\text{нт}} = 277 \text{ K}$, а для теплоносія системи опалення $T'_{\text{мв}} = 338 \text{ K}$, $T''_{\text{мв}} = 335 \text{ K}$, $T'''_{\text{мв}} = 333 \text{ K}$. Приймаємо кінцеві різниці температур на виході з теплообмінних апаратів: у випарнику $\Delta T_{\text{в}} = T'_{\text{нт}} - T_{\text{в}} = 3 \text{ K}$; а в конденсаторі $\Delta T_{\text{к}} = T_{\text{к}} - T'_{\text{мв}} = 5 \text{ K}$ [1-5].

На $p-h$ діаграмі (рис. 2) наведені теплові навантаження в ТН «В-В», «Г-В», «П-В» у вигляді відрізків ліній, які відображають основні термодинамічні процеси. Енергетичну ефективність ТН «В-В», ТН «Г-В», ТН «П-В» оцінено за допомогою $p-h$ діаграми.

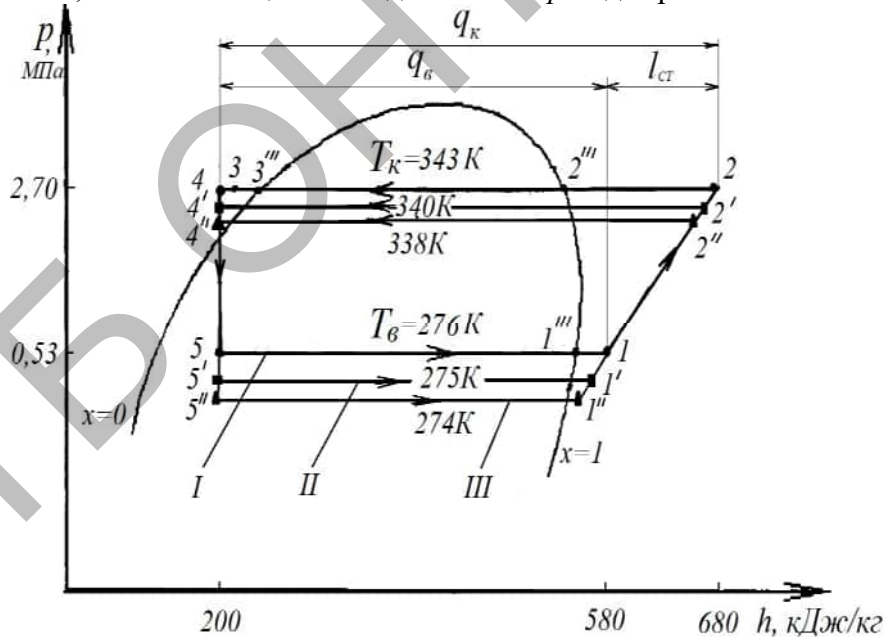


Рис. 2. Цикл I- ТН «В-В», II- ТН «Г-В», III- ТН «П-В» в $p-h$ -діаграмі

5-1''' – процес випаровування пропану; 1'''-1 – процес перегріву парів пропану; 1-2 – процес стискування пари пропану у компресорі; 2-3 – процес конденсації пропану в конденсаторі та віддача теплоти споживачу; 3-4 – процес охолодження конденсату пропану; 4-5 – процес дроселювання та зниження тиску і температури пропану при переході з пароподібного стану в рідкий

Можна відмітити, що при низькій температурі коефіцієнт трансформації ТН «П-В» є низьким, а тому застосування повітряного ТН в холодний період року є неефективним. ТН «П-В» треба застосовувати в системах постачання тепла невеликої потужності.

ТН «Г-В» трансформує тепло з ґрунту за допомогою ґрунтового колектора, яке залежить від теплофізичних властивостей ґрунту і умов клімату місцевості. Коефіцієнт трансформації ТН «Г-В» залежить від акумулюючих властивостей і теплопровідності ґрунту. Коефіцієнт трансформації теплоти в ґрунтовому ТН вищий, ніж у повітряного ТН.

ТН «В-В», який працює в системі постачання тепла з ґрунтовими водами має вищий коефіцієнт ефективності завдяки високій температурі джерела енергії, яка становить 8-12 °C протягом року.

Отже з'ясовано, що енергетична ефективність ТН «В-В», при оцінці коефіцієнтом перетворення COP ТН, становить 3,72 для ґрунтового ТН COP 3,53, а для повітряного ТН COP 3,37.

Оцінено ексергетичний ККД ТН в залежності від середньотермодинамічних температур випаровування $T_{\text{сп}}^{\text{в}}$, конденсації $T_{\text{сп}}^{\text{к}}$ і охолодження $T_{\text{сп}}^{\text{по}}$ пропану методом

ексергетичного аналізу і показано, що досконалість перетворення енергії в ТН «В-В» становить 44 %, для ґрунтового ТН ККД 40 %, а для повітряного ТН ККД 36 %.

Проведено порівняльний термодинамічний аналіз ТН «В-В» з ТН «Г-В» і ТН «П-В» та встановлено, що показники енергетичної і термодинамічної ефективності ТН «В-В» переважають над ТН «Г-В» і ТН «П-В». Водяний ТН буде мати вищу ступінь термодинамічної досконалості. Отже доцільно використовувати в системах постачання тепла водяний ТН.

Інформаційні джерела:

1. Безродний М.К., Пуховий І.І., Кутра Д.С. Теплові насоси та їх використання: навч. посіб. Київ: НТУУ «КПІ», 2013. 312 с.
2. Босий М.В. Термодинамічна енергоефективність трансформації теплоти в теплонасосному циклі «вода-вода». *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2025. № 1. С. 48-60.
3. Босий М.В., Кузик О.В. Теплові насоси для опалення та гарячого водопостачання. Findings of modern engineering research and developments: Scientific monograph. Riga. Latvia: «Baltija Publishing». 2022. Р. 24-40.
4. Босий М.В., Боса О.А., Авраменко Є.В., Герасименко І.О. Оцінка ефективності використання теплового насоса та традиційних систем тепlopостачання. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського*. 2023. Вип.1 (138). С. 11-21.
5. Ткаченко С.Й., Остапенко О.П. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах тепlopостачання: монографія. Вінниця: ВНТУ. 2009. 176 с.

УДК 697.94:621.565

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ІОННОГО ПОТОКУ В ФІЛЬТРАЦІ СИСТЕМ КОНДИЦІЮВАННЯ ПОВІТРЯ

Моїсєєв В.О. аспірант Vladmays2105@gmail.com
Одеський національний технологічний університет, м.Одеса

Використання іонного потоку (іонізації) у кондиціонерах забезпечує ефективне очищення повітря від пилу, бактерій, вірусів та неприємних запахів, насичуючи його аніонами. Ця технологія покращує самопочуття, зменшує токсичність у приміщенні та дозволяє знизити рівень алергенів, що особливо важливо для астматиків та дітей.

Знебарвлення повітря може бути досягнуто за допомогою різних методів, таких як коронний розряд, радіаційна іонізація, електронна іонізація, фотоіонізація та іонізація у високочастотному полі.

Коронний розряд - це процес іонізації газу, який відбувається між двома електродами, які знаходяться під високою напругою.

Радіаційна іонізація - це процес іонізації газу, який відбувається під впливом радіації.

Електронна іонізація - це процес іонізації газу, який відбувається під впливом електронів.

Фотоіонізація - це процес іонізації газу, який відбувається під впливом світла. Іонізація у високочастотному полі - це процес іонізації газу, який відбувається під впливом високочастотного електричного поля.

За допомогою іонних потоків можна зменшити концентрацію забруднюючих речовин у повітрі, зокрема, оксидів азоту. Іонні потоки широко використовуються в різних сферах діяльності, зокрема:

- У промисловості іонні потоки використовуються для очищення повітря в промислових приміщеннях, таких як заводи, фабрики, електростанції та інші промислові об'єкти. Іонні потоки дозволяють ефективно очищати повітря від пилу, сажі, димових газів та інших забруднювачів, що утворюються в процесі виробництва. Наприклад, компанія "Siemens" використовує іонні потоки для очищення повітря на своїх заводах у Німеччині. В результаті використання іонних потоків компанія змогла зменшити концентрацію пилу в повітрі на 95%.
- У громадських приміщеннях іонні потоки використовуються для очищення повітря в громадських приміщеннях, таких як школи, лікарні, театри та інші місця скупчення людей. Іонні потоки дозволяють створювати в цих приміщеннях чисте та здорове повітря. Наприклад, компанія "Philips" використовує іонні потоки для очищення повітря в своїх лікарнях у Нідерландах. В результаті використання іонних потоків компанія змогла зменшити кількість випадків захворювань дихальних шляхів у пацієнтів на 20%.
- У житлових приміщеннях іонні потоки використовуються для очищення повітря в житлових приміщеннях, таких як квартири, будинки та інші житлові будинки. Іонні потоки дозволяють людям дихати чистим повітрям у своїх будинках. Наприклад, компанія "Samsung" використовує іонні потоки для очищення повітря в своїх кондиціонерах. В результаті використання іонних потоків компанія змогла зменшити концентрацію пилу в повітрі в кімнатах на 80%.[2].

Іонний вітер - це явище, коли наявність заряджених часток (іонів) у повітрі викликає рух повітря. Іони взаємодіють з молекулами повітря, передаючи їм свій заряд, тим самим змінюючи заряд поверхні, на яку вони падають. Цей процес створює рух повітря, який може бути використаний для кондиціонування повітря, очищення від пилу та інших частинок, а також для регулювання вологості. [1,2].

Ми дослідили пристрій на основі ефекту Біфельда-Брауна який має багато переваг, але також має кілька недоліків. Одним з них є небезпечна велика напруга, яка може бути шкідливою для людини і призводити до проблем з економією електроенергії. Негативні іони, що утворюються при роботі пристрою, також можуть бути шкідливими для здоров'я, але їх можна утилізувати за допомогою спеціальних фільтрів та каталізаторів. [2].

Використовуємо аналітичний вираз для залежності струму від напруги. Використовуємо вираз для випадку коронного розряду між концентричними циліндрами, радіусами r і R , відповідно, з прикладеною напругою, V , а саме:

$$I = 2\mu V (V - V_c)/R^2 \ln (R/r) \quad (1)$$

V_c - критична напруга, нижче якої струм не протікає. Випадок розряду точок на площину поверхні є більш доречним для більшості робіт, про які тут повідомляється. Райзер дав (рівняння електростатичного поля для випадку розряду точки на площину, він не використав його для виведення рівняння, еквівалентного рівнянню (1) для цього випадку. Електричне поле для випадку точка/площина має вигляд: [2].

$$E(x) = 2V/(r + 2x) \ln(2d/r + 1) \quad (2)$$

Отримані результати показали, що іонні потоки (рис. 1) можуть підвищити ефективність роботи кондиціонерів, що робить їх більш ефективними та економічними для використання в промислових та комерційних застосуваннях

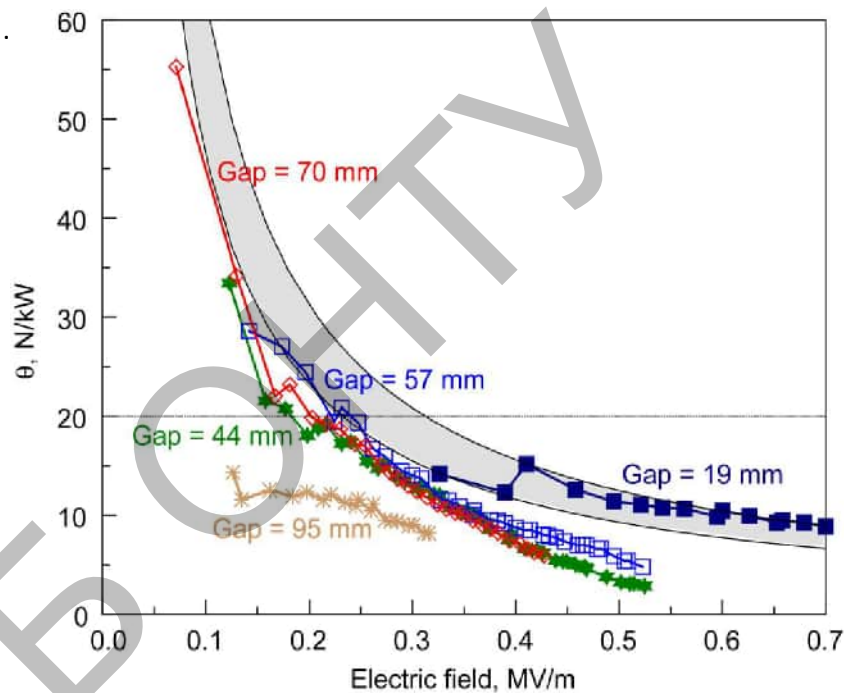


Рис. 1.-Графік залежності Θ від електричного поля для різних зазорів. Матриця емітерних electrode електродів являє собою три електроди з п'ятьма вольфрамовими штифтами в кожному. Заштрихована область - це область, обмежена кривими $\Theta = 1/\mu E$ зі значеннями рухливості для сухого і насиченого повітря.

Наразі пристрої, які генерують іонний вітер, можуть досягати швидкості повітря, як в сучасних моделях кондиціонерів, при цьому маючи просту конструкцію та не маючи рухомих частин, що вже усуває більшість проблем, пов'язаних з цим компонентом кондиціонера. .

Висновки: Результати дослідження процесів обробки процесів повітря та математичного моделювання дозволяють визначити що за допомогою "Іонного вентилятора" можна також добитися змін у формі внутрішнього блоку та значно зменшити його розміри на експериментальній установці .

Література

1. Жихарева, Н. В Інноваційні технології кондиціювання повітря в нестационарних умовах [Електронний ресурс]: монографія / Н. В. Жихарева; Одес. нац. технол. ун-т, Каф. холодильних установок і кондиціювання повітря. — Одеса : ТЕС, 2022. — 264 с.
- 2 Черненко А.В Жихарева Н.В. Використання пристрою для використання іонного потоку в кондиціонуванні повітря. Збірник тез доповідей XIV Всеукраїнської науково-технічної конференції. 21-22 вересня 2023 року «Сучасні проблеми холодильної техніки та технології». Одеса 21-22 вересня 2023 року 84-85 с
- 3 Kogut V. Bushmanov V., Zhykhareva N. The filter on the basis of the ejector of the heat exchanger for purification of harmful substances from flue gases using heat exchanger as combustion gas filter // AIP Conference Proceedings 2285, 030087 (2020); <https://doi.org/10.1063/5.0026819> pp 0030081-030087

Науковий керівник доц.к.тн . Жихарева Н.В.

УДК 621.567:621.564

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕРЕРВНОСТІ ХОЛОДИЛЬНОГО ЛАНЦЮГА ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ АВТОНОМНИХ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИХ ХОЛОДИЛЬНИХ МОДУЛІВ

Манжос М.В., здобувач вищої освіти

Якушенко Є.М., доцент кафедри інтегрованих електротехнологій та енергетичного
машинобудування, ДБТУ, м. Харків, 0660904649@btu.kharkov.ua

Сучасна харчова індустрія стикається з глобальними викликами, пов'язаними із забезпеченням населення високоякісними продуктами харчування, серед яких рибна продукція посідає одне з чільних місць завдяки своєму унікальному хімічному складу, що включає повноцінні білки, незамінні поліненасичені жирні кислоти омега-3, широкий спектр мінеральних речовин та вітамінів А, D та групи В. Проте риба як об'єкт холодильної технології характеризується надзвичайною лабільністю та низькою стійкістю до зберігання в нативних умовах, що зумовлено високим вмістом вологи, який досягає 75–80 %, специфічною структурою м'язової тканини та високою активністю власних ферментних систем. Одразу після вилову в тканинах риби ініціюються складні біохімічні процеси, зокрема автоліз, який супроводжується розпадом високомолекулярних сполук під дією тканинних ферментів, що створює сприятливе середовище для швидкої проліферації мікрофлори. За температур навколишнього середовища +20...+25 °C термін придатності свіжої риби не перевищує однієї доби, що вимагає негайного втручання засобами штучного холоду для сповільнення кінетики небажаних процесів.

Згідно з фундаментальними рекомендаціями Food and Agriculture Organization, критично важливим є зниження температури продукту до криоскопічної точки (близько 0 °C) у найкоротші терміни після вилову, що дозволяє суттєво пролонгувати термін зберігання за рахунок інгібування життєдіяльності психофільних мікроорганізмів та зниження інтенсивності ферментативних реакцій. Подальше поглиблення холодильної обробки шляхом заморожування до температури –18 °C у товщі м'язів забезпечує збереження якості продукції протягом 4–6 місяців, тоді як перехід до ультранизких режимів –30...–40 °C дозволяє досягти термінів зберігання до одного року без суттєвої деструкції нутрієнтів. Ключовим аспектом успішного заморожування є швидкість проходження діапазону температур 0...–5 °C, відомого як зона максимального кристалоутворення, де відбувається перетворення понад 75 % рідкої фази на лід; при повільному відведенні теплоти утворюються великі позаклітинні кристали льоду, які механічно руйнують мембранні структури клітин, що призводить до значних втрат тканинного соку під час дефростації та погіршення органолептичних показників.

Водночас сучасний етап розвитку холодильної техніки характеризується гострою суперечністю між необхідністю суворого дотримання температурних режимів та високою енергоємністю холодильних циклів, оскільки холодильне обладнання на рибопереробних підприємствах може споживати до 70 % сумарної електроенергії. Це актуалізує проблему пошуку нових інженерних рішень, здатних забезпечити високу холодопродуктивність при мінімізації питомих витрат енергії, особливо в умовах територіальної віддаленості місць вилову від стаціонарних промислових потужностей.

У цьому контексті розробка мобільних модульних холодильних комплексів контейнерного типу постає як найбільш перспективний напрям, що дозволяє реалізувати концепцію «холоду на місці», забезпечуючи безперервність холодильного ланцюга безпосередньо від моменту вилову до етапу реалізації.

Метою дослідження є комплексне обґрунтування та проектування енергоефективного модульного холодильного комплексу продуктивністю 1000 кг на добу, інтегрованого у стандартний 20-футовий морський контейнер, що забезпечує необхідну мобільність та автономність. Об'єктом дослідження виступають процеси тепло- та масообміну під час охолодження та заморожування рибної сировини, а предметом — технічні характеристики та енергоефективність запропонованої модульної системи. Реалізація проекту передбачала вирішення низки науково-технічних завдань, зокрема аналіз теплофізичних властивостей риби як об'єкта обробки, порівняння сучасних парокомпресійних систем та розробку функціональної схеми, яка забезпечує повний технологічний цикл в обмеженому об'ємі.

В основу конструкції покладено принципи функціонального зонування: комплекс розділено на три ізольовані відсіки — камеру попереднього охолодження ($0...+2\text{ }^{\circ}\text{C}$), камеру шокової заморозки ($-35\text{ }^{\circ}\text{C}$) та камеру тривалого зберігання ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$), що дозволяє гнучко управляти потоками продукції та підтримувати оптимальні умови для кожного етапу обробки. Вибір холодоагенту R404A був обумовлений його стабільними експлуатаційними характеристиками у низькотемпературному діапазоні та високою об'ємною холодопродуктивністю, що критично важливо для компактних мобільних установок. Математичне моделювання теплових навантажень дозволило встановити, що сумарна необхідна потужність охолодження становить близько 8 кВт, враховуючи теплопритоки через огорожувальні конструкції з підвищеним термічним опором, витрати на охолодження та фазовий перехід води в продукті, а також внутрішні тепловиділення від вентиляторів випарників та персоналу.

Для забезпечення надійної роботи системи було обрано високотехнологічне обладнання провідних світових виробників: напівгерметичні компресори Bitzer з електронним управлінням, високоефективні повітроохолоджувачі Güntner з оптимізованим кроком ламелей для запобігання швидкому снігоутворенню, конденсатори повітряного охолодження LU-VE та інтелектуальну запірно-регулюючу арматуру Danfoss. Особлива увага в роботі приділена стратегіям підвищення енергетичної ефективності, оскільки автономна робота модуля вимагає раціонального використання ресурсів. Було запропоновано та розраховано ефект від використання інверторного привода компресора, що дозволяє точно адаптувати холодопродуктивність до миттєвого теплового навантаження, уникаючи циклічних втрат при пусках. Інноваційним кроком стало впровадження у конструкцію ізоляції фазозмінних матеріалів (PCM — Phase Change Materials), які здатні акумулювати холод під час роботи компресора за пільговим нічним тарифом або при надлишку сонячної енергії та віддавати його під час пікових навантажень, стабілізуючи температуру в камері. Також передбачено інтеграцію сонячних фотоелектричних панелей на даху контейнера, що дозволяє частково компенсувати енергоспоживання допоміжних систем (автоматики, освітлення, вентиляції) та підвищити загальну екологічність проекту. Розрахунки показали, що сукупне впровадження цих заходів забезпечує зниження споживання електроенергії на 40 % порівняно з базовими аналогами. Економічний аналіз проекту підтвердив високу привабливість розробки: при капітальних інвестиціях на рівні 326 тис. грн очікуваний річний прибуток складає близько 1,7 млн грн, що зумовлено високою доданою вартістю замороженої риби порівняно зі свіжою та мінімізацією втрат продукції. Термін окупності системи становить лише 2–3 місяці експлуатації в активний сезон вилову, що робить цей комплекс ідеальним рішенням для малих та середніх фермерських господарств, а також прибережних громад, де відсутній доступ до великих холодокомбінатів. Окрім прямого економічного ефекту, впровадження таких модульних рішень має вагоме соціальне значення, сприяючи створенню нових робочих місць та зміцненню продовольчої безпеки регіонів.

Запропонована конструкція мобільного комплексу на базі стандартного 20-футового контейнера вирішує логістичні проблеми, оскільки модуль може легко транспортуватися автомобільним або водним транспортом без розбирання обладнання. Технічні рішення ґрунтуються на

принципах термодинамічної доцільності та сучасних стандартах екологічної безпеки, що підтверджується детальними розрахунками циклу та підбором компонентів.

Таким чином, розроблений енергоефективний модульний холодильний комплекс є цілісним інженерним продуктом, готовим до практичної реалізації, який поєднує в собі інновації у сфері матеріалознавства (теплоізоляція), енергетики (сонячні панелі та PCM) та холодильної інженерії (інверторне регулювання та багатозонна обробка). Підсумовуючи, слід зазначити, що використання таких систем дозволяє не лише зберегти біологічну цінність рибної сировини, але й радикально змінити структуру рибного ринку, роблячи його більш гнучким та стійким до зовнішніх факторів, забезпечуючи високу якість продукції для кінцевого споживача за рахунок мінімізації часу між виловом та початком термічної обробки. Подальші дослідження в цьому напрямі можуть бути зосереджені на адаптації системи до роботи з природними холодоагентами, такими як вуглекислий газ, що дозволить ще більше знизити екологічний відбиток та підвищити ефективність у режимах шокового заморожування. Практична значимість роботи підсилюється можливістю масштабування запропонованої концепції для інших видів швидкопсувної сировини, що робить її універсальним інструментом у сучасній холодильній логістиці та переробній промисловості, спрямованим на сталий розвиток агропромислового сектору.

Список інформаційних джерел

1. Бабіч, М. О. Холодильна технологія риби та рибних продуктів : підручник / М. О. Бабіч. – К. : Аграрна освіта, 2010. – 320 с.
2. Postolski, J. Zamrażanie żywności / J. Postolski, Z. Gruda. – Warszawa : Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2001. – 420 p.
3. An effective way to preserve aquatic products: slurry ice and its properties / Peibo Zheng, Jing Xie, Weiqing Lan // Food Research International. – 2026. – Vol. 229. – 118516. – <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2026.118516>.
4. Elmaaty, T. M. A. et al. Corrugated plate heat exchanger review / T. M. Abou Elmaaty, A. E. Kabeel, M. Mahgoub // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 70. – P. 825–860. – <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.266>.
5. Aubourg, S. P. et al. Improvement of the commercial quality of chilled Norway lobster (*Nephrops norvegicus*) stored in slurry ice: Effects of a preliminary treatment with an antimelanotic agent on enzymatic browning // Food Chemistry. – 2007. – Vol. 103, Issue 3. – P. 741–748. – <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.09.022>.

УДК 621.567:621.564

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ VRF-СИСТЕМ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ: РЕГУЛЯТОРНІ, РИНКОВІ Й ТЕХНІЧНІ ВИКЛИКИ

Геніх К.В., магістрант; ОНТУ м. Одеса

VRF-системи кондиціювання повітря (Variable Refrigerant Flow) на сьогодні є одним із найбільш енергоефективних рішень для забезпечення мікроклімату у комерційних, адміністративних та житлових будівлях. Їх застосування дозволяє здійснювати індивідуальне регулювання подачі холодоагенту до окремих внутрішніх блоків, що забезпечує підвищення енергоефективності та гнучкості керування системою.

Разом з тим, подальший розвиток та впровадження VRF-технологій супроводжується рядом регуляторних, економічних та технічних проблем, які потребують комплексного аналізу.

Однією з ключових тенденцій у галузі є поступове обмеження використання холодоагентів із високим потенціалом глобального потепління (Global Warming Potential, GWP). Зокрема, холодоагент R-410A, який широко застосовувався у VRF-системах, має показник $GWP \approx 2088$, що призвело до впровадження міжнародних обмежень щодо його використання. Відповідно до регуляторних вимог у США та країнах Європейського Союзу, з 2025 року розпочато поступову відмову від виробництва нових систем на базі цього холодоагенту.

У зв'язку з цим відбувається перехід на альтернативні холодоагенти класу A2L (зокрема R-32, R-454B та HFO-суміші), які характеризуються нижчим значенням GWP. Проте застосування таких холодоагентів потребує конструктивної модернізації обладнання, зокрема компресорів, теплообмінників та систем безпеки. Додатково це спричиняє підвищення вартості обладнання та ускладнення логістичних ланцюгів постачання.

Важливим фактором, що впливає на розвиток VRF-технологій, є відмінності у регуляторній політиці різних регіонів. Наприклад, у країнах Європейського Союзу відповідно до регламенту F-Gas передбачено поступове зниження допустимого рівня GWP для холодильного обладнання. Для систем потужністю до 50 кВт з 2027 року встановлюється обмеження $GWP < 150$. Водночас у США регуляторні вимоги формуються за іншою моделлю, що створює додаткові труднощі для виробників та проєктувальників обладнання.

Такі регуляторні відмінності можуть призводити до затримок реалізації інженерних проєктів, збільшення витрат на сертифікацію та необхідності адаптації обладнання до різних нормативних вимог.

Окрему групу проблем становлять технічні аспекти експлуатації VRF-систем. Незважаючи на високу енергоефективність, подібні системи є складними інженерними комплексами, що включають розгалужену мережу трубопроводів, електронні розширювальні клапани, інверторні компресори та систему автоматичного керування.

Однією з найбільш поширених проблем є витіки холодоагенту, які можуть виникати внаслідок корозії трубопроводів, порушень технології монтажу або механічних пошкоджень. Подібні витіки призводять до зниження холодопродуктивності системи та погіршення її енергоефективності. Крім того, значну частку відмов обладнання становлять несправності компресорів, які можуть бути спричинені перегрівом або потраплянням рідкого холодоагенту до компресійної камери.

Ще одним важливим фактором є складність монтажу та обслуговування VRF-систем. Якісне встановлення обладнання потребує високої кваліфікації технічного персоналу, зокрема у питаннях вакуумування системи, пайки трубопроводів та налаштування систем керування. За статистикою, значна частина відмов систем кондиціонування пов'язана саме з помилками під час монтажу.

Окрім технічних аспектів, важливу роль відіграють і економічні фактори. Вартість встановлення VRF-систем, як правило, на 30–70% перевищує витрати на традиційні системи кондиціонування повітря. Це пояснюється складністю обладнання, значною кількістю електронних компонентів та необхідністю використання спеціалізованих систем керування. У зв'язку з цим термін окупності подібних систем може становити 5–8 років залежно від умов експлуатації.

Разом з тим, незважаючи на зазначені труднощі, VRF-системи мають значний потенціал розвитку. За прогнозами аналітичних досліджень, світовий ринок VRF-технологій демонструватиме стабільне зростання протягом наступного десятиліття, що обумовлено підвищенням вимог до енергоефективності будівель та необхідністю скорочення викидів парникових газів.

Таким чином, VRF-системи залишаються перспективним напрямком розвитку сучасних систем кондиціонування повітря. Подальше поширення цієї технології потребує удосконалення нормативної

бази, розвитку нових типів холодоагентів з низьким GWP, а також підготовки кваліфікованих спеціалістів у сфері проектування та експлуатації інженерних систем будівель.

Список літератури

1. ASHRAE Handbook. HVAC Systems and Equipment. Atlanta : ASHRAE, 2020. 1040 p.
2. The Future of Cooling. Opportunities for Energy-Efficient Air Conditioning / International Energy Agency. Paris : IEA, 2018. 92 p.
3. Regulation (EU) No 517/2014 of the European Parliament and of the Council of 16 April 2014 on fluorinated greenhouse gases.
4. U.S. Environmental Protection Agency. Significant New Alternatives Policy (SNAP) Program. Washington : EPA, 2023.
5. Refrigeration and Air Conditioning Technology Roadmap / International Institute of Refrigeration. Paris : IIR, 2019.
6. Energy Efficiency 2023 / International Energy Agency. Paris : IEA, 2023.

Науковий керівник доц. Козут В.О

УДК: 621.56:621.67

ВІДТАЙКА ВИПАРНИКІВ ГАРЯЧИМ ГАЗОМ У КОМЕРЦІЙНИХ ХОЛОДИЛЬНИХ СИСТЕМАХ

Смілик М.М., PhD аспірант; e-mail: smilykmm@gmail.com; Харків, ДБТУ

Потапов В.О., д.т.н., проф., Харків, ДБТУ

Кучма М.С., здобувач освіти, ВСП «Харківський фаховий коледж харчової промисловості ДБТУ»

У сучасній холодильній техніці застосовується низка методів відтайки, серед яких особливе місце займає відтайка гарячим газом. Даний спосіб дозволяє підвищити енергетичну ефективність системи та зменшити експлуатаційні витрати, що зумовлює його широке застосування в комерційних холодильних установках.

У процесі експлуатації холодильного обладнання утворення інею на теплообмінних поверхнях повітроохолоджувачів є однією з основних причин зниження холодопродуктивності. Проведений аналіз основних методів усунення інею показав доцільність використання відтайки гарячим газом як одного з найбільш енергоефективних та технологічно обґрунтованих рішень для комерційних і напівпромислових холодильних систем. Розглянуто принцип дії методу, основні стадії процесу, конструктивні особливості системи та технічні вимоги до її реалізації. На основі цього встановлено, що даний метод має суттєві переваги порівняно з альтернативними способами.

Серед основних методів відтайки виділяють природне, електричне, гліколеве та відтайку гарячим газом. Кожен із зазначених способів має свої переваги та недоліки.

Природне відтаювання може застосовуватись за умови, що температура повітря в камері не нижча за $+4^{\circ}\text{C}$. Проте цей метод характеризується значною тривалістю процесу та потребує ретельного контролю часу відтайки і інтервалів між циклами.

Електричне відтаювання є простим у реалізації та забезпечує швидке видалення інею, однак супроводжується підвищеним енергоспоживанням. Крім того, при зміні умов експлуатації (наприклад, зміні типу продукції) виникає необхідність коригування режимів відтайки для оптимізації енерговитрат.

Гліколева відтайка передбачає використання додаткового обладнання, зокрема бака акумулювання теплового гліколю, який нагрівається за рахунок утилізації тепла конденсації. Незважаючи на зниження електроспоживання, дана система є більш складною та менш поширеною.

Відтайка гарячим газом є одним із найбільш ефективних методів, оскільки використовує теплову енергію, що генерується безпосередньо в холодильному циклі, без залучення зовнішніх джерел нагріву. Вона широко застосовується в системах кондиціонування повітря, а останнім часом активно впроваджується і в комерційних холодильних установках. Існують різні варіанти реалізації цього методу, зокрема із застосуванням чотириходового клапана або за допомогою електромагнітних і зворотних клапанів на лінії нагнітання.

Разом з тим, дана система має певні недоліки, серед яких необхідність встановлення віддільника рідини на всмоктувальній лінії перед компресором, а також використання додаткових елементів автоматики, що призводить до збільшення початкових капітальних витрат.

Для аналізу роботи методу відтайки гарячим газом розглянуто холодильну систему з двома випарниками Рис.1. До складу системи входять такі основні елементи: компресор, конденсатор, ресивер рідкого холодоагенту, фільтр-осушувач, електромагнітні клапани, терморегулювальні вентиля (ТРВ), випарники та система автоматичного керування і захисту. Основний елементи даної системи це наявність віддільника рідини, об'ємом не менш ніж повна заправка холодоагентом системи.

Принцип дії методу полягає у спрямуванні гарячого газоподібного холодоагенту з нагнітальної лінії компресора безпосередньо у випарник, минаючи конденсатор. При цьому електромагнітний клапан перекидає подачу рідкого холодоагенту до випарника.

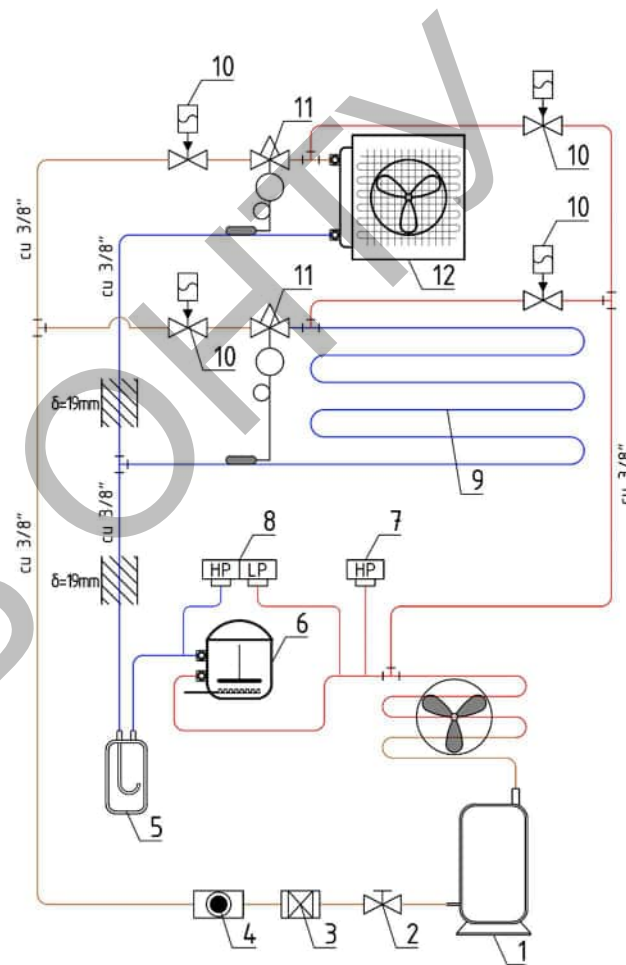


Рис.1. Відтайка гарячим газом з двома випарниками.

- 1 – Ресивер, 2 - Кульовий вентиль, 3 - Фільтр-осушувач, 4 - Оглядове скло, 5 - Віддільник рідини, 6 -Компресор, 7 - Реле тиску КР5, 8 - Реле тиску аварійне КР15, 9 – Теплообмінник, 10- Соленоїдний клапан, 11 -Терморегулюючий вентиль, 12 – Повітроохолоджувач

Під час проходження через теплообмінник гарячий газ віддає тепло, охолоджується та конденсується, що забезпечує плавлення інею на поверхні випарника. Утворений холодоагент повертається у систему через всмоктувальну лінію, при цьому перед компресором обов'язково встановлюється віддільник рідини для запобігання потраплянню рідкої фази в компресор.

Застосування даної схеми дозволяє забезпечити рівномірний прогрів теплообмінної поверхні, скоротити тривалість відтайки та зменшити теплові втрати. У системах із декількома випарниками та інверторним керуванням компресора можливе проведення відтайки без зупинки компресора, що додатково підвищує енергоефективність.

Отже, відтайка гарячим газом є перспективним напрямом розвитку холодильних систем. У порівнянні з електричною відтайкою вона забезпечує вищу енергоефективність та менші експлуатаційні витрати, особливо для середньотемпературних систем (до -5°C).

Разом із тим, ефективність застосування даного методу залежить від конструктивних особливостей системи, зокрема довжини трубопроводів і розташування холодильного агрегату відносно випарників. З урахуванням зазначених факторів, відтайка гарячим газом має значний потенціал для подальшого впровадження у сучасних комерційних холодильних установках.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ASHRAE Handbook—Refrigeration. – Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2018.
2. Industrial Refrigeration Handbook / Wilbert F. Stoecker. – New York: McGraw-Hill, 1998.
3. Refrigeration and Air Conditioning Technology / Bill Whitman, Bill Johnson, John Tomczyk, Eugene Silberstein. – 8th ed. – Cengage Learning, 2016.
4. International Institute of Refrigeration. *Refrigeration Technologies and Applications*. – Paris, 2017.
5. Emerson Climate Technologies. *Application Engineering Bulletin: Hot Gas Defrost*. – 2020.

УДК: 641.528.6

COMPARISON OF CHARGING TIME OF EUTECTIC THERMAL ENERGY ACCUMULATORS IN THE AVERAGE TEMPERATURE RANGE

Serhii Kolesnik, student, SBTU, Kharkiv
Volodymyr Potapov, professor, SBTU, Kharkiv
0661392227@btu.kharkov.ua

Introduction.

Cooling systems ensure the continuous maintenance of the cold chain from the producer to the consumer. A key issue for the safe storage of food products is maintaining the required technological temperature regime. At the same time, under the conditions of unstable power supply currently occurring in Ukraine, it is difficult to maintain these conditions, which causes significant losses for food production, trade, and refrigerated warehouses.

One promising direction for solving this problem is the use of thermal energy storage units (eutectic cold storage units - ECS) with phase change materials (PCM). Charging the ECS at night at reduced tariffs allows the use of accumulated heat during the day, reduces temperature fluctuations, and decreases the frequency of compressor activation. Furthermore, in emergency situations during power outages, the stored energy can be used to maintain the specified temperature regime without losing the quality of chilled food products.

Methodology and Materials.

In engineering calculations and the practice of storing products in medium-temperature cold rooms (ranging from 0°C to +10°C), there is a permissible range of fluctuations that must be maintained to ensure food quality and safety: $\pm 2^{\circ}\text{C}$ from the set nominal temperature, while $\pm 1^{\circ}\text{C}$ is recommended for high-quality storage.

In this temperature range, salt hydrates are the most common choice for PCM. Their advantages include: higher specific heat of phase transition compared to many organic eutectic materials (e.g., paraffins), higher thermal conductivity, providing a faster charging process for the cold storage unit, non-flammability, non-toxicity, and low cost.

However, they have several disadvantages: subcooling below the phase transition temperature, phase segregation during melting, corrosivity toward the metallic materials of ECS containers, and volume changes

during phase transition, which requires a reserve of free volume in the container. Therefore, in practice, it is necessary to add nucleators to initiate crystallization and thickeners to prevent phase segregation.

Commercial PCMs based on salt hydrates are almost always multicomponent mixtures containing a base salt, a nucleator, and a thickener.

Nucleators: For example, strontium hydroxide $\text{Sr}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, or similar compounds are often used for $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

Thickeners: Polymer additives such as carboxymethyl cellulose, polyacrylamides, or xanthan gum are utilized.

The goal of this study is to justify a medium-temperature eutectic cold storage unit based on salt hydrates. Data on such substances are presented in Table 1.

Table 1.

№	Phase Transition Temperature	PCM (Substances or Mixtures)
1	+2 °C	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (with modifier salts)
2	+3 °C	$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (with modifiers)
3	+4 °C	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (with modifiers)
4	+5 °C	Eutectic based on $\text{KCl}/\text{H}_2\text{O}$
5	+6 °C	Eutectic based on $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (with modifiers)

Results and Discussion

The specified PCM operating range of +2 ... +6°C was chosen based on the recommended temperature fluctuation relative to the nominal value of +4±2°C. The comparison methodology was as follows: it was assumed that the external power supply was disconnected when the chamber temperature was +2°C. Subsequently, due to external heat gain, the temperature in the cold room rose to the maximum allowable +6°C. During this process, the cold accumulator heated from +2°C to +6°C, and the PCM completely transitioned from a solid to a liquid state.

The duration of the ECS discharge process was calculated using heat balance equations for single-phase and two-phase states of the PCM in a two-layer flat wall of the cold room, consisting of a standard 100 mm thermal insulation layer and a 100 mm PCM layer. Thermophysical properties of the PCMs were taken from public sources [1,2].

According to the calculations (fig 1). The longest autonomous operation time is provided by the PCM based on $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ - (19.5 hours) and $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (18 hours). The shortest discharge time was observed for $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (14 hours).

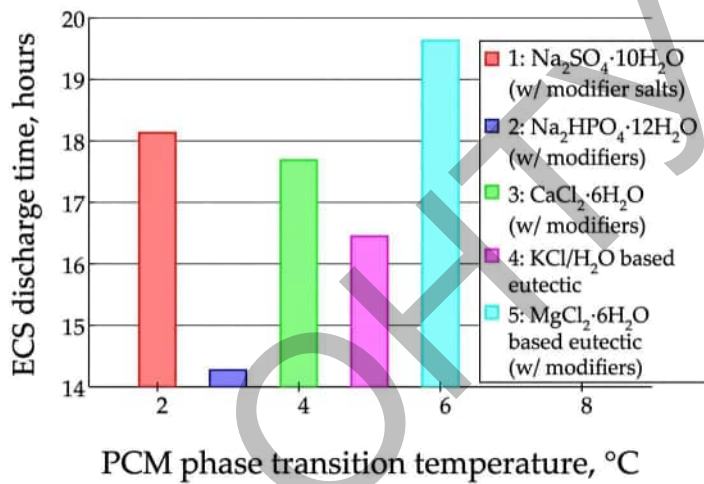


Fig 1. Duration of cold storage unit discharge from +2°C to +6°C for the investigated PCMs.

References

1. Salt Hydrate Based Positive Temperature PCMs - PCM Products Ltd, https://www.pcmproducts.net/Salt_Hydrate_PCms.htm
2. PlusICE® Range - PCM Products Ltd, <https://www.pcmproducts.net/files/PlusICE%20Range%202021-1.pdf>

ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІ КОНТАКТНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ В СИСТЕМАХ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ

Овчінніков М.К. асп ОНТУ. Меріков М.М., ЗВО бакалавр ОНТУ

Наукові керівники: Жихарєва Н. В., к.т.н. доц., ОНТУ Когут В.О. к.т.н. доц.,
Одеський національний технологічний університет, Одеса

Теплообмінники ежекторного типу є ефективними та економічними пристроями для теплообміну, що знаходять широке застосування у промислових та комерційних сферах. Однак, їх класифікація може бути складною через різні конструкційні та функціональні особливості. Основні типи теплообмінників ежекторного типу можна класифікувати за допомогою декількох критеріїв, включаючи: спосіб отримання потоку, конструкцію та принцип дії.

В системах кондиціювання повітря застосовані сучасні технології обробки: нагрів, охолодження, осушення, зволоження та очищення повітря. Розглянута робота блочного центрального кондиціонера в екстремальних умовах з застосуванням ежекторного теплообміну. Для розв'язання цього питання були запропоновані блоки з ежекторними

зволожувачами та нагрівачами повітря, які запотеновані данні практичні удосконалення системи кондиціювання повітря.

Приведені науково-обґрунтовані дослідження для проєктування системи кондиціювання повітря на підставі теоретичних та дослідницьких значень, які підтверджують адекватність математичної моделі реальним фізичним об'єктам. Центральний кондиціонер модульного типу здатний працювати в режимах близьким до критичних. Для вирішення цього питання були запропоновані спеціальні модулі, в яких застосовані контактні теплообмінники ежекторного типу. Застосування контактних теплообмінників дозволяє в зимовий час додатково підігрівати повітря в кондиціонері. У літній час при великих навантаженнях використати додатково охолоджене повітря, а у випадках збільшення теплового навантаження водяну шугу. Для таких випадків були розроблені способи і пристрої описані нижче.

За способом отримання потоку, теплообмінники ежекторного типу можна класифікувати як промивні або струменеві. Промивні теплообмінники ежекторного типу мають спеціальні насадки, що створюють турбулентні потоки для підвищення ефективності теплообміну. Струменеві теплообмінники ежекторного типу використовують газовий потік для створення турбулентності. [1]. Конструкція теплообмінників ежекторного типу може бути вертикальною або горизонтальною. Вертикальні теплообмінники ежекторного типу використовуються для теплообміну між двома рідинами, що мають різну щільність. Горизонтальні теплообмінники ежекторного типу використовуються для теплообміну між рідинами, що мають приблизно однакову щільність.

За принципом дії, теплообмінники ежекторного типу можна класифікувати як одноступеневі або багатоступеневі. Одноступеневі теплообмінники ежекторного типу мають один ежектор та один конденсатор, які знаходяться в одній зоні теплообміну. Багатоступеневі теплообмінники мають два або більше ежекторів та/або конденсаторів, які знаходяться у різних зонах теплообміну.



Рис.1. Теплообмінник ежекторного типу

Ще одним критерієм класифікації є напрямок потоків теплоносіїв. Теплообмінники ежекторного типу можуть бути поперечними або поздовжніми. У поперечних теплообмінниках теплоносії рухаються перпендикулярно один до одного, а в поздовжніх - паралельно.

Також існують спеціалізовані типи теплообмінників ежекторного типу, які впроваджені в окремих галузях промисловості. Наприклад, теплообмінники ежекторного типу з водяним паром. Використовуються для обігріву та зволоження повітря в приміщеннях, а також у зварювальних роботах для зниження температури навколишнього середовища та збільшення продуктивності робітника. [1].

Для екстремальних умов використання інноваційних технологій з використанням теплообмінників ежекційного типу дозволяє працювати блочному типу центрального кондиціонера в штатному режимі при цьому збільшується енергоефективність використання інноваційних технологій - контактних теплообмінних апаратів для очищення, нагріву, охолодження та підтримки відносної вологості

Література

1. Жихарева, Н. В Інноваційні технології кондиціонування повітря в нестаціонарних умовах [Електронний ресурс] : монографія / Н. В. Жихарева ; Одес. нац. технол. ун-т, Каф. холодильних установок і кондиціонування повітря. — Одеса : ТЕС, 2022. — 264 с.
- 2 Kogut V. Bushmanov V., Zhykhareva N. The filter on the basis of the ejector of the heat exchanger for purification of harmful substances from flue gases using heat exchanger as combustion gas filter // AIP Conference Proceedings 2285, 030087 (2020); <https://doi.org/10.1063/5.0026819> pp 0030081-030087
3. . Kogut V.. Bushmanov M ,Zhykharieva N Ejector-Based Heat Exchanger Filter for Flue Gas Pollutant Removal New Horizons of Sci-ence Technology and Culture Vol. 1, 16 May 2025 , Page 1-9

УДК.621.577

ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ У РІЗНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ

Погожий Л.А., студент

Лужанська Г.В., доц., к.т.н.

Національний університет «Одеська політехніка»

У всьому світі розробляються шляхи зниження використання паливно-енергетичних ресурсів у зв'язку з їх обмеженістю. Впровадження енергозберігаючих технологій є першочерговим завданням сучасності. Згідно з енергетичною стратегією України, рекомендується впроваджувати у всі сфери енергозберігаюче обладнання [1, 2].

Теплові насоси - енергоефективне рішення для систем енергозбереження, оскільки використовують поновлювані джерела енергії (повітря, воду, ґрунт) для опалення та охолодження будівель. У зимовий період тепловий насос забирає тепло з навколишнього середовища та передає його всередину будівлі, а влітку навпаки, видаляє надлишкове тепло, охолоджуючи приміщення.

Тепловий насос – це зворотний холодильний цикл. Система витягує тепло із зовнішнього повітря і переносить його в приміщення за допомогою холодоагенту.

Основний принцип роботи заснований на циклі перенесення тепла з використанням холодоагенту:

- холодоагент циркулює між зовнішнім та внутрішнім блоками.
- на зовнішньому блоці він поглинає тепло з повітря, випаровуючись.
- потім компресор стискає газоподібний холодоагент, збільшуючи його температуру.
- цей гарячий газ надходить у внутрішній блок, де віддає тепло повітря приміщення, конденсуючись назад у рідину.
- Після цього цикл повторюється.

У системах опалення/охолодження широкого поширення набули повітряні теплові насоси (повітря-повітря) (рис 1). Навіть при -15 °С у повітрі залишається теплова енергія. Холодоагент,

випаровуючись при низькому тиску, поглинає приховану теплоту і переносить її через компресор і конденсатор усередину приміщення.

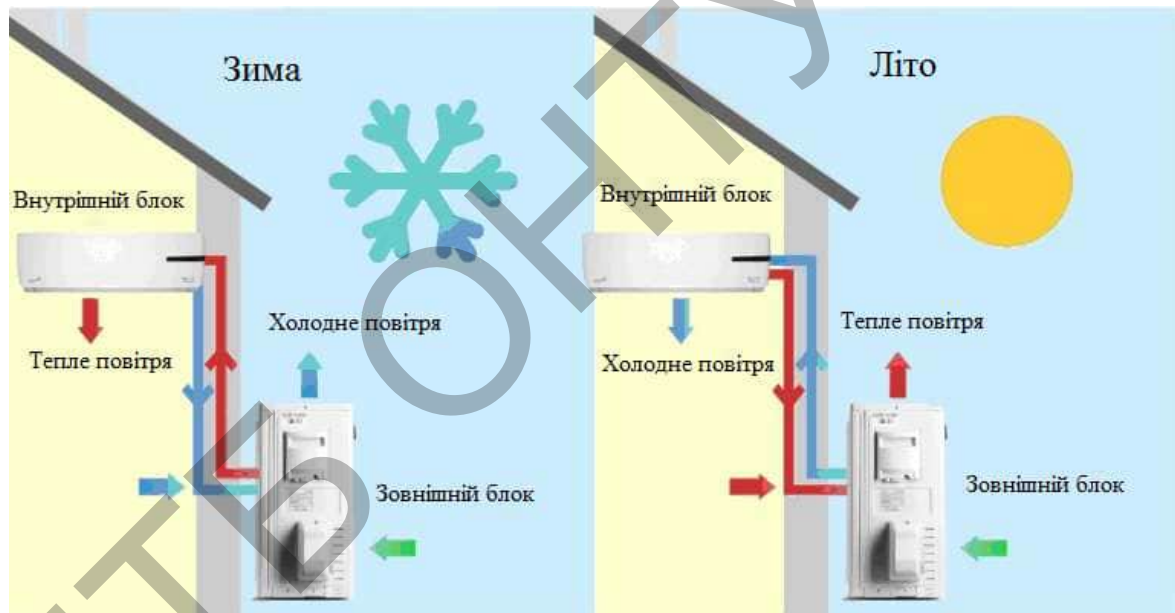


Рис 1 – Робота теплового насоса в режимі опалення та охолодження

Ефективність визначається коефіцієнтом COP (Coefficient of Performance) - ставленням виділеної теплової енергії до витраченої електричної.

Реальну ефективність роботи повітряного теплового насоса за різних температур наведено в таблиці 1

Таблиця 1 – Ефективність роботи теплового насоса за різних температур зовнішнього повітря

Температура зовнішнього повітря	COP (R32-інвертор)	Характеристика
+7 °C	4.5–5.0	Максимальна ефективність, режим міжсезоння
0 °C	3.5–4.0	Оптимальний баланс продуктивності та витрати
–10 °C	2.5–3.0	Помірне зниження через обмерзання теплообмінника
–20 °C	1.8–2.2	Робота можлива, але потрібна відтайка та утеплення траси
–25 °C і нижче	1.3–1.8	Режим на межі використовується як допоміжне опалення

Поширені інверторні моделі зазвичай мають межу близько -15 ° C - цього достатньо для більшості регіонів як допоміжне опалення. Існують спеціальні моделі, що дозволяють працювати до -22 °C. А також посилені «зимові» інверторні кондиціонери здатні обігрівати при морозах до -25°C, завдяки потужнішому компресору та покращеній теплоізоляції блоку.

Якщо порівнювати економічність роботи теплового насоса з іншими джерелами тепла (таблиця 2), повітряні теплові насоси більш ефективні.

Таблиця 2 - Порівняння опалення тепловим насосом з іншими джерелами тепла

Тип опалення	Ефективність (COP/ККД)	Характеристика
Електрообігрівач (ТЕН)	1.0	Вся електрика перетворюється на тепло
Газове опалення	0.9	Залежить від тарифів та ККД котла
Тепловий насос (COP = 3.5)	3.5	Економія до 65% електроенергії

Теплові насоси «повітря-повітря» можуть бути реалізовані як:

- настінні спліт-системи – найпоширеніший варіант
- мульти-спліт — один зовнішній блок і кілька внутрішніх для обігріву декількох кімнат одночасно.
- каналні/касетні системи — ховаються в стелі підшивної стелі, розподіляючи повітря по повітропроводах.

Застосування теплових насосів у будинках різного призначення дозволить заощадити на паливно-енергетичних ресурсах, будучи оптимальним варіантом для використання в якості системи опалення взимку та кондиціонування приміщення у літній період

Інформаційні джерела

1. Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки: Закон України від 11 липня 2001 р. № 2623-III. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2623-14>
2. Енергетична стратегія України на період до 2035 року. Біла книга енергетичної політики України «Безпека та конкурентоспроможність». Київ, 2015. 49 с.

УДК.620.92

ВИКОРИСТАННЯ ВЕУ ДЛЯ НАФТОВИХ ПЛАТФОРМ

Ляхов С.Д., студент

Лужанська Г.В., доц., к.т.н.

Національний університет «Одеська політехніка»

Нафтогазовий сектор залишається ключовим споживачем енергетичних ресурсів, створюючи за даними ІЕА приблизно 8% світового енергоспоживання [1].

Одним із перспективних напрямів у цьому контексті є інтеграція відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у логістичні процеси нафтогазової галузі. Логістичні процеси, що включають видобуток, транспортування, переробку та розподіл нафти та газу, традиційно залежать від значних обсягів енергії,

що одержується з копалин. Інтеграція ВДЕ може не лише скоротити вуглецевий слід галузі, а й забезпечити додаткові економічні та операційні переваги.

Один із ключових аспектів інтеграції ВДЕ у нафтогазовій галузі — це енергопостачання віддалених об'єктів. Нафтогазова галузь часто працює у віддалених районах, де інфраструктура для електропостачання або відсутня, або потребує значних витрат на її створення. Відновлювані джерела енергії використовуються на нафтогазових платформах для забезпечення автономного енергопостачання віддалених об'єктів, де доступ до традиційних енергетичних мереж обмежений або відсутній.

Для успішної інтеграції ВДЕ необхідно розробити та впровадити сучасні системи моніторингу та управління, які дозволяють ефективно управляти розподілом енергії, враховувати погодні умови та забезпечувати стабільність роботи обладнання [2].

З метою постійного енергозабезпечення нафтогазових платформ багато світових лідерів нафтопереробної галузі почали впроваджувати вітроенергетичні установки (ВЕУ).

При виборі вітрогенератора для нафтогазового підприємства враховують багато чинників: кліматичні умови, потреби в електроенергії, особливості майданчика тощо.

Вітроустановки доцільно встановлювати на шельфі для постачання електроенергією морських нафтових платформ для роботи електричного обладнання.

Шельфові вітрові електростанції будують у морі з відривом 10—60 км від берега. Їх особливістю є:

- практично не видно з берега;
- не займають землю;
- мають більшу ефективність роботи через регулярні морські вітри.

Шельфові вітроелектростанції будують на ділянках моря з невеликою глибиною. Башти вітрогенераторів встановлюють на фундаменти зі паль, забитих на глибину до 30 метрів. Електроенергія на землю і на платформу передається кабелями, прокладеними по дну моря (рис 1).

Морська вітрова турбіна встановлюється на фундамент. Набігаючий вітряний потік під дією аеродинамічних сил обертає лопаті, які механічно пов'язані коробкою передач (мультиплікатором) та генератором, що розташовані в гондолі. Генератор виробляє електроенергію, що передається по підводним кабелям спочатку на офшорний трансформатор, а потім на берегову підстанцію або на об'єкт споживання (бурова платформа).

Деякі переваги використання вітрогенераторів на нафтогазових платформах:

- укологічність - вітрогенератори не виробляють шкідливих викидів в атмосферу;
- економічність - після встановлення та введення в експлуатацію вітрогенератори вимагають мінімальних витрат на обслуговування та паливо;
- автономність — вітрогенератори можуть працювати в автономному режимі, забезпечуючи електроенергією віддалені бурові установки;
- скорочення витрат на паливо - використання вітрогенераторів дозволяє значно скоротити споживання дизельного палива, що призводить до економії коштів та зниження залежності від коливань цін на нафту.

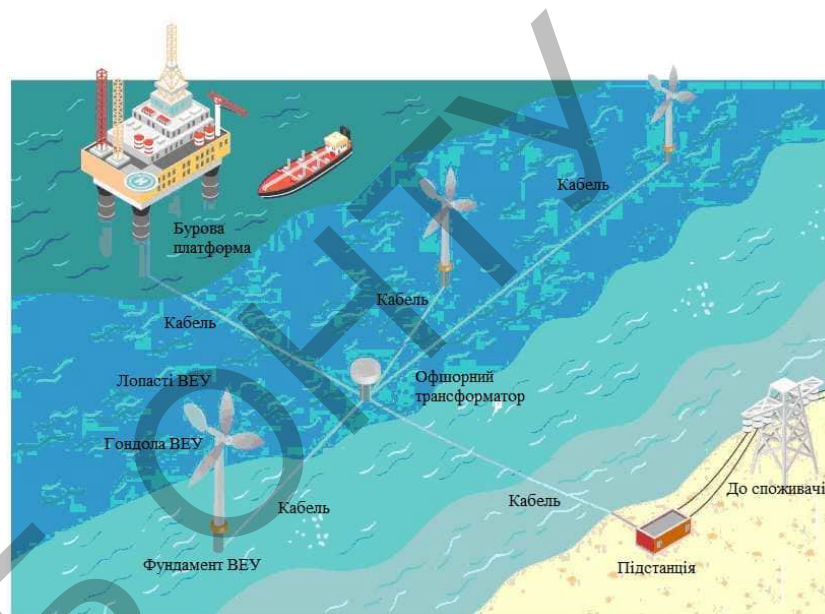


Рис 1 – Схема шельфової вітроелектростанції для забезпечення нафтової платформи

Компанія Total активно впроваджує ВДЕ на нафтогазових добувних платформах. У Північному морі, де сильні вітри є звичайним явищем, Total встановила вітрові турбіни для забезпечення енергією морських добувних платформ (рис 2).



Рис 2 – Впровадження ВЕУ компанією Total на нафтогазових платформах

Глобальний енергетичний гігант Equinor з партнерами відкрили найбільшу у світі плаваючу морську вітряну електростанцію (БЕС) Huvind Tampen. Цей проєкт, потужністю 94,6 МВт та вартістю €488 млн (\$522 млн), призначений для забезпечення електроенергією нафтогазових родовищ Snorre та Gullfaks у норвезькій частині Північного моря [3, 4]. Вітрова електростанція Huvind Tampen складається з 11 вітряних турбін потужністю по 8 МВт (модель Siemens Gamesa SG 8.0-167 DD) і задовольняє близько 35% річної потреби в електроенергії п'яти нафтових платформ Snorre A і B і

Gullfaks A, B і Gullfaks A, B і Cullfaks A, B і Gullfaks між ділянками Snorre та Gullfaks на глибині від 260 до 300 м (рис 3).



Рис 3 - Плавуча ВЕС Hywind Tampen

Китайський виробник вітряних турбін Mingyang встановив вітряну турбіну потужністю 7,25 мегават (МВт) на глибоководній плавучій вітроенергетичній платформі (рис 4). Об'єкт підключено до енергосистеми морських нафтових родовищ і призначено постачати електроенергією нафтові платформи китайської нафтогазової компанії CNOOC. На плавучому фундаменті встановлена вежа висотою близько 83 м, на якій височить гондола вагою 260 тонн. Довжина кожної лопаті вітрогенератора становить 76,6 м, а діаметр ротора - 158 м.



Рис 4 – Плавучий вітрогенератор для живлення офшорних нафтових платформ

Таким чином, перспективи використання вітроенергетичних установок (ВЕУ) для нафтових платформ пов'язані з можливістю забезпечення постійного та стабільного електропостачання, що є важливим для безперервної роботи добувних платформ.

1. <https://www.iea.org/>
2. <https://www.irena.org/>
3. <https://www.eurointegration.com.ua/news/2023/08/23/7168080/>
4. <https://www.hi.no/en/hi/nettrapporport/toktrapporport-en-2023-10>

УДК.697.94

ТЕПЛОВА ІЗОЛЯЦІЯ ХОЛОДОПРОВІДІВ

Лукашенко О.В., студент

Губар Л.Б., ст. викладач

Національний університет «Одеська політехніка»

Ізоляція трубопроводів холодильних установок обов'язковий процес перед початком експлуатації обладнання. Теплоізоляцію виконують, щоб збільшити термін служби техніки, зменшити витрати на електроенергію, підвищити коефіцієнт корисної дії.

Ізоляцію трубопроводів проводять, щоби продовжити термін експлуатації морозильних камер, забезпечити стабільну безперебійну подачу холоду від обладнання. У торгових підприємствах робота холодильних камер забезпечує якість продукції, умови зберігання товару.

На трубопроводи систем холодопостачання негативно впливають два фактори: висока вологість через конденсацію вологи з повітря на холодній поверхні і перепад температур, що викликає нагрівання труб. Ізоляційні матеріали повинні нівелювати обидва фактори. Матеріали із замкнутою будовою пор застосовуються в конструкціях без пароізоляційного захисту [1, 2].

Компоненти для ізоляції повинні бути зносостійкими, мати низькі коефіцієнти теплопровідності, вологопоглинання, морозостійкість для експлуатації в умовах частих перепадів температури, заморозування та відтавання [3].

Теплоізоляційна конструкція для температур від $+19^{\circ}\text{C}$ та нижче 0°C повинна забезпечувати:

- стабільні параметри холодоносія під час експлуатації;
- нормативний рівень теплових втрат обладнанням та трубопроводами;
- безпечну для людини температуру зовнішніх поверхонь агрегатів та труб;
- запобігання конденсації вологи з навколишнього повітря на покривному шарі теплової ізоляції обладнання та трубопроводів.

Ізоляція у холодильних системах виконує кілька ключових функцій:

1. Зниження теплоприток - мінімізація надходження тепла з навколишнього середовища до холодоагенту.
2. Запобігання конденсату - виключення випадання вологи на поверхні труб при температурі нижче точки роси.
3. Захист від замерзання (для систем з негативними температурами) - запобігання утворенню льоду на трубопроводах.
4. Захист від корозії – бар'єр від агресивних середовищ та вологи.
5. Пожежна безпека – відповідність вимогам до вогнестійкості.
6. Гігієнічність та екологічність — матеріали, що використовуються в теплоізоляційних конструкціях, не повинні виділяти в процесі експлуатації шкідливі, пожежонебезпечні та вибухонебезпечні речовини, що неприємно пахнуть, а також хвороботворні бактерії, віруси та грибки, у кількостях, що перевищують гранично допустимі концентрації, встановлені в нормативних документах.

Ключові технічні вимоги до теплої ізоляції:

- низький коефіцієнт теплопровідності – основний показник ефективності;
- закрита ніздрювата структура — для мінімального водопоглинання та паропроникності;
- властивість та гнучкість – для зручності монтажу на складних трасах;
- довговічність – стійкість до старіння, УФ-випромінювання (для зовнішніх ділянок), хімічних середовищ;
- відповідність санітарним нормам – відсутність виділення шкідливих речовин;
- енергоефективності – мати оптимальне співвідношення між вартістю конструкції та вартістю теплових втрат через ізоляцію протягом розрахункового терміну експлуатації

Для ізоляції холодильного обладнання використовують спінений каучук, пінополіуретан, спінений поліетилен, мінеральну вату. Порівняльна характеристика цих матеріалів наведена у таблиці 1.

Таблиця 1 - Порівняльна характеристика утеплювачів холодопроводів

Параметр	Спінений каучук	Пінополіуретан (шкаралупа)	Спінений поліетилен	Мінеральна вата
Коефіцієнт теплопровідності, λ , Вт/(м·К)	0,033-0,040	0,019-0,030	0,031-0,040	0,034-0,045
Температурний діапазон	-200 ° С +175 ° С	-180 ° С +130 ° С	-60 ° С +85 ° С	До +600°С (для холоду – спец.)
Водопоглинання	Дуже низька	Низька (при пошкодженні зростає)	Низьке	Висока
Паропроникність (μ)	≥ 7000	30–100	3000–5000	1–2
Вогнестійкість	КМ0-КМ2 (трудногорючий)	Г1-Г4 (горючий)	Г1-Г4 (горючий)	НГ (негорючий)
Термін служби	25–30 років	20-30 років	10-15 років	15–25 років (при сухості)
Вартість	Висока	Середня/висока	Низька	Низька/середня
Монтаж	Дуже простий	Складний (вимагає герметизації)	Простий	Складний (вимагає гідропароізоляції)

Теплова ізоляція для трубопроводів холодопостачання – це процес, який мінімізує тепловтрати, запобігає конденсату та захищає труби від замерзання (для систем з негативними температурами). Ізоляція також захищає труби від корозії та забезпечує пожежну безпеку.

Інформаційні джерела

1. Степанов Д.В., Степанова Н.Д. Холодильна техніка та технологія. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2008. – 95 с.
2. <https://www.kaimann.com/uk/domashnya-avtomatyzatsiya/tekhnolohiya-nyzkykh-temperatur>
3. <https://energoresurs.com/wp-content/uploads/2021/05/katalog-bzv.pdf>

УДК 621.57

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМБІНОВАНОЇ CO₂-ХОЛОДИЛЬНОЇ СИСТЕМИ

Трандафілов В.В., доцент (докторант), кафедра ХУКП

Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

Розвиток холодильних технологій сьогодні спрямований на підвищення енергоефективності та широке використання природних холодоагентів. Особливе місце серед них займає діоксид вуглецю (CO₂), який активно застосовується у транскритичних бустерних системах комерційного холоду. Ключовою технічною проблемою таких систем залишаються втрати енергії, що виникають під час дроселювання та утворення флеш-газу. Для їх мінімізації використовуються мультиежекторні блоки та технології додаткового переохолодження холодоагенту. Поєднання цих рішень дозволяє суттєво підвищити коефіцієнт енергетичної ефективності та забезпечити стабільність роботи системи.

Метою роботи є аналіз енергоефективності комбінованої парокомпресійної CO₂-холодильної системи, оснащеної мультиежекторним блоком та інтегрованим додатковим контуром переохолодження. Останній використовує теплоту нагнітання для реалізації процесу переохолодження холодоагенту, що відкриває можливості для обґрунтування нових раціональних схемних рішень.

Для досягнення поставленої мети запропоновано нове схемне рішення комбінованої CO₂-холодильної установки, що базується на інтеграції процесів рекуперації теплоти нагнітання та додаткового переохолодження холодильного агента після газоохолоджувача (ГО). На дане технічне рішення подано заявку на винахід №а202503308 «Комбінована парокомпресійна CO₂-холодильна система» [1].

В основу запропонованого рішення покладено використання теплоти нагнітання компресорів високого тиску для живлення інтегрованої ежекторної холодильної машини (ЕХМ), яка забезпечує додаткове переохолодження CO₂ після газоохолоджувача. Така організація процесу дозволяє підвищити термодинамічний потенціал потоку перед елементами розширення, зменшити втрати від дроселювання та інтенсифікувати роботу мультиежекторного блоку. При цьому застосування ежекторної технології забезпечує часткове відновлення енергії потоку високого тиску та її використання для транспортування вторинного потоку, що призводить до зменшення витрат енергії на механічне стиснення в компресорах паралельного стиснення (ПС). У результаті знижується сумарна споживана потужність установки та підвищується її енергетична ефективність.

Для оцінки енергетичної ефективності запропонованої комбінованої CO₂-холодильної системи було прийнято ряд вихідних даних, що відповідають характерним умовам експлуатації об'єктів комерційного холоду. Температура зовнішнього повітря становить 35°C, що відповідає роботі системи в умовах підвищених температур навколишнього середовища та транскритичного режиму. Температурні рівні випаровування прийнято: для низькотемпературного контуру (LT) -40°C, для середньотемпературного контуру (СТ) -10°C. Тиск у газоохолоджувачі становить 80 бар при температурі 35°C. У схемі передбачено реалізацію теплоутилізації, використання паралельної компресії та мультиежекторного блоку, що забезпечує підвищення енергоефективності системи за рахунок зменшення дросельних втрат і часткового відновлення енергії потоку.

Джерелом енергії для інтегрованої ежекторної холодильної машини є теплота нагнітання компресорів високого тиску, при цьому температура генерації прийнята на рівні T_g = 70°C. Використання даного теплового потенціалу дозволяє реалізувати додаткове переохолодження CO₂ після газоохолоджувача без залучення додаткової електричної енергії.

З метою дослідження впливу ступеня додаткового переохолодження на ефективність роботи системи проведено розрахунковий аналіз для трьох режимів, що відрізняються температурою CO_2 на виході з випарника ежекторної холодильної машини. Розглянуто випадки з температурами в точці 60 [1] $T_{60} = 20^\circ\text{C}$, 15°C та 10°C , що відповідає стану охолодженого надкритичного газу після випарника ЕХМ перед мультиежекторним блоком. Додатково було виконано порівняльний аналіз базової транскритичної CO_2 -системи та запропонованої комбінованої системи [1], що дозволило кількісно оцінити вплив застосування мультиежекторного блоку та додаткового переохолодження на зменшення частки флеш-газу, навантаження на компресори та загальну енергетичну ефективність установки.

Було визначено значення коефіцієнта енергетичної ефективності (COP) як для запропонованої комбінованої системи, так і для базової системи. Проведений розрахунковий аналіз дозволив оцінити вплив додаткового переохолодження на енергетичні показники установки. Отримані результати дослідження наведено на рис. 1.

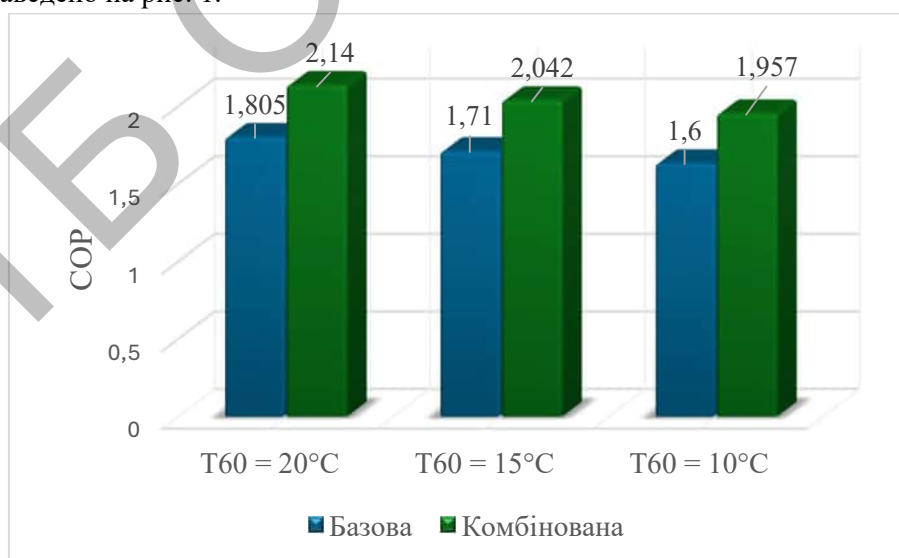


Рис. 1. Порівняння коефіцієнтів COP.

Результати розрахункового дослідження показали суттєве підвищення енергетичної ефективності запропонованої комбінованої системи порівняно з базовою схемою. Зокрема, приріст коефіцієнта енергетичної ефективності (COP) становить 18,57% при температурі CO_2 на виході з випарника ЕХМ $T_{60} = 20^\circ\text{C}$, 19,15% при $T_{60} = 15^\circ\text{C}$ та досягає 19,66% при $T_{60} = 10^\circ\text{C}$. Отримані результати свідчать про зростання ефективності системи зі збільшенням глибини додаткового переохолодження, що зумовлено зменшенням частки флеш-газу та підвищенням ефективності роботи мультиежекторного блоку.

Отримані результати свідчать про високу ефективність інтеграції мультиежекторного блоку та додаткового переохолодження в бустерну транскритичну CO_2 -холодильну систему. Запропонована комбінована парокомпресійна CO_2 -холодильна система забезпечує зниження енергоспоживання до 32,65% та підвищення COP до 19,66% порівняно з базовими рішеннями. Це підтверджує доцільність її використання для об'єктів комерційного холоду, особливо в умовах підвищених температур навколишнього середовища.

Література

1. Заявка на винахід №a202503308. Комбінована парокомпресійна CO_2 -холодильна система / [Трандафілов В.В., Хмельнюк М.Г.]. – Подана 2025. – Укрпатент.

Науковий консультант: Хмельнюк М.Г., д.т.н., проф., зав. кафедри холодильних установок і кондиціонування повітря ОНТУ

УДК 697.91.93.94

МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМ КОНДИЦІЮВАННЯ ПОВІТРЯ З ВПРОВАДЖЕННЯМ ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ МОДУЛІВ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЇ

Здобувач СВО «Магістр» ННІХКтаЕ Єфремов І. Ю., ОНТУ

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю забезпечення ефективного повітрообміну в громадських, освітніх та виробничих будівлях, де існуючі системи вентиляції часто є морально застарілими або відсутніми. Недостатній повітрообмін призводить до погіршення мікроклімату, зниження рівня комфорту та негативного впливу на здоров'я людей. Одночасно з цим актуальним є питання зниження енергоспоживання систем вентиляції та кондиціонування повітря, які є одними з найбільш енергоємних інженерних систем будівель.

Одним із найбільш ефективних напрямів підвищення енергоефективності HVAC-систем є використання теплоутилізаційних установок, які дозволяють використовувати теплоту витяжного повітря для обробки припливного. Це дає змогу значно зменшити витрати енергії на нагрівання або охолодження зовнішнього повітря. За різними оцінками, впровадження систем теплоутилізації дозволяє досягти економії енергії на рівні 30–70%, а в окремих випадках — до 90% при використанні схем рециркуляції.

У роботі проаналізовано основні методи та технічні рішення утилізації тепла в системах вентиляції та кондиціонування повітря. До них належать: системи з проміжним теплоносієм (Twinvent), пластинчасті рекуператори (Directvent), теплообмінники на теплових трубах (Heatvent) та роторні теплообмінники (Rotorvent).

Системи типу Twinvent передбачають використання двох теплообмінників, з'єднаних контуром із проміжним теплоносієм, як правило водним розчином етиленгліколю. Основною перевагою таких систем є можливість передачі теплоти між потоками повітря, які просторово рознесені або не можуть бути безпосередньо з'єднані. Це особливо актуально для реконструкції існуючих будівель. Однак додатковий тепловий опір проміжного теплоносія знижує загальну ефективність системи, яка зазвичай становить 40–45%.

Пластинчасті теплообмінники (Directvent) є одним із найпоширеніших рішень завдяки простоті конструкції, надійності та відносно низькій вартості. У таких теплообмінниках тепло передається через тонкі стінки каналів, сформованих чергуванням плоских і гофрованих алюмінієвих пластин. Потоки припливного і витяжного повітря рухаються роздільно, що виключає їх змішування. Ефективність таких теплообмінників зазвичай знаходиться в межах 40–60%.

Теплообмінники на теплових трубах (Heatvent) використовують фазовий перехід теплоносія для передачі теплоти. Завдяки цьому досягається більш інтенсивний теплообмін у порівнянні з традиційними рекуператорами. Такі системи ефективні в певних температурних діапазонах і забезпечують коефіцієнт утилізації на рівні 55–75%.

Нами розглянутий перекресноточний теплообмінник і показано ефективними серед розглянутих є), ефективність яких досягає 80–90%. Високі показники зумовлені великою площею теплообмінної поверхні та організацією протитечісного руху повітряних потоків.

У процесі експлуатації роторних та перекресноточних теплообмінників можливе часткове перетікання витяжного повітря в припливний потік, що є небажаним з точки зору санітарних вимог. Для запобігання цьому застосовуються спеціальні очищувальні секції (purge-секції), які дозволяють обмежити перетікання до рівня не більше 0,04% від об'ємної витрати повітря.

Аналіз процесів тепло- і масообміну показує, що в негігроскопічних теплообмінниках у холодний період відбувається нагрівання припливного повітря при постійному вмісті вологи, тоді як у

теплий період — його охолодження без зміни вологості. У гігроскопічних теплообмінниках одночасно реалізуються процеси тепло- та вологообміну, що дозволяє більш точно підтримувати параметри мікроклімату.

Отримані результати свідчать, що впровадження теплоутилізаційних установок є ефективним засобом підвищення енергоефективності систем кондиціонування повітря. Найбільш перспективними є перекресноточні теплообмінники, які забезпечують високі показники утилізації тепла та можливість комплексного регулювання параметрів повітря. Використання комбінованих схем і відновлюваних джерел енергії відкриває додаткові можливості для зниження енергоспоживання та підвищення екологічності інженерних систем будівель.

Список використаних джерел:

1. Інноваційні технології кондиціонування повітря в нестационарних умовах: монографія / Н. Жихарева ; Одеський національний технологічний університет, кафедра холодильної техніки та кондиціонування повітря - Одеса : ТЕС, 2022. – 264 с. : іл.
2. Жихарева Н.В., Хмельнюк М.Г. (2016) Математичне моделювання нестационарного теплообміну будівель. Холодильна техніка та технологія, 52 (6), с. 75–79. DOI: <http://dx.doi.org/10.15673/ret.v52i6.479>
3. Жихарева Н., Хмельнюк М. (2017) Оптимізація витрат на термозахист будівель та кондиціонування повітря в цілому. Холодильна техніка та технологія, 53(4), с. 17-20 DOI: <http://dx.doi.org/10.15673/ret.v53i4.706>

Науковий керівник: Жихарева Н. В., к.т.н. доц. ОНТУ

УДК 697.91.93.94

РОЗРОБКА КОМПЛЕКСНОЇ СИСТЕМИ ПРЕЦИЗІЙНОГО МІКРОКЛІМАТУ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОЗМІРНОЇ СТАБІЛЬНОСТІ ГІГРОСКОПІЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ

Здобувач СВО «Магістр» ННІХКтаЕ Висотенко Д. В. ОНТУ

Вступ

Деревообробна промисловість потребує особливого підходу до проектування інженерних систем, оскільки якість продукції залежить від стабільності параметрів навколишнього середовища. Деревина є гігроскопічним матеріалом, тому будь-які коливання мікроклімату викликають зміни її внутрішньої структури. Розробка комплексної системи прецизійного кондиціонування є необхідною умовою для запобігання деформаціям та забезпечення конкурентоспроможності сучасного виробництва.

Вплив параметрів мікроклімату на розмірну стабільність

Для забезпечення високої якості обробки гігроскопічної продукції необхідно враховувати взаємозв'язок між параметрами повітря та фізико-механічними властивостями матеріалу:

- Температурна стабілізація: Постійний термічний режим запобігає нерівномірному висиханню, яке є основною причиною викривлення та появи тріщин у деревині.
- Регулювання вологості: Вологість повітря безпосередньо визначає вологість деревини, що є ключовим фактором її розмірної стабільності. Недостатній рівень вологості призводить до усадки, а надмірний — до набухання матеріалу.

- Гідротермічна рівновага: Точне регулювання параметрів дозволяє підтримувати оптимальний рівень вологості залежно від специфіки конкретного виду деревини.

Складові комплексної системи керування середовищем

Комплексний підхід до розробки системи передбачає інтеграцію декількох функціональних блоків:

- Прецизійна вентиляція: Забезпечує рівномірний розподіл повітряних потоків, що унеможливорює появу зон з різною вологістю та запобігає локальним деформаціям.
- Система очищення та фільтрації: Захищає поверхню продукції від пилу та дрібних часток, що критично важливо для якості фінішного покриття.
- Аспірація та безпека: Видалення стружки та шкідливих випарів не лише покращує якість продукції, а й захищає технологічне обладнання від передчасного зносу.

Технологічні та економічні переваги

Впровадження розробленої системи дозволяє досягти наступних результатів:

- Мінімізація ризиків: Контроль параметрів дозволяє уникнути незворотних змін у структурі деревини під впливом зовнішнього середовища.
- Ефективність виробництва: Стабільний мікроклімат забезпечує безперервність технологічних процесів та знижує відсоток браку.
- Енергозбереження: Використання сучасних алгоритмів керування дозволяє оптимізувати витрати на експлуатацію систем вентиляції та кондиціонування.

Висновки

Розробка комплексної системи прецизійного кондиціонування для деревообробних підприємств є технічно обґрунтованим рішенням, що гарантує збереження геометричних параметрів гігроскопічної продукції. Інвестиції в такі системи забезпечують довговічність виробів та належні умови праці для персоналу.

Список використаної літератури:

1. Жихарева Н., Хмельнюк М., В. І. Перепека (2016) Енергозбереження при експлуатації припливних систем вентиляції та кондиціонування повітря <https://doi.org/10.21691/ret.v52i2.63>
2. Жихарева Н.В., Хмельнюк М.Г. (2016) Математичне моделювання нестационарного теплообміну будівель. Холодильна техніка та технологія, 52 (6), с. 75–79. DOI: <http://dx.doi.org/10.15673/ret.v52i6.479>
3. Жихарева Н., Хмельнюк М. (2017) Оптимізація витрат на термозахист будівель та кондиціонування повітря в цілому. Холодильна техніка та технологія, 53(4), с. 17-20 DOI: <http://dx.doi.org/10.15673/ret.v53i4.706>
4. Жихарева Н.В. Хмельнюк М.Г., Важинський Д.І. Сучасні технології осушення повітря // Холодильна техніка і технологія. 2014. № 3 (149).
5. Інноваційні технології кондиціонування повітря в нестационарних умовах: монографія / Н. Жихарева. — Одеса : ТЕС, 2022.

*Науковий керівник: Жихарева Н.В., к.т.н.,
доц. кафедри Холодильних установок і кондиціонування повітря ОНТУ*

УДК 621.57

ДОСЛІДЖЕННЯ БУСТЕРНОЇ ТРАНСКРИТИЧНОЇ ХОЛОДИЛЬНОЇ СИСТЕМИ НА CO₂ З МУЛЬТИЕЖЕКТОРНИМ БЛОКОМ

Фоменко Г.А., здобувач СВО Бакалавр ІХКЕ ОНТУ

В умовах посилення екологічних вимог та зростання вартості енергетичних ресурсів особливої актуальності набувають холодильні системи, що поєднують високу енергетичну ефективність та мінімальний вплив на навколишнє середовище. Одним із найбільш перспективних напрямків розвитку промислового та комерційного холоду є використання діоксиду вуглецю (CO₂, R744) як холодоагенту.

Метою даної роботи є аналіз функціонування холодильних систем на CO₂ для зберігання продуктів харчування та доведення, що застосування R744 є більш ефективним, економічно доступним та екологічно безпечним рішенням у сучасних умовах.

Для досягнення поставленої мети вирішені наступні задачі:

1. Досліджено вплив тиску газового охолоджувача на показники енергетичної ефективності роботи (COP) CO₂-системи.
 2. Проаналізовано особливості роботи систем із мультиежекторним блоком, що дозволяє підвищити коефіцієнт енергетичної ефективності та оптимізувати процеси тепловідведення.
- Для оцінки енергетичної ефективності запропонованої комбінованої CO₂-холодильної системи були прийняті вихідні дані, що відповідають типовим умовам експлуатації об'єктів комерційного холоду.

- **Температура на виході з газоохолоджувача:** 35°C.
- **Температурні рівні випаровування:**
 - для низькотемпературного контуру (НТ) -40°C;
 - для середньотемпературного контуру (СТ) -10°C.
- **Тиск у газоохолоджувачі:** 80÷100 бар, що відповідає реальним умовам роботи системи в транскритичному режимі.

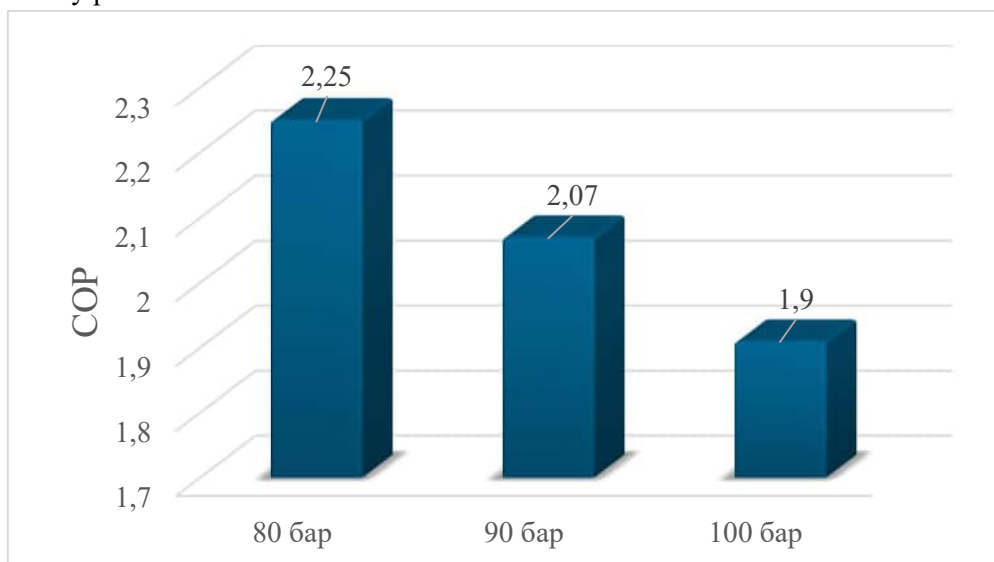


Рис. 1. Вплив збільшення тиску газоохолоджувача на ефективність системи

В результаті проведеного дослідження можна сформулювати наступні висновки:

1. Зниження COP із збільшенням тиску пояснюється збільшенням втрат при дроселі та зменшенням здатності охолодження.

2. Оптимальне значення COP було отримано при більш низькому тиску газового охолоджувача (80 бар).

Науковий керівник: Трандафілов В.В., к.т.н., доц., доцент кафедри холодильних установок і кондиціонування повітря ОНТУ

METHODOLOGICAL ASPECTS OF INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF CLEANROOM HVAC SYSTEMS THROUGH OPTIMIZATION OF MULTI-STAGE FILTRATION AND THERMOPHYSICAL PROCESSES

Master's Degree Student: Briushcov Kostiantyn city.Odesa Str Polska 16 apartment 60

.Energy Strategy and National Economic Significance. Under the conditions of global energy resource scarcity, the modernization of HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) systems for cleanrooms (CR) is becoming a critical point for cost reduction. Since such facilities consume 10 to 100 times more energy per square meter than conventional office buildings, improving their thermophysical models not only reduces production costs but also significantly diminishes the environmental footprint.

Optimization of Multi-zone Systems and Coefficient of Performance. The primary development vector is the transition to intelligent systems with high energy efficiency ratios (\$EER\$ and \$COP\$). This is achieved by implementing inverter control for compressors and fans, allowing the system to flexibly adapt to variable internal heat gains from personnel and equipment, thus avoiding excessive operation during peak loads.

Integration of Renewable Sources and Thermal Storage. Modern solutions involve the use of solar collectors for preheating supply air in winter and geothermal probes for cooling in summer. Phase Change Material (PCM) thermal storage plays a particularly vital role, allowing for the "smoothing" of daily electricity consumption peaks by accumulating cold during nighttime hours at lower utility rates.

Five-Stage Filtration System

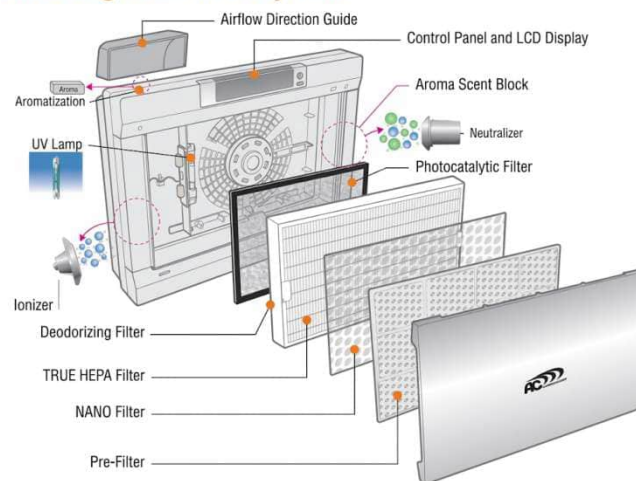


Fig. 1. Cleanroom air filtration

Hierarchy of Air Filtration according to ISO 14644. To ensure a specified cleanliness class (from ISO 1 to ISO 9), a cascading filtration method must be employed. Primary filtration (classes G3–G4) captures coarse particles, secondary filtration (F7–F9) minimizes the load on expensive final elements, and final filtration (HEPA H13–H14 or ULPA U15–U17) ensures the removal of particles as small as $0.1\text{--}0.3\text{ }\mu\text{m}$ with an efficiency of up to 99.999%.

Secondary Filtration as a Financial Optimization Tool. Installing high-quality medium-efficiency filters is an economically sound step. Without a proper second level of protection, final HEPA filters clog 3 to

5 times faster. Given the high cost of replacement and the mandatory subsequent validation of the entire room, preventive air cleaning is a key element of energy conservation.

Aerodynamic Resistance and Power Consumption. The power consumed by fans is directly proportional to the pressure drop across the filters (ΔP). Using filters with an increased filtration surface area (V-shaped or pocket filters) allows for a reduction in initial resistance. Constant monitoring of filter conditions using differential pressure sensors enables replacement at the optimal threshold, preventing energy waste.

Dynamic Airflow Management during Non-working Hours. One of the most effective ways to save energy in the annual cycle is transitioning the system to "Stand-by" mode when personnel are absent. Reducing the air change rate (e.g., from 20 to 5 air changes per hour) while maintaining positive pressure prevents external contamination and can reduce energy consumption by 40–60% without risking the cleanliness class.

Equipment Selection Methodology based on Life Cycle Cost (LCC). The final selection of climate control equipment must be based on a joint optimization target function. This means that capital expenditures for more expensive but energy-efficient equipment and multi-stage filtration are offset by lower operational payments within the first 2–3 years of the system's operation

Supervisor, Associate Professor: Zhykharieva Nataliia ONUT

УДК 628.84:614.21

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ КОНДИЦІЮВАННЯ ТА ОЧИЩЕННЯ ПОВІТРЯ В ЛІКАРНЯХ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ РИЗИКУ ВНУТРІШНЬО ЛІКАРНЯНИХ ІНФЕКЦІЙ

Копитін В.О., бакалавр ІХКЭ ОНТУ, Одеса

Постановка проблеми: Очищення повітря від внутрішньо лікарняних інфекцій залишається однією з актуальніших задач сучасної медицини. Для закладів охорони здоров'я системи вентиляції та кондиціонування повинні забезпечувати не тільки комфортні параметри мікроклімату, а й контроль чистоти повітря, напрямку його руху, перепадів тиску між приміщеннями та ефективності очищення. Чинні норми прямо вимагають спеціальних систем вентиляції й кондиціонування для приміщень із підвищеними вимогами до чистоти повітря, зокрема операційних, пологових залів, приміщень відділень інтенсивної терапії та опікових відділень.

Мета роботи: полягає в аналізі сучасних інноваційних технічних рішень систем вентиляції, кондиціонування й очищення повітря в лікарнях на основі операційних приміщень з використанням ламінарної стелі.

Основний матеріал: Вимоги до чистоти повітря, особливо в медичній та фармацевтичній галузях, є дуже високими і продовжують зростати. У стерильних медичних приміщеннях необхідно підтримувати нормативні гігієнічні умови. Інноваційне рішення — панелі «Sanisteel» (рис.1) для припливно-витяжних установок та систем кондиціонування зі спеціально розробленим антибактеріальним покриттям, яке забезпечує гарантований захист від бактерій та мікробів. Відповідає усім нормативним вимогам і демонструє високу антибактеріальну активність проти бактеріальних штамів (рис.2).

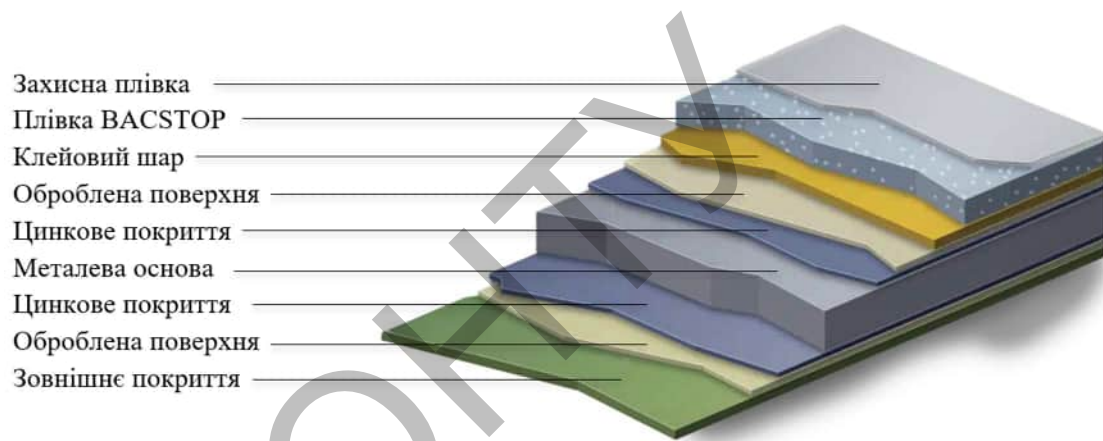


Рис. 2. Сталь з антибактеріальним покриттям Sanisteel®



Рис. 3. Бактеріальні штами: а) *Escherichia Coli*; б) *Klebisella pneumonie*; в) *Staphylococcus aureus*; г) *Salmonella typhimurium*; д) *Listeria monocytogenes*; е) *Legionella pneumophila*; ж) *Pseudomonas aeruginosa*

Антибактеріальною плівкою BACSTOP покривають панелі для повітряно-витяжних установок (рис. 3), що знижує ризик внутрішньо лікарняних інфекцій.

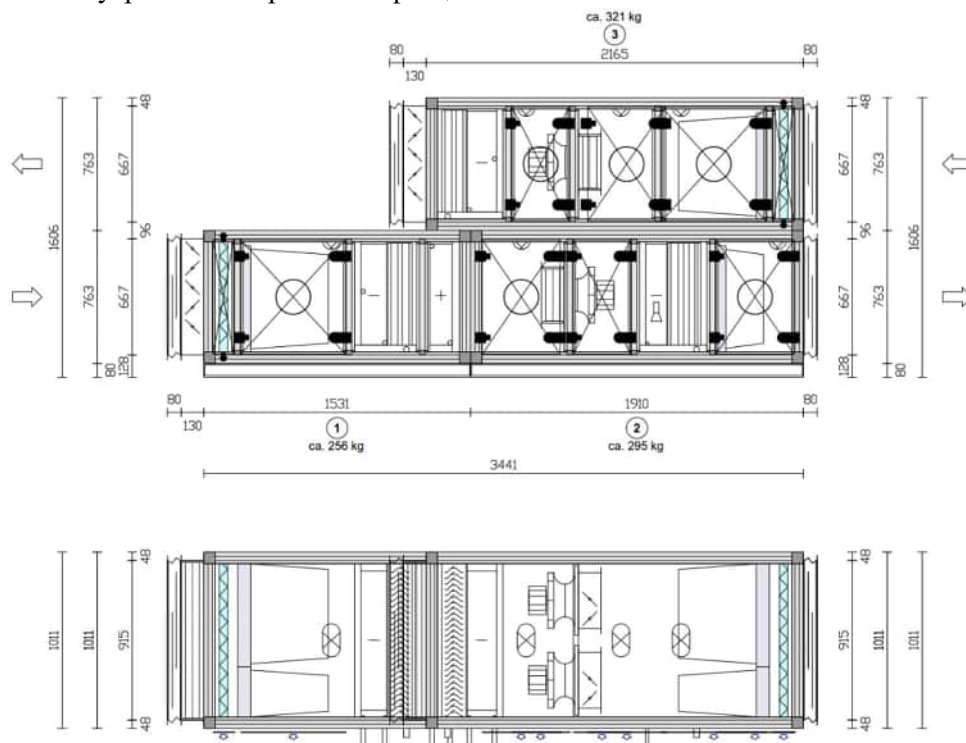


Рис. 3. Повітряно-витяжна установка у гігієнічному виконанні з антибактеріальним покриттям BACSTOP

Повітряно-витяжні установки у гігієнічному виконанні обладнують системою гліколевої рекуперації тепла, водяним калорифером, фреоновим випарником, резервними вентиляторами та секціями для проведення дезінфекції з оглядовими вікнами, освітленням, а також багатоступеневою системою фільтрації. Додатково у повітропроводах додають шумоглушники, парогенератор та УФ-лампу. ПВУ обладнана системою автоматики.

Вимоги до приміщень операційних (рис. 4) можуть включати ламінарні стелі (HEPA-13) дуже високої продуктивності (20-ти кратний повітрообмін), які потребують громіздкого, дороговартісного обладнання для подачі, обробки, очищення та витяжки при використанні зовнішнього повітря [1,2]. У такому випадку може застосовуватись часткова рециркуляція повітря [3] з доочищенням за допомогою рециркуляційних колон. Рециркуляційна колона розміщується в обслуговуваному приміщенні та призначена для подачі повітря до ламінарної стелі. Вона складається з корпусу гігієнічного виконання з шумоізоляційними панелями, повітрязбірні решітки оснащені фільтрами G4, F7, F9 та вентиляторного модуля.

Система динамічної ламінарної стелі з використанням рециркуляційних модулів (рис. 5) розробляється спеціально для вирішення проблеми рециркуляції та подачі повітря в ламінарну зону в умовах обмеженого простору для прокладання повітропроводів великого перерізу — що є особливо актуальним під час реконструкції.

Ключові особливості системи:

- Інноваційна конфігурація. На відміну від традиційних систем із забором повітря на рівні стелі, застосовується принципово нове інженерне рішення – рециркуляційні модулі розміщуються в чотирьох кутах операційної;
- Інтегровані фільтрація та шумозаглушення. Кожен модуль оснащений високоефективними фільтрами та шумоглушниками, що дозволяють знизити рівень шуму до 15 дБ(А), забезпечуючи комфортні умови;
- Замкнутий повітряний контур. Більша частина повітря, яка забирається модулями, рециркулюється та повертається в ламінарну зону. Решта надходить до системи кондиціонування та частково виводиться назовні.
- Енергоефективність та стабільність. Вентилятори рециркуляційних модулів оснащені частотними перетворювачами, які підтримують постійний повітряний потік та міру забруднення фільтрів.

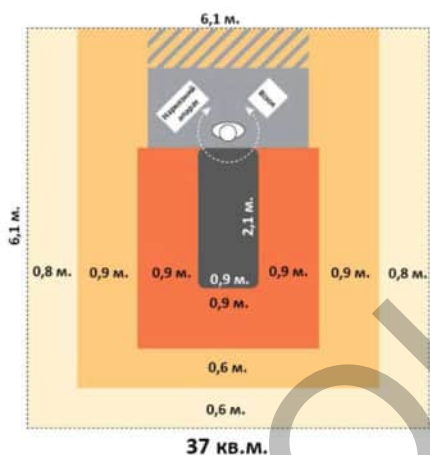


Рис. 4. Мінимальні вимоги до операційної кімнати (світло-сіра зона – анестезія; заштрихована – загальна; темно-сіра – зона пацієнта; помаранчева – стерильна зона; жовта – зона переміщення персоналу; світло-жовта – зона пересувного обладнання)

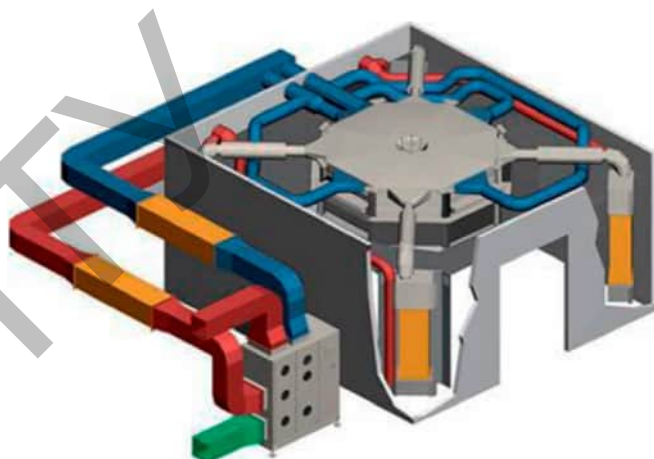


Рис. 5. 3D-вигляд системи вентиляції та кондиціювання повітря в операційній з секційними ламінарними стелями та рециркуляційними колонами

Таким чином, щоб задовольнити мінімальні вимоги до підтримання мікроклімату в операційній кімнаті та знизити ризики від внутрішньо лікарняних інфекцій система вентиляції, кондиціювання та очищення повітря повинна мати наступні показники.

Ламінарна стеля повинна бути розрахована на – 5390 м³/год, у т.ч. прилив свіжого повітря - 1078 м³/год (продуктивність припливно-витяжної установки), рециркуляція повітря - 4900 м³/год (4 колони по 1225 м³/год). Швидкість повітря у робочій зоні – 0,15...0,3 м/с.

Поєднання антибактеріальних матеріалів, систем HEPA фільтрації та рекуперації тепла, а також нових інноваційних технічних рішень з секційними ламінарними стелями та рециркуляційними колонами комплексно дозволяють повисити енергоефективність системі та знизити ризик внутрішньо лікарняних інфекцій у лікарнях.

Висновки: Сучасна безпечна система кондиціювання й очищення повітря в лікарнях повинна поєднувати достатню кратність повітрообміну, вискоефективну HEPA-фільтрацію, точне підтримання позитивного тиску, контроль температури та вологості, ламінарний приплив у критичних приміщеннях, а також безперервний моніторинг і автоматизоване керування. Саме комплексне застосування цих рішень відповідає чинним нормам та знижує ризик внутрішньо лікарняних інфекцій.

Літературні джерела

1. ДБН В.2.2-10:2022. Заклади охорони здоров'я. Основні положення.
2. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціювання.
3. Про затвердження Державних санітарних норм і правил «Санітарно-протиепідемічні вимоги до новозбудованих, реставрованих і реконструйованих закладів охорони здоров'я»: наказ МОЗ України від 21.02.2023 № 354.

Науковий керівник: Жихарєва Н.В., к.т.н., доцент кафедри холодильних установок і кондиціювання повітря ОНТУ

УДК 628.84:614.21

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ХОЛОДИЛЬНОЇ СИСТЕМИ ПТАХОФАБРИКИ

Ходаков М О..., ЗВО бакалавр ІХКЭ ОНТУ, Одеса

В сучасному світі, де зростає увага до екологічних проблем і раціонального використання ресурсів, питання енергоефективності систем охолодження стає все більш актуальним. Особливо важливою стає ця проблема для промислових об'єктів, таких як птахофабрики, де забезпечення оптимальних умов збереження продуктивності та здоров'я тварин є пріоритетом.

У Ладижині Вінницької обл. знаходиться птахофабрика, яка є важливим ланком в галузі виробництва продуктів харчування. З урахуванням унікальних кліматичних умов регіону та специфіки виробництва, питання енергоефективності систем охолодження стає особливо актуальним.

Мета: дослідження та оцінку ефективності системи охолодження птахофабрики у. Ладижин . Головною метою дослідження є виявлення можливостей оптимізації використання енергії та ресурсів у процесі охолодження, зокрема, шляхом впровадження енергоефективних технологій.

Дослідження базувалося на якісному аналізі та експериментальних дослідженнях, спрямованих на вдосконалення процесів охолодження у птахофабриці. Результати даної роботи сприятимуть підвищенню продуктивності та зниженню енерговитрат, що є важливими чинниками для сталого розвитку агропромислового сектору

Розглято холодильну установку холодильної установки та особливості роботи установки. Компресори з'єднані паралельно, та накачують пари аміаку у форт-конденсатор. Поміж форт-конденсатором та компресорами є труби, що ведуть на відтаювання. Компресори охолоджуються мастилом (що, в свою чергу, охолоджується у термосифонному ресивері), а також водою (утилізація тепла), яка подається до котельні.

Форт-конденсатор також охолоджує пари аміаку, підігрівачи розчин пропіленгліколю, який, у свою чергу, підігріває воду у теплообміннику яка прямує до котельні. Розчин пропіленгліколю обрано тому що форт-конденсатори розташовані на вулиці, і необхідно подолати ризик перемерзання трубопроводу

Після форт-конденсаторів пара аміаку прямує до випарних конденсаторів. Основна частина теплоти відводиться завдяки випаровуванню води, але взимку, при низьких температурах, воду необхідно зливати та використовувати лише вентилятори. Шляхом експериментів було встановлено, що зі всіма модернізаціями, система може працювати з водою при температурах до -10°C . У випарних конденсаторах встановлено ТЕНи для підігріву води взимку щоб уникнути локального примерзання – бо це все одно виходить значно дешевше, аніж використання вентиляторів. Вентилятори мають потужність близько 120 кВт, а насоси – лише по 6 кВт. Далі потік рідкого аміаку йде у термосифонний ресивер. Звідти він йде у теплообмінник для охолодження мастила. Його температура близько $+30^{\circ}\text{C}$, але для охолодження мастила цього вистачає. Термосифонний ресивер тісно пов'язан із лінійним ресивером, фактично являючи собою майже одну посудину, з однаковим тиском та температурою. Лінійний ресивер складається з двох посудин, з'єднаних між собою трубопроводами, і це створює єдину посудину з єдиним рівнем.

Звідси потік розподіляється по циркуляційним ресиверам, і йде до них через відповідні економайзери відповідних компресорів. У випадку першого та другого циркуляційних ресиверів – потік іде до центрального, об'єднаного економайзера. З циркуляційних ресиверів рідкий аміак поступає на споживачі через аміачні насоси, один із яких обов'язково повинен бути в резерві. Система створена таким чином, що циркуляційні ресивери складають собою бочку, з якої донизу йдуть ще невеликі бочки. До невеликих бочок, у середину, підключено трубопровід у всмоктування насосів, а до низу маленьких бочок йде трубопровід відведення мастила та вологи у масляний ресивер (де зберігається відпрацьоване мастило). Зверху циркуляційних ресиверів стоять великі труби, що ведуть на різні гілки компресорів.

З самого початку, курка потрапляє у шнекові ванни, де її охолоджують у крижаній воді. Вода подається з основної системи через 2 теплообмінника, приєднаних до 4 циркуляційного ресивера (далі ЦР). Перший теплообмінник, який працює за DX-схемою (безпосереднє кипіння аміаку), охолоджує воду до +6 °C. Другий, працює за DX-схемою, є плівковим, тобто вода проходить у міжтрубному просторі. Це зроблено для того щоб уникнути вражень теплообміннику внаслідок перемерзання води.

Це була система «виготовлення води», але також необхідно підтримувати цю температуру. Для цього використовують речілері типу FAT-CAT (див. мал.), які також охолоджують безпосередньо аміаком, мають власні аміачні насоси. Вони забирають воду зі шнекових ванн, охолоджують її, та повертають знов у ванни.

Також на підприємстві є спіральні фризери. Вони заморожують курку таким чином, щоб уникнути великої усушки. Складність у тому, що треба охолодити тушки, але не так сильно щоб вони не змерзли. Спіральні фризери подають потік охолодженого повітря, у той час коли курка рухається по кривій траєкторії. Це робить охолодження рівномірним.

Для виготовлення замороженої продукції використовуються плітотні скороморозильні апарати. Туди, у окремі комірки, завантажують фарш, чи іншу продукцію, та вмикають режим охолодження. Після 1.5 годин охолодження продукт повністю замерз, та може прямувати до камер зберігання. Для того щоб дістати брикет із апарату, необхідно роздвинути комірки, тому одразу після заморозки, плітотні апарати вмикають режим відтаювання гарячими парами. Для порівняння, інша холодильна техніка проходить відтаювання лише раз на добу, щоб можна було провести очищення від залишків м'яса.

На підприємстві діє найбільша у Європі морозильна камера (кам. №30). Там стоять повітроохолоджувальні пристрої з аміаком, як і на універсальній камері №27. Інші камери зберігання охолодженої продукції працюють на 35% розчині пропіленгліколю. Цікаво, що камери іноді залишаються без охолодження. Але завдяки великому об'єму, площа контакту камери з навколишнім середовищем не порівняно мала, порівняно з об'ємом камери та запасами холоду. Тому за 1-2 доби температура змінюється лише на 0.6-1 °C (при розрахунковій температурі - 20 °C).

Висновки Вінницький птахокомбінат є високотехнологічним підприємством, що має потребу в надійному та ефективному енергозабезпеченні. Компресорний цех відіграє ключову роль у роботі багатьох технологічних ліній. З огляду на важливість його функцій та наявні недоліки, реконструкція компресорного господарства є доцільною та необхідною для подальшого розвитку підприємства

Перелік використаних джерел

1. ДСТУ ISO 12100:2020 Безпека машин. Загальні принципи проєктування. Оцінка ризиків і зменшення ризиків.
2. Наказ МОЗ України № 400 від 28.09.2012 «Про затвердження Державних санітарних норм і правил при роботі з джерелами шуму на виробництві».
3. ДСТУ EN 1012-1:2005 Компресори та вакуумні насоси. Вимоги безпеки. Частина 1: Компресори.
4. Інструкція з експлуатації компресора Dalgakiran Inversys 75 D / 75 P. – [Офіційний сайт Dalgakiran](#).
5. Журнали обліку технічного обслуговування компресорного обладнання ВАТ «Вінницький птахокомбінат», 2022–2024 рр.

Науковий керівник: Жихарева Н.В., к.т.н., доцент кафедри холодильних установок і кондиціювання повітря ОНТУ

УДК 628.84:614.21

SYSTEMS IN THE APPLICATION OF MULTI-ZONE SPLIT SYSTEMS

Master's Degree Student: Vorobjov Maksim

Refrigeration, Cryogenic Engineering and Energy, Odesa National Technological University, Odesa, Ukraine

The rapid growth of energy consumption in buildings and the increasing requirements for indoor environmental quality have made the improvement of HVAC technologies one of the key priorities in modern engineering practice. Multi-zone split systems (VRF/VRV systems) have become widely used in commercial and public buildings due to their flexibility, energy efficiency, and ability to provide individualized thermal comfort. However, despite their technological advantages, challenges remain related to air treatment quality, air distribution efficiency, and environmental sustainability.

Comfort air conditioning systems with local air conditioners (indoor units) have firmly entered our lives, leaving the functions of technological air conditioning and ventilation of premises for air systems. The multi-zone principle of air conditioning, in which not only the cooling and heating capacity of the air conditioning unit is individually regulated, but also the required temperature and speed of air flows in the room are maintained, is optimally implemented using local air conditioners (autonomous or non-autonomous) installed in the serviced premises. A similar in functionality multi-zone air conditioning scheme using only air systems loses to the previous one in terms of capital costs, dimensions of equipment and air ducts, and energy characteristics. Therefore, it is not surprising that more than 95% of multi-zone air conditioning systems are implemented on the basis of air conditioners with indoor units.

Today, three independent classes of climate systems with local air conditioners can be distinguished: split systems; VRF systems; chiller-fan coil systems. Each of these systems uses similar types and designs of indoor units. The entire range of indoor units is diverse, but the following types of local air conditioners are installed in most serviced premises: wall-mounted, cassette, floor-ceiling, ducted. Moreover, for the consumer, the type of indoor unit and its characteristics are primarily important, since it is the indoor unit that interacts with the air in the room and produces clear results of the entire air conditioning system. In addition, the indoor unit is the “face” of the air conditioner, it is located in the serviced room, so its most important characteristic is the design of the housing. In most cases, the choice of the type of indoor units is based on two criteria - the calculated cooling capacity and the design of the housing. Meanwhile, there is a large class of criteria for choosing the type of indoor unit, based on ensuring the required air conditions in the room. Neglecting them leads to the installation of an indoor unit that is perfectly combined with the overall design of the room, has the necessary cooling and heating capacity, but when it is working, the air parameters in the room do not meet sanitary norms and hygiene standards. Most often, turning off the air conditioner, consumers are in better microclimatic conditions than when it is operating.

A multi-zone system is an air conditioning system of the inventory type, which allows you to create different microclimate parameters in individual rooms of the building. The number of temperature zones in one system can reach 60 with one or more outdoor units.

Modern multi-zone split systems primarily focus on temperature control, while ventilation and air quality management are often implemented as separate subsystems. This separation may lead to uneven air distribution, insufficient fresh air supply, and increased energy consumption. Therefore, improving methods of air treatment and optimizing air distribution schemes represent important directions for increasing overall system performance.

One promising approach is the integration of multi-zone split systems with fan coil units and centralized air handling solutions. Fan coils can serve as intermediate elements that enhance air mixing, improve local comfort conditions, and allow better humidity regulation. The combined use of fan coil units and multi-zone systems enables flexible zoning while maintaining stable indoor air parameters, particularly in buildings with variable occupancy such as supermarkets, office centers, and public facilities.

Special attention should be paid to airflow organization within conditioned spaces. Improper air distribution may cause temperature stratification, drafts, or stagnant zones with reduced air quality. The application of optimized diffuser placement, variable airflow control, and computational airflow modeling allows engineers to achieve uniform thermal fields and improved occupant comfort while reducing unnecessary cooling loads. Environmental considerations also play a crucial role in the development of modern HVAC systems. The transition toward low-GWP refrigerants, reduction of indirect CO₂ emissions through energy-efficient operation, and intelligent control algorithms contribute to sustainable building operation. Multi-zone split systems equipped with inverter compressors and demand-controlled ventilation strategies can significantly reduce electricity consumption compared to traditional constant-capacity systems.

Another important aspect is the integration of smart control technologies and building management systems (BMS). Adaptive control based on occupancy, indoor air quality sensors, and outdoor climate conditions allows dynamic regulation of airflow and cooling capacity. Such solutions not only improve comfort but also minimize energy waste and operational costs.

The improvement of air treatment processes should also include advanced filtration and air purification technologies. The use of multi-stage filtration, heat recovery ventilation, and humidity control enhances indoor environmental safety, which has become especially relevant in the context of global health challenges and increasing standards for indoor air quality.

In conclusion, the development of improved air treatment methods and air distribution systems for multi-zone split systems represents an important step toward sustainable and energy-efficient building operation. The integration of fan coil technologies, intelligent airflow management, and environmentally responsible design approaches allows achieving higher comfort levels while reducing environmental impact. Future research should focus on hybrid HVAC configurations, optimization algorithms, and experimental validation of airflow distribution models to further enhance system performance and ecological efficiency.

Supervisor, Associate Professor: Zhykharieva Nataliia



УДК 628.84:614.21

НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ХАРЧОВІЙ ТА ПЕРЕРОБНІЙ ПРОМИСЛОВOSTІ

Казімір О.В., магістр Навчально-науковий інститут холоду, кріотехнологій та екоенергетики ім. В. С. Мартиновського, Одеський національний технологічний університет, Одеса, Україна

Сучасний розвиток харчової та переробної промисловості супроводжується зростанням вимог до якості, безпечності та тривалості зберігання продукції. У цих умовах низькотемпературні технології відіграють ключову роль, оскільки забезпечують ефективне гальмування біохімічних і мікробіологічних процесів у продуктах. Використання холоду дозволяє зберігати органолептичні

властивості, поживну цінність і товарний вигляд продукції, що є критично важливим для сучасного ринку харчових продуктів.

Основними напрямками застосування низькотемпературних технологій є охолодження, заморожування та глибоке заморожування харчових продуктів. Охолодження використовується для короткочасного зберігання, тоді як заморожування забезпечує тривале зберігання без значних втрат якості. Особливу увагу приділяють швидкому (шоковому) заморожуванню, яке дозволяє формувати дрібнокристалічну структуру льоду, мінімізуючи руйнування клітин продукту.

Інноваційні методи отримання холоду, такі як використання кріогенних агентів (рідкого азоту або вуглекислого газу), дозволяють значно підвищити ефективність процесів заморожування. Кріогенне заморожування характеризується високою швидкістю теплообміну, що забезпечує краще збереження структури та смакових властивостей продуктів. Такі технології активно впроваджуються у м'ясній, рибній та плодоовочевій галузях.

Важливим аспектом є енергоефективність низькотемпературних установок. Сучасні холодильні системи використовують інверторні компресори, теплообмінники підвищеної ефективності та системи рекуперації тепла. Це дозволяє зменшити енергоспоживання та експлуатаційні витрати, що є особливо актуальним в умовах зростання вартості енергоресурсів.

Значну роль відіграють теплові насоси та акумулятори холоду, які дозволяють оптимізувати енергетичні процеси на підприємствах. Використання акумуляторів холоду дає можливість згладжувати пікові навантаження та ефективно використовувати електроенергію в нічний час. Це сприяє підвищенню загальної енергетичної ефективності виробництва.

Організація тепло- та масообмінних процесів у холодильних установках є ключовим фактором їх ефективної роботи. Сучасні дослідження спрямовані на вдосконалення конструкцій теплообмінних апаратів, оптимізацію режимів роботи та використання нових робочих тіл із покращеними термодинамічними властивостями. Це дозволяє підвищити продуктивність систем і зменшити їх вплив на навколишнє середовище.

Екологічні аспекти застосування низькотемпературних технологій набувають все більшого значення. Використання екологічно безпечних холодоагентів із низьким потенціалом глобального потепління (GWP), зменшення викидів CO₂ та підвищення енергоефективності систем є важливими напрямками розвитку галузі. Також актуальним є впровадження відновлюваних джерел енергії у холодильних технологіях.

За результатами додаткового математичного моделювання, з урахуванням фактичних витрат енергії за перший рік роботи, можуть бути прийняті рекомендації, наприклад, по установці додаткового енергозберігаючого обладнання, посилення теплоізоляції огорожень, скорочення періоду між чистками фільтра і т.д.

Результати математичного моделювання дозволяють визначити по середньомісячним зовнішнім температурам енергоефективне обладнання, яке при оптимальній товщині ізоляції огорожень, забезпечує мінімум витрат та мінімальний строк окупності. На основі розрахунків, можливо, оцінити кліматичне обладнання для будь-якого регіону і вибрати оптимальне з врахуванням доцільно-економічної товщини ізоляції.

Низькотемпературні технології широко застосовуються у різних галузях харчової промисловості: м'ясній, молочній, рибній, кондитерській та плодоовочевій. Вони забезпечують безперервність холодового ланцюга від виробництва до споживача, що є необхідною умовою збереження якості продукції. Особливо важливим є контроль температурних режимів під час транспортування та зберігання.

Перспективним напрямом є використання нанотехнологій та нових матеріалів у холодильному обладнанні. Застосування нанопокриттів, інноваційних теплоізоляційних матеріалів та покращених

теплообмінних поверхонь дозволяє підвищити ефективність і надійність обладнання. Крім того, активно розвиваються системи автоматизації та інтелектуального керування холодильними процесами.

Висновок: слід зазначити, що розвиток низькотемпературних технологій є одним із ключових факторів підвищення ефективності та екологічності харчової промисловості. Поєднання інноваційних методів охолодження, енергоефективних рішень та сучасних систем керування дозволяє забезпечити високу якість продукції та зменшити негативний вплив на довкілля. Подальші дослідження мають бути спрямовані на оптимізацію технологічних процесів, впровадження нових холодоагентів і розробку комплексних енергозберігаючих рішень

ЛІТЕРАТУРА

1. Жихарева Н., Хмельнюк М. (2017) Оптимізація витрат на термозахист будівель та кондиціонування повітря в цілому. Холодильна техніка та технологія, 53(4), с. 17-20 DOI: <http://dx.doi.org/10.15673/ret.v53i4.706>
2. Інноваційні технології кондиціонування повітря в нестационарних умовах: монографія / Н. Жихарева. — Одеса : ТЕС, 2022.

УДК 621.56, 004.8:621.57

ОСНОВНІ БАР'ЄРИ ВПРОВАДЖЕННЯ ХОЛОДИЛЬНИХ СИСТЕМ НА CO₂ (R744) ТА АРХІТЕКТУРА ДІАГНОСТИКИ НЕСПРАВНОСТЕЙ

Кушнір В.О., аспірант, ОНТУ kushnir.uni@gmail.com

При глобальній кліматичній трансформації та переходу до сталого розвитку холодильні системи на основі природних холодоагентів, зокрема діоксиду вуглецю (CO₂), набувають все більшого значення. CO₂ характеризується низьким потенціалом глобального потепління (GWP), високою термодинамічною ефективністю, а також відсутністю токсичності та вибухонебезпечності, що робить його екологічно безпечною альтернативою синтетичним холодоагентам. Впровадження таких систем супроводжується рядом суттєвих бар'єрів.

Аналіз наукових досліджень А. Semedo та J. Garcia (2025) [1], виявлено, що ключові проблеми впровадження холодильних установок на R744 пов'язані з економіко-технологічними та інфраструктурними чинниками, які виявляються у регіонах з обмеженими ресурсами.

Першим важливим бар'єром є високі початкові інвестиції. У дослідженні вказано, що найбільш ефективні системи, які поєднують CO₂ з відновлюваними джерелами енергії, потребують значних капіталовкладень у обладнання та енергетичну інфраструктуру. Такі холодильні системи демонструють високу економічну ефективність у довгостроковій перспективі (період окупності 4–5 років). Але початкові витрати є серйозною перешкодою для широкого застосування систем. Це підтверджується і в рамках експертної дискусії на конференції RETHINK. Так, **Derek Goslin** (Hillphoenix) [2], зазначає, що одним із головних викликів є складність першого впровадження CO₂-технологій, що пов'язано з високими витратами та необхідністю впровадження нових технічних рішень.

Другим бар'єром виявлена технологічна складність та необхідність модернізації інфраструктури. CO₂-системи, особливо транскритичні холодильні установки на R744, потребують спеціалізованого обладнання, нових підходів до проєктування та адаптування технологій з енергетичними системами. Підкреслюється, що такі системи часто поєднуються з відновлюваними джерелами енергії [1], що ускладнює їх реалізацію та вимагає застосування комплексного інженерного підходу до вирішення поставлених завдань. На це звертає увагу **Brian Telle** (експерт з промислового

напрямку реалізації вуглекислотних холодильних установок), що перехід до CO₂ пов'язаний зі зміною технологічних підходів, включаючи нові конфігурації систем, цифровий моніторинг та інші інновації, що потребують додаткових ресурсів та адаптації.

Третім важливим фактором є нестабільність та складність інтеграції відновлюваних джерел енергії до вуглекислотних систем. У дослідженні показано, що використання сонячної, вітрової та припливної енергії дозволяє знизити викиди CO₂ на 92–95% [1], однак такі системи залежать від природних умов і потребують додаткових рішень для накопичення енергії (energy storage). Це в свою чергу також створює труднощі з технічної та економічної сторін при забезпеченні стабільної роботи холодильних установок.

Ще одним бар'єром виявлено інфраструктурні обмеження та енергетична нерівність. Визначається, що в країнах Африки, втрати рибної продукції досягають 30% через недостатню холодильну інфраструктуру. Навіть можливість використати енергоефективні технології не дасть гарантії її впровадження без розвитку регіональної енергетичної та технічної бази.

Важливим бар'єром є недостатній рівень обізнаності ринку та дефіцит кваліфікованих кадрів. Як зазначає Derek Goslin [2], значна частина промислових клієнтів не має достатнього розуміння можливостей CO₂-технологій для впевненого вибору оптимальних рішень. Це знижує не тільки темпи впровадження інновацій також підвищує ризики для інвестування у холодильний сектор.

Останнім фактором є нерівномірність регуляторного середовища. Усіма експертами підкреслюється роль та обмеження у міжнародних угодах, таких як Кіотський протокол і Паризька угода, які стимулюють розвиток низьковуглецевих технологій. Водночас, **Peter Dee** (Hillphoenix) на зустрічі експертів визначає, що окремі регіони (наприклад, Каліфорнія та Нью-Йорк) активно впроваджують природні холодоагенти, тоді як інші значно відстають, що веде до глобальної нерівномірності розвитку CO₂-технологій.

Важливою позицією є економічна ефективність у довгостроковій перспективі. Дослідження показують, що холодильні системи, які залежні від електромережі, мають постійні витрати та негативний фінансовий баланс, тоді як вуглекислотні холодильні системи з відновлюваними джерелами енергії демонструють значні економічні переваги, не зважаючи на капітальні вкладення. Можливо відмітити, що основною проблемою є не ефективність технології, а бар'єри її впровадження. Одним із ключових бар'єрів впровадження CO₂ холодильних систем є їх технологічна складність, що безпосередньо зумовлює потребу у застосуванні сучасних методів виявлення та діагностики несправностей. Архітектура діагностики несправності розглядається як інструмент підвищення надійності, енергоефективності та експлуатаційної стабільності вуглекислотних систем. Разом з тим, багатоконтурна структура систем та нелінійна динаміка ускладнюють задачу надійного виявлення та інтерпретації відхилень у роботі. Традиційні підходи, які ґрунтуються на правилах до виявлення несправностей та діагностики обмежені здібністю виявляти лише заздалегідь визначені сценарії цих несправностей та не можуть враховувати складні взаємозв'язки між термодинамічними параметрами. У даній роботі запропоновано гібридну архітектуру виявлення несправностей та їх діагностику, яка поєднує фізично обґрунтоване термодинамічне моделювання з методами машинного навчання. Архітектура реалізує двоступеневу логіку, узгоджену з сучасними підходами до діагностики: етап виявлення аномалій та етап класифікації типів несправностей. На першому етапі використано комбінацію двох алгоритмів, k-середніх кластеризації та автоенкодера. Простір ознак на вході розроблено на основі термодинамічних змінних, які є чутливими до процесів деградації у холодильній системі (тисків, температур, масових витрат та коефіцієнта енергоефективності). Нормалізація даних забезпечила коректність роботи алгоритмів у багатовимірному просторі.

Алгоритм K-середніх дозволяє виявити структуру операційних режимів системи. Також алгоритм допомагає знайти глобальні відхилення, які пов'язані зі змінами режиму роботи холодильної

системи або параметричними зсувами. Алгоритм Автоенкодер, при навчанні відтворювати нормальний стан роботи системи, може забезпечувати виявлення локальних нелінійних аномалій через аналіз похибки реконструкції. Така комбінація забезпечує поєднання дистанційно-орієнтованих та реконструкційних підходів до виявлення аномалій. Отримані результати демонструють високу узгодженість між теоретичними очікуваннями та поведінкою моделей. Автоенкодер показав стабільну збіжність протягом 150 епох навчання із зменшенням похибки реконструкції до $RMSE \approx 0.67$, що свідчить про ефективне відображення нелінійної структури нормального режиму.

Порівняльний аналіз показав, що алгоритм k-середні виявляє обмежену кількість аномалій (9 випадків), які відповідають значним відхиленням у глобальному просторі станів. Автоенкодер ідентифікує більшу кількість (15 випадків), включно слабко виражені нелінійні порушення. Лише 3 аномалії були спільними, що підтверджує їх високий рівень достовірності.

На основі отриманих результатів виділено три класи аномалій можливо відмітити високонадійні відхилення, що відповідають критичним режимам, глобальні відхилення (лише k-середні), пов'язані зі зміною робочих умов системи, локальні нелінійні порушення (лише автоенкодер), які можуть бути ранніми індикаторами деградації. Важливим результатом є встановлення фізичної інтерпретованості виявлених аномалій. Як наприклад, порушення в контурі рекуперації тепла призводять до зростання високого тиску, а деградація повернення масла у системі викликає зниження ефективності теплообміну. В свою чергу сенсорні зсуви формують систематичні похибки у відновлених змінних стану.

Таким чином, запропонована модель не лише забезпечує підвищення точності виявлення аномалій, але й формує основу для фізично обґрунтованої діагностики. Інтеграція результатів машинного навчання з термодинамічною інтерпретацією дозволяє перейти від обслуговування (проблема-вирішення) до прогнозованого обслуговування, що є критично важливим для підвищення надійності та енергоефективності холодильних систем на R744.

Як результат, можна виділити ключові бар'єри впровадження холодильних систем, високі початкові інвестиції, технологічна складність і необхідність модернізації інфраструктури, нестабільність відновлюваних джерел енергії, інфраструктурні обмеження, дефіцит кваліфікованих кадрів, а також нерівномірність регуляторної політики. Відповідно до наукових досліджень та експертних оцінок, вуглекислотні холодильні системи мають значний потенціал для забезпечення сталого розвитку.

Для подолання частини оговорених бар'єрів може служити підвищення надійності та ефективності функціонування вуглекислотних холодильних систем за рахунок впровадження інтелектуальних методів діагностики (застосування штучного інтелекту, машинного навчання). Запропонована модель забезпечує підвищення точності виявлення аномалій та формує основу для фізично обґрунтованої діагностики системи.

Список інформаційних джерел:

1. Semedo, A., & Garcia, J. (2025). Harnessing renewable energy sources in CO₂ refrigeration for Eco-friendly fish cold storage. *Processes (Basel, Switzerland)*, 13(9), 2847. <https://doi.org/10.3390/pr13092847> ...
2. RETHINK Live Conference. CO₂ in Commercial and Industrial Refrigeration (Expert Panel Discussion)

Науковий керівник: Яковлева О.Ю., к.т.н., доцент, доцент кафедри холодильних установок і кондиціонування повітря ННІ холоду, кріотехнологій та екоенергетики ім. В.С. Мартиновського ОНТУ

УДК 621.56

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ХОЛОДИЛЬНИХ УСТАНОВОК НА R744 ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕХНОЛОГІЇ PRESSURE EXCHANGER

Михайлицький М.Є., студент, ОНТУ, м. Одеса

Сучасні тенденції розвитку холодильних установок спрямовані на підвищення енергоефективності та зменшення вуглецевого сліду, що зумовлено як посиленням екологічних вимог та міжнародних регуляторних обмежень, так і необхідністю зниження експлуатаційних витрат у комерційному секторі [1]. Значний вплив вносять європейські та світові ініціативи, які спрямовані на декарбонізацію енергетичних систем (холодильних установок) та поступову відмову від холодоагентів із високим GWP потенціалом глобального потепління. Підвищення енергоефективності холодильних установок розглядається як технічне завдання, так і як пріоритетний компонент сталого розвитку та оптимізації об'єктів. Холодильні установки, які працюють на природному холодоагенті CO₂ (R744), які активно впроваджуються як у комерційному секторі так і у промисловому. Однак однією з визначальних проблем таких систем є підвищене енергоспоживання, особливо в умовах високих температур навколишнього середовища.

Одним з напрямків вирішення цієї проблеми є використання технології pressure exchanger (PX), розробленої компанією *Energy Recovery*. За словами віце-президента з "CO₂ Engineering" Кюо-Чіанг Чена (Guoqiang Chen, Casey Chan), дана технологія дозволяє суттєво знизити енергоспоживання холодильних установок за рахунок рекуперації енергії тиску [2].

Технологія PX була спочатку розроблена для установок опріснення води і за понад 25 років експлуатації довела свою ефективність. У світі встановлено більше 30 000 таких пристроїв, що підтверджує їхню надійність та промислову придатність. Ефективність перетворення енергії в цих системах досягає 98,5%, що є надзвичайно високим показником для енергетичних установок [2].



Рисунок 1 - Пристрій pressure exchanger

Пристрій PX (Рис.1) є апаратом рекуперації енергії, може використовуватися для підвищення енергоефективності холодильних установок на вуглекислоті за рахунок відновлення енергії тиску (by recovering pressure energy), яка може бути втрачена у процесі розширення. Пристрій згідно конструктивним особливостям складається з чотирьох основних керамічних компонентів, циліндричного корпусу, та одного обертового елементу (ротору) з множиною внутрішніх каналів. Ротор обертається всередині керамічної гільзи зі швидкістю приблизно від 100 до 1600 об/хв, що дозволяє пристрою ефективно працювати при різних навантаженнях системи. Завдяки простій конструкції та відсутності складних механічних компонентів, таких як поршні, клапани або ущільнення, PX характеризується високою надійністю та тривалим терміном експлуатації [3]. Робота

РХ базується на безпосередній передачі енергії тиску між двома потоками робочого середовища, потоком високого тиску після газоохолоджувача, та потоком низького тиску, що повертається з випарника. У традиційних холодильних установках на R744 зниження тиску відбувається через клапан високого тиску (HPV), де значна частина енергії втрачається. РХ замінює цей процес, одночасно виконуючи дві функції, розширення потоку високого тиску (аналогічно клапану), та стискання потоку (аналогічно компресору). Всередині ротора розташовані прямі канали (протоки). Під час обертання ротора потік CO₂ високого тиску подається з одного боку ротору, потік CO₂ низького тиску подається з протилежного боку, при суміщенні каналів із вхідними отворами відбувається короточасна взаємодія потоків. У цей момент у каналі виникає хвиля тиску (ударна хвиля). Ця хвиля передає енергію тиску від потоку високого тиску до потоку низького тиску. У результаті потік високого тиску втрачає тиск та надходить у ресивер. У потоку низького тиску підвищується тиск та робоча речовина частково стискається перед компресором. Цей процес відбувається безперервно під час обертання ротора, забезпечуючи динамічний обмін тиском без додаткових витрат електроенергії. РХ забезпечує «безкоштовне» стискання холодоагенту, зменшуючи навантаження на компресор. Це призводить до зниження енергоспоживання, підвищення ефективності системи, та зменшення викидів вуглецю.

Експериментальні дослідження, проведені у Массачусетському технологічному інституті, показали, що при використанні пристрою РХ, виявлено енергопотенціал **30–40%** [2] за певних умов експлуатації. Подальші польові випробування підтвердили ці результати. Зокрема, в одному з супермаркетів мережі *Viata* (США) було зафіксовано економію **19%** у зимовий період, та до **30%** у літній період у реальних умовах експлуатації. Важливо зазначити, що ці результати були отримані навіть при використанні адіабатичного охолодження, що свідчить про додатковий енергопотенціал при структурній оптимізації холодильної установки.

Впровадження пристрою *pressure exchanger* у холодильних установках на R744 демонструє значний потенціал зниження енергетичних витрат за рахунок ефективного використання енергії тиску (*by recovering pressure energy*), яка в традиційних схемах втрачається. Відповідно до отриманих результатів вченими, можливо відмітити, що навіть часткове підвищення ефективності роботи холодильної установки дозволяє досягти економічного ефекту, що є важливим показником для торговельних об'єктів із високим рівнем енергоспоживання.

Крім економічної доцільності, використання РХ пристрою сприяє підвищенню загальної технічної ефективності холодильних установок, також зменшенню навантаження на основні елементи системи. Це, у свою чергу, дає позитивний результат на надійність роботи обладнання, та знижує витрати на його обслуговування. Отже, застосування технології *pressure exchanger* можна розглядати як перспективний напрям модернізації сучасних холодильних установок, який поєднує у собі три важливих показника для промисловості: енергоефективність, економічну ефективність та екологічну безпеку.

Список інформаційних джерел

1. *Regulation - EU - 2024/573 - EN - EUR-Lex.* (2024). on fluorinated greenhouse gases, amending Directive (EU) 2019/1937 and repealing Regulation (EU) No 517/2014 (Text with EEA relevance) Europa.Eu. Retrieved April 6, 2026, from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX%3A32024R0573>
2. Chen G.-C., Matthews J. *PX G1300: From Desalination Plants to CO₂ Refrigeration Systems*
3. Energy Recovery Technical Interview (Refrigeration Podcast)

Науковий керівник: Яковлева О.Ю., к.т.н., доцент, доцент кафедри холодильних установок і кондиціонування повітря ННІ холоду, кріотехнологій та екоенергетики ім. В.С. Мартиновського ОНТУ

УДК 621.565

ПРАКТИЧНИЙ ДОСВІД ВИКОРИСТАННЯ АДІАБАТИЧНО-ВИПАРНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ДРАЙКУЛЕРІВ ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИН

Книш С.В.¹, аспірант, serge@leacond.od.ua, Желіба Ю.В.¹, Книш А.С.¹, Желіба Т.О.²

¹Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

²НУ «Одеська політехніка», м. Одеса

Парокомпресійні холодильні машини (ПХМ) з повітряними теплообмінниками мають широке використання. Це зумовлено простотою монтажу та систем керування, компактністю обладнання, автономністю роботи та оптимальними витратами на експлуатацію й технічне обслуговування. Проте ефективність таких установок залежить від параметрів зовнішнього повітря. Підвищення температури повітря на вході до теплообмінника призводить до зростання температури та тиску конденсації холодоагенту. Як наслідок, збільшується споживана потужність компресора при практично незмінній холодопродуктивності, знижується об'ємна холодопродуктивність робочої речовини. Це спричиняє зниження холодильного коефіцієнта (ϵ), зростання пікових електричних навантажень і може наближати обладнання до граничних режимів експлуатації, особливо влітку.

Ефективним та відомим способом підвищення енергоефективності ПХМ є застосування адіабатично-випарного охолодження, суть якого полягає у зниженні температури повітря, що надходить до конденсатора або сухого охолоджувача, шляхом його зволоження. У результаті температура повітря може наближатися до температури вологого термометра. Відомо, що зниження температури конденсації лише на 1 °C дозволяє зменшити енергоспоживання на 2-4 % [1], що свідчить про високу чутливість холодильного циклу до умов тепловідведення.

Ефективність методу визначається психрометричними характеристиками повітря. Найбільший ефект досягається при низькій відносній вологості, коли різниця між температурами сухого та вологого термометрів максимальна. Температура конденсації може бути знижена на 5-15 °C, що підвищує ϵ на 10-30 %.

Існує кілька основних підходів до практичної реалізації:

1. Пряме зволоження теплообмінної поверхні, коли вода подається безпосередньо на конденсатор. Це забезпечує максимальний ефект зниження температури конденсації на 8-12 °C [2], але супроводжується ризиками корозії та утворення накипу.
2. Попереднє охолодження повітря, яке здійснюється за допомогою форсунок або зволожувальних касет перед теплообмінником. Такий підхід є надійним і дозволяє знизити температуру повітря на вході в конденсатори та драйкулери на 5-10 °C [3].
3. Гібридні системи, які поєднують сухий та адіабатичний режими роботи. За звичайних умов вони працюють як традиційні повітряні охолоджувачі, а коли температура зовнішнього повітря підвищується, вмикається режим випарного охолодження, що знижує температуру конденсації в середньому на 6-12 °C, забезпечуючи баланс між енергоефективністю та витратами води.

Авторами доповіді провели експериментальні дослідження на двох промислових холодильних установках Daikin EWWQC16BXS в Одеській області та підтвердили ефективність адіабатичних систем охолодження повітря з використанням сухих градирень. Було зафіксовано стійке зниження температури конденсації холодоагенту (рис. 1), що супроводжувалося підвищенням холодильного коефіцієнта (рис. 2) та холодопродуктивності установок. Також зафіксовано і зниження енергоспоживання вентиляторів завдяки зменшенню необхідної витрати повітря в умовах покращеного відведення теплоти. Продемонстровано, що комбінований ефект досягається завдяки одночасному зниженню проміжної температури холодоагенту та оптимізації потоку повітря через сухі градирні, що є особливо важливим у періоди пікових температур [4].

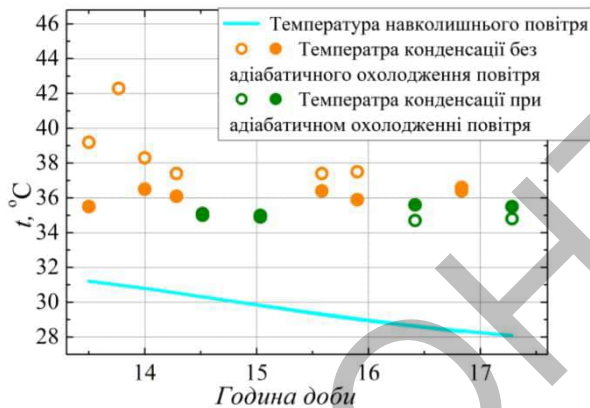


Рисунок 1 – Залежність температури конденсації від часу у двох сухих градирнях за різних режимів роботи (21.08.2025 р.)

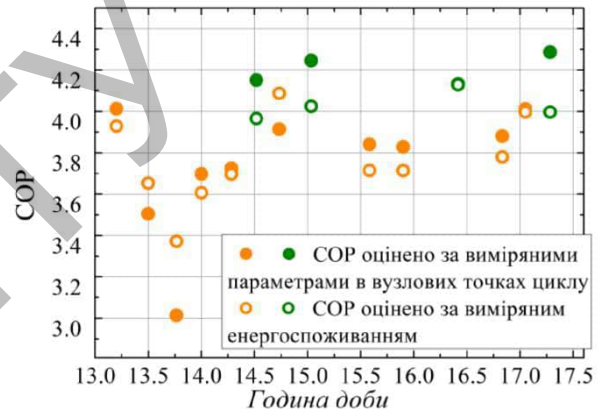


Рисунок 2 – Залежність ϵ від часу двох холодильних установок за різних режимів роботи (21.08.2025 р.)

Отримані авторами доповіді результати узгоджуються з результатами експериментів, проведених іншими дослідниками в цій галузі, підтверджуючи ефективність запропонованих підходів. Зокрема, застосування адіабатичного попереднього охолодження повітря дозволяє знизити енергоспоживання систем кондиціонування приблизно на 18 % [2]. Щодо сухих градирень, було продемонстровано значне зниження температури охолоджуваної рідини порівняно з режимом сухого охолодження та підвищення холодильного коефіцієнта на 4-8 %, економію енергії до 13,5 % [3]. У деяких дослідженнях зафіксовано підвищення холодильного коефіцієнта теплових насосів на понад 20 % [5].

Проте використання адіабатичного охолодження на практиці супроводжується низкою обмежень. До яких належать: залежність ефективності від вологості повітря, необхідність контролю якості води, ризик корозії та утворення накипу, а також додаткові витрати води. Дослідницька експлуатація системи в літній період визначила, що дуже важливим є правильний та коректний вибір режимів роботи системи зволоження з урахуванням усіх чинників впливу.

Отже, адіабатично-випарне охолодження є ефективним інструментом підвищення енергоефективності холодильних машин за рахунок зниження температури конденсації. Найбільш перспективними для практичного використання є гібридні системи з адаптивним керуванням, які дозволяють досягти значного енергозбереження при мінімізації експлуатаційних недоліків і забезпечують ефективну роботу в умовах змінного клімату. У доповіді обговорюються перспективи використання таких систем для кліматичних умов Одеського регіону, методики систем керування їх роботою, обмежуючі чинники та економічна доцільність систем у залежності від кліматичних умов та вартості водних ресурсів.

Література

1. Jacob, T.A. et al. (2021) Evaluation of hybrid evaporative-vapor compression air conditioners for different global climates. *Energy Conversion and Management*, 249, 114841.
2. Yu F. W., Chan K. T. Improved energy performance of air-cooled chiller system with mist pre-cooling // *Applied Thermal Engineering*. – 2011. – Vol. 31, no. 4. – P. 537-544.
3. Lucas M., Martínez P., Cutillas C. G., Martínez P. J., Ruiz J., Kaiser A. S., Zamora B. Experimental optimization of the thermal performance of a dry and adiabatic fluid cooler // *Applied Thermal Engineering*. – 2014. – Vol. 69, no. 1–2. – P. 1-10.
4. Книш, С. (2025). Експериментальна оцінка ефекту впровадження системи адіабатичного охолодження повітря драйкулерів холодильних установок у кліматичних умовах Одеської області. *Refrigeration Engineering and Technology*, 61(4), 312-318.
5. Tissot J., Boulet P., Trinquet F., Fournaison L., Lejeune M., Liaudet F. Improved energy performance of a refrigerating machine using water spray upstream of the condenser // *International Journal of refrigeration*. – 2014. – Vol. 38. – P. 93-105.

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ В АВТОМОБІЛЯХ

Гудз О.А., бакалавр ОНТУ Римский О. Є. бакалавр ОНТУ

На відміну від побутових систем, автокондиціонер працює в умовах постійної вібрації, перепадів температур та впливу дорожніх реагентів.

Використання гнучких шлангів замість жорстких трубок (у місцях з'єднання з двигуном) підвищує ризик мікробитоків холодоагенту.

В автомобілях компресор найчастіше приводиться в дію механічно через ремінь від колінчастого вала, що безпосередньо впливає на витрату палива та динаміку авто.

Перехід від старого фреону (R134a) до екологічного (R1234yf) зумовлений нормами ЄС, що здорожує обслуговування, але зменшує вплив на глобальне потепління.

Природний витік холодоагенту (до 8–10% на рік) через гумові ущільнювачі є нормою і потребує регулярної дозаправки.

Утворення конденсату на випарнику створює вологе середовище для бактерій (легіонел), що вимагає регулярної антисептичної обробки та заміни фільтра салону.

Кондиціонер виконує функцію осушення повітря, що є найшвидшим способом усунення запотівання вікон у дощ чи туман.

В електрокарах компресор працює від високої напруги (електричний привід), що дозволяє кондиціонеру працювати навіть при вимкненому авто.

Використання системи як «теплого насоса» дозволяє економити до 30% заряду батареї при обігріві салону взимку.

Ефективність охолодження конденсатора (зовнішнього радіатора) на 70% залежить від набігаючого потоку повітря.

У міських заторах основне навантаження припадає на електричні вентилятори, що підвищує ризик перегріву двигуна, оскільки радіатор кондиціонера стоїть першим у «касеті» радіаторів.

В автокондиціонерах використовується спеціальна синтетична олива (PAG), яка дуже швидко вбирає вологу з повітря.

Розглянуті особливості систем кондиціювання повітря — це складна інженерна система, що працює в агресивному середовищі (вібрації, бруд, перепади температур). Це вимагає від власника регулярного професійного обслуговування, а не лише дозаправки фреоном.

Кондиціювання безпосередньо впливає на швидкість реакції водія (через підтримання оптимальної температури) та видимість на дорозі (шляхом осушення повітря). Водночас питання гігієни випарника та чистоти фільтрів залишаються пріоритетними для здоров'я пасажирів.

Перехід на нові типи холодоагентів та впровадження систем «теплого насоса» в електромобілях свідчать про те, що майбутнє галузі — за максимальною енергоефективністю та мінімізацією впливу на довкілля.

Ми вважаємо, що система кондиціювання автомобіля дуже необхідна, і особливо в авто «вічного» літа, що експлуатуються в країнах. Але фреонова система кондиціювання дуже неекологічна, хоча і має, порівняно з іншими системами охолодження, високий ККД, невелику металоємність, не потрібні великі потужності на привід агрегатів, невисока вартість. Абсорбційна та повітряна система кондиціювання поки в автомобілях не застосовується у зв'язку з тим, що вони мають велику металоємність, вимагають великих потужностей на привід компонентів, мають невеликий ККД.

Але ці системи екологічно чисті і навколишнє середовище мало впливають, рахунок того, що застосовується фреон.

Останнім часом людство починає замислюватися про світ у якому воно живе і щоб не втратити його залишки починає вживати заходів щодо усунення фреонових та інших систем, що руйнують озоновий шар. І тому будемо сподіватися на те, що що будуть винайдені або доопрацьовані системи охолодження, які будуть замінювати фреонові

Список літератури

- 1 Єрмаков А.Ю. "Сучасні технології кондиціонування повітря у транспортних засобах." — Харків: ХНУ імені Каразіна, 2021.
- 2 Довгаль В.П. "Управління кліматом у салоні автомобіля." — Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2014.
3. Федеральні стандарти і нормативи щодо систем кондиціонування в автомобілях, ДБН В.2.5-72, ДСТУ 4274-2004.
4. Неофітова Н.А. "Енергозбереження в системах кондиціонування автомобілів." — Київ: Енергетика України, 2022.

Наукові керівники: Жихарєва Н. В., к.т.н. доц., ОНТУ Козут В.О. к.т.н. доц., ОНТУ

СЕКЦІЯ №2 –НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНІ ХОЛОДИЛЬНІ І КРІОГЕННІ МАШИНИ

ДОСЛІДЖЕННЯ СОРБЦІЙНОГО ПОДІЛУ НЕОНУ НА ІЗОТОПИ МЕТОДОМ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ХРОМАТОГРАФІЇ

Терещенко О.В., бакалавр ОНТУ, м. Одеса

З розвитком нових технологій з'явилася необхідність розширення виробництва чистих і особливо чистих стабільних ізотопів інертних газів, таких як: гелій, неон, аргон, криптон, ксенон. Зокрема, дедалі ширше застосування знаходять стабільні ізотопи неону.

Газова суміш ізотопів неону (^{20}Ne та ^{22}Ne) є активним середовищем лазерного гіроскопа, що застосовується в навігаційних системах. Робота гіроскопа ґрунтується на ефекті Жоржа Саньяка. Сутність ефекту полягає в появі фазового зсуву зустрічних електромагнітних хвиль в кільцевому інтерферометрі, що обертається. Такі гіроскопи не чутливі до механічних впливів та мають стабільний масштабний коефіцієнт.

Ізотоп неону ^{22}Ne застосовується для синтезу трансуранових хімічних елементів. Такі елементи як курчатовій, nobelій, францій та астат у природі практично не зустрічаються, проте існує можливість їх одержання внаслідок ядерних реакцій. Реакції протікають в результаті синтезу ізотопів неону та ряду важких радіоактивних ізотопів шляхом бомбардування останніх ізотопами неону ^{22}Ne .

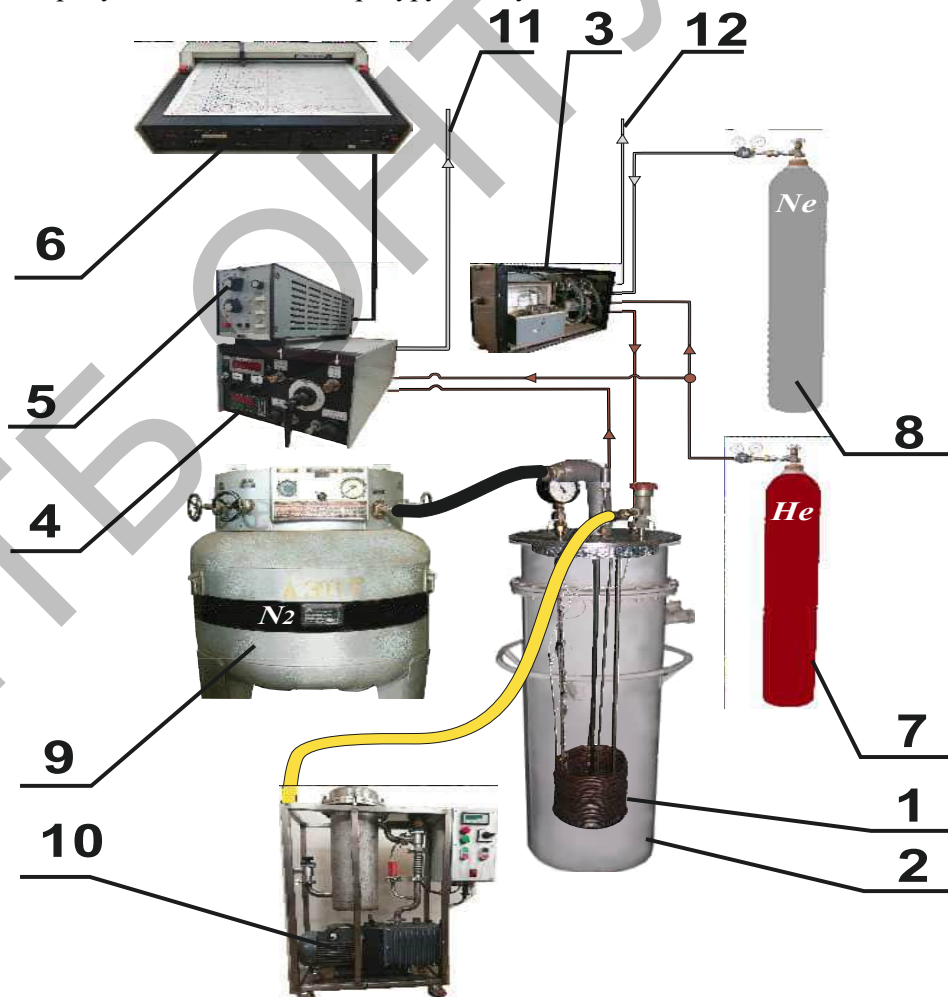
Ізотоп неону ^{21}Ne має великий інтерес у медицині, зокрема застосовується як біомаркер при МРТ-діагностиці легень, печінки, мозку, кровоносної та лімфатичної систем. Завдяки своїм атомним і фізичним властивостям допускається застосування його як альтернатива ізотопу ^3He і ^{129}Xe . Застосування таких стабільних ізотопів, що не володіють радіоактивним випромінюванням, є безпечним для людини і дозволяє багаторазово проводити процедуру МРТ-діагностики без шкоди для пацієнта. Крім того, застосування таких біомаркерів зменшують у десятки разів робоче магнітне поле томографа, що особливо важливо під час проведення досліджень на головному мозку.

Ще однією особливістю виробництва ізотопів неону в перспективі є, можливо, нижча вартість. Це зумовлено тим, що з усіх інертних газів саме ізотопи неону більш доступні. Оскільки відомо, що чим важчий хімічний елемент, тим більш трудомісткий процес його поділу у зв'язку з великою кількістю ізотопів. Так, наприклад: криптон включає п'ять стабільних ізотопів, а ксенон – сім. У випадку з більш легким елементом, таким як гелій, який містить всього два ізотопи (^3He і ^4He), основною проблемою в отриманні затребуваного ізотопу гелію ^3He є дуже низький вміст останнього в ізотопній суміші природного складу.

В основі дослідження лежить комплексний підхід до розгляду та дослідження системи поділу неону на ізотопи. Попередньо проведено огляд науково-технічної літератури для ознайомлення з існуючими та застосовуваними адсорбційними матеріалами, виділено технічні рішення, що обмежують технологію, та проведено пошук можливих шляхів їх вирішення. Зроблено детальне порівняння з технологіями, що конкурують.

Для дослідження технології сорбційного поділу ізотопів неону створено спеціальну лабораторну установку, яка наведена на рисунку. В результаті проведених експериментів на установці при варіаціях різних параметрів проведено дослідження ефективності розподілу неону на ізотопи. Знайдено значення параметрів, за яких може ефективно протікати процес поділу. Доведено можливість поділу неону на ізотопи хроматографічними методами за низьких температур. Вивчено вплив температури на процес розподілу.

Надалі дані напрацювання можуть бути використані для оптимізації процесу хроматографічного поділу. Пропонується використовувати мікропористі та ультра мікропористі сорбенти для того, щоб максимально посилити топологічні ефекти поверхні, зокрема ефект капілярної конденсації, і за рахунок цього спробувати підняти температуру поділу.



*Кріогенна експериментальна хроматографічна установка у зборі:
 1 – хроматографічна колонка; 2 – кріостат; 3 – БДГ-115; 4 – компаратор;
 5 – БІД-36; 6 – самопишучий пристрій; 7 – балон із газом-носієм гелієм;
 8 – балон із неоном; 9 – ємність із рідким азотом; 10 – вакуумний насос 2НВР-5ДМ;
 11 – лінія контролю об'ємної швидкості газу-носія з колонки;
 12 – лінія контролю витрати дозованого неону*

*Науковий керівник: Симоненко Ю.М., д.т.н., завідувач
 кафедри кріогенної техніки ОНТУ*

БАТАРЕЯ КАРНО – ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В СИСТЕМАХ ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ

Довгаль Є.В., Стоян Г.О., Кісса Д.В., Кушніров Д.О., бакалаври ОНТУ, м. Одеса

Зростання використання відновлювальних джерел енергії в електромережі визначає критичну необхідність ефективних систем зберігання енергії. У більшості випадків отримання електроенергії з відновлювальних джерел енергії носить переривчастий характер і не узгоджується з попитом. Передові технології необхідні для збереження надлишкової електроенергії та забезпечення її доступності в періоди високого попиту та/або низького виробництва. Ця залежність від систем зберігання енергії, що зростає, має вирішальне значення для підвищення стабільності мережі, підвищення енергоефективності. Серед перспективних технологій значну увагу привернула «батарея Карно» як система зберігання енергії великого масштабу та тривалої дії.

Концепція акумулювання теплової енергії гідроакумулюючими електростанціями існує вже кілька десятиліть. Електрична енергія, що живить парокомпресорний тепловий насос, перетворюється на теплову енергію (корисний ефект ТН) та акумулюється з використанням різних матеріалів. Накопичена теплова енергія згодом перетворюється назад на електрику в органічному циклі Ренкіна (ОЦР).

Дослідження на рівні технологічної готовності проводилися у період 1970-1990 рр. Перших великих наукових розробок було досягнуто у 2000-2010 рр. У цей час серйозно розглядається акумулювання теплової енергії на електростанціях, Досягнення в технологіях теплових насосів та органічних циклів Ранкіна, а також у матеріалах для високотемпературного зберігання зробили концепцію більш здійсненою.

Термін «батарея Карно» було запропоновано у 2018 році Німецьким центром аерокосмічної техніки для опису систем, які зберігають електричну енергію у вигляді теплової енергії (при постійній температурі) та згодом перетворюють її назад в електрику. Кілька німецьких наукових інститутів, університетів та компаній запустили дослідницькі проекти, присвячені різним конфігураціям батарей Карно, робочим рідинам та матеріалам для зберігання теплової енергії. Поточний рівень технологічної готовності батарей Карно. Продовжуються дослідження щодо підвищення термодинамічної ефективності та комерційної доцільності. Як альтернатива парокомпресорним тепловим насосам розглядається адіабатична система зберігання енергії на основі зрідженого повітря.

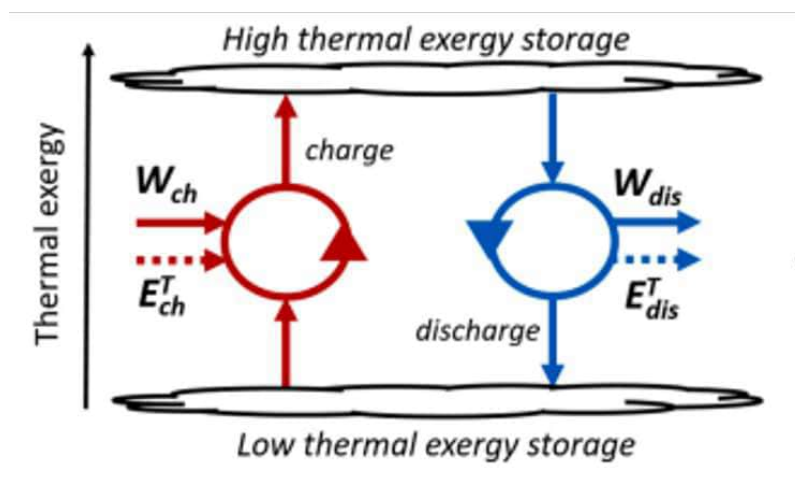


Рисунок 1. Принципова термодинамічна схема «батарей Карно»

Принцип роботи батареї Карно з погляду термодинаміки показано на рис. 1. Додатковим варіантом може бути використання відпрацьованого тепла і/або генерація відпрацьованого холоду, що описуються потоками теплової ексергії ET_{ch} і ET_{dis} відповідно. За допомогою бази даних Scopus було виявлено близько 270 статей (опублікованих англійською станом на квітень 2025 р.). Лідерську роль у публікаціях відіграє Німеччина

Дані, які часто згадуються в оглядових статтях: бажана ефективність повного циклу 50-70 % залежить від використовуваних технологій та умов експлуатації; питомі капітальні витрати перебувають у діапазоні 100–500 \$/кВт·год залежно від масштабу; термін служби 20-30 років; вплив на довкілля класифікується як «низький». Усереднена вартість рекуперованої електроенергії варіюється в залежності від масштабу, тривалості зберігання, матеріалів теплового акумулювання та економічних змінних, що використовуються в економічному аналізі.

На рис. 2 показано принципову технологічну схему батареї Карно, що включає парокompresорний тепловий насос (ТН) та органічний цикл Ранкіна (ОЦР). ТН містить випарник, компресор, дросельний пристрій та конденсатор. ОЦР містить турбіну, конденсатор, насос та випарник. Ці підсистеми (ТН та ОЦР) з'єднані системою акумулювання теплової енергії (АКЕ), що включає високотемпературний та низькотемпературний резервуари. АКЕ зберігає високотемпературну теплову енергію.

Термодинамічні цикли ТН та ОЦР надано на рис.3 у діаграмі стану $T-s$ робочої речовини у конкретному температурному режимі. Цикл ТН, зображений контуром (1-2-3-4), працює під час зарядження акумулятора, цикл ОЦР, зображений контуром (9-10-11-12), працює під час розрядження. Під час зарядження електрична енергія перетворюється на теплову. Розрядження, у свою чергу, здійснюється ОЦР, використовуючи теплову енергію як вхідний параметр для зворотного перетворення на електрику

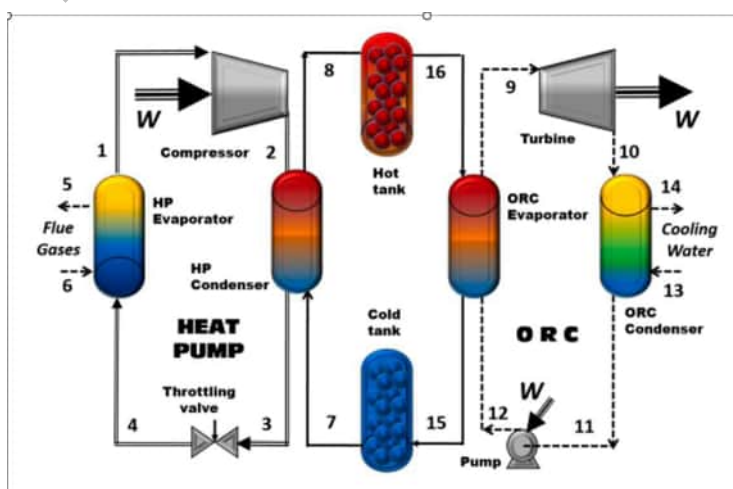


Рисунок.2. Принципова технологічна схема «батареї Карно»

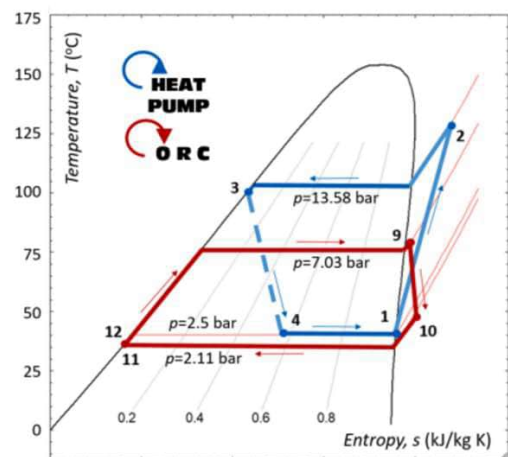


Рисунок 3. Цикли ТН та органічного Ранкіна в діаграмі $T-s$

У якості робочого тіла вибрано R245fa, а як середовище зберігання – вода. Вибір R245fa засновано на його застосуванні в системах кондиціонування повітря, теплових насосах та системах ОЦР. Він має добрі співвідношення термодинамічних властивостей та ефективності для систем ОЦР (вихід з турбіни у перегрітому стані). R245fa використовують в батареях Карно, оскільки його термодинамічні властивості роблять його ефективним за низьких і середніх температур циклів. Найвища ексергетична ефективність усієї системи, а також найменша питома вартість спостерігаються при температурі на вході в турбіну 100 °C для всіх розглянутих періодів зарядження/розрядження. Батареї Карно

призначено для тривалого зберігання енергії. Час зарядження зазвичай становить від 6 до 12 годин, залежно від ємності системи акумулювання теплової енергії. Час розрядження становить від 6 до 12 години, потенційно до 24 годин.

*Науковий керівник: Морозюк Л.І., д.т.н., професор
кафедри кріогенної техніки ОНТУ*

АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ОДНОЧАСНОГО ВИРОБНИЦТВА ЕНЕРГІЇ І ХОЛОДУ

Опарівський Н.В., аспірант ОНТУ, м. Одеса

Добре відомо, що практично будь-яка холодильна установка може слугувати для одночасного охолодження і нагрівання. Однак такий режим роботи холодильних установок використовується дуже рідко, головним чином через те, що потреби в теплі і холоді практично рідко коли збігаються. Влітку зазвичай переважає потреба в холоді, а взимку потрібно тепло для опалення будівель і гарячого водопостачання.

У зв'язку зі збільшенням частки електроенергії, одержуваної від поновлюваних джерел тепла, які відрізняються своєю непостійністю, виробництво електроенергії часто не збігається з потребою в ній. Тому не тільки потреби в теплі і охолодженні, а й потреби в електроенергії – непостійні.

Виходом з цієї ситуації є створення установок, які можуть виробляти електроенергію, тепло і холод як одночасно, так і окремо. Причому, бажано, щоб цим вимогам задовольняла одна установка, а не кілька, які включаються або вимикаються у міру виникнення потреби в тому чи іншому вигляді енергії, тепла або холоду. Це дозволить, по-перше, зменшити термін окупності таких установок за рахунок того, що вони будуть працювати практично безперервно, змінюючи лише кількість і якість виробленої енергії, по-друге, поліпшити енергетичні показники самих установок, так як при їх експлуатації не доведеться витратити час і енергію на вихід установки в необхідний режим роботи.

На базі циклу Каліни була запропонована схема тригенераційної установки для виробництва механічної (електричної) енергії, тепла і холоду. Розрахунки запропонованої тригенераційної установки для виробництва електроенергії, тепла і холоду проводилися в потоковому симуляторі СОСО ChemSep (рис. 1). На схемі також представлені основні результати розрахунку установки в «зимовому» режимі роботи, при якому відсутня необхідність в холоді, але є велика потреба в теплоті для опалення та гарячого водопостачання

Перш, ніж перейти до аналізу результатів розрахунку запропонованої установки, слід відповісти на цілком закономірне питання: навіщо потрібно відводити тепло, придатне для обігріву або гарячого водопостачання?

Для відповіді на це питання потрібно вказати, що підводиться до установки і відводиться від неї тепло різної якості. Так, до установки надходить тепло від димових газів з початковою температурою не нижче 240 °С, а відводиться тепло в діапазоні температур від 120 до 70 °С. Завдяки різним температурним рівнями підведеного і відведеного тепла, на кожен кДж відведеного тепла установка виробляє деяку кількість електричної енергії.

В Україні опалення і гаряче водопостачання багатоквартирних будинків найчастіше здійснюється централізовано від газових котелень.

Максимальна температура води на виході з водогрійного котла при робочому тиску – це основний параметр для класифікації котлів як небезпечних об'єктів. В Україні максимальна

температура води на виході з водогрійних котлів, що застосовуються для опалення та гарячого водопостачання житлових будинків, чітко регламентується і не повинна перевищувати 115 °С.

Нагрівати воду до температури 115 °С, спалюючи природний газ, з термодинамічної точки зору вкрай нераціонально. Набагато вигідніше було б одночасно виробляти тепло і електроенергію на міні-ТЕЦ. Крім більш високих капітальних витрат, недоліком міні-ТЕЦ є те, що в літній час їх експлуатація економічно недоцільна, а тривалі простой устаткування призводять до істотного збільшення терміну їх окупності.

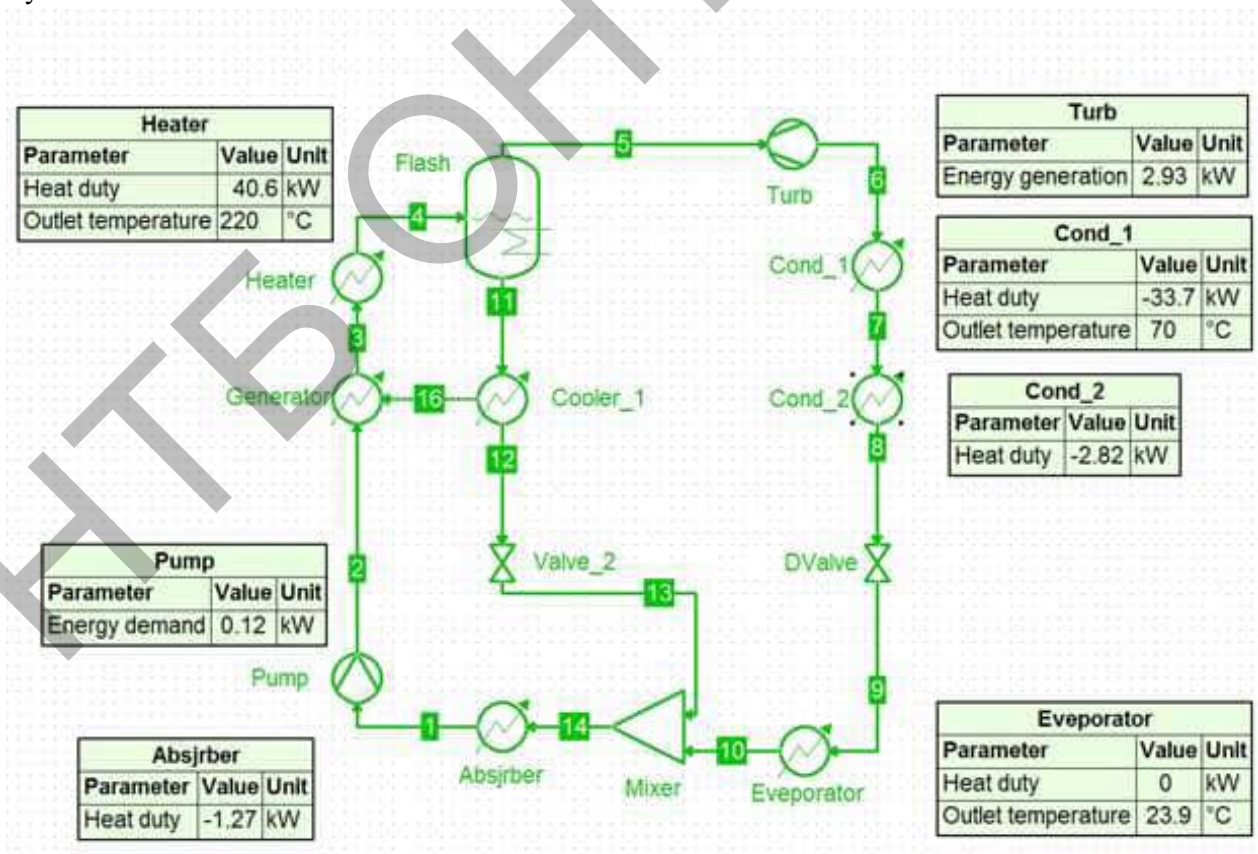


Рисунок 1 – Розрахункова схема запропонованої установки в потоковому симуляторі COCO ChemSep

Запропонована установка може працювати цілорічно, тому капітальні витрати на її створення окупляться набагато швидше, ніж витрати на міні-ТЕЦ. Крім цього, установка дозволяє одночасно отримувати відносно невелику кількість тепла для гарячого водопостачання і холод, придатний для кондиціонування приміщень в літній період.

Всі розрахунки проводилися при витраті водоаміачної суміші на виході з насоса – 1 моль/с. У «зимовому» режимі роботи температура водоаміачної суміші на виході з котла прийнята рівною 220 °С, а тиск суміші – 44 бар. При цьому в котлі до водоаміачної суміші підводиться 40,6 кВт тепла, турбіна виробляє 2,93 кВт механічної енергії і в теплообміннику відводиться 33,7 кВт тепла для опалення та гарячого водопостачання. Таким чином, марно в навколишнє середовище викидається всього лише 4 кВт тепла. Якщо вважати, що скидання тепла в навколишнє середовище обумовлено роботою теплової машини, що виробляє механічну енергію, то, знаючи кількість виробленої енергії і кількість тепла, відданого в навколишнє середовище, можна оцінити термічний ККД даної теплової машини. Цей ККД виходить рівним 0,42, що є досить високим показником для теплових двигунів.

«Літній» режим роботи запропонованої установки розраховувався виходячи з того, що влітку є потреба у всіх трьох видах енергії. Хоча потрібно враховувати, що влітку потреба в теплі обмежена, так як вона необхідна тільки для гарячого водопостачання. На відміну від «зимового» режиму, в «літньому» режимі з'являється потреба в холоді, наприклад, для кондиціонування повітря.

Для підвищення теплового навантаження випарника в «літньому» режимі роботи температура нагріву водоаміачної суміші в котлі прийнято рівною 155 °С, тиск суміші, що надходить в турбіну, складає 25 бар. Розрахунки проводилися при витраті робочого тіла на виході з насоса 1 моль/с. При такій витраті робочого тіла в котлі до нього підводиться 10,7 кВт первинного тепла, турбіна виробляє 0,63 кВт механічної енергії. У випарник відводиться 2,62 кВт тепла при температурі від -2 до 5 °С, а в теплообміннику – 3,87 кВт тепла при температурі вище 70 °С. У навколишнє середовище від конденсатора і абсорбера скидається 8,9 кВт тепла.

*Науковий керівник: Грудка Б.Г., к.т.н., доцент
кафедри кріогенної техніки ОНТУ*

ВИКОРИСТАННЯ ХОЛОДУ У ВИНОРОБНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

Яцяк В.С., бакалавр ОНТУ, м. Одеса

Холод є одним із найважливіших технологічних факторів у виноробній промисловості, оскільки він безпосередньо впливає на перебіг фізико-хімічних та біохімічних процесів, що визначають якість кінцевого продукту. Його застосування дозволяє ефективно керувати процесами ферментації, стабілізації та зберігання вина, а також забезпечує збереження органолептичних характеристик продукції. У сучасному виноробстві холод використовується практично на всіх етапах виробництва, починаючи від первинної обробки винограду і закінчуючи витримкою та реалізацією готового вина. Завдяки розвитку холодильних технологій стало можливим точно регулювати температурні режими, що раніше залежали виключно від природних умов.

Одним із найважливіших процесів є спиртове бродіння, під час якого дріжджі перетворюють цукри виноградного соку на етиловий спирт. У процесі бродіння виділяється значна кількість тепла, що може призводити до перегріву сусла і погіршення якості вина. Для запобігання цьому застосовуються системи охолодження, які забезпечують підтримання оптимальної температури бродіння для білих вин — приблизно 18-22 °С, для червоних — 20-30 °С. У виробничих умовах застосовуються спеціальні ферментаційні резервуари з охолоджувальними сорочками або внутрішніми теплообмінниками, через які циркулює холодоносій. Це дозволяє підтримувати оптимальну температуру для різних типів вин і забезпечує формування бажаного аромату та смаку.

Контроль температури дозволяє зберегти ароматичні властивості вина, запобігти зупинці бродіння та забезпечити стабільність процесу.

Важливим етапом є холодова стабілізація вина, яка передбачає його охолодження до температур 0...-4 °С. У результаті цього процесу відбувається кристалізація винного каменю, що дозволяє уникнути утворення осаду у пляшці. Такий підхід покращує прозорість вина і підвищує його товарні характеристики. У сучасних умовах холодова стабілізація здійснюється за допомогою холодильних установок, що дозволяє проводити цей процес незалежно від пори року.

Охолодження відіграє важливу роль і під час зберігання вина. Для збереження якості продукції необхідно підтримувати стабільний температурний режим 10-15 °С і оптимальну вологість близько 70%.. Порушення температурного режиму може призвести до погіршення смаку, втрати аромату та загального зниження якості вина. Саме тому використовуються спеціальні винні холодильники та кліматичні камери.



Процес охолодження та контроль температури бродіння вина у ферментаційних резервуарах

У сучасній виноробній промисловості застосовуються різноманітні системи холодопостачання, серед яких найбільш поширеними є гліколеві установки, чилери та пластинчасті теплообмінники. Ці системи забезпечують ефективне відведення тепла і точний контроль температури на всіх стадіях виробництва. Використання автоматизованих систем управління дозволяє оптимізувати енергоспоживання та підвищити ефективність технологічних процесів. Крім того, впровадження сучасних холодильних технологій сприяє зниженню витрат і підвищенню екологічності виробництва.

Особливого значення набуває використання холоду в умовах зміни клімату, коли підвищення середньорічних температур ускладнює традиційні методи виноробства. У таких умовах холодильні технології стають необхідним інструментом для забезпечення стабільності виробництва і збереження високої якості продукції. Вони дозволяють компенсувати вплив зовнішніх факторів і забезпечити контрольовані умови для всіх технологічних процесів.

Таким чином, використання холоду у виноробній промисловості є невід'ємною складовою сучасного виробництва вина. Воно забезпечує контроль над основними технологічними процесами, сприяє підвищенню якості продукції та дозволяє адаптувати виробництво до сучасних умов. Застосування холодильних технологій відкриває нові можливості для вдосконалення виноробства та створення продукції, що відповідає найвищим стандартам якості.

*Науковий керівник: Яковлев Ю.О., к.т.н., доцент
кафедри криогенної техніки ОНТУ*

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ХОЛОДУ В МЕДИЦИНІ

Пугач В.О., бакалавр ОНТУ, м. Одеса

Холод давно використовується в медицині як ефективний терапевтичний засіб. Низькі температури допомагають зменшити біль, набряклість та запальні процеси, що особливо важливо при травмах, післяопераційних станах та хронічних захворюваннях. Сучасна медицина застосовує холодові методи у фізіотерапії, спортивній медицині, реабілітації та дерматології.

Вплив холоду може бути локальним — на конкретну ділянку тіла, або загальним — на весь організм, що робить його універсальним інструментом для лікування та профілактики. Використання холоду дозволяє активізувати природні механізми відновлення організму та знизити потребу в медикаментозних засобах.

Холод у медицині використовується як фізіотерапевтичний та лікувальний засіб протягом тривалого часу. Його застосування базується на фізіологічних ефектах, які виникають у відповідь на зниження температури тканин. Розглянемо основні параметри та особливості холодової терапії.

Контроль температурного режиму є ключовим фактором безпеки та ефективності процедур. Оптимальна температура залежить від мети лікування: для локальної кріотерапії використовуються пакети льоду або аплікатори з температурою від 0 °C до -10 °C, а для загальної кріотерапії у спеціальних камерах температура може знижуватися до -110...-160 °C.

Надмірно низькі температури або тривалість впливу понад рекомендовану межу можуть спричинити переохолодження тканин, місцеві опіки, порушення кровообігу або нервові розлади. Тому сучасні системи кріотерапії оснащені таймерами та сенсорами, що дозволяють регулювати і підтримувати потрібні параметри з високою точністю.

Локальна кріотерапія використовується для лікування травм, забоїв, розтягнень та післяопераційних набряків. Вплив холоду сприяє звуженню судин у зоні ушкодження, що зменшує крововиливи та набряк. Додатково холод знижує чутливість нервових закінчень, що забезпечує швидке зменшення болю.

Загальна кріотерапія впливає на весь організм і застосовується у спортивній медицині та реабілітації. Короткочасне перебування у кріокамері стимулює обмінні процеси, підвищує тонус м'язів, зміцнює імунну систему та покращує загальне самопочуття.

Кріохірургія є специфічною областю застосування холоду, де патологічні тканини видаляються за допомогою екстремально низьких температур. Метод дозволяє мінімізувати травматизацію здорових тканин, зменшити крововтрату та скоротити час реабілітації. Використовується для лікування бородавок, папілом, дрібних новоутворень шкіри та деяких онкологічних змін.

Холод має низку фізіологічних ефектів:

- звуження судин на місці впливу зменшує набряк та запалення;
- зменшення болю через уповільнення передачі нервових імпульсів;
- покращення мікроциркуляції після завершення процедури сприяє швидкій регенерації тканин;
- зниження метаболізму у пошкоджених тканинах запобігає подальшому ушкодженню клітин.

Переваги застосування холоду в медицині:

- безпечність при правильному застосуванні;
- швидкий терапевтичний ефект;
- універсальність — підходить для фізіотерапії, реабілітації, спортивної медицини та дерматології;
- можливість комбінування з іншими методами терапії.

Сучасні кріотерапевтичні кабінети та клініки оснащені спеціальним обладнанням: кріокамерами, аплікаторами для локального впливу, системами контролю температури та вентиляції. Ефективна

вентиляція та циркуляція холодного повітря забезпечують рівномірне охолодження тканин, що підвищує ефективність процедур та безпеку пацієнтів.

Окремої уваги заслуговує застосування холоду в кардіології та неврології. Контрольоване охолодження використовується при лікуванні після зупинки серця (терапевтична гіпотермія), що дозволяє зменшити ушкодження головного мозку та підвищити шанси на відновлення пацієнта. Також холод застосовується при мігренях та невралгіях для зниження больового синдрому.

Холод у медицині є ефективним і універсальним засобом лікування та реабілітації. Його застосування дозволяє зменшити біль, набряклість і запальні процеси, сприяє швидшому відновленню після травм та операцій, а також підвищує загальний тонус організму.

Впровадження сучасного обладнання для кріотерапії, кріохірургії та холодкових процедур — це вклад у якість медичних послуг, безпеку пацієнтів та ефективність лікування. Контроль параметрів впливу холоду дозволяє уникнути негативних наслідків і забезпечити стабільний та прогнозований результат терапії.

Холодові методи залишаються актуальними у спортивній медицині, фізіотерапії, реабілітації та дерматології, а їхнє застосування постійно вдосконалюється завдяки сучасним технологіям і науковим дослідженням.

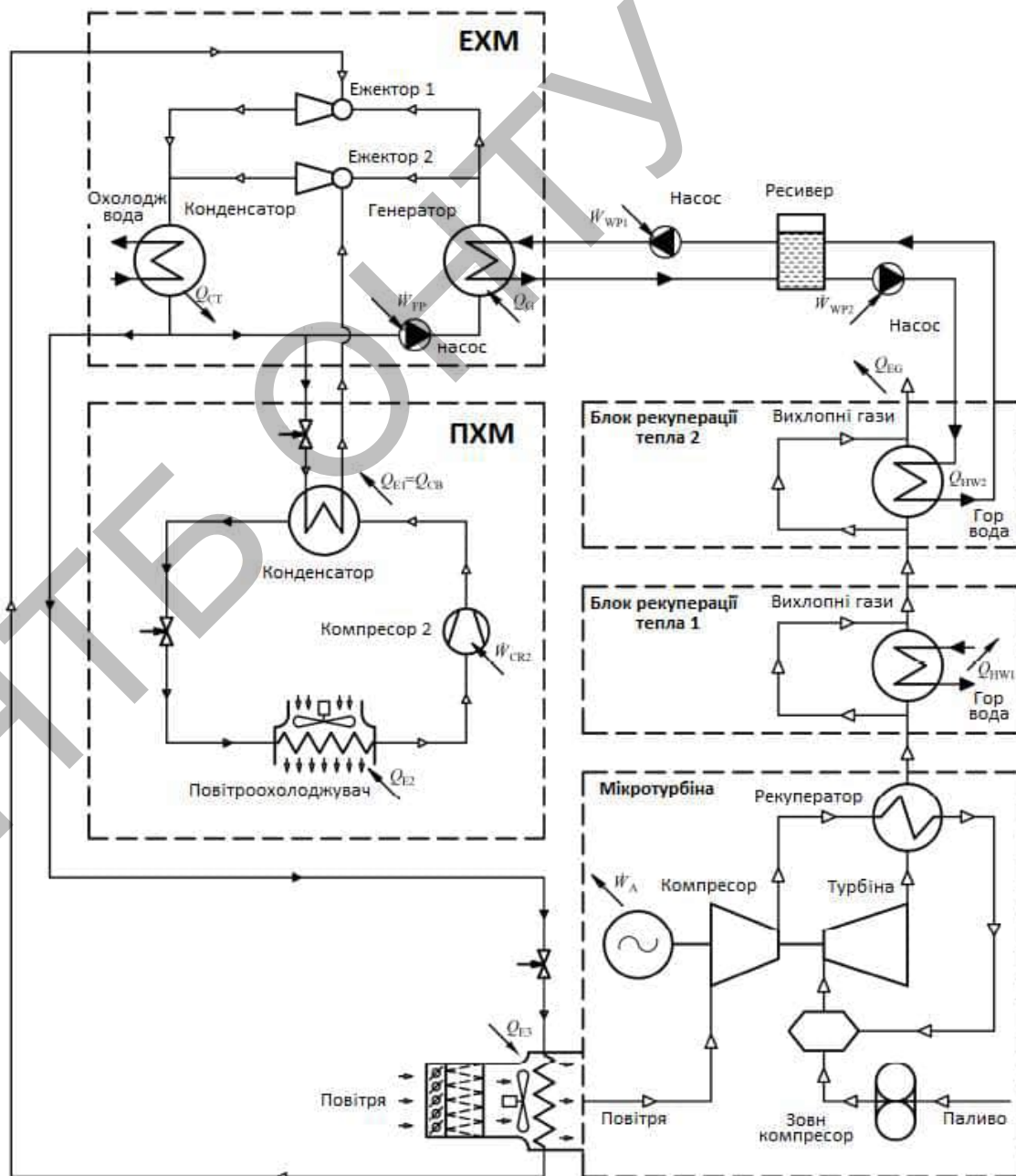
*Науковий керівник: Яковлев Ю.О., к.т.н., доцент
кафедри кріогенної техніки ОНТУ*

СИСТЕМА ТРИГЕНЕРАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ МІКРОТУРБИНИ, ПАРОКОМПРЕСОРНОЇ ТА ЕЖЕКТОРНОЇ ХОЛОДИЛЬНОЇ МАШИН

Грудка Я.Г., бакалавр ОНТУ, м. Одеса

Наразі серед існуючого різноманіття методів виробництва електричної та теплової енергії спостерігається тенденція до збільшення кількості малих електростанцій для окремих споживачів, які є ефективною альтернативою традиційним централізованим системам електропостачання. Ця тенденція зумовлена низкою причин, зокрема: зростанням цін на енергоносії від централізованих систем електропостачання, спричинених відмовою від вугілля та мазуту як основного палива, а також обмеженнями на використання атомної енергії; відсутністю необхідних інвестицій у проектування нових великих електростанцій, що відповідають сучасним екологічним стандартам; необхідністю зменшення антропогенного впливу на навколишнє середовище тощо.

Таким чином, у найближчі роки очікується збільшення частки локальних систем енергопостачання для одночасного виробництва електроенергії та тепла (когенераційних систем) на основі вискоелективних двигунів внутрішнього згорання та мікротурбін. Такі системи мають короткий термін окупності (в середньому 3-5 років). Водночас, автономність малих систем енергопостачання з виробництвом електроенергії та тепла в місці споживання гарантує відсутність перебоїв або аварійних відключень традиційних електричних та теплових систем. Термін служби двигунів та турбін дуже високий і може досягати 200 000 годин або 25 років при використанні протягом 8000 годин на рік. Це робить малі когенераційні системи надійним джерелом безперебійного енергопостачання.



Принципова схема маломасштабної системи тригенерації

Крім того, поряд з виробництвом електроенергії та тепла споживачеві часто потрібен холод для задоволення потреб у кондиціонуванні повітря та охолодженні. Для цього в більшості випадків використовуються звичайні парокомпресорні холодильні машини (ПХМ). Традиційні ПХМ є споживачами електроенергії, і їм також потрібне стабільне джерело живлення [7]. Комбіноване використання маломасштабних когенераційних систем та ПХМ – тригенераційних систем, є перспективним способом забезпечення споживачів електроенергією, теплом та холодом для кондиціонування повітря та охолодження. Крім того, вся необхідна електрична та теплова енергія для тригенераційної системи виробляється самою системою, що також робить її незалежною від централізованої системи енергопостачання.

Наразі, незважаючи на існуючі технічні рішення, питання створення високоефективної тригенераційної системи залишається актуальним та потребує подальшого дослідження в цьому напрямку. Вирішення цього питання ускладнюється необхідністю врахування конкретних умов, що пред'являються споживачем, що часто вимагає індивідуального підходу до проектування та розробки таких систем

Принципова схема запропонованої тригенераційної системи показана на рисунку. Система тригенерації складається з когенераційної системи, парокомпресорної холодильної системи та ежекторної системи охолодження. Когенераційна система включає мікотурбіну з генератором змінного струму для вироблення електричної енергії та два блоки рекуперації тепла, встановлені на вихлопній системі мікотурбіни. Частина виробленої електроенергії використовується для живлення всіх компонентів системи зі споживанням електроенергії (компресор, насоси, вентилятори), а решта електроенергії передається в енергосистему споживача. Блок рекуперації тепла 1 призначений для отримання гарячої води для різних потреб споживача та забезпечує зниження температури вихлопних газів. Блок рекуперації тепла 2 використовується для отримання гарячої води для створення теплового навантаження на генератор ЕХМ, тим самим забезпечуючи роботу теплокерованої системи охолодження. Запропоноване рішення дозволяє значно зменшити споживання первинного палива при максимальному використанні наявного потенціалу відхідного тепла.

ПХМ, що працює на виробленій електроенергії, є основним джерелом холоду для холодильних установок та систем кондиціонування повітря. Вуглекислий газ (CO₂) використовується як природне робоче тіло в цьому циклі.

Висока ефективність системи когенерації та ПХМ забезпечується ЕХМ, яка працює на холодоагенті R245ca. Запропонована ЕХМ працює за рахунок використання гарячої води, отриманої в блоці рекуперації тепла 2. Теплоносій надходить до генератора ЕХМ, в якому холодоагент R245c нагрівається та кипить завдяки теплообміну. У цьому випадку циркуляція гарячої води здійснюється за двоконтурною схемою з використанням акумулятора гарячої води та двох водяних насосів, що забезпечує стабільну роботу генератора. ЕХМ включає два ежектори для отримання охолоджувального ефекту при різних температурах. Один з цих ежекторів використовується в контурі для підтримки низької температури конденсації в ПХМ. Цей контур ЕХМ та ПХМ утворює каскадну систему охолодження. Другий ежектор використовується в контурі для охолодження повітря, що подається на мікотурбіну, що призводить до підвищення її ефективності. Таким чином, ЕХМ є поєднанням верхнього каскаду в каскадному циклі охолодження та кондиціонера

*Науковий керівник: Басов А.М., PhD., ст. викладач
кафедри кріогенної техніки ОНТУ*

ВИКОРИСТАННЯ ХОЛОДУ В БУДІВЕЛЬНІЙ ТЕХНІЦІ

Батістік М.Д., бакалавр ОНТУ, м. Одеса

Холод широко використовується у будівельній техніці як важливий технологічний інструмент і як фактор, що суттєво впливає на надійність, довговічність та безпеку будівель і споруд. Його застосування охоплює як процеси будівництва, так і подальшу експлуатацію об'єктів у різних кліматичних умовах. Особливо актуальним є використання холоду в умовах складних інженерно-

геологічних середовищ, де традиційні методи укріплення ґрунтів є недостатньо ефективними або економічно недоцільними.

Одним із найважливіших напрямів є штучне заморожування ґрунтів, яке полягає у відведенні тепла з ґрунтового масиву за допомогою спеціальних холодильних установок. Для цього в ґрунт занурюють металеві або полімерні труби, через які циркулює холодоносій, зокрема сольовий розчин або рідкий азот. У результаті відбувається замерзання порової води, що призводить до утворення міцної крижаногрунтової структури з підвищеною несучою здатністю. Такий заморожений ґрунт стає водонепроникним бар'єром, що дозволяє ефективно запобігати проникненню ґрунтових вод у зону будівництва. Цей метод широко застосовується при спорудженні тунелів, метрополітенів, підземних переходів, шахтних стволів та інших підземних об'єктів. Крім того, він забезпечує тимчасову стабілізацію нестійких ґрунтів під час виконання складних будівельних робіт.

Холод також істотно впливає на фізико-механічні властивості ґрунтів, що необхідно враховувати при проектуванні фундаментів і основ. Одним із найбільш небезпечних явищ є морозне пучення, яке виникає внаслідок замерзання води в порах ґрунту та супроводжується збільшенням його об'єму. У процесі цього явища формуються так звані льодові лінзи, які спричиняють підняття ґрунтової поверхні та створюють додаткові навантаження на конструкції. Це може призводити до деформацій фундаментів, перекосів будівель, руйнування дорожніх покриттів і пошкодження інженерних мереж. Для запобігання таким негативним наслідкам застосовуються комплексні інженерні рішення, зокрема улаштування дренажних систем, використання теплоізоляційних матеріалів, заміна пучинистих ґрунтів на стабільніші та регулювання вологості основи.

У процесі експлуатації будівель холод також відіграє важливу роль, особливо у спеціалізованих спорудах із контрольованим температурним режимом. До таких об'єктів належать холодильні склади, логістичні комплекси, підприємства харчової промисловості, а також льодові арени та спортивні комплекси. У цих випадках тривала дія низьких температур може спричинити промерзання ґрунту під фундаментом, що, у свою чергу, викликає небажані деформації підлоги та конструктивних елементів будівлі. Для уникнення цих проблем застосовують системи вентиляції підпільного простору, електричний або водяний підігрів ґрунту, а також ефективну теплоізоляцію фундаментів і підлог.

Низькі температури мають також значний вплив на властивості будівельних матеріалів, особливо тих, що містять вологу. При замерзанні вода збільшується в об'ємі приблизно на 9 %, що створює внутрішні напруження у структурі матеріалу. Це призводить до утворення мікротріщин, які з часом можуть розширюватися і спричинити руйнування матеріалу. Найбільш небезпечними є багаторазові цикли заморожування і відтавання, які поступово знижують міцність бетону, цегли, природного каменю та інших матеріалів. У зв'язку з цим у сучасному будівництві широко використовуються морозостійкі бетони, спеціальні добавки, що зменшують водопоглинання, а також технології правильного твердіння матеріалів у холодний період року.

Особливе місце займає будівництво в умовах вічної мерзлоти, де холод виступає природним стабілізуючим фактором. У таких регіонах ґрунт перебуває у замерзломому стані протягом тривалого часу, і його розмерзання може призвести до різкого зниження несучої здатності основи. Тому при проектуванні будівель застосовуються спеціальні конструктивні рішення, спрямовані на збереження мерзлого стану ґрунту. До них належать свайні фундаменти з повітряним зазором, що забезпечує природну вентиляцію, а також термосифони, які відводять тепло з ґрунту та підтримують його низьку температуру.

Сучасні тенденції розвитку будівельної техніки пов'язані з удосконаленням методів використання холоду та впровадженням інноваційних технологій. Зокрема, активно розробляються математичні моделі процесів тепломасообміну у ґрунтах, що дозволяє більш точно прогнозувати їхню поведінку при замерзанні та відтаванні. Крім того, досліджуються можливості використання фазових

переходів для акумулювання холоду та підвищення енергоефективності будівель. Значна увага приділяється також екологічним аспектам, зокрема зменшенню енергоспоживання холодильних систем і використанню природних холодоагентів.

Отже, холод у будівельній техніці має комплексний характер впливу, поєднуючи як негативні, так і позитивні аспекти. З одного боку, він може викликати деформації, руйнування матеріалів і порушення стійкості конструкцій, а з іншого — є ефективним засобом для укріплення ґрунтів і забезпечення безпечного виконання будівельних робіт. Раціональне використання холоду, засноване на сучасних наукових підходах і технологіях, дозволяє значно підвищити надійність, довговічність і ефективність будівельних об'єктів.

*Науковий керівник: Яковлев Ю.О., к.т.н., доцент
кафедри кріогенної техніки ОНТУ*

СЕКЦІЯ №3 – ЕКОЛОГІЯ. ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

УДК 628.477:595.772:642.5

БІОКОНВЕРСІЯ РЕСТОРАННИХ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ЛИЧИНОК МУХИ ЧОРНА ЛЬВИНКА (*HERMETIA ILLUCENS*): ТЕХНОЛОГІЧНІ ПЕРЕВАГИ ТА ВИКЛИКИ

Прилуцький В., аспірант, Крусір Г.В., проф. каф. ЕВтаПТ ОНТУ, Сагдєєва О.А., доц. каф. ЕВтаПТ ОНТУ, м. Одеса

Глобальні обсяги утворення харчових відходів, зокрема в сфері громадського харчування, становлять одну з найгостріших екологічних та економічних проблем сучасності. За даними Програми ООН з навколишнього середовища (UNEP), щорічно утворюється понад 931 млн тон харчових відходів, значна частина яких генерується у ресторанах, кафе та закладах фаст-фуду. У структурі твердих побутових відходів органічна фракція зазвичай становить 40 – 60%, і її ефективна утилізація є критично важливою для досягнення цілей сталого розвитку та реалізації принципів циркулярної економіки [1; 2].

Оскільки традиційні методи обробки (компостування, анаеробне зброджування) мають низку обмежень – довготривалість, необхідність попереднього сортування, недостатній рівень дезінфекції – дедалі більшої уваги набувають інноваційні технології біоконверсії, зокрема за допомогою комах. У цьому контексті особливо перспективною вважається технологія переробки харчових відходів за участі личинок мухи чорна львинка (*Hermetia illucens*), які відзначаються високою адаптивністю, ефективністю розкладання органіки та утворенням цінних біопродуктів [2; 3].

Ресторанні харчові відходи являють собою високовологий, гетерогенний органічний субстрат, який складається з термічно оброблених і сирих залишків рослинного та тваринного походження. Такий субстрат потребує підвищеної стабілізації перед використанням, зокрема подрібнення, гомогенізації, корекції вологості (оптимально 70 – 75%) та співвідношення вуглецю до азоту (C:N $\approx$ 20 – 25:1) [2; 3].

Личинки *H. illucens* є поліфагами з надзвичайною здатністю до біоконверсії органічної маси, демонструючи рівень редукції маси відходів до 65 – 70% залежно від типу субстрату. Вони оснащені потужним травним апаратом, що включає низку гідролітичних ферментів (амілаза, протеаза, ліпаза), а також симбіотичну мікрофлору, здатну синергічно посилювати деградацію органіки. Висока біологічна щільність (до 10000 особин/м²) та короткий цикл розвитку (10 – 14 діб до стадії передлялечки) забезпечують високу продуктивність у обробці значних обсягів ресторанних залишків. Біоконверсія органічних відходів ресторанного походження за допомогою личинок мухи чорна львинка (*H. illucens*) набуває дедалі більшого визнання як ефективна біотехнологічна стратегія переробки багатих на поживні речовини залишків у продукти доданої вартості. Центральним продуктом такого процесу є біомаса передлялечок, яка демонструє високі показники поживної цінності. За хімічним складом вона містить у середньому 40 – 45% білків у сухій речовині, що наближає її до класичних джерел кормового протеїну. Ліпідна складова становить 30 – 35% і представлена переважно насиченими жирними кислотами, зокрема лауриною, яка відіграє важливу роль у метаболізмі й має антибактеріальні властивості [3; 4]. Крім того, до складу біомаси входять макро- й

мікроелементи (Ca, Mg, Zn, Fe), а також вітаміни групи B (B₁, B₂) та C, що робить її універсальним інгредієнтом для кормових рецептур [3].

Хімічний склад передлялечок *H. illucens* варіює залежно від типу субстрату. За даними [4], що наведені в Таблиці 1, вміст білка залишається стабільним (399 – 431 г/кг сухої речовини) незалежно від джерела органіки – перегній, рослинні або ресторанні відходи, курячий корм. Водночас жирова та мінеральна фракції демонструють чутливість до якості субстрату: найнижчий вміст ефірного екстракту зафіксовано на перегній (218 г/кг), тоді як найвищий – на ресторанних відходах (386 г/кг); вміст золи, що опосередковує мінеральну насиченість, також значно коливається – від 27 г/кг (ресторанні відходи) до 197 г/кг (перегній).

Таблиця 1. Хімічний склад біомаси передлялечок *Hermetia illucens* залежно від субстрату вирощування (у перерахунку на суху речовину, г/кг СР)

Компонент	Перегній	Рослинні відходи	Курячий комбікорм	Ресторанні відходи
Сирий білок	399 – 431	399 – 431	399 – 431	399 – 431
Жир (ефірний екстракт)	218	371	336	386
Зола	197	96	100	27

Враховуючи ці властивості, біомаса *H. illucens* є придатною для виготовлення високоякісних комбікормів для свійської птиці, свиней та аквакультури, виступаючи альтернативою таким традиційним компонентам, як рибне борошно чи соєвий шрот. Ліпідна фракція, завдяки високому вмісту насичених жирних кислот, може бути екстрагована для використання у виробництві біодизеля, косметичних засобів або фармацевтичних препаратів [3].

Паралельно з основною продукцією формується фрас – органічний залишок, що включає екскременти личинок, неперетравлені рештки субстрату та скинуті кутикули. Цей побічний продукт має значний агротехнічний потенціал і може використовуватись як мікробіологічно активне органічне добриво, субстрат для вермікомпостування або сировина для виробництва біогазу [2; 3].

Попри численні переваги, технологія має низку викликів, що потребують уваги для її масштабного впровадження. Зокрема, однією з головних проблем є високий рівень вологості фрасу, що ускладнює його транспортування та зберігання. Крім того, зберігається ризик бактеріального контамінаційного навантаження, зокрема з боку патогенів роду *Salmonella*, що зобов'язує впроваджувати системи мікробіологічного контролю. Також викликає занепокоєння нестабільність складу органічної сировини, особливо в ресторанному секторі, де харчові залишки мають значні варіації за складом і можуть містити небажані домішки: надлишок солі, приправ, жирів або важких металів [2; 5]. Актуальними залишаються й питання регулювання та стандартизації як на рівні технологічних норм, так і в контексті відповідності санітарно-ветеринарним вимогам для використання кінцевої продукції в аграрному та кормовому секторах [5].

У цьому контексті біоконверсія ресторанних органічних відходів за допомогою *Hermetia illucens* розглядається як інноваційна складова циркулярної економіки. Вона дозволяє ефективно трансформувати харчові залишки на цінні ресурси, знижуючи обсяги полігонних відходів, скорочуючи викиди парникових газів і мінімізуючи загальний антропогенний вплив на довкілля. Перспективи розвитку галузі пов'язані з подальшою оптимізацією технологічних процесів, створенням інтегрованих

інсектаріїв, удосконаленням логістичних моделей збору харчових відходів, а також з комплексною оцінкою життєвого циклу та безпечності продуктів інсектної переробки.

Список інформаційних джерел:

1. United Nations Environment Programme. Food Waste Index Report 2021. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2021. 100 p. ISBN 978-92-807-3851-3.
2. Gold M., Tomberlin J. K., Diener S., Zurbrugg C., Mathys A. Decomposition of biowaste macronutrients, microbes, and chemicals in black soldier fly larval treatment: a review. *Waste Management*. 2018. Vol. 82. P. 302–318. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.10.022.
3. Barragán-Fonseca K. B., Dicke M., van Loon J. J. A. Nutritional value of the black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) and its suitability as animal feed: a review. *Journal of Insects as Food and Feed*. 2017. Vol. 3, No. 2. P. 105–120. DOI: 10.3920/JIFF2016.0055.
4. Spranghers T., Ottoboni M., Klootwijk C., Ovyen A., Deboosere S., De Meulenaer B., Michiels J., Eeckhout M., De Clercq P., De Smet S. Nutritional composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) prepupae reared on different organic waste substrates. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2017. Vol. 97, No. 8. P. 2594–2600. DOI: 10.1002/jsfa.8081.
5. EFSA Scientific Committee. Risk profile related to production and consumption of insects as food and feed. *EFSA Journal*. 2015. Vol. 13, No. 10. Art. 4257. DOI: 10.2903/j.efsa.2015.4257.

УДК 504.06:657.6

РОЗВИТОК НЕЗАЛЕЖНОГО ЕКОЛОГІЧНОГО АУДИТУ В УКРАЇНІ: ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Мащенко Г.А., студентка, ОНТУ, м. Одеса

В умовах реформування системи державного екологічного контролю та імплементації екологічного правил Європейського Союзу особливого значення набуває розвиток незалежного екологічного аудиту як превентивного інструменту забезпечення дотримання природоохоронного законодавства. Загальні засади правового регулювання екологічних відносин визначені Законом України «Про охорону навколишнього природного середовища» [1].

Правові основи організації та здійснення екологічного аудиту закріплені у Законі України «Про екологічний аудит» [2], який передбачає проведення обов'язкового та добровільного аудиту. Водночас механізми реалізації його положень залишаються недостатньо ефективними, що обумовлює необхідність удосконалення інституційних та економічних засад аудиторської діяльності.

Державний нагляд (контроль) у сфері господарської діяльності здійснюється відповідно до Закону України «Про основні засади державного нагляду (контролю) у сфері господарської діяльності» [3]. Реалізацію контрольних функцій у природоохоронній сфері забезпечує Державна екологічна інспекція України, діяльність якої регламентується відповідним Положенням [4]. Однак державний контроль має переважно реактивний характер, тоді як екологічний аудит повинен виконувати превентивну функцію.

Європейська практика засвідчує ефективність поєднання державного контролю та незалежної верифікації екологічної діяльності підприємств. Зокрема, Регламент ЄС № 1221/2009 запроваджує систему добровільної участі організацій у схемі екологічного менеджменту та аудиту (EMAS) [5], яка передбачає регулярну перевірку екологічної звітності незалежними верифікаторами.

Важливим інструментом інтеграції аудиту в систему корпоративного управління є міжнародний стандарт ISO 14001, розроблений International Organization for Standardization [6], який встановлює вимоги до систем екологічного менеджменту та внутрішнього аудиту.

Для України актуальним є впровадження ризик-орієнтованого підходу до визначення обов'язковості проведення екологічного аудиту для підприємств із підвищеним рівнем екологічної небезпеки. Доцільним є також створення незалежного професійного об'єднання екологічних аудиторів із функціями сертифікації, контролю якості та дисциплінарної відповідальності.

Особливого значення незалежний екологічний аудит набуває в умовах післявоєнної відбудови України. Реалізація інфраструктурних і промислових проєктів потребує системної оцінки екологічних ризиків, контролю за дотриманням стандартів екологічної безпеки та прозорості використання інвестиційних ресурсів. У цьому контексті аудит може виконувати функцію інструменту екологічного комплаєнсу та запобігання порушенням ще на етапі планування господарської діяльності.

Перспективними напрямками розвитку незалежного екологічного аудиту в Україні є:

гармонізація законодавства з європейськими вимогами;
інституційне розмежування функцій державного контролю та незалежного аудиту;
запровадження цифрових інструментів аудиторської діяльності;
інтеграція аудиту в систему ESG-звітності підприємств;
формування економічних стимулів (податкових, інвестиційних, страхових) для добровільного проходження аудиту.

Отже, розвиток незалежного екологічного аудиту є необхідною умовою підвищення ефективності екологічної політики держави. Він сприятиме переходу від каральної моделі контролю до превентивної, ризик-орієнтованої системи управління екологічними ризиками та забезпеченню принципів сталого розвитку.

Список інформаційних джерел

1. Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України від 25.06.1991 № 1264-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12> (дата звернення: 27.02.2026).
2. Про екологічний аудит: Закон України від 24.06.2004 № 1862-IV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1862-15> (дата звернення: 27.02.2026).
3. Про основні засади державного нагляду (контролю) у сфері господарської діяльності : Закон України від 05.04.2007 № 877-V. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/877-16> (дата звернення: 27.02.2026).
4. Положення про Державна екологічна інспекція України : затв. постановою Кабінету Міністрів України від 19.04.2017 № 275. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/275-2017-п> (дата звернення: 27.02.2026).
5. Regulation (EC) No 1221/2009 of the European Parliament and of the Council of 25 November 2009 on the voluntary participation by organisations in a Community eco-management and audit scheme (EMAS). Official Journal of the European Union. 2009. L 342. P. 1–45.
6. International Organization for Standardization. ISO 14001:2015 Environmental management systems — Requirements with guidance for use. Geneva : ISO, 2015.

Науковий керівник – Мадані М.М., к.т.н., доцент

УДК 628.1:502.174

ЗЕЛЕНІ ТЕХНОЛОГІЇ У ВИРОБНИЦТВІ МІНЕРАЛЬНИХ ВОД - ШЛЯХ ДО ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПІДПРИЄМСТВА

Стоянова С.І., здобувач СВО «Бакалавр», ОНТУ, м. Одеса, sofiastojanova123@gmail.com

Виробництво фасованих мінеральних вод є галуззю харчової промисловості, що характеризується безпосередньою залежністю від стану природних водних ресурсів та водоносних горизонтів. Це зумовлює особливу відповідальність підприємств галузі за збереження довкілля в зонах їх розташування. Актуальність впровадження зелених технологій у виробництво мінеральних вод визначається необхідністю узгодження промислової діяльності з принципами сталого розвитку, раціонального природокористування та мінімізації антропогенного навантаження на вразливі екосистеми.

Мета роботи — обґрунтування напрямів впровадження зелених технологій на підприємстві з виробництва мінеральних вод для підвищення рівня його екологічної безпеки. Об'єктом дослідження обрано ТДВ «Одеський завод мінеральної води «Куяльник» - підприємство харчової промисловості, що спеціалізується на видобуванні, підготовці та розливі природної мінеральної води з Верхньосарматського водоносного горизонту Куяльницького родовища. Підприємство розташоване безпосередньо біля Куяльницького лиману - водного об'єкта, що має статус об'єкта державного значення та входить до Смарагдової мережі Європи. Технологічний цикл охоплює видобуток води зі свердловин глибиною 75–90 м, механічну фільтрацію, знесолення способом зворотного осмосу (для столових вод), насичення вуглекислим газом або киснем, видув ПЕТ-тари з преформ, розлив, укупорювання, етикетування та пакування. За класифікацією екологічної небезпеки підприємство належить до IV–V класу.

Аналіз впливу підприємства на довкілля засвідчив, що за даними Екологічного паспорта Одеської області за 2024 рік та регіональних доповідей, завод не входить до переліку значущих джерел забруднення регіону [1-4]. Прямі скиди стічних вод у Куяльницький лиман відсутні - господарсько-побутові та промивні води відводяться до міської каналізації. Викиди в атмосферу обмежуються роботою котельні, вентиляційних систем та транспорту і не перевищують граничнодопустимих концентрацій. Утворювані відходи належать до IV–V класу небезпеки (пластикові та скляні упаковки, картон, осад фільтрів, побутові відходи) і передаються ліцензованим операторам. Гідрогеологічний моніторинг родовища, що ведеться з 1950-х років, підтверджує стабільність водоносного горизонту без ознак деградації.

Водночас екологічна ситуація в зоні розташування підприємства характеризується гострою проблемою деградації Куяльницького лиману: обміління, зростання солоності до 300 г/л, втрата біорізноманіття. Хоча підприємство не є причиною цих процесів, його статус користувача надр у межах природоохоронної території зумовлює доцільність активної участі у збереженні екосистеми лиману.

На підставі проведеного аналізу запропоновано комплекс зелених технологій для підвищення екологічної безпеки підприємства за такими напрямками:

1) Водозбереження та замкнений цикл водокористування: збір дощової води; перероблення або рециркуляція концентрату зворотного осмосу.

2) Енергоефективність та відновлювана енергетика: перехід на живлення виробничого обладнання від сонячних та вітрових джерел енергії; застосування насосів із частотним регулюванням та систем рекуперації енергії.

3) Мінімізація відходів та циркулярна економіка: зменшення маси ПЕТ-пляшки на 10–20 %; використання етикеток, що легко відокремлюються; забезпечення 100 % роздільного збору та передачі полімерних, паперових та металевих відходів на переробку; утилізація осадів після фільтрації для виробництва будівельних матеріалів.

4) Зниження викидів парникових газів: ліквідація витоків газу в обладнанні і трубопроводах для зберігання і подачі CO₂ на сатурацію води; заміна дизельних навантажувачів на електричні; нейтралізація стоків після використання лужних мийних засобів.

5) Екологічний менеджмент та регіональна відповідальність: впровадження системи ISO 14001; проведення незалежного зовнішнього аудиту підземних вод із фокусом на гідрологічний баланс родовища; участь у програмах відновлення Куяльницького лиману; організація екологічних акцій з місцевими громадами.

Таким чином, підприємство з виробництва мінеральних вод, попри свій низький клас екологічної небезпеки, має значний потенціал для впровадження зелених технологій. Реалізація запропонованих заходів дозволить не лише підвищити екологічну безпеку виробництва, а й посилити конкурентоспроможність продукції на вітчизняному та міжнародних ринках, де екологічна відповідальність виробника стає вагомим чинником споживчого вибору.

Список інформаційних джерел

1. Екологічний паспорт Одеської області за 2024 рік / Департамент екології та природних ресурсів Одеської обласної державної адміністрації. URL: <https://ecology.od.gov.ua> (дата звернення: 14.02.2026).
2. Програма моніторингу атмосферного повітря в Одеській агломерації на 2025–2029 роки : проект рішення / Одеська міська рада. URL: <https://omr.gov.ua> (дата звернення: 20.02.2026).
3. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Одеській області за 2021 рік / Мін-во захисту довкілля та природних ресурсів України. URL: <https://mepr.gov.ua> (дата звернення: 20.02.2026).
4. Виробники Одеського регіону 2024: інформаційний довідник / Одеська обласна державна адміністрація. URL: <https://oda.od.gov.ua> (дата звернення: 11.02.2026).

Науковий керівник – Коваленко О.О., д.т.н., професор

УДК 628.165:536.421

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕПЛО- І МАСОПЕРЕНОСУ ПРИ КРИСТАЛІЗАЦІЙНОМУ ОПРІСНЕННІ РОЗЧИНУ NaCl–H₂O

Василів Б.О., аспірант, ОНТУ, bvasyliv41@gmail.com

Глобальний дефіцит прісної води зумовлює зростаючий інтерес до енергоефективних методів опріснення. Опріснення виморожуванням ґрунтується на явищі відторгнення іонів солей льодовою

граткою і є перспективним конкурентом гібридних систем нульового рідкого скиду. Прихована теплота плавлення льоду (334 кДж/кг) у 7 разів менша за теплоту випаровування води, що забезпечує питоме енергоспоживання 2,9–8,0 кВт·год/м³ [1]. Водночас промислове впровадження опріснення виморожуванням стримується складністю контролю чистоти льоду [2]. Ключовою проблемою моделювання є коректний опис спільного тепло- і масопереносу при наявності рухомої межі розподілу фаз: чисельні моделі повинні зв'язати мікроскопічну кінетику відторгнення іонів із макроскопічними параметрами апарату.

У роботі представлено двовимірну (r – z) осесиметричну модель процесу виморожування розчину NaCl–H₂O у циліндричній геометрії. Внутрішня поверхня трубки має низьку температуру ($T_{\text{wall}} = -5^\circ\text{C}$), яка змінюється в процесі виморожування. Лід наростає радіально назовні. Початкова концентрація солі $c_0 = 0,6$ моль/л (≈ 35 г/дм³, що відповідає середній солоності морської води).

Система розв'язується відносно двох зв'язаних полів: температури $T(r, z, t)$ та концентрації солі $c(r, z, t)$. Для опису фазового переходу застосовано ентальпійний підхід, запропонований в роботі [3], який дозволяє уникнути явного відстеження межі фаз. Двофазна зона розглядається як пористе середовище, а рідка фракція θ визначається через згладжену функцію Хевісайда $\mathcal{H}_s$:

$$\theta = \mathcal{H}_s(T - T_m, \Delta T_{tr}), \quad (1)$$

де $T_m = T_{m0} - k_f \cdot c$ – локальна температура ліквідусу; $T_{m0} = 0^\circ\text{C}$;

$k_f = 1,86$ К·л/моль – криоскопічна стала NaCl;

$\Delta T_{tr} = 1,0$ К – ширина перехідної зони.

Зниження T_m зі зростанням c забезпечує зворотний зв'язок між полями температури та концентрації: збагачення розсолу відторгнутою сіллю знижує температуру ліквідусу, сповільнюючи подальшу кристалізацію.

Ефективні теплофізичні властивості інтерполюються лінійно за θ : $\rho_{\text{eff}} = \rho_{\text{ice}} + (\rho_w - \rho_{\text{ice}}) \cdot \theta$; аналогічно для λ_{eff} та $c_{p,\text{base}}$. Прихована теплота включається до $c_{p,\text{base}}$ через похідну функції $\mathcal{H}_s$ за температурою, що реалізує ентальпійний підхід без додаткових рівнянь. Рівняння теплопровідності у циліндричних координатах:

$$\rho_{\text{eff}} c_{p,\text{base}} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (2)$$

Рівняння масопереносу солі включає ефективний коефіцієнт дифузії D_{eff} і джерельний член S_{salt} , що описує відторгнення іонів при кристалізації:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{\text{eff}} \nabla c) + S_{\text{salt}}. \quad (3)$$

Для розрахунку S_{salt} використано модель Бертон–Прима–Сліхтера [3]. Ефективний коефіцієнт розподілу k_p визначає, яка частка концентрації рідини включається в лід ($c_{\text{ice}} = k_p \cdot c$), і залежить від числа Пекле масопереносу $Pe = v \cdot \delta / D_{\text{salt}}$, де v – швидкість росту льодового фронту, δ – товщина дифузійного приграничного шару:

$$k_p = \frac{k_{p0}}{k_{p0} + (1 - k_{p0}) \cdot \exp(-Pe)}. \quad (4)$$

де $k_{p0} = 0,2$ – рівноважний коефіцієнт розподілу для NaCl.

Модель враховує концентраційну поляризацію: іони солі, відторгнуті рухомим фронтом кристалізації, не встигають відводитися дифузією в об'єм розсолу, формуючи збагачений прикордонний шар товщиною δ . При $Pe \rightarrow 0$ дифузія ефективно відводить сіль і $k_p \rightarrow 0,2$ (максимальне відторгнення); при $Pe \rightarrow \infty$ фронт захоплює розсіл без розділення і $k_p \rightarrow 1,0$ (повне включення).

Джерельний

член

$S_{\text{salt}} = (k_p - 1) \cdot c \cdot \partial \theta / \partial t$ набуває додатного значення при кристалізації ($\partial \theta / \partial t < 0$), що відповідає

вивільненню солі з льоду у рідину. Чисельна стійкість розв'язку забезпечується обмеженнями $Pe_{\max}$, $k_{p,\text{safe}}$ та обмеженням швидкості зміни $\partial\theta/\partial t$ ($\pm 0,02 \text{ c}^{-1}$).

Вертикальний градієнт концентрації NaCl у рідкій фазі спричиняє природну конвекцію солі, яка суттєво впливає на масоперенос. Інтенсивність конвекції характеризується локальним числом Релея [4]:

$$Ra_S = g \cdot \beta_S \cdot |\Delta c| \cdot L^3 / (v \cdot D_{\text{salt}}) \quad (5)$$

і враховується через ефективний коефіцієнт дифузії $D_{\text{eff}} = D_{\text{salt}} \cdot \theta \cdot (1 + \text{enhance})$, де $\text{enhance} \sim Ra_S^{1/4}$ – безрозмірний внесок конвективного масопереносу. Число Льюїса $Le = a/D_{\text{salt}} \approx 2280$ вказує, що теплова рівновага встановлюється на три порядки швидше за масову, тому нерівномірність концентраційного поля зберігається значно довше за температурну.

Числовий розв'язок верифіковано порівнянням з аналітичним розв'язком задачі Стефана для циліндричної геометрії у чистій воді. Контроль якості моделі здійснюється за інтегральними критеріями: похибка енергетичного балансу $\varepsilon_E = |Q_{\text{wall}} - dE_{\text{tot}}/dt| / |Q_{\text{wall}}| \times 100\%$ та похибка балансу солі $\varepsilon_{\text{salt}}$ не перевищують 1 %. Число Стефана $Ste = c_p \cdot \Delta T / L \approx 0,063$ підтверджує, що явна теплота становить лише 6 % від прихованої, тому процес контролюється саме фазовим переходом, що є типовим для розчинів NaCl [5].

Висновок. Розроблена чисельна модель інтегрує ентальпійний підхід, формулу Бертон–Прима–Сліхтера для ефективного коефіцієнта розподілу k_p та модуль конвективної стратифікації в єдину обчислювальну схему. Модель реалізована у COMSOL Multiphysics і верифікована за аналітичним розв'язком Стефана та інтегральними балансами маси й енергії. Запропонований підхід забезпечує зв'язок між мікроскопічною кінетикою відторгнення іонів солей на фронті кристалізації та макроскопічними параметрами роботи апарату і дозволяє прогнозувати солевміст льоду залежно від швидкості кристалізації, початкової солоності та геометрії кристалізатора.

Список інформаційних джерел

1. Василів Б., Дорошенко В., Василів О., Коваленко О. Енергетична, економічна та екологічна ефективність сучасних способів опріснення води та розсолів. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2025. 61(4). URL: <https://doi.org/10.15673/ret.v61i4.3330>
2. Zhang H., Janajreh I., Hassan Ali M.I., Askar K. Freezing desalination: Heat and mass validated modeling and experimental parametric analyses. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021. 26, 101189. URL: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101189>
3. Burton J.A., Prim R.C., Slichter W.P. The distribution of solute in crystals grown from the melt. Part I. Theoretical. *J. Chem. Phys.* 1953. 21(11). P. 1987–1991. <https://doi.org/10.1063/1.1698728>
4. Jayakody H., Al-Dadah R., Mahmoud S. Computational fluid dynamics investigation on indirect contact freeze desalination. *Desalination*. 2017. 420. P. 21–33. URL: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.06.023>
5. El Kadi K., Janajreh I. Desalination by freeze crystallization: An overview. *International Journal of Thermal and Environmental Engineering*. 2017. 15(2). P. 103–110. URL: <https://doi.org/10.5383/ijtee.15.02.004>

Науковий керівник: Дорошенко В.М., д.т.н., професор кафедри нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики ОНТУ

СЕКЦІЯ №4 –ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА, НАФТОГАЗОВА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 666.3.019:621.365.5

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ МІКРОХВИЛЬНОЇ ЕНЕРГІЇ У ПРОЦЕСАХ СПІКАННЯ ТЕХНІЧНОЇ КЕРАМІКИ

Борець С. О., аспірант, ОНТУ, м. Одеса, borec.stas@gmail.com

Тортіка Д. М., аспірант, ОНТУ, м. Одеса, dmitry6729@ukr.net

Останнім часом активізувалися дослідження мікрохвильової обробки кераміки та композитів завдяки її потенційним перевагам над традиційними методами. Незважаючи на те, що технологія перебуває на ранній стадії, інтерес до неї стрімко зростає, про що свідчить збільшення кількості наукових публікацій. Здатність матеріалів (оксидів, карбідів, нітридів та їх композицій) поглинати мікрохвилі відкриває нові можливості для їх обробки. Ключовою перевагою є вибіркове нагрівання, що дозволяє локалізувати енергію в зоні з'єднання керамічних елементів, що неможливо при звичайному нагріві.

Застосування мікрохвильової енергії для обробки діелектричних матеріалів при виготовленні технічної кераміки має низку суттєвих переваг, зокрема: економію коштів за рахунок скорочення тривалості процесів та зменшення енергоспоживання; швидкий внутрішній нагрів матеріалу; високу точність і контрольованість температурного режиму; можливість вибіркового нагріву окремих зон; покращення якості та фізико-механічних властивостей готових виробів; синтез нових матеріалів, а також реалізацію технологічних процесів, які неможливо здійснити традиційними методами. Однак, поряд із перевагами, існує низка проблем, що виникають при мікрохвильовому нагріванні. До них належать: неможливість нагрівання низькодieleктричної кераміки; явище теплового розгону; розтріскування зразків внаслідок термонапружень; виникнення дугового розряду та плазми; неоднорідність нагріву через низьку теплопровідність матеріалів; погана передача мікрохвильової енергії до об'єкта обробки, а також небажана хімічна реакція з матеріалом теплоізоляції [1].

У процесі розвитку мікрохвильової обробки керамічних матеріалів було ідентифіковано низку технологічних проблем, для кожної з яких згодом було запропоновано відповідні рішення. Так, проблема неможливості нагрівання низькодieleктричної кераміки вирішується шляхом ефективного узгодження імпедансу в одномодових камерах, застосування гібридного мікрохвильового нагріву в багатомодових установках, а також використання поглинаючих добавок [2]. Для запобігання тепловому розгону необхідний контроль діелектричних властивостей матеріалу, оптимізація розподілу електричного поля та впровадження систем активного керування потужністю зі зворотним зв'язком [3]. Ризик розтріскування зразків мінімізується завдяки зменшенню температурних градієнтів та контролю фазових перетворень у матеріалі [4].

Виникнення дугового розряду та плазми можна запобігти шляхом покращення зчеплення матеріалів, ізоляції термопар, а також створення азотної атмосфери [5]. Неоднорідність нагріву, спричинена низькою теплопровідністю зразків, компенсується покращеним тепловідведенням, використанням теплоізоляції, застосуванням модифікаторів поля та багатомодових камер, що сприяє формуванню однорідної структури зерен [1]. Проблема поганої передачі мікрохвильової енергії вирішують регулюванням товщини матеріалу, підбором оптимальних частот, використанням фокусувальної оптики (лінз) та узгодженням імпедансу для зменшення відбиття [2]. Нарешті, небажана

реакція з теплоізоляцією усувається застосуванням матеріалів із низькими діелектричними втратами (високочистий глинозем, кварц), забезпеченням їх хімічної інертності, використанням азотної атмосфери та оптимізацією товщини ізоляційного шару [5].

У випадку великогабаритних керамічних виробів нерівномірність нагрівання здатна генерувати значні теплові градієнти, що призводить до утворення тріщин та руйнування структури. Високі швидкості нагріву можуть індукувати термічні напруження, сприяти виникненню небажаної пористості та формуванню локальних перегрітих зон, що, своєю чергою, провокує екстремальні теплові втрати [3].

Для вирішення цих питань було створено методи гібридного нагріву, які інтегрують безпосереднє мікрохвильове опромінення з додатковим джерелом тепла — як правило, суцептором (допоміжним нагрівачем) [5]. Цей елемент виготовляють із матеріалу, що характеризується високими діелектричними втратами (ϵ'') за низьких температур. Суцептор активно поглинає мікрохвильову енергію на початковому етапі, швидко досягаючи високих температур, і передає тепло керамічному зразку через класичні механізми теплопередачі, зокрема випромінюванням. Коли температура зразка сягає критичного значення, його власні діелектричні втрати стають достатніми для ефективного поглинання мікрохвиль та об'ємного розігріву. Такий гібридний підхід забезпечує подвійний механізм нагрівання: зовнішній прогрів від суцептора доповнюється внутрішнім об'ємним нагрівом від мікрохвиль. Це сприяє досягненню значно вищої температурної однорідності порівняно з прямим мікрохвильовим нагрівом, при якому центр виробу зазвичай перегрівається відносно поверхні (явище теплового розгону). Додатково, суцептор мінімізує теплові втрати з поверхні, що також сприяє підтриманню рівномірності температурного поля впродовж усього технологічного циклу.

Висновки

1. Мікрохвильова обробка кераміки та композитів є перспективним напрямом, що викликає зростаючий науковий інтерес завдяки унікальним перевагам: вибірковості, високій швидкості та об'ємному характеру нагріву, енергоефективності та можливості покращення властивостей матеріалів.

2. Широке впровадження технології стримується низкою проблем, пов'язаних з фізикою процесу: нерівномірністю температурного поля, тепловим розгоном, розтріскуванням зразків, обмеженнями для низькодіелектричних матеріалів та паразитними явищами (дуга, плазма). Для кожної з ідентифікованих проблем в літературі були знайдені дієві технічні рішення. Ключовими підходами є оптимізація апаратного забезпечення (одномодові камери, модифікатори поля), вдосконалення методів контролю (системи зворотного зв'язку, регулювання частот) та застосування допоміжних матеріалів (поглинаючі добавки, спеціалізована теплоізоляція).

3. Аналіз літературних даних показав, що метод гібридного нагріву із використанням суцептора ефективний для вирішення проблеми нерівномірності нагріву, особливо для великогабаритних виробів. Поєднання зовнішнього (від суцептора) та внутрішнього (від мікрохвиль) підведення тепла дозволяє уникнути перегріву центру та мінімізувати теплові втрати, забезпечуючи високу температурну однорідність.

Список інформаційних джерел

1. Borrell A., Salvador M. D. Advanced Ceramic Materials Sintered by Microwave Technology. *Sintering Technology - Method and Application*. 2018. URL: <https://doi.org/10.5772/intechopen.78831>
2. Processing of Ceramics / ed. by A. Ikesue. Wiley, 2021. URL: <https://doi.org/10.1002/9781119538806>
3. Chaix J.-M. Microwave Sintering of Ceramics. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. 2020. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818542-1.00004-7>

4. Adigun Afolabi O., Akanni Olanrewaju O. Processing and Applications of Composite Ceramic Materials for Emerging Technologies. *Advanced Ceramics Materials - Emerging Technologies* [Working Title]. 2024. URL: <https://doi.org/10.5772/intechopen.1007296>.
5. Binner J., Vaidhyanathan B., Carney T. Microwave Hybrid Sintering of Nanostructured YSZ Ceramics. *Advances in Science and Technology*. 2006. Vol. 45. P. 835–844. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ast.45.835>

Науковий керівник: Бошкова Ірина Леонідівна, професор

УДК 536.24(075.8)

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ МІКРОХВИЛЬОВОГО НАГРІВУ РОСЛИННОГО МАТЕРІАЛУ В ПРОЦЕСАХ КОМБІНОВАНОЇ ЕКСТРАКЦІЇ

Фатєєва К.О., аспірант, ОНТУ, м. Одеса, Kapauzka@ukr.net
Комедант С.Г. аспірант, ОНТУ, м. Одеса, komendant.s.h@gmail.com

Останнім часом мікрохвильова екстракція зарекомендувала себе як ефективна альтернатива класичним методам завдяки низці переваг: скороченню тривалості процесу, зменшенню об'ємів розчинників та збільшенню виходу цільових продуктів. Окрім цього, енергія надвисокої частоти, що поглинається, сприяє нагріванню екстрагента, підвищуючи його здатність розчиняти необхідні речовини [1], тому цей метод набув поширення для переробки різноманітної рослинної сировини. Одним із головних недоліків класичних методів екстракції є значна тривалість процесу, яка може сягати 8, 16, 24 годин і більше. Застосування комбінованої мікрохвильової екстракції - методу екстрагування, в якому мікрохвильове нагрівання поєднується з іншими техніками (наприклад, ультразвуковою), дозволяє нівелювати ці обмеження завдяки використанню значно менших об'ємів розчинника, зокрема за співвідношення твердої фази до рідкої 1:12 (г/мл) [2]. Параметри часу та потужності є взаємопов'язаними: підвищення потужності випромінювання скорочує тривалість екстракції, і навпаки. Важливою особливістю методу є його антитермолабільний характер — він забезпечує збереження термочутливих сполук, які зазвичай деградують за умов тривалого нагрівання при традиційній екстракції [2]. Завдяки цим перевагам комбінована мікрохвильова екстракція набула широкого поширення в лабораторній практиці порівняно зі звичайною рідинною екстракцією. Водночас масштабування цієї технології залишається складним завданням, а відтворюваність умов процесу важко піддається оцінюванню через різноманіття апаратних конфігурацій.

Мікрохвильова екстракція є поширеним методом виділення біологічно активних речовин із рослинної сировини [3]. Ключові технологічні параметри процесу, зокрема співвідношення твердої фази до розчинника, потужність мікрохвильового випромінювання та тривалість екстракції, зазвичай підлягають оптимізації із застосуванням статистичних методів. Водночас описані в літературі оптимальні умови мають обмежений характер, оскільки вони придатні лише для конкретних типів мікрохвильових установок. За однакових номінальних параметрів різні апаратні конфігурації можуть демонструвати відмінну ефективність нагріву та, відповідно, різну продуктивність екстракції. У дослідженні [3] було визначено оптимальні робочі параметри комбінованої мікрохвильової екстракції для різних масштабів згідно із запропонованою методикою, а також проведено оцінку їх екстракційної ефективності. У процесі мікрохвильового нагрівання відбуваються складні мікроструктурні трансформації, зумовлені супутніми явищами тепло- та масоперенесення, які суттєво впливають на кінетику сушіння та якісні характеристики кінцевого продукту. Встановлено, що формування

нанорозмірних пор є характерною ознакою виключно переривчастого мікрохвильово-конвективного режиму. Безперервне мікрохвильове опромінення спричиняє локальне перегрівання, деструкцію клітинних стінок або їх обвуглювання, тоді як конвективне сушіння не забезпечує утворення нанопористої структури. Виявлено пряму кореляцію між потужністю мікрохвильового випромінювання та параметрами пористості: збільшення потужності супроводжується зростанням як кількості, так і розмірів пор, що пояснюється специфічним профілем температурного розподілу та особливостями випаровування вологи в об'ємі матеріалу.

Складено методику розрахунку граничного часу обробки рослинного матеріалу $\square$ в мікрохвильовому полі, тобто часу, при перевищенні якого відбуватиметься порушення цілісності клітинних стінок [4]. Маючи в своєму розпорядженні ці дані, можна визначити рекомендовану тривалість мікрохвильової обробки в технологіях екстрагування біологічно активних речовин: $\square$. Множник 1,13 було визначено з міркувань енергетичної ефективності на підставі аналізу експериментальних даних дослідження теплового впливу мікрохвильового поля на рослинну тканину. Результати розрахунків, отримані при різних значеннях вологості для початкової температури зерна 20 °C наведені в табл.1.

Таблиця 1 – Результати розрахунку граничного часу обробки зерна гречки у мікрохвильовому полі. Маса матеріалу $m=1,2$ кг, час мікрохвильової обробки $\tau=180$ с.

w	c_p , Дж/(кг·K)	Δm , кг	$Q_{\text{пол}}$, Дж	ϵ''	E, В/м	Q, Дж	$\tau_{\text{гр}}$, с
0,09	1788	$1 \cdot 10^{-3}$	88081	1,18	1469	58257	119
0,13	1893	$2,1 \cdot 10^{-3}$	91233	1,77	1221	56258	111
0,17	1999	$5 \cdot 10^{-3}$	109636	2,35	1162	64866	106
0,2	2078	$6,2 \cdot 10^{-3}$	112632	2,93	1054	65019	104

Зі зниженням початкової температури матеріалу за однакової вологості значення граничного часу збільшуються, що пов'язано з необхідністю більшого підведення енергії до досягнення граничної температури. Зі збільшенням вологості тривалість мікрохвильової обробки трохи знижується, що пояснюється зростанням фактора діелектричних втрат – у досліджуваному діапазоні ϵ'' збільшилася у 2,5 разів, тоді як квадрат напруженості електричного поля зменшився у 1,9 разів. Необхідно глибше розібратися про вплив вмісту вологи рослинної тканини на ефекти мікрохвильового нагріву як специфічного нагріву, що дасть можливість надалі доповнити методику розрахунку граничного часу.

Список інформаційних джерел

1. Fundamentals and applications of microwave heating to chemicals separation processes / H. Li et al. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 114. P. 109316. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109316>.
2. Wang L., Qin P., Hu Y. Study on the microwave-assisted extraction of polyphenols from tea. *Frontiers of Chemical Engineering in China*. 2010. Vol. 4, no. 3. P. 307–313. URL: <https://doi.org/10.1007/s11705-009-0282-6>.
3. Chan C.-H., Yusoff R., Ngho G.-C. Optimization of microwave-assisted extraction based on absorbed microwave power and energy. *Chemical Engineering Science*. 2014. Vol. 111. P. 41–47. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.02.011>.
4. Study into effects of a microwave field on the plant tissue / N. Volgusheva et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 6, no. 8 (90). P. 47–54. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.115118>.

УДК 621.355.9

ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ МІКРОХВИЛЬНОЇ РЕГЕНЕРАЦІЇ НА ТЕПЛОАКУМУЛЮВАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ ЦЕОЛІТІВ

Гречановський А.П. аспірант, ОНТУ, м. Одеса, grechanovskey62@gmail.com

Крятов А.Г., аспірант, ОНТУ, м. Одеса, barsiccc@gmail.com

Питання розвитку систем теплоакумулювання з точки зору оптимізації використання енергоресурсів є актуальним в сучасному світі. Системи акумулювання теплової енергії призначені для накопичення та зберігання теплоти з метою її подальшого використання. Такі системи відіграють ключову роль у балансуванні енергосистем, оптимізації енергоспоживання та зменшенні частки викопного палива в енергетичному балансі, здатні забезпечити стійкіше енергетичне майбутнє, підвищуючи енергоефективність процесів та сприяючи інтеграції відновлюваних джерел енергії. В зв'язку з цим спостерігається зростаючий інтерес до застосування цеолітів у системах акумулювання теплової енергії, що пояснюється мінімальними тепловими втратами та можливістю практично необмеженого в часі зберігання акумульованої теплоти за умови збереження цеоліту в сухому стані. Порівняльний аналіз різних типів систем накопичення теплової енергії свідчить, що термохімічне акумулювання теплоти на основі цеолітів забезпечує вищу енергоефективність порівняно з системами ємнісного типу [1]. Автори [2] стверджують, що матеріали для термохімічного зберігання енергії мають приблизно в 3 – 30 разів більшу щільність зберігання енергії в порівнянні з системами явного зберігання тепла (або ємнісні) і в 2 – 20 разів більш високу, ніж системи прихованого зберігання (використовуються матеріали з фазовим переходом), залежно від властивостей матеріалу.

У роботі [3] встановлено, що десорбція в умовах мікрохвильового нагрівання є швидким та ефективним методом регенерації адсорбційних матеріалів, який у ряді випадків забезпечує зниження енергетичних витрат порівняно з класичними підходами. Автори дослідження [4] продемонстрували, що оптимізація конструкції реактора дозволяє досягти високошвидкісної регенерації цеолітів марки 13X із застосуванням мікрохвильового випромінювання. Енергоефективність процесу, визначена як відношення енергії, спожитої з електричної мережі для генерації мікрохвиль, до енергії, акумульованої цеолітами у вигляді теплоти, сягає 75 %. Відтворюваність результатів адсорбції-десорбції CO₂ після циклів мікрохвильового опромінення свідчить про відсутність структурних або поверхневих змін цеолітів. На думку авторів [4], метод мікрохвильового нагріву є перспективною альтернативою традиційній термічній регенерації, особливо з огляду на екологічні аспекти. Електроенергія, необхідна для генерації мікрохвиль, може бути отримана з відновлюваних джерел (вітряної або сонячної енергії), на відміну від традиційних методів, що базуються на спалюванні викопного палива.

Експериментальні дослідження процесу дегідратації цеолітів проводили на лабораторній установці, схема якої представлена в роботі [5]. Установка забезпечує проведення досліджень у режимах мікрохвильового та мікрохвильово-конвективного сушіння. Досліджувались наступні цеоліти: 4A (виробництво Україна) з насипною щільністю $\rho=780 \text{ кг/м}^3$, цеоліти 13X виробництва Китай (далі - цеоліт 13X_к) з насипною щільністю $\rho=680 \text{ кг/м}^3$ та виробництва Україна (далі - цеоліт 13X_у), з насипною щільністю $\rho=726 \text{ кг/м}^3$. Експерименти проводили на цеолітах з рівноважним вологовмістом і з вологовмістом, що визначався стадією розрядки при контакті з водою. Вихідна потужність магнетрона у всіх дослідях становила 800 Вт, початкова маса завантаження цеоліту – 0.1 кг. Дослідження показали, що закон зміни вологовмісту цеоліту 13 X не залежить від країни-виробника та форми частинок. Сушіння цеоліту 4A відбувалося менш інтенсивно, що, найімовірніше, пояснюється

великим розміром частинок. Експерименти показали, що цеоліт 13Х_к характеризується кращими властивостями міцності і витримує без механічних пошкоджень більшу кількість циклів сорбції-десорбції в порівнянні з цеолітом 13Х_у і 4А. При контакті цеоліту з водою зафіксовано виділення значної теплоти адсорбції, для оцінки її значення були проведені теплові розрахунки. Враховувалося, що теплота адсорбції йшла на нагрівання води Q_v , експериментальної комірки Q_k , шару цеоліту Q_c і випаровування вологи $Q_{\text{вип}}$. Після додавання води в шар цеоліту експериментальна ємність герметизувалася кришкою, на внутрішній поверхні якої спостерігалася конденсація водяної пари. Це явище зумовило необхідність врахування теплоти пароутворення в тепловому балансі системи. Кількість вологи, що зазнала випаровування, визначали гравіметричним методом шляхом зважування кришки після завершення експерименту.

Результати експерименту показали, що при додаванні води масою 0,1 кг шар цеоліту 13Х_к масою 0,07 кг при початковій температурі 25 °С, середня (за результатами трьох повторів) питома теплота адсорбції становить $Q=216,4$ кДж/кг. Аналогічним чином були проведені експерименти з цеолітом 13Х_у та 4А. Для цеоліту 13Х_у теплота адсорбції становила $Q=167,4$ кДж/кг, для цеоліту 4А – $Q=155,5$ кДж/кг. Похибка проведення експериментів становила 13,7 %, 14,2 % та 15,7 % відповідно. Таким чином, застосування цеоліту 13Х_к у системах термохімічного накопичення тепла є кращим.

Список інформаційних джерел

1. Experimental and Numerical Assessment of Novel All-In-One Adsorption Thermal Storage with Zeolite for Thermal Solar Applications / Michelangelo Di Palo [et al.] // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, №. 23. P. 8517. <https://doi.org/10.3390/app10238517>.
 2. Advances in thermal energy storage materials and their applications towards zero energy buildings: A critical review [Electronic resource] / Jesús Lizana [et al.] // *Applied Energy*. 2017. Vol. 203. P. 219–239. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.008>
 3. Mechanisms Responsible for Dielectric Properties of Fauasites and Linde Type A Zeolites в Microwave Frequency Range / Benoit Legras [et al.] // *The Journal of Physical Chemistry C*. 2011. Vol. 115, no. 7. P. 3090-3098. <https://doi.org/10.1021/jp111423z>.
 4. Intensification of TSA processes using a microwave-assisted regeneration step / Eugenio Meloni [et al.] // *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. 2021. Vol. 160. P. 108291. – <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108>.
- Бошкова І.Л., Волгушева Н.В., Гречановський А.П., Крятов А.Г., Кравченко Є.О. Дослідження теплоакмулювальних властивостей цеолітів після мікрохвильової регенерації. *Фізика аеродисперсних систем*. 2025. Випуск 63. 63-71. <http://fas.onu.edu.ua/article/view/338084/334140>

УДК 621.311.243:697.1

МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ГІБРИДНИХ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

Єрохін Д. М., аспірант, ОНТУ, м. Одеса, erokhin-dima@ukr.net

Гібридні системи теплопостачання поєднують кілька джерел енергії — наприклад, сонячну енергію, теплові насоси, біомасу, геотермальну енергію та традиційні котли. Метою їх оптимізації є підвищення енергоефективності, зменшення витрат палива та скорочення викидів CO₂. Оптимізація

гібридних систем теплопостачання - це не просто питання вибору компонентів; вона включає складний процес визначення оптимального розміру, конфігурації та операційної стратегії для балансування конкуруючих економічних, технічних, екологічних та соціальних цілей [1]. Ключові цілі оптимізації гібридної системи теплопостачання на основі відновлюваної енергетики (ГСТВЕ) узагальнені в роботі [2]. Вони поділяються на економічні, технічні, стійкісні, екологічні та соціальні. Під час оптимізації проекту системи можна розглядати різні цілі. Максимізація ефективності системи та мінімізація витрат на її виробництво є прикладами таких цілей. Методи та методи оптимізації можуть допомогти вирішити складні проблеми. Під час проектування ГСТВЕ необхідно враховувати продуктивність її компонентів. Головна мета – мати кращу продуктивність зі зниженими витратами. Цих цілей можна досягти за допомогою оптимального моделювання системи [3]. Три поширені методи моделювання та оптимізації для гібридних систем – це класичні алгоритми, метаевристичні методи та гібрид двох або більше методів оптимізації.

Класичні алгоритми оптимізації використовують диференціальне числення для знаходження оптимальних рішень для диференційованих та неперервних функцій. Класичні методи мають обмежені можливості для застосунків, цільові функції яких не є диференційованими та/або неперервними. Кілька традиційних методів оптимізації використовувалися для гібридних енергетичних систем. Модель лінійного програмування (LPM), динамічне програмування (DP) та нелінійне програмування (NLP) є прикладами класичних алгоритмів, що широко використовуються для оптимізації відновлюваних джерел енергії (HRES). Модель лінійного програмування (LPM) вивчає випадки, коли цільова функція є лінійною, а простір проектних змінних задається лише лінійними рівностями та нерівностями. Ця модель використовувалася в кількох дослідженнях оптимізації ГСТВЕ [4, 5]. Дослідження використовують можливості LPM для стохастичного виконання аналізу надійності та економіки. Модель нелінійного програмування (NLP) вивчає загальні випадки, коли цільові функції або обмеження, або обидва містять нелінійні частини.

Технічна оптимізація. Окрім оптимізації витрат, технічні цілі також можуть бути оптимізовані під час проектування ГСТВЕ. Технічні цілі включають, але не обмежуються, задоволення бажаних рівнів надійності на основі ймовірності втрати живлення або ймовірності втрати навантаження, мінімізація співвідношення витрат/ефективності та мінімізація викидів вуглецю максимізація доступності потужності. Технічна оптимізація потрібна для узгодження режимів роботи різних джерел енергії, підвищення ефективності перетворення та передачі тепла, правильного підбору потужностей обладнання, забезпечення балансу виробництва і споживання тепла.

Стійкісна оптимізація дозволяє підвищити енергетичну безпеку системи, забезпечити безперервність теплопостачання при зміні погодних умов, створити резервування джерел енергії та мінімізувати ризики відмов обладнання.

Екологічна оптимізація спрямована на зменшення викидів CO₂ та інших забруднювачів, зниження екологічного навантаження на довкілля та виконання міжнародних кліматичних зобов'язань.

Соціальна оптимізація сприяє підвищенню доступності теплової енергії для населення, створенню нових робочих місць у сфері відновлюваної енергетики, покращенню якості життя та енергетичної незалежності громад та підвищенню прийнятності технологій ВДЕ у суспільстві.

Майбутні дослідження повинні пріоритизувати міждисциплінарну співпрацю, стандартизовані соціальні/стійкі показники, масштабований та надійний штучний інтелект, а також рамки валідації для розкриття потенціалу ГСТВЕ. Системи сталого розвитку відновлюваних джерел енергії, які інтегрують численні відновлювані джерела, такі як сонячна енергія, вітер та біомаса, з накопичувачами та традиційними резервними генераторами, пропонують перспективне рішення для зменшення переривчастості окремих відновлюваних джерел енергії та підвищення загальної надійності системи та економічної ефективності. Однак, складність ГСТВЕ, що характеризується різноманітними

компонентами, стохастичними джерелами енергії та багатограничними операційними цілями, робить їх проектування та експлуатацію складним завданням оптимізації. Оптимізація дає змогу зменшити капітальні та експлуатаційні витрати системи, підвищити економічну ефективність використання відновлюваних джерел енергії, скоротити залежність від викопного палива та коливань його цін, визначити оптимальне співвідношення компонентів системи (сонячні колектори, теплові насоси, акумулятори тепла, резервні котли тощо).

Висновки

Оптимізація гібридної системи теплопостачання на основі відновлюваних джерел енергії є необхідною умовою для забезпечення економічної доцільності, технічної ефективності, надійності роботи, екологічної безпеки та соціальної прийнятності системи.

Комплексне використання економічних, технічних, стійкісних, екологічних і соціальних методів дозволяє сформувати найбільш раціональну конфігурацію системи теплопостачання.

Список інформаційних джерел

- 1 Ajiyoye, O. K., Ochiegbu, C. V., Ofosu, E. A., & Gyamfi, S. (2023). A review of hybrid renewable energies optimisation: design, methodologies, and criteria. *International Journal of Sustainable Energy*, 42(1), 648–684. <https://doi.org/10.1080/14786451.2023.2227294>.
- 2 Ajiyoye, O. K., Ochiegbu, C. V., Ofosu, E. A., & Gyamfi, S. (2023). A review of hybrid renewable energies optimisation: design, methodologies, and criteria. *International Journal of Sustainable Energy*, 42(1), 648–684. <https://doi.org/10.1080/14786451.2023.2227294>.
- 3 Siddaiah, R., & Saini, R. P. (2016). A review on planning, configurations, modeling and optimization techniques of hybrid renewable energy systems for off grid applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 376–396. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.281>.
- 4 Babatunde, O. M., Munda, J. L., & Hamam, Y. (2020). Operations and planning of integrated renewable energy system: a survey. *У 2020 5th International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/redec49234.2020.9163857>.
- 5 A. C., N., Jyoti, R., & Raju, A. B. (2011). Economic analysis and comparison of proposed HRES for stand-alone applications at various places in Karnataka state. *У 2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies - India (ISGT India)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/iset-india.2011.6145346>.
- 6

УДК 621.575.24:644.62

УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ АБСОРБЦІЙНОГО ХОЛОДИЛЬНОГО УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ РОБОТИ В НЕСТАБІЛЬНИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ УМОВАХ

Сатир Н.С., аспірант, Тітлов О.С., д.т.н, професор, Дорошенко В.М., д.т.н, професор,
кафедри нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики,
Одеський національний технологічний університет, м Одеса, Україна
dev.niksatur@gmail.com, titlov1959@gmail.com; doroshenkovm444@gmail.com

Сучасний стан світової енергетики характеризується стрімким зростанням вартості електричної енергії та посиленням екологічних вимог до холодильних агентів. Традиційні компресійні холодильні машини, попри високу ефективність, мають суттєві недоліки: високе енергоспоживання в пікові

періоди та використання фторвмісних холодоагентів (ГФУ), що мають високий потенціал глобального потепління [1].

Абсорбційні холодильні прилади (АХП) пропонують альтернативне рішення, оскільки вони здатні працювати на тепловій енергії (скидне тепло промисловості, сонячна енергія, спалювання природного газу або біопалива) та використовують природні робочі тіла (водоаміачні або бромистолітєві розчини), що є екологічно безпечними. Особлива актуальність розробки АХП для широкого діапазону кліматичних параметрів обумовлена необхідністю стабільної роботи обладнання в умовах аномальної спеки (до 45 °C і вище), що стає нормою через кліматичні зміни [2].

Стрімка урбанізація та глобальне потепління призвели до того, що охолодження стало одним із найбільш енергоємних секторів світової економіки. Традиційні компресійні машини створюють «замкнене коло»: вони споживають викопну енергію та використовують ГФУ-холодоагенти, що спричиняє потепління, яке, своєю чергою, вимагає ще більшої кількості холоду. Перехід на абсорбційні холодильні прилади дозволяє використовувати скидне тепло (waste heat) промислових підприємств, теплову енергію сонячних колекторів або біопалива. Це дозволяє скоротити викиди CO₂ на 30...50 % порівняно з електричними аналогами. Саме тому розробка АХП, здатних стабільно працювати при екстремально високих температурах зовнішнього повітря, є стратегічним завданням. Це дозволяє не лише забезпечити автономність (наприклад, у сільській місцевості або зонах військових конфліктів), а й зняти навантаження з національних енергосистем, перетворивши «дармове» тепло на корисний холод.

Об'єктом дослідження є складні взаємопов'язані процеси тепло- та масообміну, що протікають у функціональних апаратах абсорбційного холодильного агрегату (АХА) під час реалізації термодинамічного циклу на бінарній робочій суміші.

Предметом дослідження є сукупність термодинамічних та експлуатаційних закономірностей, що визначають зміну енергетичної ефективності (холодопродуктивності та холодильного коефіцієнта COP) водоаміачного холодильного приладу залежно від динаміки кліматичних параметрів експлуатації та характеристик джерела теплової енергії.

Проведений термодинамічний аналіз циклу АХП при температурах конденсації $T_k > 50$ °C та абсорбції $T_a > 45$ °C, що дозволило визначити критичні точки «термічного замикання» циклу, при яких різниця концентрацій між багатим та бідним розчинами прямує до нуля ($\Delta c \rightarrow 0$) [3].

При аномальній спеці (понад 40...45 °C) тиск у системі зростає, що змінює умови рівноваги між рідкою та паровою фазами. У водоаміачних машинах вода є абсорбентом, але її потрапляння у випарник (через неефективну дефлегмацію) є катастрофічним. При високих температурах зовнішнього повітря дефлегматор працює з меншим температурним напором, що підвищує ризик проскакування водяної пари. Розрахунок «запасу міцності» розчину в даному контексті — це визначення мінімально допустимої концентрації аміаку в парі ($\epsilon_D \geq 0,998$), при якій температура кипіння у випарнику не підвищиться вище критичної межі (наприклад, 5 °C).

Для того щоб АХП працювала при спеці 45 °C, температуру в генераторі доводиться піднімати до 180...200 °C. Це може привести до термічної дисоціації та інтенсивної корозії. Використання стабілізуючих добавок (наприклад, сполук сурми або спеціальних органічних сполук), які пасивують поверхню сталі та підвищують енергію активації реакції розпаду аміаку. Використання екологічно безпечні інгібіторів корозії, таких як силікати або молібдати натрію, дозволить захистити систему при високих теплових навантаженнях.

Для того, щоб при підвищенні зовнішньої температури автоматично збільшувалась подача тепла для підтримки тиску генерації, але водночас не було перегріву абсорбера, необхідно створити логічну схему автоматичного регулювання потужності теплового джерела на основі зворотного зв'язку від датчиків середовища.

Основним бар'єром для АХП у жарких зонах є критичне зростання тиску абсорбції (Pa), що наближається до тиску генерації, унеможливаючи рух холодоагенту. Для подолання ефекту «термічного запирання» циклу необхідно ввести дефлегматорів з внутрішнім обребренням та поперечним обдувом, що дозволить підтримувати градієнт температур, необхідний для отримання концентрації аміаку у парі $\epsilon_D \geq 9,8 \%$.

Застосування двоступеневого процесу поглинання, де пара з випарника спочатку потрапляє в абсорбер низького тиску, а потім доабсорбується в камері змішування з охолодженим слабким розчином. Це дозволяє штучно знизити парціальний тиск аміаку над розчином, забезпечуючи стабільну циркуляцію робочого тіла навіть тоді, коли традиційні системи зупиняються через вирівнювання тисків у контурі.

Підвищення температури зовнішнього повітря з 25 °C до 43 °C призводить до зниження COP на 15...20 %. Проте, впровадження адаптивної системи дефлегмації, дозволяє стабілізувати температуру в холодильній камері на рівні 2...4 °C навіть при критичних зовнішніх параметрах.

Вдосконалення конструкції абсорбційного холодильного приладу, дозволить системі функціонувати в діапазоні зовнішніх температур від 10 °C до 45 °C без критичного зниження продуктивності. Ключовим фактором стійкості АХП до жаркого клімату є ефективність роботи абсорбера та якість очищення парів у дефлегматорі. Використання запропонованих систем дозволить знизити експлуатаційні витрати на 30 % у порівнянні з електричними моделями при використанні сонячних колекторів як основного джерела тепла.

Результати роботи можуть бути впроваджені при серійному виробництві побутових та промислових АХП нового покоління, що відповідають вимогам екологічної безпеки та енергоефективності.

Література:

1. LIFE Climate Change Mitigation and Adaptation. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/life-climate-change-mitigation-and-adaptation_en.
2. Arora C. P. Refrigeration and Air Conditioning. — 3rd ed. — McGraw Hill Education, 2021. — 932 p. <https://ru.scribd.com/document/1012286594/Refrigeration-and-Air-Conditioning-3rd-Edition-C-P-Arora>
3. Srivastava S., Agarwal R. Heat and Mass Transfer Analysis in Ammonia-Water Absorbers for High Ambient Temperatures // International Journal of Refrigeration. — 2023. — Vol. 145. — P. 112–125. https://www.researchgate.net/publication/258552417_An_analytical_study_on_heat_and_mass_transfer_for_ammonia-water_system_in_a_vertical_falling-film_type_of_absorber_and_generator

УДК 621.565

ПОРІВНЯННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ЯВНОГО ТА ПРИХОВАНОГО АКУМУЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ У ТЕПЛИЦЯХ

Писаревський І.О. аспірант, ОНТУ, м. Одеса, rori@ukr.net

Акумуляування теплової енергії є важливим напрямом підвищення енергоефективності систем, що використовують відновлювані джерела енергії [1]. Особливий інтерес становить накопичення низькопотенційної теплоти в тепличних комплексах для зменшення добових коливань температури повітря та зниження енерговитрат на опалення [1, 2]. Найбільш поширеними є системи акумуляування

явної теплоти, в яких енергія запасасться за рахунок зміни температури матеріалу, та системи прихованого теплонакопичення з використанням матеріалів з фазовим переходом [3, 4].

Метою роботи є дослідження експлуатаційних характеристик систем акумулювання низькопотенційної теплоти на основі щільного шару щебеню та модифікованого парафіну ТЗ для умов теплиці.

Для дослідження було створено експериментальну установку у вигляді макета теплиці з акрилового скла, що містила два типи теплоакумулювальних елементів: вертикальний теплообмінний канал із щільним шаром щебеню та полімерні трубки, заповнені модифікованим парафіном ТЗ. У системі з щебенем теплоносієм була вода, яка вдень нагрівалася сонячним випромінюванням у трубках під покрівлею теплиці та подавалася у верхню частину теплообмінного каналу. Для зниження температури плавлення до парафіну додавали вазелінову оливу та гліцерин, унаслідок чого температура фазового переходу зменшилася до 34–35,5 °С.

У процесі експериментів вимірювали температуру води в циркуляційному контурі, температуру щебеню по висоті каналу, температуру парафіну, температуру повітря в теплиці та навколишнього середовища, а також інтенсивність освітлення. Реєстрація даних здійснювалася автоматизованою системою на базі Arduino Mega 2560 R3, ESP32 та Raspberry Pi 5 з інтервалом 10 с.

Результати показали, що температура повітря в макеті теплиці суттєво залежить від інтенсивності сонячного випромінювання і вдень досягала 42–45 °С, тоді як температура зовнішнього повітря не перевищувала 24 °С. Встановлено, що теплообмін між водою та щільним шаром щебеню відбувається достатньо інтенсивно, а середній коефіцієнт міжкомпонентного теплообміну становить $\alpha = 80 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, що істотно перевищує значення, характерні для повітряного теплоносія.

За результатами теплових розрахунків визначено, що питома кількість теплоти, акумульована щебенем, становить 18,4–22,8 кДж/кг. Для модифікованого парафіну в аналогічних умовах питома акумулювання теплоти досягало 171,2 кДж/кг, тобто було у 7,5–9,3 раза вищим, ніж для щебеню. При цьому маса використаного парафіну була у 23,6 раза меншою за масу щебеню.

Аналіз експериментальних кривих показав, що зміна температури води та щебеню задовільно описується функцією типу GaussAmp, а зміна температури повітря в теплиці та парафіну — функцією типу Cubic. Узгодження математичної моделі з експериментальними даними для температури повітря в теплиці становило 98,8 %.

Таким чином, система прихованого теплонакопичення з модифікованим парафіном ТЗ є значно ефективнішою за питоמוю теплоакумулювальною здатністю. Разом з тим використання вертикального теплообмінного каналу зі щебенем є конструктивно простішим та зручнішим для інтеграції в діючі теплиці без суттєвої реконструкції. Остаточний вибір типу теплоакумулювальної системи повинен здійснюватися з урахуванням енергетичної ефективності, вартості матеріалів, конструктивної складності та умов інтеграції в тепличний комплекс.

Список інформаційних джерел

1. Ali H. M., Rehman T.-u., Arıcı M., Said Z., Duraković B., Mohammed H. I. et al. Advances in thermal energy storage: Fundamentals and applications // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2024. Vol. 100. 101109. DOI: 10.1016/j.pecs.2023.101109.
2. Suresh C., Saini R. P. Thermal performance of sensible and latent heat thermal energy storage systems // *International Journal of Energy Research*. 2020. Vol. 44, No. 6. P. 4743–4758. DOI: 10.1002/er.5255.
3. Faraj K., Khaled M., Faraj J., Hachem F., Castelain C. A review on phase change materials for thermal energy storage in buildings: Heating and hybrid applications // *Journal of Energy Storage*. 2021. Vol. 33. 101913. DOI: 10.1016/j.est.2020.101913.

4. Bouadila S., Lazaar M., Skouri S., Kooli S., Farhat A. Assessment of the greenhouse climate with a new packed bed solar air heater at night, in Tunisia // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 35. P. 31–41. DOI: 10.1016/j.rser.2014.03.051.

УДК 621.575.24:644.62

УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ АБСОРБЦІЙНОГО ХОЛОДИЛЬНОГО УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ РОБОТИ В НЕСТАБІЛЬНИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ УМОВАХ

Сатир Н.С., аспірант, Тітлов О.С., д.т.н, професор, Дорошенко В.М., д.т.н, професор, кафедри нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики, Одеський національний технологічний університет, м Одеса, Україна
dev.niksatyr@gmail.com, titlov1959@gmail.com; doroshenkovm444@gmail.com

Сучасний стан світової енергетики характеризується стрімким зростанням вартості електричної енергії та посиленням екологічних вимог до холодильних агентів. Традиційні компресійні холодильні машини, попри високу ефективність, мають суттєві недоліки: високе енергоспоживання в пікові періоди та використання фторвмісних холодоагентів (ГФУ), що мають високий потенціал глобального потепління [1].

Абсорбційні холодильні прилади (АХП) пропонують альтернативне рішення, оскільки вони здатні працювати на тепловій енергії (скидне тепло промисловості, сонячна енергія, спалювання природного газу або біопалива) та використовують природні робочі тіла (водааміачні або бромистолітєві розчини), що є екологічно безпечними. Особлива актуальність розробки АХП для широкого діапазону кліматичних параметрів обумовлена необхідністю стабільної роботи обладнання в умовах аномальної спеки (до 45 °C і вище), що стає нормою через кліматичні зміни [2].

Стрімка урбанізація та глобальне потепління призвели до того, що охолодження стало одним із найбільш енергоємних секторів світової економіки. Традиційні компресійні машини створюють «замкнене коло»: вони споживають викопну енергію та використовують ГФУ-холодоагенти, що спричиняє потепління, яке, своєю чергою, вимагає ще більшої кількості холоду. Перехід на абсорбційні холодильні прилади дозволяє використовувати скидне тепло (waste heat) промислових підприємств, теплову енергію сонячних колекторів або біопалива. Це дозволяє скоротити викиди CO₂ на 30...50 % порівняно з електричними аналогами. Саме тому розробка АХП, здатних стабільно працювати при екстремально високих температурах зовнішнього повітря, є стратегічним завданням. Це дозволяє не лише забезпечити автономність (наприклад, у сільській місцевості або зонах військових конфліктів), а й зняти навантаження з національних енергосистем, перетворивши «дармове» тепло на корисний холод.

Об'єктом дослідження є складні взаємопов'язані процеси тепло- та масообміну, що протікають у функціональних апаратах абсорбційного холодильного агрегату (АХА) під час реалізації термодинамічного циклу на бінарній робочій суміші.

Предметом дослідження є сукупність термодинамічних та експлуатаційних закономірностей, що визначають зміну енергетичної ефективності (холодопродуктивності та холодильного коефіцієнта COP) водааміачного холодильного приладу залежно від динаміки кліматичних параметрів експлуатації та характеристик джерела теплової енергії.

Проведений термодинамічний аналіз циклу АХП при температурах конденсації $T_k > 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ та абсорбції $T_a > 45\text{ }^{\circ}\text{C}$, що дозволило визначити критичні точки «термічного замикання» циклу, при яких різниця концентрацій між багатим та бідним розчинами прямує до нуля ($\Delta\varepsilon \rightarrow 0$) [3].

При аномальній спеці (понад $40\ldots 45\text{ }^{\circ}\text{C}$) тиск у системі зростає, що змінює умови рівноваги між рідкою та паровою фазами. У водоаміачних машинах вода є абсорбентом, але її потрапляння у випарник (через неефективну дефлегмацію) є катастрофічним. При високих температурах зовнішнього повітря дефлегматор працює з меншим температурним напором, що підвищує ризик проскакування водяної пари. Розрахунок «запасу міцності» розчину в даному контексті — це визначення мінімально допустимої концентрації аміаку в парі ($\varepsilon_D \geq 0,998$), при якій температура кипіння у випарнику не підвищиться вище критичної межі (наприклад, $5\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Для того щоб АХП працювала при спеці $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, температуру в генераторі доводиться піднімати до $180\ldots 200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Це може привести до термічної дисоціації та інтенсивної корозії. Використання стабілізуючих добавок (наприклад, сполук сурми або спеціальних органічних сполук), які пасивують поверхню сталі та підвищують енергію активації реакції розпаду аміаку. Використання екологічно безпечні інгібіторів корозії, таких як силікати або молібдати натрію, дозволить захистити систему при високих теплових навантаженнях.

Для того, щоб при підвищенні зовнішньої температури автоматично збільшувалась подача тепла для підтримки тиску генерації, але водночас не було перегріву абсорбера, необхідно створити логічну схему автоматичного регулювання потужності теплового джерела на основі зворотного зв'язку від датчиків середовища.

Основним бар'єром для АХП у жарких зонах є критичне зростання тиску абсорбції (P_a), що наближається до тиску генерації, унеможливаючи рух холодоагенту. Для подолання ефекту «термічного запирання» циклу необхідно ввести дефлегматорів з внутрішнім обребненням та поперечним обдувом, що дозволить підтримувати градієнт температур, необхідний для отримання концентрації аміаку у парі $\varepsilon_D \geq 9,8\%$.

Застосування двоступеневого процесу поглинання, де пара з випарника спочатку потрапляє в абсорбер низького тиску, а потім доабсорбується в камері змішування з охолодженим слабким розчином. Це дозволяє штучно знизити парціальний тиск аміаку над розчином, забезпечуючи стабільну циркуляцію робочого тіла навіть тоді, коли традиційні системи зупиняються через вирівнювання тисків у контурі.

Підвищення температури зовнішнього повітря з $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $43\text{ }^{\circ}\text{C}$ призводить до зниження COP на $15\ldots 20\%$. Проте, впровадження адаптивної системи дефлегмації, дозволяє стабілізувати температуру в холодильній камері на рівні $2\ldots 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ навіть при критичних зовнішніх параметрах.

Вдосконалення конструкції абсорбційного холодильного приладу, дозволить системі функціонувати в діапазоні зовнішніх температур від $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ без критичного зниження продуктивності. Ключовим фактором стійкості АХП до жаркого клімату є ефективність роботи абсорбера та якість очищення парів у дефлегматорі. Використання запропонованих систем дозволить знизити експлуатаційні витрати на 30% у порівнянні з електричними моделями при використанні сонячних колекторів як основного джерела тепла.

Результати роботи можуть бути впроваджені при серійному виробництві побутових та промислових АХП нового покоління, що відповідають вимогам екологічної безпеки та енергоефективності.

Література:

4. LIFE Climate Change Mitigation and Adaptation. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/life-climate-change-mitigation-and-adaptation_en.

5. Arora C. P. Refrigeration and Air Conditioning. — 3rd ed. — McGraw Hill Education, 2021. — 932 p. <https://ru.scribd.com/document/1012286594/Refrigeration-and-Air-Conditioning-3rd-Edition-C-P-Arora>
6. Srivastava S., Agarwal R. Heat and Mass Transfer Analysis in Ammonia-Water Absorbers for High Ambient Temperatures // International Journal of Refrigeration. — 2023. — Vol. 145. — P. 112–125. https://www.researchgate.net/publication/258552417_An_analytical_study_on_heat_and_mass_transfer_for_ammonia-water_system_in_a_vertical_falling-film_type_of_absorber_and_generator



УДК 622.692

ВЛАСТИВОСТІ ВИСОКОВ'ЯЗКОЇ НАФТИ

Сагала В.В., здобувач СВО Магістр, ОНТУ, м. Одеса, sglvltt@gmail.com

Під час видобутку, транспортування та переробки високов'язких нафт виникають технологічні ускладнення, особливо в зимовий період. Використання сучасних емпіричних моделей дозволяє точно прогнозувати зміну в'язкості сировини залежно від температури ще на етапі проєктування. Це забезпечує можливість впровадження ефективних систем підігріву, вибору оптимальної товщини теплоізоляції та точного дозування депресорних присадок. Такий підхід гарантує стабільну роботу магістральних трубопроводів за будь-яких температурних умов.

Метою роботи є дослідження температурної залежності кінематичної в'язкості та густини високов'язкої нафти в діапазоні температур від 0 °С до 70 °С з використанням різних апроксимаційних емпіричних моделей, отриманих на основі експериментальних даних.

Для апроксимації температурної кривої в'язкості нафти та нафтопродуктів використовують експоненціальні та логарифмічні залежності, зокрема рівняння Рейнольдса-Філонова та формулу Вальтера (стандарт ASTM D341) [1, 2]. Для визначення густини нафти використовують відомі залежності [1].

Чисельне моделювання проведено за наступними вихідними даними: діапазон зміни температури від 0°С до 70°С; коефіцієнт кінематичної в'язкості при 20°С – 163,3 мм²/с; коефіцієнт кінематичної в'язкості при 50°С – 28,2 мм²/с; густина за 20°С 921 кг/м³; температура застигання 262 К. Результати наведені на рис. 1 та рис. 2.

Таблиця 1 – Зміна коефіцієнту кінематичної в'язкості нафти

t, °C	0	10	20	30	40	50	60	70
v, мм ² /с	988,1	369,8	163,3	82,3	46,2	28,2	18,5	12,8

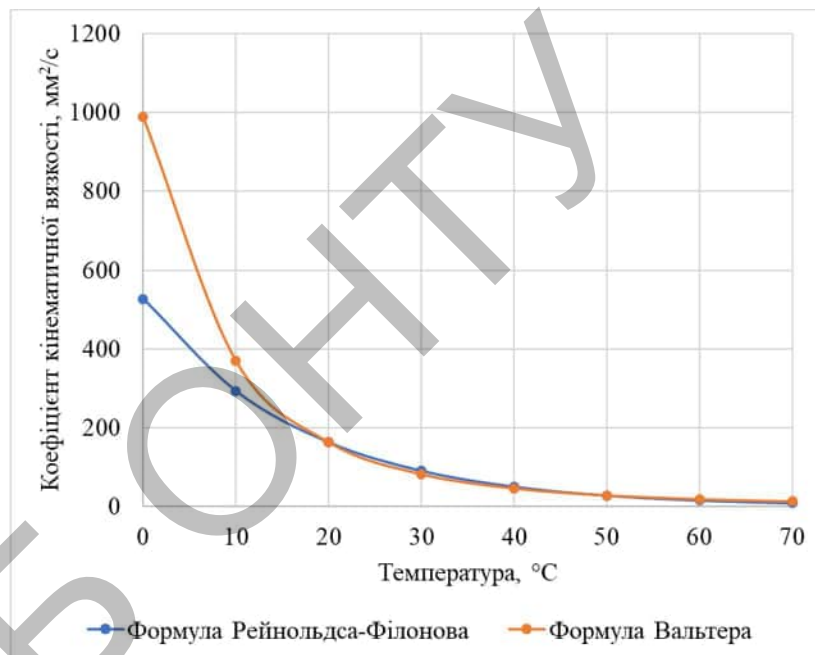


Рисунок 1 – Залежність коефіцієнту кінематичної в'язкості нафти від температури за формулами Рейнольдса-Філонова та Вальтера

Отримані дані показують, що при зниженні температури з 70°C до 0°C коефіцієнт кінематичної в'язкості підвищується в 77 разів (методика Вальтера).

Використання методики Вальтера є доцільнішим для інженерних розрахунків, оскільки вона забезпечує кращий збіг з численними експериментальними даними у широкому діапазоні температур. На відміну від спрощеної формули Рейнольдса-Філонова, рівняння Вальтера базується на подвійному логарифмуванні в'язкості, що дозволяє мінімізувати похибку.

Таблиця 2 – Зміна густини нафти

t, °C	0	10	20	30	40	50	60	70
ρ_0	933	927	921	914	908	902	896	890

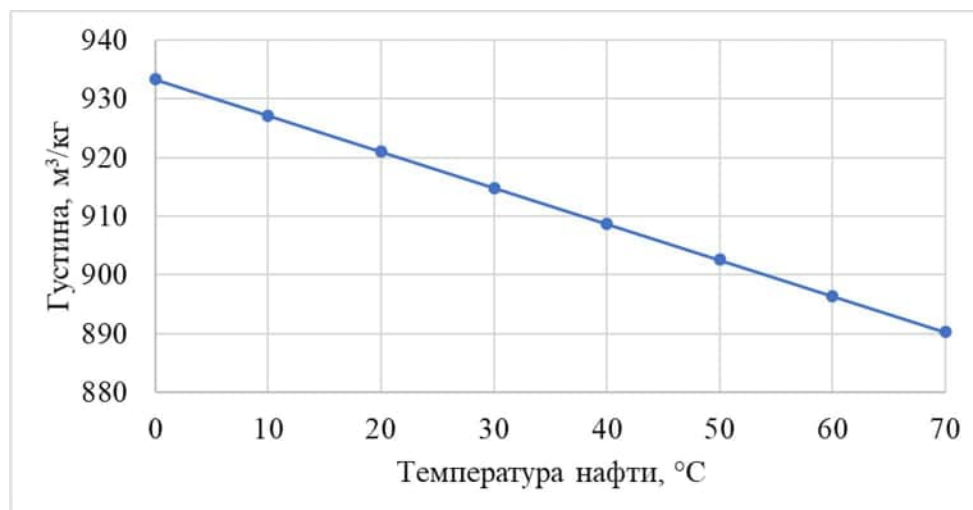


Рисунок 2 – Залежність густини нафти від температури

Результати розрахунку показують, що при зниженні температури з 70°C до 0°C густина нафти підвищується на 5%.

При зниженні температури в'язкість і густина нафти значно зростають, що призводить до збільшення гідравлічного опору як у трубопроводах, так і в самій робочій камері насоса. У таких умовах насос змушений працювати з навантаженням. Це спричиняє зростання споживаної потужності електродвигуна, що створює ризик його перевантаження, перегріву та аварійної зупинки. Крім того, висока в'язкість рідини на всмоктувальній лінії знижує допустимий кавітаційний запас.

Зі збільшенням густини та в'язкості також знижується загальний коефіцієнт корисної дії насосної установки. Частина механічної енергії витрачається не на переміщення об'єму рідини, а на подолання внутрішнього тертя її шарів. Натомість при підвищенні температури нафти її в'язкість знижується до значень, що забезпечують роботу системи насосна установка – трубопровід, як при перекачуванні малов'язких рідин.

При виборі температури підігріву нафти для перекачування рекомендується орієнтуватися на оптимальне співвідношення між зниженням в'язкості та енергетичними витратами, враховуючи, що найефективніше зниження опору тертя відбувається до моменту досягнення в'язкості в межах 100–150 сСт. Енергія, витрачена на нагрів понад цей поріг, стає дорожчою за енергію, яка заощаджується на роботі насосів. Практично температуру нагріву встановлюють на 10–15°C вище точки застигання нафти, щоб запобігти випаданню парафінів на стінках труби, але не вище 60–70°C, щоб уникнути інтенсивного випаровування легких фракцій.

Список інформаційних джерел

1. Кологривов М.М. Бузовський В.П. Транспортування і перевалка високов'язкої нафти та нафтопродуктів з підігрівом: навч.посібник. – Одеса: Видавництво ОНТУ, 2022. - 127 с.
2. ASTM D341-20. Standard Practice for Viscosity-Temperature Equations and Charts for Liquid Petroleum or Hydrocarbon Products. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020. 5 p.

Науковий керівник Кологривов М.М. доцент

УДК 621.3

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ КОНДУКТИВНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ

Волчок В.О., ст. викл. ОНТУ, Гусяков С.О. бакалавр ОНТУ,
Чута О.В. бакалавр ОНТУ, Одеса recvicv@gmail.com

До складу систем забезпечення теплового режиму (СЗТР) радіоелектронної апаратури (РЕА) в загальному випадку входять як засоби активного регулювання теплообміну і перенесення теплоти, так і засоби пасивного терморегулювання - конструктивні елементи, що організують теплообмін випромінюванням і теплопровідністю.

Внутрішній теплообмін повинен забезпечити відведення тепла від тепловиділяючих приладів і перенесення його до радіаційних поверхонь, а також перерозподіл тепла між різними елементами РЕА, зокрема між оболонками, що знаходяться в теплообміні з навколишнім простором.

При відсутності спеціальних засобів перенесення тепла між елементами теплообмін здійснюється випромінюванням між поверхнями і теплопровідністю по елементах конструкції.

Незважаючи на широке застосування систем кондуктивного охолодження (СКО) в спецтехніці, на сьогоднішній день не існує чітко сформульованих рекомендацій та методик їх теплового проектування як єдиного цілого [1]. Залишається відкритим питання і про можливість вибору на ранній стадії проектування параметрів системи охолодження.

Метою дослідження є покращення експлуатаційних параметрів, таких як надійність, масогабаритні характеристики та енерговитрати за допомогою підвищення ефективності СКО.

Математична модель стаціонарного режиму роботи СКО базується на необхідності аналізу теплового стану елементів конструкції корпусу блоку та його вузлів. В основу покладено дослідження температурного поля системи пластин з дискретними джерелами та стоками теплової енергії, з'єднаних між собою та мають теплообмін один з одним та навколишнім середовищем [2].

Для цього визначаються величини джерел та стоків на кожній із пластин, значення контактних теплових опорів між ними, визначається характер та інтенсивність їх теплообміну з навколишнім середовищем. Для вирішення поставленого завдання використовується диференціальне рівняння теплопровідності для обмеженої пластини з дискретним джерелом теплової енергії.

Для аналізу нестаціонарного теплового режиму роботи електронного блоку РЕА використовуються основні закономірності регулярного процесу нагрівання системи тіл із джерелами теплової енергії.

У процесі аналізу теплового режиму досліджуваної системи температурний розподіл плат і стінок блоку розглядався як пластина з локальними джерелами тепла, а також теплообміном на її основних поверхнях. Двовимірний стаціонарний розподіл перегріву в пластині, обумовлений присутністю джерела тепла, визначається шляхом розв'язання наступного рівняння:

$$\lambda_y \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} + \frac{q(y, z)}{\delta} - \alpha \frac{\vartheta}{\partial} = 0$$

$$0 < y < l_y \quad 0 < z < l_z \quad (1)$$

де l_y, l_z – розміри пластини, δ – товщина пластини;

λ_y, λ_z – ефективні теплопровідності у напрямку y та z ;

α – сумарний коефіцієнт тепловіддачі з поверхні пластини;

$q(y, z)$ – поверхнева густина теплового потоку від локальних джерел.

Для складання математичної моделі нестаціонарного теплового режиму електронного блоку у корпусі використовувалось спрощене уявлення блоку у вигляді складового тіла, що складається з ядра, тонкого зазору з малою теплоємністю, зовнішньої оболонки, на поверхні якої відбувається теплообмін із навколишнім середовищем. При цьому були враховані наступні припущення: потужність джерел теплової енергії незмінна у часі; температура навколишнього середовища стала; коефіцієнт тепловіддачі та теплофізичні параметри матеріалів не залежать від температури; регулярний режим настає з самого початку процесу.

Ядром тіла вважалися елементи конструкції, які знаходились у внутрішній замкнутій області блоку обмеженої корпусом. Оболонкою тіла було прийнято корпус блоку. Внутрішньою поверхнею оболонки системи умовно вважалася сукупність поверхонь джерел тепла на бічних стінках блоку.

У якості зазору нескінченно малої товщини, що розділяє ядро і оболонку тіла приймалося сумарне значення всіх теплових опорів між теплостоками вузлів і стінками корпусу. В умовах регулярного режиму структура темпу охолодження для аналізованої системи має вигляд:

$$m = \frac{a - \sqrt{a^2 - 4b}}{2} \quad a = m_0 + m_{\text{я}}(1 + \beta) \quad b = m_0 \cdot m_{\text{я}} \quad (2)$$

де $m_0, m_{\text{я}}$ – темпи охолодження оболонки та ядра, відповідно;

β – критерій, що враховує теплоємності оболонки і ядра та нерівномірність його температурного поля.

Коефіцієнт тепловіддачі тепловідвідних елементів вузлів має досить складну структуру, і отримати аналітичний вираз, що дає досить точне значення досить проблематично. Виходячи з цього, найбільш раціонально набувати значення коефіцієнта тепловіддачі теплопровідного елемента вузла методом послідовного наближення.

Отримано вираз для оцінки ефективної теплопровідності багатошарової друкованої плати з тепловідвідними шарами та наскрізними металізованими отворами в зонах джерела до зони стоку тепла для двох випадків. У першому джерело і стік тепла знаходяться на одній стороні, у другому – на протилежних сторонах друкованої плати.

Інформаційні джерела

1. Anatychuk, L. I., Lysko, V. V. (2012). Investigation of the effect of radiation on the precision of thermal conductivity measurement by the absolute method. *Journal of thermoelectricity*, 1, 65-73.
2. Волчок В.О., Булгару І.М., Густяков С.О. Дослідження системи охолодження РЕА з використанням речовин, що плавляться / В.О. Волчок, І.М. Булгару, С.О. Густяков // Зб. наукових праць ІХ Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конф. «Актуальні проблеми сучасної енергетики», 22 травня 2025, Херсон. – Херсон: ХНТУ, 2025. – С. 66-69

УДК 536.24:66.045.132

ЗАСТОСУВАННЯ ЕНЕРГІЇ МІКРОХВИЛЬОВОГО ПОЛЯ У ПРОЦЕСІ ВИГОТОВЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ГРАДІЄНТНИХ МАТЕРІАЛІВ

Волгушева Н.В., доцент, ОНТУ, м. Одеса, natvolgusheva@gmail.com

Тортіка Д.М., аспірант, ОНТУ, м. Одеса, dmitry6729@ukr.net

Розвиток сучасних технологій вимагає створення матеріалів зі спеціальними функціональними властивостями, які можуть забезпечувати підвищену якість і надійність виробів у складних експлуатаційних умовах. Функціонально-градієнтні матеріали (ФГМ) становлять собою інноваційний клас композитів з плавно змінюваними властивостями по об'єму, що дозволяє поєднати переваги різномірних компонентів і знизити внутрішні напруги, викликані нерівномірністю структури. Одним із перспективних напрямів виготовлення таких матеріалів є використання енергії мікрохвильового випромінювання [1, 2].

Мікрохвильове випромінювання забезпечує глибокий та рівномірний нагрів, який відбувається безпосередньо у матеріалі за рахунок селективного поглинання електромагнітної енергії. Це дозволяє контролювати температурні градієнти та скоротити час термообробки порівняно з традиційними методами, що особливо важливо для металокерамічних ФГМ із різними коефіцієнтами теплового розширення. Застосування мікрохвильового нагрівання створює умови для формування якісної градієнтної структури з мінімальними залишковими напругами, що значно підвищує експлуатаційні характеристики матеріалів [3].

Через природу швидкого нагрівання мікрохвилями процес з'єднання частинок матеріалу в процесі виготовлення матеріалів може бути у багато разів швидшим, ніж за допомогою звичайних методів. Основні переваги використання мікрохвильової енергії, такі: об'ємний та селективний нагрів, висока швидкість та енергоефективність, покращена мікроструктура та властивості та унікальний механізм ущільнення. В свою чергу виготовлення ФГМ обмежуються такі технічними складнощами, як: обмежене застосування для металів, ризик нерівномірного нагріву та теплового розгону, складність контролю температури та необхідність спеціального оснащення для обробки матеріалів, які погано поглинають мікрохвилі.

Взаємодія матеріалу з електромагнітним випромінюванням в мікрохвильовому діапазоні залежить від його діелектричних властивостей. Ефективність та рівномірність нагріву визначаються комплексною діелектричною проникністю матеріалу. Високі значення уявної частини (ϵ'') забезпечують швидке поглинання енергії, але зменшують глибину проникнення, створюючи ризик нерівномірного нагріву. Це особливо критично для багат шарових ФГМ, де кожен шар має власні діелектричні характеристики [4].

Про успішне виготовлення ФГМ за допомогою мікрохвильового поля наведено в статті [5]. Методом мікрохвильового спікання при температурі 1200°C протягом 30 хвилин було успішно виготовлено чотиришарові функціонально-градієнтні матеріали на основі системи W–Cu та алмаз/W–Cu. Застосування мікрохвильового поля забезпечило формування рівномірної градієнтної структури з високою щільністю (до 94,66%) та утворенням вольфрамового покриття товщиною 200 нм на поверхні алмазних частинок завдяки селективному нагріву компонентів. Отриманий алмаз/W–Cu ФГМ продемонстрував теплопровідність $220 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, що перевищує показники звичайного W–Cu композиту ($209 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), а також вищу стійкість до термічних ударів.

Висновки

1. Застосування енергії мікрохвильового поля є перспективним та ефективним методом виготовлення ФГМ, що дозволяє отримувати вироби з покращеними експлуатаційними характеристиками.
2. Експериментально підтверджено успішне виготовлення ФГМ методом мікрохвильового спікання. Отримані матеріали мають високу щільність (до 94,66%), рівномірну градієнтну структуру та покращені властивості.
3. Мікрохвильова технологія є дієвим інструментом для створення ФГМ з унікальним поєднанням властивостей, однак її реалізація вимагає врахування діелектричних характеристик матеріалів та контролю температурних режимів для уникнення небажаних ефектів, таких як тепловий розгін або нерівномірний нагрів.

Список інформаційних джерел

1. Wetherhold R. C., Seelman S., Wang J. The use of functionally graded materials to eliminate or control thermal deformation // *Composites Science and Technology*. 1996. № 56. P. 1099-1104.
2. Lee W. Y., Stinton D. P., Bernardt C. C., Erdogan F., Lee Y. D., Mutasin Z. Concept of functionally graded materials for advanced thermal barrier coatings applications // *J. of American Ceramic Society*. 1996. Vol. 19. P. 3003-3012.
3. M.A. Willert-Porada and R. Borchert, "Microwave sintering of metal-ceramic FGM", in I. Shiota and Y. Miyamoto (eds.), *Functionally Graded Materials* 1996, Elsevier, pp. 349–354.
4. Borrell A., Salvador M. D. *Advanced Ceramic Materials Sintered by Microwave Technology. Sintering Technology - Method and Application*. 2018. URL: <https://doi.org/10.5772/intechopen.78831>
5. Wei C., Cheng J., Zhang M., Zhou R., Wei B., Yu X., Luo L., Chen P. Fabrication of diamond/W–Cu functionally graded material by microwave sintering. *Nuclear Engineering and Technology*. 2022. Vol. 54, no. 3. P. 975–983. URL: <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.08.035>

УДК 628.112.9:621.577:620.92

РОЗРОБКА СИСТЕМ ОТРИМАННЯ ВОДИ З АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В ОДЕСЬКІЙ ОБЛАСТІ

Годик К.О., аспірант, Тітлов О.С., д.т.н, професор, Дорошенко В.М., д.т.н, професор, ОНТУ, м. Одеса, Україна

sugerslava@gmail.com, titlov1959@gmail.com; doroshenkovm444@gmail.com

Розвиток побутової та торговельної холодильної техніки йде в бік жорсткіших вимог до енергоефективності, екологічної безпеки й надійності в експлуатації. Холодильне обладнання споживає дуже суттєву частку електроенергії — як у домогосподарствах, так і в роздрібній торгівлі. Тому пошук принципово нових рішень, які б дозволили серйозно знизити енергоспоживання й підвищити ефективність, залишається вкрай актуальним завданням.

Традиційні парокомпресійні машини, які й досі домінують на ринку, дають досить високий коефіцієнт перетворення (COP 2,5–4,5), але мають низку серйозних мінусів: шум і вібрацію, використання синтетичних холодоагентів, повну залежність від електрики та обмежений ресурс компресора [2]. Саме тому все більшу увагу привертають альтернативні технології, зокрема абсорбційні холодильні прилади (АХП), які можуть працювати від теплової енергії різного походження.

Серед головних переваг абсорбційних систем — можливість використовувати низькопотенційне тепло (відпрацьоване тепло, сонячну енергію, газові джерела), практично повна відсутність рухомих механічних частин, безшумність і значно вища надійність [1]. Завдяки цим якостям АХП дуже перспективні для автономних установок, мобільних систем і роботи в особливих умовах.

Але, попри всі плюси, масового поширення абсорбційних приладів досі немає — головна причина в їх відносно низькій енергоефективності. Значення COP зазвичай не перевищують 0,6–0,8 [2]. Основний «вузький» момент — недосконалість тепломасообмінних процесів у ключових елементах: генераторі, конденсаторі, абсорбері та випарнику. Через це виникають значні теплові втрати й загальна ефективність циклу падає.

Крім того, у реальних конструкціях часто стикаємося з обмеженою холодопродуктивністю та недостатньою інтенсивністю теплообміну всередині холодильної камери. Це призводить до довгого виходу на робочий режим, нерівномірності температур і, як наслідок, гіршого зберігання продуктів.

У низці робіт [3–5] показано, що ефективність АХП дуже сильно залежить від організації теплових потоків і величини сумарного термічного опору в ланцюгу «випарник – охолоджуваний об'єм». Температуру в камері можна приблизно описати такою залежністю:

$$t_{\text{кам}} = t_0 + Q_0 \cdot R,$$

де t_0 — середня температура випарника;

Q_0 — холодопродуктивність;

R — сумарний термічний опір.

З цієї формули видно: щоб підтримувати потрібну температуру, можна або знижувати температуру випаровування (а це автоматично збільшує енергоспоживання), або зменшувати термічний опір — і другий шлях виглядає набагато розумнішим з погляду енергозбереження.

Тут особливо цікавими стають пасивні інтенсифікатори теплообміну — теплові труби (ТТ) та двофазні термосифони (ДФТС). Завдяки фазовим переходам робочої рідини вони забезпечують надзвичайно ефективний перенос тепла. Еквівалентна теплопровідність таких пристроїв може бути на порядки вищою, ніж у звичайних матеріалів, — це дозволяє суттєво зменшити температурні градієнти й вирівняти теплові поля.

Теплова труба — це герметичний пристрій із замкненим циклом випаровування-конденсації, а в двофазному термосифоні рідина циркулює переважно за рахунок гравітації, що робить конструкцію простішою й надійнішою. Інтеграція таких елементів в АХП дає змогу створити ефективні канали тепловідводу й додаткові ізотермічні поверхні, що значно покращує теплообмін.

Найдоцільніше застосовувати теплові труби та термосифони в таких вузлах:

- у генераторі — для інтенсифікації десорбції аміаку;
- у конденсаторі — для кращого скидання тепла в навколишнє середовище;
- в абсорбері — для покращення процесу поглинання;
- у випарнику та всередині камери — для зниження термічного опору й вирівнювання температури.

За даними досліджень [4,5], таке рішення дозволяє помітно підвищити коефіцієнт теплопередачі, усунути локальні перегріву й переохолодження, а також отримати приріст COP на 15–25 %. Для систем із початково низькою ефективністю це досить суттєвий результат.

Водночас інтеграція теплових труб і термосифонів у конструкцію АХП тягне за собою цілий комплекс науково-технічних питань: оптимальні схеми вбудовування, вибір геометричних і режимних параметрів, вивчення теплових режимів усієї системи, створення достовірних математичних моделей.

Отже, основна проблематика дослідження — це комплексне підвищення ефективності абсорбційних холодильних приладів через інтенсифікацію теплообміну, зниження термічних опорів і оптимізацію конструктивних рішень.

Розробка АХП із застосуванням теплових труб і двофазних термосифонів є на сьогодні актуальним і перспективним науково-технічним напрямком. Її успішне вирішення дозволить суттєво підняти енергоефективність холодильних систем, розширити сфери їх використання та ефективніше залучати низькопотенційні джерела енергії.

Список інформаційних джерел

1. Низькопотенційна енергетика : навч. посіб. / Редько А. О., Безродний М. К., Загорученко М. В., Ратушняк Г. С., Редько О. Ф., Хмельнюк М. Г.; Нац. техн. ун-т України "Київський політехнічний університет", Одес. нац. акад. харч. технологій, Харків. нац. ун-т будівництва та архітектури, Вінниц. нац. техн. ун-т. — Харків : Друкарня Мадрид, 2016. — 412 с.
2. Захаров М. Д., Тітлов О. С., Ботук Ю. С., Василів О. Б., Рева Н. В. Енергетичні і екологічні показники компресійної та абсорбційної побутової холодильної техніки. Наукові праці Одеської державної академії харчових технологій. — 1997. — № 17. — С. 167–175.
3. Захаров М. Д., Тітлов О. С., Рева Н. В., Лозовський С. І., Вольневич С. В., Завертаний В. В. Розробка нових схем та дослідження елементів конструкцій апаратів для первинної термічної обробки та збереження харчових продуктів. Наукові праці Одес. держ. акад. харч. технол. — 1995. — № 15. — С. 119–127.
4. Тітлов О. С., Захаров М. Д. Науково-технічні основи створення енергозберігаючих побутових абсорбційних холодильних приладів. Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. — 2009. — № 35, Т. 1. — С. 113–127.
5. Тітлов О. С. Розробка побутової абсорбційної холодильної техніки різного функціонального призначення з використанням сучасних технологій. Наукові праці Одеської державної академії харчових технологій. — 1997. — № 17. — С. 266–272.

УДК 628.112.9:621.577:620.92

РОЗРОБКА СИСТЕМ ОТРИМАННЯ ВОДИ З АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В ОДЕСЬКІЙ ОБЛАСТІ

Годик К.О., аспірант, Тітлов О.С., д.т.н, професор, Біленко Н.О. PhD, доцент, Осадчук Є.О., к.т.н., доцент, ОНТУ, м. Одеса, Україна

godykkostas@gmail.com, titlov1959@gmail.com; bilenko.onaft@gmail.com, osadchuk1980@gmail.com

Південні регіони України, зокрема Одеська область, стикаються з дефіцитом якісної прісної води через мінералізацію підземних вод та нестабільність відкритих джерел [1]. Водночас висока

вологість повітря та значний рівень сонячної інсоляції роблять атмосферну генерацію води (АГВ) перспективним рішенням. Проблема існуючих систем полягає у високій енергоемності, що потребує впровадження інверторних технологій та відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) [2].

Ефективність роботи системи атмосферної генерації води (АГВ) безпосередньо залежить від термодинамічних параметрів навколишнього середовища: температури повітря ($T, ^\circ\text{C}$) відносної вологості ($\phi, \%$) та інтенсивності сонячної радіації ($I, \text{Вт}/\text{м}^2$). Одеський регіон, розташований у степовій зоні на узбережжі Чорного моря, має унікальне поєднання високої інсоляції та морського впливу на вологість повітря.

Для аналізу використано усереднені багаторічні метеорологічні дані для Одеси. Характерною особливістю регіону є висока відносна вологість у ранкові та вечірні години, що зумовлено морськими бризами.

- Літній період (червень–серпень): Середня денна температура становить $24\text{--}28\text{ }^\circ\text{C}$ при цьому вночі та вранці відносна вологість сягає $75\text{--}85\%$. Вдень, через прогрів повітря, вологість падає до $45\text{--}55\%$.
- Перехідний період (травень, вересень): Температурний режим $15\text{--}20\text{ }^\circ\text{C}$ при стабільно високій вологості ($60\text{--}70\%$).

Саме ці умови є оптимальними для роботи водоаміачної холодильної машини, оскільки висока вологість знижує енерговитрати на досягнення "точки роси".

Одеська область входить до першої зони сонячної активності України [3, 4]. Середньорічний рівень надходження сонячної енергії на горизонтальну поверхню становить близько $1300 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2$ [5]

Місяць	Сонячна інсоляція ($\text{кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2$)	Середня вологість (%)	Продуктивність установки	Примітка
Січень	1.2	84	Низька	Ризик обмерзання випарника
Лютий	1.9	82	Низька	Низький вміст вологи в г/кг
Березень	3.1	78	Середня	Початок стабільної роботи
Квітень	4.4	72	Висока	Оптимальні температури
Травень	5.8	68	Максимальна	Висока сонячна активність
Червень	6.4	66	Максимальна	Пік генерації
Липень	6.6	63	Максимальна	Найбільша сонячна активність
Серпень	5.9	62	Максимальна	Висока температура повітря
Вересень	4.4	68	Висока	Стабільна робота
Жовтень	2.8	75	Середня	Скорочення світлового дня
Листопад	1.4	82	Низька	Брак сонячної енергії
Грудень	0.9	85	Мінімальна	Робота переважно від мережі

Хоча відносна вологість взимку в Одесі висока (до 85%), абсолютний вміст вологи дуже низький через низькі температури.

- При $25\text{ }^\circ\text{C}$ та вологості 60% у повітрі міститься приблизно $12 \text{ г}/\text{кг}$ повітря. [6]
- При $2\text{ }^\circ\text{C}$ та вологості 85% у повітрі міститься лише близько $3.8 \text{ г}/\text{кг}$ повітря.

Висновок : Економічний план повинен враховувати, що система є сезонно-ефективною. Найвищий ККД спостерігається протягом 7–8 місяців на рік (з квітня по жовтень). У зимові місяці установка може працювати як допоміжна або потребувати додаткового підігріву повітря, що енерговитратне.

В розрахунку окупності ми не беремо 365 днів на рік. Ми беремо приблизно 210–240 продуктивних днів. Це зробить дослідження чесним та науково обґрунтованим.

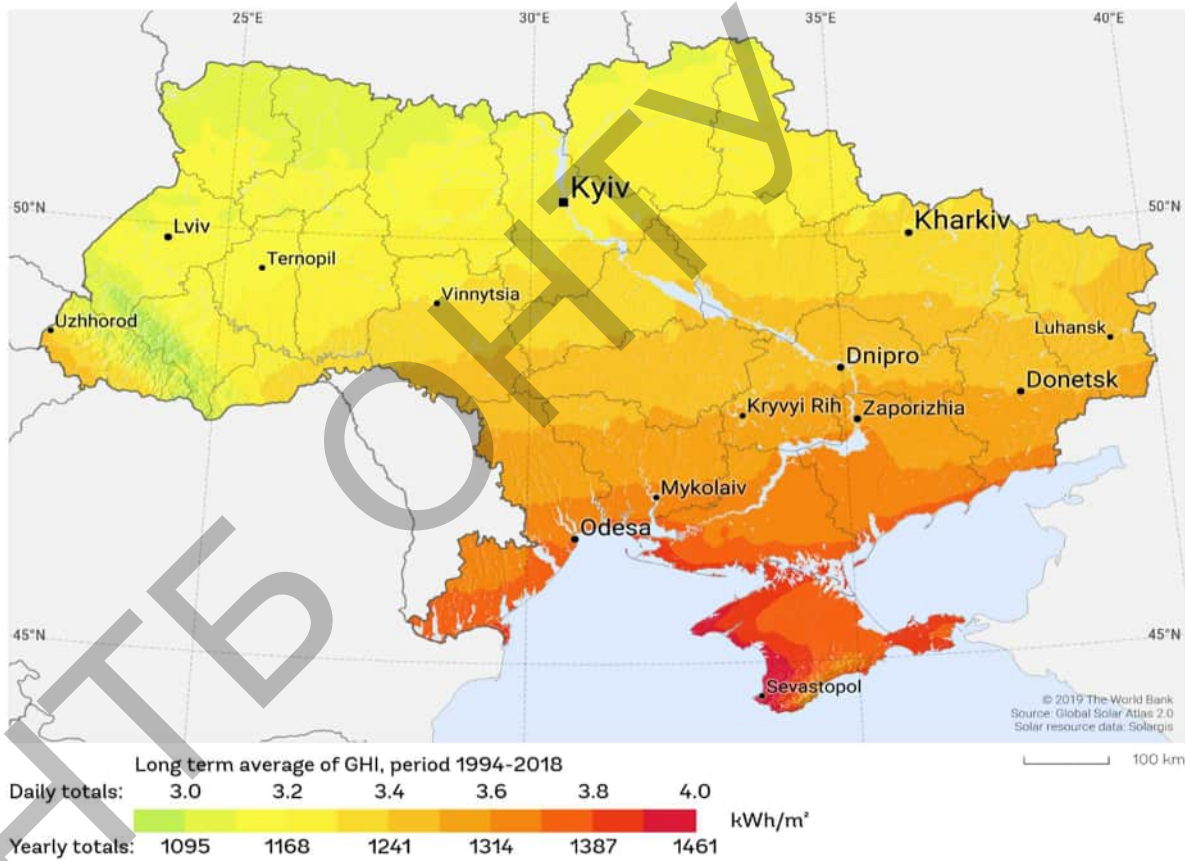


Рис. 1 Карта інсоляції України та Одеської області

Максимальна інтенсивність випромінювання спостерігається з 10:00 до 16:00, що збігається з піком енергоспоживання інверторного компресора при роботі на максимальних обертах.

На основі аналізу кліматичних даних встановлено, що робота установки протягом 16 годин (з 06:00 до 22:00) дозволяє:

1. Захопити ранковий пік вологості (06:00–09:00), коли вологи в повітрі найбільше, а температура випарника може бути вищою, що підвищує тепловий коефіцієнт (COP).
2. Забезпечити повне покриття потреб енергії від PV-панелей (10:00–17:00).
3. Використати вечірнє зниження температури (18:00–22:00) для полегшення процесу конденсації.

Розрахунок вологовмісту повітря для Одеси показує, що в літні місяці кожен кубометр повітря містить від 12 до 18 грамів вологи. Використання інверторного компресора дозволяє гнучке змінювати витрату холодоагенту: при зниженні вологості вдень компресор переходить на підвищені оберти (за рахунок надлишку сонячної енергії), а вранці працює в енергоощадному режимі при високій вологості. Таким чином кліматичні умови Одеського регіону є сприятливими для експлуатації систем АГВ з використанням ВДЕ. Комбінація високої ранкової вологості та значної денної інсоляції підтверджує доцільність впровадження саме 16-годинного графіка роботи установки з інверторним керуванням.

Запропонована система отримання води з атмосферного повітря на базі ПКТ (парокомпресійний термотрансформатор) з комбінованими джерелами електричної енергії по холодопродуктивності значно перевершує абсорбційні схеми [7-10].

Відмінною особливістю такої пропозиції є використання компресора, що працює на змінному струмі, що значно знижує собівартість виробу. Пропонується для такого компресора використовувати в світлий час доби сонячні батареї з перетворювачем постійного струму в змінний струм.

Пусковий струм, при періодичному запуску електродвигуна компресора ПКТ, подається короткочасно від стаціонарного мережевого джерела електричної енергії.

У темний, вечірній і ранковий час доби ПКТ може працювати від стаціонарного мережевого джерела електричної енергії, як в режимі отримання води, так і в режимі кондиціонування повітря.

Системи отримання води з атмосферного повітря на базі ПКТ найбільш ефективним при температурах атмосферного повітря 35...40 °C і відносній вологості понад 70 %

Запропонована модифікація АВТ з адіабатним випарником розчину може працювати в складі систем отримання води з атмосферного повітря при температурах гарячого джерела від 100 °C та цілком конструктивно вписується в елементну базу типових моделей. В середньому випарник розчину становить близько 10 % від поверхні абсорбера.

Незважаючи на позитивний досвід застосування в конструкціях абсорберів і випарників аміаку АВТТ (абсорбційний водоаміачний термотрансформатор) радіальної капілярної насічки в подальших дослідженнях АВТ необхідно буде вивчити ступінь впливу її на процеси тепломасообміну при випаровуванні розчину в ПГС (парогазова суміш).

При моделюванні та розрахунку процесу випаровування аміаку зі слабого ВАР (водоаміачний розчин) в ПГС була використана аналогія зворотного у напрямку процесу абсорбції пари аміаку з ПГС слабким ВАР. На сьогоднішній день автору невідомі ні теоретичні, ні експериментальні дослідження такого процесу.

Запропонована універсальна схема АВТ з двома підтискаючими бустер-компресорами дозволяє істотно підвищити експлуатаційні характеристики не тільки джерела холоду, але і надійність роботи системи отримання води з атмосферного повітря в цілому. АВТ дозволяє вирішувати завдання кондиціонування повітря у житлових та громадських приміщеннях, опалення, отримання води із атмосферного повітря та холодильного зберігання плодів, овочів та іншої сільськогосподарської продукції і сировини. Схема також дозволяє оперативно реагувати на зміни умов експлуатації в частині температур джерела теплової енергії та довкілля [11].

Доведено, що система отримання води з атмосферного повітря на ба-зі АВТТ з бустер-компресором, може бути працездатна з джерелами тепла вище ніж 85 °C і використовувати в своїй роботі широко поширені у світі сонячні колектори з водою в якості теплоносія.

Порівняльний аналіз енергетичних витрат в АВТТ з бустер-компресором і в пароконпресійних аналогах показав енергетичну перевагу АВТТ при роботі з сонячним джерелом тепла, як при експлуатації в помірному кліматі, так і тропічному у 2,4...3,3 рази [12].

З урахуванням знайдених можливостей роботи АВТТ з бустер-компресором на низькотемпературних джерелах теплової енергії та високої енергетичної ефективності можна рекомендувати їх для роботи в складі комфортних і технологічних систем кондиціонування повітря.

Отримані результати розрахунку термодинамічних циклів АВТТ дозволяють визначити «оптимальну» температуру джерела тепла для реалізації циклу термотрансформатора з максимальною енергетичною ефективністю при експлуатації в діапазоні практичних температур експлуатації і можуть бути рекомендовані для розробників систем автоматичного управління АВТТ різного функціонального призначення.

Розроблено конструкції систем отримання води з атмосферного повітря на базі насосного і безнасосного АВТТ, в тому числі і для роботи в польових умовах в автономному режимі, які можна одночасно рекомендувати і для отримання води, і для комфортного і технологічного кондиціонування повітря.

Розроблено конструкцію повітроохолоджувача в складі систем отримання води з атмосферного повітря з регенеративним теплообмінником на базі двофазних термосифонів. Схема дозволяє підвищити продуктивність системи отримання води за рахунок попереднього охолодження вхідного повітряного потоку в процесі теплообміну з холодним потоком.

Список інформаційних джерел

1. Коновалов, О. В., & Петренко, М. С. (2022). Атмосферна генерація води: стан та перспективи. Холодильна техніка та технологія, 58(2), 45–52.
2. Saleh, H. M., & Al-Amir, S. (2023). Atmospheric water generation: A review of current technologies. International Journal of Environmental Science, 12(1), 104–118.
3. Мінрегіон України. (2021). Настанова з розрахунку інсоляції об'єктів цивільного призначення (ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010). Київ: ДП «УкрНДЦ». www.ksv.biz.ua

4. Васильєв, В. В. (2020). Відновлювані джерела енергії: Одеса: Видавництво «Одеська політехніка», 215 с.
5. Український гідрометеорологічний центр. (2024). Метеорологічні дані та кліматичні графіки по Одеській області. Київ: ДСНС України. <https://meteo.gov.ua>
6. Желіх, В. М., & Юркевич, Ю. С. (2021). Теплогенеруючі установки та холодильна техніка. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 162 с.
7. Тітлов О. С., Осадчук Є.О., Цой О. П., Алімкешова А. Х., Джамашева Р. А. Розробка автономних систем охолодження з урахуванням відновлювальних і непридатних джерел теплової енергії // Холодильна техніка та технологія. – 2019. – Т.55. – № 2. – С. 84-96. <https://doi.org/10.15673/ret.v55i2.1357>.
8. Тітлов О.С., Гратій Т.І., Біленко Н.О. Підвищення енергетичної ефективності абсорбційних холодильних приладів. Холодильна техніка та технологія. 2019. 55 (5-6). – С. 293-303. <https://doi.org/10.15673/ret.v55i5-6.1659>.
9. Osadchuk, E., Titlov, O. (2020). Analysis of the climatic features of the regions of the primary application of the systems for producing water from the atmospheric air. Scientific Journal «ScienceRise», 4, 3–9. DOI: 10.21303/2313-8416.2020.001390. <http://journal.eu-jr.eu/sciencerrise/article/view/1449>
10. Біленко, Н., & Тітлов, О. (2021). Розробка абсорбційних холодильних агрегатів на низькопотенційних джерелах теплової енергії. Refrigeration Engineering and Technology, 57(1), 13-25. <https://doi.org/10.15673/ret.v57i1.1976>.
11. Тітлов, О., Годик, К., Кравченко, Д., & Осадчук, Є. (2021). Розробка установок отримання води з атмосферного повітря в складі систем життєзабезпечення житлового будинку в кліматичних умовах Одеської області. Refrigeration Engineering and Technology, 57(4), 218-228. <https://doi.org/10.15673/ret.v57i4.2212>
12. Titlov Oleksandr, Vasylyv Oleh, Osadchuk Yevhen. Development of absorption water-ammonia refrigerating machines for operation in the systems for extracting water from atmospheric air. 10th IIR Conference: Ammonia and CO2 Refrigeration Technologies, Ohrid, 2023. 317-324. DOI: 10.18462/iir.nh3-co2.2023.0038. <https://iifir.org/en/fridoc/development-of-absorption-water-ammonia-refrigerating-machines-for-147001>

УДК 621.575.932

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОМАСООБМІНУ В СИСТЕМАХ ГЕНЕРАЦІЇ АТМОСФЕРНОЇ ВОДИ З МЕТОЮ ЗНИЖЕННЯ ПИТОМИХ ЕНЕРГОВИТРАТ

Агатій І.В., аспірант, Тітлов О.С., д.т.н., проф. Нікітін Д.М., д.т.н., проф.
ОНТУ, м. Одеса, Україна

iliusagastus@gmail.com, titlov1959@gmail.com, dnn@utecon.com

На сучасному етапі розвитку цивілізації дефіцит кондиційної прісної води перестав бути локальною проблемою окремих аридних регіонів і трансформувався в один із найнагальніших глобальних викликів ХХІ століття. Згідно з аналітичними звітами профільних інституцій ООН, станом на період 2025–2026 років, понад 2,2 мільярда осіб позбавлені стабільного доступу до безпечно керованих послуг питного водопостачання. Ситуація ускладнюється стрімкою деградацією традиційних гідрологічних ресурсів: відкриті прісноводні артерії та підземні водоносні горизонти вичерпуються темпами, що значно перевищують швидкість їхнього природного відновлення.

Основними детермінантами цього процесу є неконтрольована інтенсифікація промислового та сільськогосподарського водозабору, а також глобальні кліматичні аномалії, що призводять до непередбачуваних змін у режимі опадів та масштабного опустелювання територій [1].

У пошуку альтернативних способів автономного водозабезпечення особливу увагу привертає атмосферне повітря. Воно являє собою колосальний, динамічне відновлюваний акумулятор вологи, сумарний об'єм якої в навколоземному просторі оцінюється астрономічною цифрою — близько 13 000 км³. Цей ресурс є доступним практично в будь-якій точці планети, незалежно від наявності наземних джерел. Проте, незважаючи на високий потенціал, масове впровадження атмосферних генераторів води стикається з серйозним технологічним бар'єром — критично високою енергоємністю процесу фазового переходу водяної пари в рідкий стан.

Технологічний аналіз сучасних конденсаційних установок показує, що для отримання всього 1 літра питної води необхідно затратити від 0,3 до 0,6 кВт·год електричної енергії. В умовах нестабільності світового енергетичного ринку та стрімкого удорожчання енергоносіїв такі показники роблять експлуатацію атмосферних генераторів води економічно обтяжливою для пересічного споживача та промисловості.

Критичним завданням сучасної прикладної науки є пошук конструктивних та термодинамічних рішень, здатних знизити питомі енерговитрати на 20–30 %. Досягнення такої мети дозволить трансформувати атмосферну генерацію води з вузькоспеціалізованої дорогої технології (яка зараз використовується переважно в експедиційних чи військових цілях) на масовий, комерційно привабливий та доступний продукт, здатний забезпечити водяну незалежність домогосподарств та громад.

В роботі розглянуто сукупність складних, взаємопов'язаних процесів тепломасообміну, що супроводжують фазове перетворення водяної пари в рідкий стан при взаємодії пароповітряної суміші з робочими елементами систем водоодержання, які пов'язані з перенесенням енергії від потоку вологого атмосферного повітря до твердої поверхні охолодження в умовах вимушеного або природного руху. Вивчено закономірності утворення конденсату на охолоджених металевих поверхнях, зокрема перехід від менш ефективної плівкової конденсації до енергоощадної крапельної та фізико-хімічна взаємодія молекул води з активними центрами твердих сорбентів (силікагелів, цеолітів або інноваційних MOF-матеріалів) у процесах поглинання вологи з повітря та її подальшої термічної регенерації.

Ми розглядали фундаментальні та прикладні закономірності, що встановлюють кількісний та якісний взаємозв'язок між конструктивними параметрами системи, аеродинамічними режимами та загальною енергетичною ефективністю процесу отримання води. Розглянуто вплив кроку обребрення, форми каналів та мікрорельєфу теплообмінників на інтенсифікацію тепловіддачі та швидкість видалення конденсату, а також вплив швидкості повітряного потоку, рівня турбулізації та структури прикордонного шару у забезпеченні максимальної інтенсивності вологовиділення. Вплив температурного напору (різниці між температурою стінки та точкою роси), робочого тиску та параметрів холодильного циклу на питомі витрати енергії (kWh/L). Це дозволило визначити шляхи мінімізації втрат енергії при охолодженні неконденсованих компонентів повітря (азоту, кисню) та оптимізувати баланс між витратами на примусову циркуляцію повітря і виходом готового продукту.

Для дослідження фазових перетворень вологого атмосферного повітря при його охолодженні нижче температури точки роси (T_{dp}) треба визначити теоретичний мінімум енергії, необхідного для виділення одиниці маси конденсату при різних початкових параметрах середовища. Аналіз втрат від незворотності процесів теплообміну дозволить ідентифікувати вузли системи з найбільшим потенціалом для енергозбереження.

Порівняльний аналіз гідрофільних (змочуваних) та гідрофобних (водовідштовхувальних) поверхонь дозволить обґрунтувати параметри текстурованих покриттів, які забезпечують перехід до «стрибаючого» режиму крапельної конденсації, що різко знижує термічний опір шару рідини.

Впровадження в канали теплообмінника штучних турбулізаторів потоку, дифузотно-конфузорних переходів та гофрованого оребрення дозволяє зруйнувати пристінний ламінарний шар повітря, збільшити число Нуссельта (Nu) та забезпечити рівномірний розподіл температурного поля по всій поверхні конденсації, що прямо веде до зниження потужності, необхідної для приводу вентиляторів. Це дозволяє розробити рекомендації щодо експлуатації установок у нічний період (коли відносна вологість природним чином зростає) та оцінка якості отриманої води на відповідність санітарно-гігієнічним нормам питного водопостачання

Традиційні компресійні цикли демонструють різке падіння ККД при відносній вологості повітря $\phi < 40\%$, оскільки енерговитрати на охолодження великих об'ємів повітря стають непропорційними до кількості отриманої води. Використання дворівневої схеми: на першому етапі високопористі адсорбенти концентрують вологу з сухого повітря навіть при $\phi \approx 10-15\%$. На другому етапі відбувається термічна десорбція. Використання низькопотенційного сонячного тепла (через вакуумні колектори) для регенерації сорбенту дозволяє виключити енергоємну роботу компресора в пікові години сонячної інсоляції. Застосування термоелектричних модулів Пельтьє для фінальної конденсації дозволяє провести точне регулювання температури та повну відсутність рухомих частин, що підвищує надійність системи в пустельних умовах. У більшості існуючих атмосферних генераторів води компресор працює в режимі «on/off» або з фіксованою температурою випарника, що призводить до надлишкового переохолодження повітря і марних витрат електроенергії. Використання інверторним методом керування параметрами циклу дозволить системі в реальному часі аналізує дані з датчиків вологості та температури, обчислюючи актуальну точку роси ($T_{др}$). [2].

Підтримання температури поверхні конденсації в межах $\Delta T = 1-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ нижче за $T_{др}$ є термодинамічне оптимальним. Це мінімізує енергію на чутливе охолодження сухого повітря, фокусуючи всю потужність установки виключно на прихованому теплі фазового переходу, що дозволяє знизити споживання енергії на 15-20% при збереженні стабільного виходу води.

Плівкова конденсація, характерна для звичайних алюмінієвих або мідних теплообмінників, створює водяний шар, який діє як ізолятор, перешкоджаючи подальшій віддачі тепла. Якщо застосовувати метод хімічного осадження з парової фази для створення супергідрофобних нанопокриттів з ефектом лотоса. Це звільнить центри конденсації для нових циклів та збільшить локальний коефіцієнт тепловіддачі у 4-6 разів порівняно з плівковим режимом. Зменшення термічного опору дозволяє підвищити температуру кипіння холодоагенту в циклі, що безпосередньо покращує холодильний коефіцієнт (COP) системи.

Використання попереднього охолодження вхідного повітря за допомогою рекуперативного теплообмінника дозволяє знизити теплове навантаження на компресор. Це призводить до зниження сумарного енергоспоживання на 15–18%. Ефект найбільш виражений при температурах вище $+30^{\circ}\text{C}$, де різниця ентальпій вхідного та вихідного повітря є максимальною.

Ефект «самоочищення» поверхні від мікрокрапель, призводить до зростання середнього коефіцієнту тепловіддачі на 28% порівняно з плівковим режимом на базовому алюмінієвому теплообміннику, що дозволяє підняти температуру кипіння холодоагенту на $2...3\text{ }^{\circ}\text{C}$, покращує енергетичну ефективність всього циклу. Інтеграція адсорбційного ступеня дозволяє системі залишатися працездатною навіть у нічний час у пустельних регіонах, коли традиційні конденсатори виходять із робочого діапазону. Зниження питомих витрат до $0,34\text{ кВт}\cdot\text{год/л}$ дозволяє наблизити вартість атмосферної води до вартості води з промислових систем демінералізації [3].

Висновки:

Використання «залишкового холоду» осушеного повітряного потоку для попереднього охолодження вхідного повітря дозволяє змістити робочу точку процесу в зону інтенсивної конденсації, знижуючи загальне енергоспоживання установки на 15–18%.

Застосування інтелектуальних алгоритмів керування потужністю компресора та швидкістю обертання вентиляторів (інверторні технології) дозволяє підтримувати стабільний градієнт температур на поверхні конденсації. Це запобігає нераціональним витратам енергії на надлишкове охолодження повітря в періоди коливання добових температур, забезпечуючи стабільний вихід конденсату навіть у перехідні періоди «день-ніч».

Модифікація поверхонь теплообміну супергідрофобними нанопокриттями ініціює перехід до крапельної конденсації з ефектом «стрибаючих крапель». Це знижує термічний опір конденсатного шару та підвищує коефіцієнт тепловіддачі на 28 %, що дає змогу працювати з вищими температурами кипіння холодоагенту.

Список літературних джерел

1. Снежкін Ю. Ф., Данілова О. В. Енергоэффективные технологии кондиционирования та осушения повітря: Монографія. — К.: Наукова думка, 2021. — 312 с.
2. Kim H., Yang S., Rao S. R., et al. Water harvesting from air with metal-organic frameworks fueled by natural sunlight // Science. — 2017. — Vol. 356. — P. 430–434
3. Milani D., Abbas A., Vassallo A. Modeling and optimization of atmospheric water generator // Energy Conversion and Management. — 2021. — Vol. 228. — Art. 113645

УДК 628.112:697.94:551.582(477.74)

РОЗРОБКА СИСТЕМ ОТРИМАННЯ ВОДИ З АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В СКЛАДІ СИСТЕМ ЖИТТЄЗАБЕПЕЧЕННЯ ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ В КЛІМАТИЧНИХ УМОВАХ ОДЕСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Годик К.О., аспірант, Білий О.С., аспірант, Тітлов О.С., Осадчук Є.О., к.т.н., доцент, ОНТУ, м. Одеса, Україна

godykkostas@gmail.com, talexbeliy68@gmail.com, itlov1959@gmail.com; osadchuk1980@gmail.com

Загальновідомо, що найціннішим ресурсом на планеті найближчим часом стане вода, а боротьба за водні ресурси в світі є одним з факторів в сучасних збройних конфліктах і, ця тенденція буде тільки зростати в досяжному майбутньому [1]. Близько 70 відсотків поверхні земної кулі вкрито водою, проте на 97,5 відсотків вона складається з солоної води. Решта 2,5 відсотки припадають на прісну воду, майже дві третини якої перебуває в замороженому стані в льодовикових шапках. Втім основна частина прісної води знаходиться в 1-кілометровому шарі атмосфери. Її сумарний обсяг становить не менше 1.000,000,000,000,000 літрів. Тому одним з найважливіших завдань є розвиток технологій, що дозволяють добувати воду з повітря, причому безпосередньо на місці, де вона необхідна. Проблема добування води з повітряного басейну — актуальне наукове завдання, яке до теперішнього часу не має усталеного й домінантного рішення. У переважній більшості випадків розробки залишаються на рівні патентів. Конструктивні рішення, що підтверджують заявлені параметри, у цих патентах поодинокі. Спочатку коротко зупинимось на відомих підходах, пов'язаних з розрахунками параметрів вологого повітря.

За даними вчених географічного факультету МДУ [2, 3], щороку з поверхні суші й океану випаровується 577 000 км³ води, стільки ж потім випадає у вигляді опадів. Цей цикл повторюється 45

разів на рік. Річковий річний стік становить лише 7 % від загальної кількості опадів. Таким чином, виявляється, що основне джерело прісної води — атмосферна вода — поки що не використовується. Однак за даними цієї роботи [3], середня абсолютна вологість біля земної поверхні становить 11 г/м³, а в тропічних регіонах вона доходить до 25 г/м³ і вище. Велика кількість країн тропічного поясу потерпає від відсутності прісної води, хоча її вміст в атмосфері досить значний. Наприклад, в Джибуті упродовж усього року практично не буває дощів, але абсолютна вологість становить 18–24 г/м³. Кількість води, що проноситься над кожним квадратом у 10 км² Аравійської пустелі або Сахари, дорівнює за обсягом озера площею 1 км² і глибиною 50 м.

Тому одним з найважливіших завдань є більше розвинення технологій, що дозволяють витягати воду з повітря, причому безпосередньо на місці, де вона необхідна. Найбільші перспективи мають методи, пов'язані з роботою автономних генераторів штучного холоду, які гарантовано забезпечують температуру охолодження повітря нижче точки роси.

Найбільш перспективним напрямком тут є розробка систем отримання води з атмосферного повітря на базі абсорбційних водоаміачних термотрансформаторів (АВТТ), що працюють від джерела низько потенційного тепла - сонячної енергії [4-7].

З урахуванням аналізу відомих технічних рішень [8-11] запропоновано такі схеми систем життєзабезпечення житлового будинку, на приклади кліматичних умов Одеської області з використанням традиційних та відновлюваних джерел енергії.

Запропонована базова схема (Рис.1), яка є удосконаленою технічною пропозицією універсальної системи опалення, охолодження (кондиціювання) та отримання води з атмосферного повітря на базі традиційних та відновлюваних джерел енергії (сонячних колекторів).

Універсальна система працює наступним чином. Розглянемо кілька режимів роботи системи у різних кліматичних умовах.

Холодна пора року:

Основне джерело системи опалення житлового приміщення 1 – котел 8 на традиційних джерелах теплової енергії – газі або мазуті.

Гарячі продукти згоряння контактують з теплоносієм (водою) системи опалення 3, нагрівають його та за рахунок циркуляції теплоносія відбувається обігрів приміщення.

Продукти згоряння, що йдуть по витяжній трубі 9, мають температуру 250-350 °С. Цей температурний потенціал цілком прийнятний для використання як джерело тепла для термотрансформаторів абсорбційного типу, у тому числі з водоаміачним розчином (ВАР) як робоче тіло.

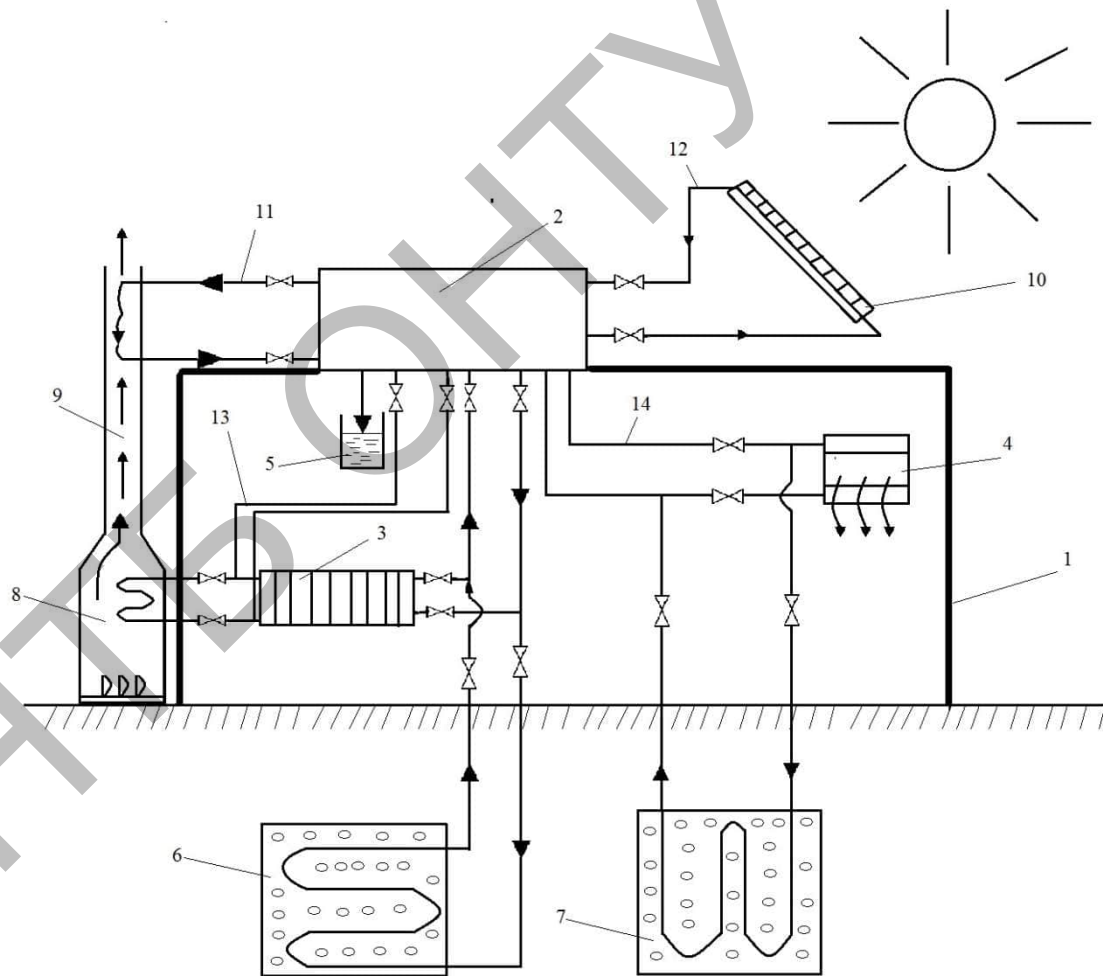


Рис.1 Схема універсальної системи опалення, охолодження (кондиціонування) та отримання води з атмосферного повітря на базі традиційних та відновлюваних джерел енергії (сонячних колекторів): 1- житловий будинок; 2-термотрансформатор; 3-система опалення; 4-система охолодження; 5-система отримання води; 6-акумулятор тепла; 7-акумулятор холоду; 8-котел; 9-витяжна труба; 10-система сонячних колекторів; 11 - утилізаційний контур гарячого теплоносія; 12 – контур сонячних колекторів; 13 - контур тепла, що відводиться елементів АВТТ; 14 – контур холодоносія.

У темний час доби гарячий теплоносій системи каналів 11 подається в акумулятор тепла 6, а система опалення при цьому блокується засувками.

У світлий час доби підключається абсорбційний термотрансформатор (АВТТ) 2. На його генератор подається нагрітий в акумуляторі теплоносій 6, а на випарник теплоносій з контуру 12 системи сонячних колекторів 10.

Відводиться в циклі АВТТ теплота абсорбції, конденсації та дефлегмації використовується для системи опалення 6 за допомогою циркуляції контуру 13.

У цьому випадку АВТТ 2 працює у режимі теплового насоса, тобто. використовує низькопотенційну теплоту атмосферного повітря для системи опалення 6 житлового приміщення 1.

У цьому режимі роботи АВТТ 2, залежно від температури зовнішнього повітря, може підключати котел 8, що досить рідко для кліматичних умов Одеського регіону.

Таким чином, у світлий час доби може бути економія традиційного палива для роботи системи опалення 6 житлового будинку 1.

Тепла пора року:

У теплу пору року вирішуються завдання охолодження повітря у житловому приміщенні 1.

Джерелом теплової енергії АВТТ 2 є енергія сонячного випромінювання від системи сонячних колекторів 10.

АВТТ 2 виробляє охолодження циркулюючого холодоносія в системі 14. Холодний потік подається на систему охолодження 4 (повітроохолоджувач). Охолоджене повітря розподіляється у приміщенні 1 залежно від потреб.

У пік денного сонячного випромінювання АВТТ 2 працюватиме з максимальною продуктивністю по холоду і при цьому матимуть місце та надлишки тепла.

В цьому випадку для запасу теплової енергії для роботи АВТТ 2 у темний час доби підключається акумулятор тепла 6, а для збереження надлишку холоду акумулятор холоду 7.

При заході сонця на генератор АВТТ подають гарячий теплоносій з тепла акумулятора 6, а весь вироблений холод подається в систему охолодження 4.

У разі нестачі запасеного тепла АВТТ відключається і на систему охолодження 4 подається охолоджений теплоносій акумулятора холоду 7.

Таким чином АВТТ вирішує завдання опалення та охолодження з максимальним використанням відновлюваного джерела тепла – сонця.

Одночасно із завданнями опалення та кондиціонування повітря запропонована універсальна система може вирішувати завдання отримання води з атмосферного повітря. Це завдання вирішується при роботі АВТТ як охолодження повітря, тобто. у теплі та спекотні періоди року.

Збір отриманого конденсату проводиться в ємність 5, звідки потім використовується для господарських потреб.

Клімат в Одесі – м'який та помірний, завдяки активному регулюванню з боку кліматичного стану Чорного моря, адже він, у свою чергу, відповідає за те, яка погода буде влітку та взимку. Як правило, в спеку море послаблює спеку, а в зимовий час, робить морози легко переносимими та м'якими. Саме цю чудову особливість вже давно помітили вчені, які вивчають клімат Одеси. Звернемося до історії. Ось, наприклад, що писали перші лікарі-курортологи в далекому 1833 році: «Яка знаходиться на певній височині і омивається Чорним морем із заходу і півдня, оточена зі сходу і півночі степовими зонами Одеса, дарує одні з найчудовіших умов для відпочинку, адже ніщо в цьому місці не перешкоджає свободі руху повітря. Тут повітряні маси м'які, сухі, а влітку клімат Одеси найсприятливіший.

Найдовший сезон у всьому році в Одесі – літо. Як правило, він триває не менше 145 днів. Оздоровчий сезон у цій місцевості триває, починаючи з травня місяця, і триває до жовтня. У цей період включений і такий знаменитий період, як «бабине літо», він відрізняється сухим прозорим повітрям та безвіттям.

Кліматичний район Одеси охарактеризований величезною кількістю яскравих сонячних днів – їх у році близько 300. Сонячне сяйво досягає максимуму у липні, а мінімальне спостерігається у грудні.

Цілий рік у Одесі тепла погода. Найтепліший місяць на рік – липень. Тут середня температура – 23 °С, а максимальна – 39 °С. Найхолодніший місяць – січень. Середня температура за добу мінус 2,5 °С.

Рельєф місцевості курортного району Одеси сприяє проникненню холодних мас повітря, із заходу – насичених вологою мас з Атлантичного океану, з півдня – вологого та теплого повітря з басейну Середземномор'я.

В Одесі спостерігаються сильні вітер. Влітку - північний румби, а в зимовий - східно-північні. Середня швидкість вітру – близько 5 метрів за секунду. У серпні та липні часто дують бризи.

Починаючи з березня і закінчуючи жовтнем, вологість повітря на Чорному морі, входи у відповідність до зони комфорту, це близько 50-70 % вологості.

На відміну від інших регіонів, в Одесі зима відрізняється м'якістю та нестійкістю снігових покривів із частими відлигами, зі слабкою морозною погодою. Взимку можна спостерігати як хмарні, так і похмурі дні, іноді тумани. Влітку спостерігається суха, малохмарна та тепла погода.

Барометричний тиск спостерігається в межах 755 та 760 мм рт. стовпця, гігієнічні норми зазвичай не перевищують.

Подольськ, розташований у північно-західній частині Одеської області. Клімат міста помірно-континентальний. Клімат у місті близький до помірного, кількість опадів є значною, навіть у посушливий місяць. Середньорічна температура — 10.1 °С. Випадає близько 576 мм опадів на рік. Найсухіший місяць лютий-31 мм опадів. У червні кількість опадів досягає свого піку, в середньому 73 мм. Липень є найтеплішим місяцем — 22.5 °С. Січень у свою чергу є найхолоднішим місяцем року мінус 2.8 °С.

Місяць із найвищою відносною вологістю – січень (82.95 %). Місяць із найнижчою відносною вологістю – серпень (56.34 %). Місяць із найбільшою кількістю дощових днів - червень (10.57 днів). Місяць з найменшим номером – лютий (6.43 днів).

Ізмаїл знаходиться у південній зоні помірного клімату: спекотне, посушливе літо та помірно холодна зима. Період активної вегетації тут припадає на період з 15 квітня по 20 жовтня. Найменша кількість опадів випадає у лютому, становить близько 30 мм. Більшість опадів випадає в червень, в середньому 61 мм. Температури є найвищими у липні, на позначці 24.6 °С. Січень є найхолоднішим місяцем із температурами в середньому мінус 0.3 °С. Зміна опадів між посушливими та дощовими місяцями – 31 мм. Найнижча відносна вологість протягом року – випадає в серпні (57.85 %). Місяць із найвищою вологістю - січень (82.48 %). Найменша кількість дощових днів очікується в серпні (5.23 днів), а найбільше дощових днів – у травні (9.83 днів).

ВИСНОВКИ

1. Було проведено аналіз міст Одеського регіону на кращий результат коефіцієнту вологовипадання, при конкретних критеріях для утворення конденсату.

До уваги взяли най північніше місто-Подольськ, місто у середині регіону-Одеса, та місто на півдні-Ізмаїл. При проведенні аналізу середньої температури за місяць було виявлено найліпші місяці для утворення конденсату: квітень, травень, червень, липень, серпень, вересень, жовтень. Завдяки середній температурі та відносній вологості за місяць, було знайдено ентальпію та абсолютний вологовміст за місяць. При відомих змінних знайшли дельту ентальпії та дельту абсолютного вологомісту, виходячи із цього також знайшли коефіцієнт вологовипадання. Було виявлено що місто Ізмаїл є найвигіднішим для утворення конденсату, та отримання води з атмосферного повітря, у зв'язку з південними координатами регіону.

2. Доведено, що система отримання води з атмосферного повітря на базі АВТТ з бустер-компресором, може бути працездатна з джерелами тепла вище ніж 85 °С і використовувати в своїй роботі широко поширені у світі сонячні колектори з водою в якості теплоносія. Порівняльний аналіз енергетичних витрат в АВТТ з бустер-компресором і в парокомпресійних аналогах показав енергетичну перевагу АВТТ при роботі з сонячним джерелом тепла, як при експлуатації в помірному кліматі, так і тропічному у 2,4...3,3 рази [17, 18].

3. У кліматичних зонах з дефіцитом водних ресурсів для підвищення енергетичної ефективності процесу отримання води з атмосферного повітря слід оцінювати можливість роботи з максимально гарантованої температурою точки роси за допомогою аналізу кліматичних карт регіону.

Список інформаційних джерел

1. Международное десятилетие действий «Вода для жизни», 2005-2015 годы. Механизм «ООН – водные ресурсы» [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://www.un.org/ru/waterforlifedecade/unwater.shtml>.
2. Аль Майтами Валид Абдулвахид Мохаммед. Направления совершенствования водообеспечения в странах аравийского полуострова [Текст] / Аль Майтами Валид Абдулвахид Мохаммед, Г.Т. Фрумин // Современные проблемы науки и образования. – 2007. – №6 – С. 13–17.
Режим доступа: URL: www.science-education.ru/24-769.
3. Аль Майтами Валид Абдулвахид Мохаммед. Экологически безопасные технологии водообеспечения в странах аравийского полуострова [Текст] / Аль Майтами Валид Абдулвахид

- Мохаммед, Г.Т. Фрумин // Современные проблемы науки и образования. – 2008. – №3 – С. 111–115. Режим доступа: URL: www.science-education.ru/22-764.
4. Ищенко, И.Н., Титлов А.С., А.Н. Краснопольский А.Н. Перспективы применения абсорбционных водоаммиачных холодильных машин в системах получения воды из атмосферного воздуха. Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Вип. 7. – 2011. – С.92–97.
 5. Осадчук Е.А., Титлов А.С. Поиск Энергетически эффективных тепловых режимов водоаммиачной абсорбционной холодильной машины в широком диапазоне эксплуатационных параметров. Харчова наука і технологія. 2012. №4. С. 79-82.
 6. Осадчук Е.А., Титлов А.С., Мазуренко С.Ю. Определение энергетически эффективных режимов работы абсорбционной водоаммиачной холодильной машины в системах получения воды из атмосферного воздуха. Холодильна техніка та технологія. 2014. №4. С. 54-57.
 7. Осадчук Е.А., Титлов А.С., Кузаконь В.М., Шлапак Г.В. Разработка схем насосных и безнасосных абсорбционных водоаммиачных холодильных машин для работы в системах получения воды из атмосферного воздуха. Технологический аудит и резервы производства. 2015. №3/3(23). С. 30-37.
 8. Дорошенко А.В., Гончаренко В.А. Разработка многофункциональных солнечных систем на основе теплоиспользующего абсорбционного цикла и тепломасообменных аппаратов с подвижной насадкой. Холодильна техніка та технологія. – 2015. – № 1. – С. 35-46.
 9. The European Solar Thermal Industry Federation (ESTIF) [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL : <http://www.estif.org>.
 10. Thermal solar line [Text] // Rotartica, air conditioning appliances: - Solar Line, single effect 4,5 kW. Режим доступа: URL : <http://www.rotartica.com>.
 11. SorTech. Innovative Cooling! [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL : <http://www.sortech.de/en/trade/solare-kuehlung>.
 12. Василів О.Б., Тітлов О.С., Осадчук Є.О. Спосіб одержання води з атмосферного повітря. Патент на корисну модель: пат. 100195 Україна: МПК (2015.01) E03B 3/28 (2006.01) F25B 15/00. № 201501512; заявл. 20.02.2015; опубл. 10.07.2015, Бюл. № 13.
 13. Василів О.Б., Тітлов О.С., Осадчук Є.О., Кузаконь В.М. Установка для одержання води з атмосферного повітря. Патент на корисну модель: пат. 104853 Україна: МПК E03B 3/28 (2006.01) F25B 15/10. № 201507385; заявл. 23.07.2015; опубл. 25.02.2016, Бюл. № 4
 14. Василів О.Б., Тітлов О.С., Осадчук Є.О., Кузаконь В.М. Спосіб одержання води з атмосферного повітря. Патент на корисну модель: пат. 104854 Україна: МПК E03B 3/28 (2006.01) F25B 15/10. № 201507386; заявл. 23.07.2016; опубл. 25.02.2016, Бюл. № 4
 15. Василів О.Б., Тітлов О.С., Осадчук Є.О., Кузаконь В.М. Спосіб одержання води з атмосферного повітря і установка для його здійснення. Патент на винахід: пат. 114658 Україна: МПК E03B 3/28 (2006.01) F25B 15/10 (2006.01). F25D 21/14 (2006.01). № 201506905; заявл. 13.07.2015; опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13.
 16. Osadchuk, E., Titlov, O. (2020). Analysis of the climatic features of the regions of the primary application of the systems for producing water from the atmospheric air. ScienceRise, 4, 3–9.
 17. Kholodkov A., Osadchuk E., Titlov A., Boshkova I., Zhykhareva N. Improving the energy efficiency of solar systems for obtaining water from atmospheric air. Eastern- European Journal of Enterprise Technologies. № 3/8(93)2018. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.133643.
 18. A. Titlov A., E. Osadchuk E., A. Tsoy, A. Alimkeshova, R. Jamasheva. Development of cooling systems on the basis of absorption water-ammonia refrigerating machines of low refrigeration capacity. Eastern- European Journal of Enterprise Technologies. № 2/8(98)2019.

UDC 544.452.2: 621.1.01

MODELING THE PROCESS OF HEAT GENERATION UNDER STATIC CONDITIONS DURING AN EXOTHERMIC CHEMICAL REACTION

Volodymyr Doroshenko, graduate student, Oleksandr Titlov, Doctor of Technical Sciences, Professor znajpomni@gmail.com, titlov1959@gmail.com
Odesa National University of Technology (Ukraine)

The economic development of any nation, including Ukraine, is largely dictated by the availability and management of fuel and energy resources. Securing these resources—specifically oil and gas—remains a matter of critical importance. Unfortunately, Ukraine is not fully self-sufficient in terms of domestic oil production, and there is little reason to expect the discovery and development of massive new high-capacity fields in the near future. Currently, Ukraine's recoverable oil reserves stand at approximately 75 million tons, of which roughly 66 % are classified as hard-to-recover (Fig. 1).

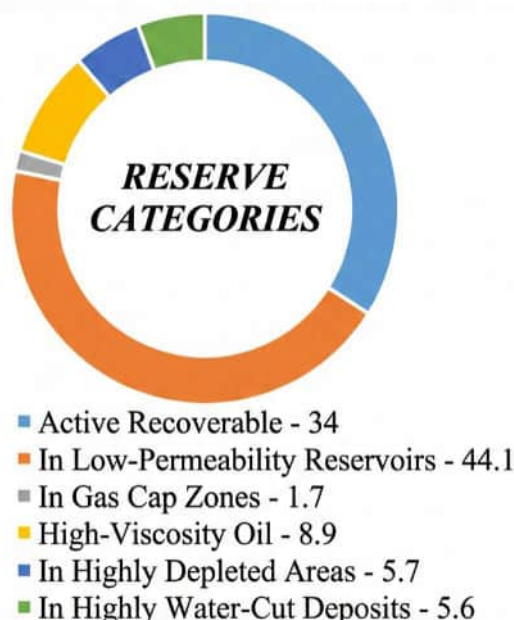


Fig. 1. Distribution of oil reserves by categories

The current oil recovery factor (ORF) is approximately 30 % of the initial oil in place (IOIP), while the recovery factor for dissolved gas stands at 40 %.

As natural reserves are gradually depleted, the rational use of energy resources becomes increasingly vital. This necessitates the optimization of existing field development systems by integrating the theoretical foundations of thermal power engineering, which are rooted in the laws of thermodynamics, heat and mass transfer, and fluid dynamics. Such an approach allows for the study of irreversible thermobaric changes within porous media, providing a framework for improving extraction systems specifically for hard-to-recover oil reserves.

In laboratory experiments, we have investigated the characteristics of thermal energy generation during the exothermic reaction of granulated magnesium with hydrochloric acid at pressures of 10, 20, and 30 MPa. This pressure range is the most appropriate (characteristic) for the oil fields of Ukraine and is entirely sufficient for obtaining generalized empirical dependencies.

In accordance with the formulated conditions, table 1 and figure 6 present the statistically processed results of the research on the kinetics of the exothermic dissolution of granulated magnesium in a 15%

hydrochloric acid solution at system pressures of 10, 20, and 30 MPa.

Table 1. Reaction time and pressure based on amount of reacted magnesium

Reaction time, h	Amount of reacted magnesium at corresponding pressures, g		
	10 MPa	20 MPa	30 MPa
0,1	0,5	0,1	0,05
0,25	0,6	0,15	0,07
0,5	0,64	0,2	0,1
0,75	0,66	0,23	0,12
1	0,67	0,25	0,135
1,25	0,675	0,27	0,15
1,5	0,68	0,29	0,16
2	0,6802	0,32	0,18
2,5	0,6805	0,35	0,19
3	0,6808	0,37	0,2
3,5	0,681	0,39	0,212
	0,683	0,4	0,22

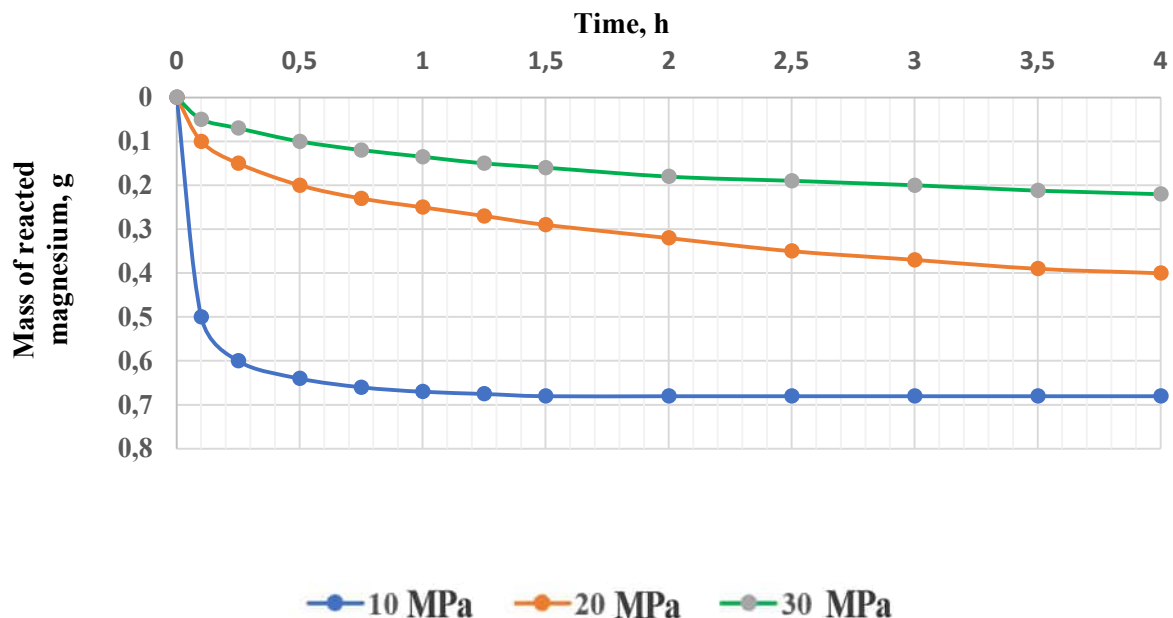


Fig. 2. Kinetic curves of granulated magnesium dissolution in a 15% hydrochloric acid solution at pressures of 10, 20, and 30 MPa

Figure 3 presents the results of research on temperature changes in the reaction zone at a pressure of 10 MPa, which is within the operating range of the majority of oil fields in Ukraine that are in the late stage of

development.

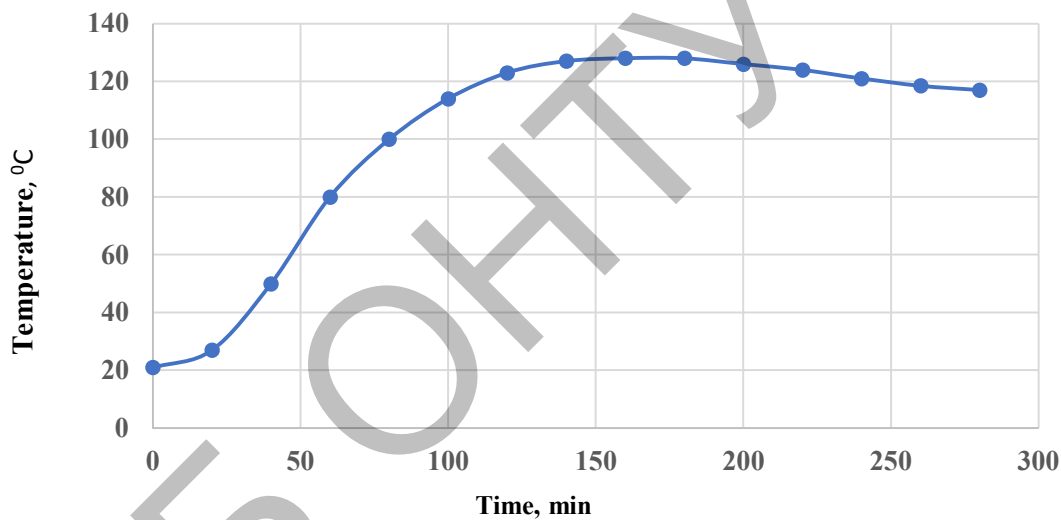


Fig. 3. Dynamics of temperature change in the reaction zone at a pressure of 10 MPa

Experimental studies have confirmed that the reaction rate, as well as the intensity of the thermal effect, slow down significantly with increasing pressure in the reaction zone. Thus, at a pressure of 10 MPa, the temperature reaches approximately 130 °C within the first 150 s, and then monotonically decreases. This is primarily due to the depletion of the active acid concentration and the reduction of the contact area between the reactants.

The mathematical interpretation of the experimental results for system pressures from 0 to 30 MPa is described quite accurately by the empirical equation we obtained:

$$G_1 = G_2 \cdot [1 - \exp \cdot (0,41e^{-0,693P^{0,531}} \cdot \tau^{0,39-0,002P})] \quad (1)$$

where P — pressure in the reaction zone, MPa; τ — time from the start of the reaction, h; G_1, G_2 — amount of reacted magnesium and initial amount before the reaction, g.

Equation (1) determines the dissolution time of granulated magnesium in a 15% hydrochloric acid solution at system pressures up to 30 MPa:

$$\tau = \left[\frac{\ln \left(1 - \frac{G_1}{G_2} \right)}{-0,41 \exp \cdot (-0,63P^{0,531})} \right]^{\frac{1}{0,39-0,002P}} \quad (2)$$

The interaction of magnesium with hydrochloric acid is a typical example of a heterogeneous process, the intensity of which is determined by the rate of direct and reverse diffusion of reagents and products. The rate of diffusion processes depends on the concentration gradient, while the kinetics of magnesium dissolution is proportional to the square of the acid concentration at the phase boundary. At a pressure of 10 MPa, approximately 60 % of the metal mass dissolves within the first hour. The decrease in reaction rate with increasing pressure is explained by changes in hydrodynamic conditions; specifically, hydrogen bubbles decrease in size and detach less effectively from the surface of the granules. The formation of such a stable gas shell shields the magnesium, limiting acid access to the metal and increasing the overall duration of the process.

Using the Lukvynske oil field as an example, where the reservoir temperature (38 °C) slightly exceeds the paraffin crystallization temperature (35 °C), and its melting occurs only at 55 °C, we have demonstrated the possibility of generating thermal energy in the filter zone, as the most contaminated section of the wellbore.

The calculation of the required amount of heat for the destruction of paraffin deposits and their conversion into a liquid state is carried out on the basis of the classic calorimetric equation:

$$Q_T = \Delta T_1 \sum_{i=1}^n \varepsilon_i V_i \quad (3)$$

where $\Delta T_1 = T_p - T_{por}$ — temperature increment or the difference between the paraffin melting point and the reservoir temperature; ε_i — heat capacity of the reactants; V_i — amount of reagents per linear meter of reservoir thickness or perforation interval.

The required amount of heat, taking into account the volumes of acid and pipes, can be determined by equation 10:

$$Q = (T_K - T_p) \cdot (\varepsilon_{HCl} \cdot V_{HCl} + \varepsilon_K \cdot V_K) \quad (4)$$

where T_K — temperature in the reaction zone, °C; T_p — reservoir temperature, °C; ε_{HCl} — specific heat capacity of the hydrochloric acid solution, kcal/kg°C; ε_K — specific heat capacity of the production casing pipes, kcal/kg°C; V_{HCl} — magnesium chloride solution volume, m³; V_K — volume of the pipe metal within the productive horizon, m³.

It is known that the amount of heat obtained during the interaction of acid with 1 kg of magnesium Q is 4,520 kcal. Based on this, the implementation of the technological process—for example, according to scheme A in a typical well of the Lukvynske field with a production casing diameter of 0.168 m and a perforation interval length of 8 m—requires the use of 86 kg of granulated magnesium (bulk density of magnesium granules is 880 kg/m³), which necessitates determining the optimal number of reagents involved.

With a specific heat capacity of the hydrochloric acid solution ε_{HCl} , equal to 0,83 kcal/kg°C, for 86 kg of magnesium, the required amount of acid will be:

The ratio of acid to magnesium for the adopted well conditions, by analogy with the experiments, is:

$$m_{HCl} = \frac{m_{Mg} \cdot m_G}{G_2} = \frac{86 \cdot 54,47}{1,3} = 3537 \text{ kg}, \text{ or } 3,5 \text{ m}^3 \quad (5)$$

where m_G - the amount of acid required to dissolve 1.3 g of magnesium.

In the equation 11, m_{HCl} and m_K can be calculated using equation 12:

$$m = V \cdot \rho \quad (6)$$

The volume of the casing pipes (V_K) in the filter (perforation) interval is determined as:

$$V_K = \left(\frac{\pi d_{outer}^2}{4} - \frac{\pi d_{inner}^2}{4} \right) \cdot h \quad (7)$$

where d_{inner} and d_{outer} the outer and inner diameter of the production casing, then:

$$V_K = \left(\frac{3,14 \cdot 0,154^2}{4} - \frac{3,14 \cdot 0,146^2}{4} \right) \cdot 8 = 0,022 \text{ m}^3 \quad (8)$$

The mass of the pipes m_K is determined by:

$$m_K = V_p \cdot \rho = 0,022 \cdot 7850 = 172,7 \text{ kg} \quad (9)$$

The temperature difference between the reaction zone and the reservoir is determined by:

$$\Delta T = \frac{Q \cdot m_{Mg}}{V_{HCl} \cdot \rho_{HCl} \cdot \varepsilon_{HCl} + V_K \cdot \rho_K \cdot \varepsilon_K} \quad (10)$$

or:

$$\Delta T = \frac{Q \cdot m_{Mg}}{m_{HCl} \cdot \varepsilon_{HCl} + m_K \cdot \varepsilon_K} \quad (11)$$

It follows that the temperature difference will be:

$$\Delta T = \frac{4520 \cdot 86}{3539 \cdot 0,83 + 172,7 \cdot 0,46} = 128,8^{\circ}\text{C} \quad (12)$$

Based on the temperature difference, it is possible to calculate the required temperature—and, specifically, the amount of heat generated at the bottom of the well—due to the exothermic reaction of magnesium with hydrochloric acid under static reaction conditions:

$$T_r = \Delta T + T_p = 128,8 + 35 = 163,8^{\circ}\text{C} \quad (13)$$

The presented research results on generating thermal energy at the bottom of the well indicate the feasibility of achieving temperatures significantly higher than the melting point of paraffin.

Thus, applying the principles of thermal engineering to generate heat through an exothermic reaction makes it possible to clear the filtration zone of paraffin deposits and increase the oil productivity of the well.

CONCLUSIONS

1. It has been confirmed that fuel and energy resources—the supply of which, particularly oil and gas, remains extremely relevant—are the most widespread in the functioning of thermal power engineering as an industrial sector.
2. The effectiveness of using an exothermic chemical reaction as a method for generating thermal energy at the bottom of oil wells to increase their productivity has been proven.
3. It has been shown that the reaction of granulated magnesium with hydrochloric acid allows for the creation of a local thermal energy source at the bottomhole, aimed at clearing paraffin deposits from the filter zone, increasing the flow rate, and improving the recovery of residual, hard-to-extract oil reserves.
4. A conceptual design for a mobile high-pressure autoclave has been proposed for the rapid study of exothermic reaction kinetics under conditions closely resembling real well environments.
5. The influence of pressure on the rate of heterogeneous reactions accompanied by the release of a gaseous phase has been experimentally confirmed.
6. An empirical equation for the kinetics of magnesium dissolution in a hydrochloric acid solution has been obtained in "pressure-reaction time" coordinates.
7. Technological schemes for implementing the thermal energy generation process under static conditions of an exothermic chemical reaction at the bottomhole have been developed.
8. The procedure for generating thermal energy at the bottom of a typical well in the Lukvynske oil field has been demonstrated.
9. The presented research results serve as a significant basis for further studies on the dynamics of exothermic reactions within the oil-saturated pore space.

УДК 641.5.06:536.5:001.5

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ ТЕПЛОВОЇ КАМЕРИ У СКЛАДІ ПОБУТОВОГО ПРИЛАДУ КОМБІНОВАНОЇ ТЕРМІЧНОЇ ДІЇ

Дмитренко Д.В., аспірант, Тітлов О.С., д.т.н, професор, ОНТУ, м. Одеса, Україна
basheaction@gmail.com, titlov1959@gmail.com

Аналіз теплових режимів абсорбційних холодильних агрегатів (АХА) вказує на значний потенціал створення енергоефективних побутових приладів із суміщеними функціями охолодження та термічної обробки продуктів [1-4]. У таких комбінованих системах теплота холодильного циклу не розсіюється в навколишнє середовище, а акумулюється у спеціальній тепловій камері (ТК), де підтримується температура, вища за кімнатну.

Енергозбереження забезпечується за рахунок використання вторинного (скидного) тепла без додаткових витрат електроенергії. Попередні дослідження засвідчили, що для більшості побутових харчових технологій достатнім є діапазон 50...70 °С. ТК може застосовуватися для термостатування, підігріву або переробки сировини (сушіння, в'ялення, ферментація тощо) [5-7]. Серед сучасної побутової техніки необхідний температурний потенціал (понад 70 °С) здатні забезпечити лише АХА, зокрема на ділянках дефлегматора та ректифікатора.

Тим не менш, розробка таких комбінованих приладів стикається з відсутністю інформації, яку досить складно отримати розрахунковим шляхом.

Насамперед, це процеси теплообміну в тепловій камері між стінками та продуктом, що обробляється.

Вплив технологічних параметрів на процес теплообміну між повітряним середовищем та продуктом можна оцінити з експериментальної залежності, що представляє кількісний зв'язок між часом процесу і факторами, що впливають на нього. Отримана при цьому інформація повинна бути достатнім вихідним матеріалом для побудови вимог при проектуванні теплових камер.

Для моделювання теплових процесів, що протікають в тепловій камері, використовували лабораторну сушильну шафу Ш-005 з дверцятами, що герметично закриваються. Температуру продукту вимірювали за допомогою хромель-копелевих термопар та цифрового потенціометра Щ-302, включених за компенсаційною схемою. Температуру середовища у процесі пошукових досліджень варіювали від 40 до 70 °С.

Як об'єкти досліджень було обрано молоко свіже, кисле молоко, сливи та виноград.

Умови теплообміну в зазначеному діапазоні температур з урахуванням різної щільності продуктів, визначали при прогріванні молока та кислого молока.

Тепло- і масоперенос при сушінні досліджували на прикладі бланшованих і не бланшованих слив та винограду.

Обробку результатів експерименту проводили за кривими кінетики, процесів, що вивчаються. Процес прогріву молока і кислого молока розглядали з позиції теорії регулярного теплового режиму. Для математичного опису процесу теплообміну графічну залежність зміни температури продукту у часі будували в напівлогарифмічних координатах. По осі абсцис відкладали тривалість прогріву у лінійних відрізках. По осі ординат відкладали логарифмічне значення різниці температур між камерою та продуктом. При цьому логарифмічна шкала була побудована так, що різниця температур зростала зверху донизу. Такий прийом у побудові графіка обумовлений наочністю порівняно з вихідною «натуральною» кривою прогріву. Використання напівлогарифмічних координат дозволяє випрямити криву прогріву і, отже, охарактеризувати їх відносно простим аналітичним виразом:

$$\lg \left(\frac{T_{\kappa} - T_{nn}}{T_{\kappa} - T_{nk}} \right) = \frac{\tau}{fh}, \quad (1)$$

де τ - час досягнення максимальної температури продукту, година;

T_{κ} - температура в камері, °C;

T_{nn} - температура продукту початкова, °C;

T_{nk} - температура продукту кінцева, °C;

fh - константа, що характеризує нахил випрямленої кривої до горизонтальної осі.

Константу термічної інерції можна визначити як час, протягом якого необхідно прогрівати продукт, щоб різниця температур між камерою та продуктом скоротилася в 10 разів. Величина цієї константи знаходиться в прямій кореляції з часом прогріву і залежить від фізичних властивостей продукту, форми, розмірів, матеріалу тари та ін. Для розрахунку тривалості прогрівання продуктів в тепловій камері за різних режимів необхідно експериментально визначити значення константи термічної інерції для даного виду продукту.

Тривалість процесу пастеризації молока крім часу прогріву до максимальної температури включає також час витримки при цій температурі. Встановлено, що між температурою пастеризації молока t та тривалістю її впливу Z існує функціональна залежність, що виражається рівнянням Дальберга-Кука [8]:

$$\ln Z = 36,84 - 0,48 \cdot t, \quad (2)$$

де 36,84 і 0,48 - постійні величини.

Режими пастеризації, встановлені за цією формулою, гарантують мікробіологічну чистоту молока. Користуючись нею, можна визначити час витримки заданого температурного режиму.

Кінетику процесу сушіння характеризували ставленням вологості продукту до абсолютно сухої речовини, що змінюється у часі. Обчислення проводили за такою формулою:

$$\omega_c = \frac{W}{G} \cdot 100\%, \quad (3)$$

де ω_c - вологість продукту на суху вагу, %;

W - вологовміст продукту, кг/кг;

G - вміст сухих речовин у продукті, кг/кг.

Вміст сухих речовин у продуктах визначали стандартним методом, висушуванням у сушильній шафі до постійної маси.

Загальні закономірності процесу теплообміну при термостатування молока та кислого молока можна простежити на рис. 1.

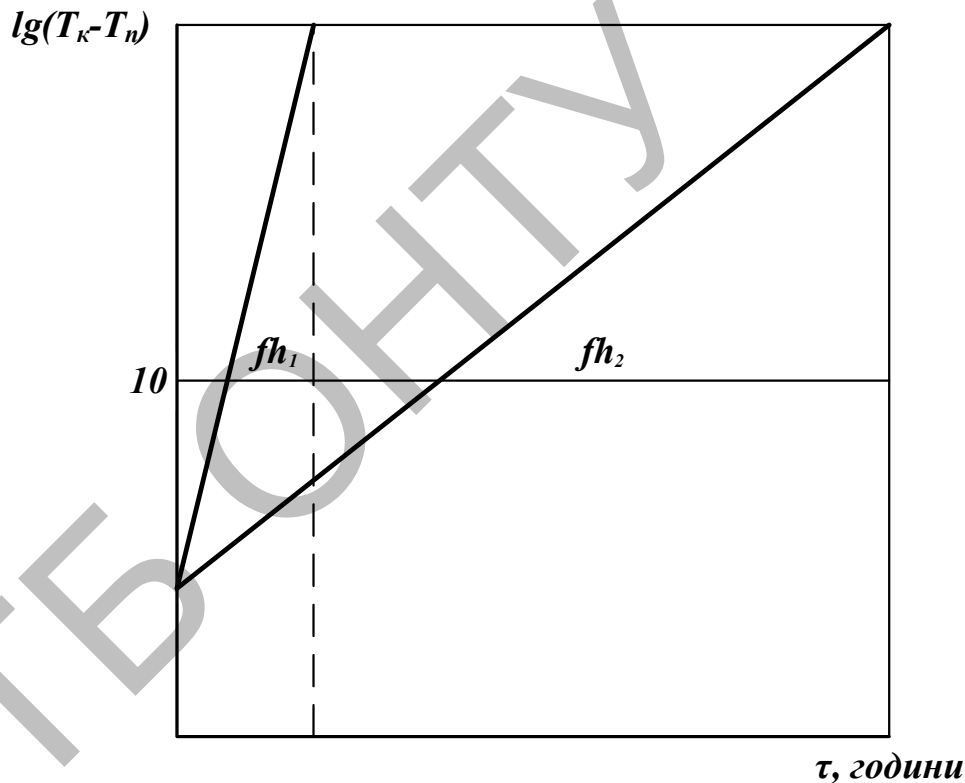


Рис. 1 – Крива термічної інерції:
 fh_1 – термічна інерція молока; fh_2 – термічна інерція кислого молока.

Аналіз представлених кривих термічної інерції показує, що fh_1 молока у кілька разів менше відповідної константи кислого молока fh_2 за умови рівності всіх технологічних параметрів. Інтенсивніший теплообмін при прогріванні молока обумовлений переважно дією конвективних потоків. У харчових продуктах густої консистенції (простокваша) конвективні потоки сильно ослаблені або відсутні. Передача тепла в таких продуктах здійснюється переважно кондуктивним способом, шляхом теплопровідності. Оскільки коефіцієнт теплопровідності харчових продуктів невеликий, такі продукти прогріваються повільно.

Як показали проведені дослідження константа термічної інерції, залежить також і від геометричних розмірів тари: чим більше геометричні розміри та відношення висоти тари до її діаметру, тим більше і fh . Достатньо знати лише одне якесь значення fh , щоб за допомогою цього співвідношення за розмірами банок зробити перерахунок величини fh для будь-якої тари. Крім цього, на величину fh впливає і підведення тепла в камері, і площа дотику і т.п., тобто, особливості теплообміну самої теплової камери.

Таким чином, для визначення режимів термостатування харчових продуктів у тепловій камері необхідно визначити константу термічної інерції кожного продукту в тарі, що рекомендується (матеріал, розміри).

Динаміка процесу зневоднення плодів при температурі 60 °С без циркуляції повітря представлена на рис. 2. По осі ординат, як прийнято характеризувати процес сушіння, наведено значення відносної величини вмісту вологи в продукті до його абсолютно сухої маси.

З рис. 2 видно, що процес сушіння протікає в два періоди: спочатку волога випаровується з поверхні матеріалу, що висушується, потім зона випаровування поглиблюється всередину продукту. Перший період протікає близько 3 діб. При цьому з сировини видаляється волога змочування та частина капілярної вологи, що надійшла на поверхню із внутрішніх шарів. У другому періоді, коли кількість вологи в продукті значно знижується, її випаровування з поверхні практично закінчується і переноситься в глиб матеріалу. Швидкість сушіння зменшується, температура поверхні зростає та

досягає температури повітря до 60 °С.

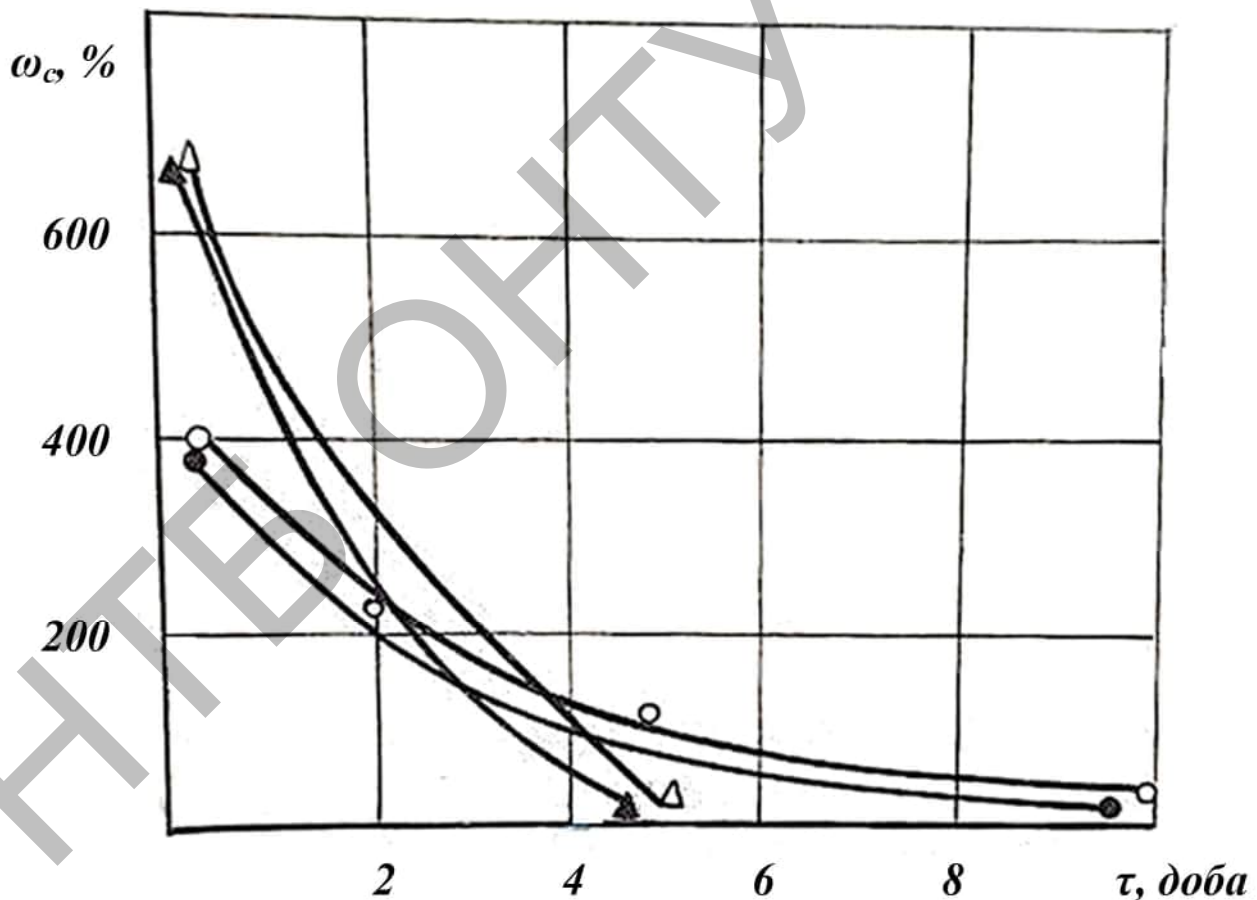


Рис. 2 – Криві сушіння бланшованих та не бланшованих слив та винограду:

○ – виноград не бланшований; ● – виноград бланшований;
Δ – слива бланшована; ▲ – слива не бланшована, без кісточок

Загальна тривалість процесу сушіння досліджених плодів досить тривала і становить винограду близько 10...12 діб, а слив 5...6 діб. Настільки тривалий процес сушіння пов'язаний з тим, що в сушильній шафі дуже слабкі конвективні потоки повітря, які необхідні для видалення парів води. Тому для інтенсифікації процесу необхідно здійснити примусовий рух повітря, який сприятиме кращому випаровуванню вологи та видаленню зволоженого повітря в процесі сушіння.

Оскільки якість продукту та термін його зберігання залежать від кінцевої вологості, необхідно встановити оптимальне поєднання цих факторів.

Список інформаційних джерел

1. Тітлов, О., & Дмитренко, Д. (2025). Розробка побутових комбінованих приладів абсорбційного типу, що поєднують функції холодильного зберігання і теплової обробки. *Refrigeration Engineering and Technology*, 61(4), 333-340. <https://doi.org/10.15673/ret.v6i4.3351>
2. Titlov A.S., Rybnikov M.V. (1994). Tendenzen der Entwicklung von Haus-schalt-s-Kugl-und Gefieberten in der Ukraine und Untersuchungen neuer Arbeiter-fahren. *Die Kalte und Klima-technik*, 6, 386-388.
3. Тітлов О.С. (1998). Сучасні тенденції розвитку побутової абсорбційної холодильної техніки. *Наукові праці Одеської державної академії харчових технологій*, 18, 205-208.

4. Тітлов О.С. (1997). Розробка побутової абсорбційної холодильної техніки різного функціонального призначення з використанням сучасних технологій. Наукові праці Одеської державної академії харчових технологій, 17, 266-272.
5. Oleksandr Titlov, Tetiana Hratii. (2023). Development of a new type of household appliances – refrigerators with a heating chamber. ScienceRise, 1 (84), 3-15. <http://journal.eu-jr.eu/sciencerrise/article/view/2856/2180>.
6. Тітлов, О., & Гратій, Т. (2022). Підвищення енергетичної ефективності абсорбційних холодильних приладів. Refrigeration Engineering and Technology, 58(4), 204-215. <https://doi.org/10.15673/ret.v58i4.2569>
7. Гратій, Т., & Тітлов, О. (2023). Підвищення енергетичної ефективності комбінованих абсорбційних холодильних приладів. Холодильна техніка та технологія, 59(1), 14-31. <https://doi.org/10.15673/ret.v59i1.2616>

УДК 620.92:621.472:628.112

РОЗРОБКА АВТОНОМНИХ ГЕЛІОСИСТЕМ ПЕРІОДИЧНОЇ ДІЇ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ ВОДИ З АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ

**Кравченко В.В., аспірант, Тітлов О.С., д.т.н, професор, д.т.н., професор Нікітін Д.М.
ОНТУ, м Одеса, Україна**

vladkrav1122@gmail.com, titlov1959@gmail.com

Дефіцит прісної води є однією з ключових глобальних проблем сучасності, особливо для посушливих регіонів, територій із порушеною інфраструктурою та автономних об'єктів. За таких умов перспективним напрямом є одержання води з атмосферного повітря. Атмосферне водовидобування розглядається як ефективний резерв децентралізованого водозабезпечення, а сорбційні сонячно-керовані системи — як один із найбільш перспективних підходів. [1]

Серед існуючих рішень значний інтерес становлять геліосистеми періодичної дії, у яких процеси адсорбції та десорбції розділені у часі. У нічний період відбувається поглинання водяної пари сорбентом, а у денний — її десорбція під дією сонячного нагріву з подальшою конденсацією. Такий підхід не потребує компресорного обладнання, може працювати автономне та не залежить від зовнішнього електроживлення.

Об'єктом дослідження є процеси тепло- та масообміну в автономних геліосистемах періодичної дії. Предметом — термодинамічні та конструктивні параметри, що визначають інтенсивність адсорбції, десорбції та конденсації. Метою роботи є узагальнення принципів побудови таких систем і визначення факторів, що впливають на їх ефективність.

Принцип роботи системи базується на взаємодії сорбційного модуля, сонячного колектора, конденсатора та накопичувального резервуара. У фазі адсорбції вологе повітря контактує з пористим сорбентом, який акумулює воду. У фазі десорбції адсорбент нагрівається, що спричиняє виділення водяної пари та її подальшу конденсацію. Схема автономної геліосистеми періодичної дії для одержання води з атмосферного повітря зображена на рис. 1.

Як сорбенти застосовуються силікагель, цеоліти, гігроскопічні солі та їх композити. Перспективними є метал-органічні каркаси (MOF), які забезпечують високу водопоглинальну здатність навіть за низької відносної вологості. Для MOF-801 показано можливість одержання до 2,8 л/кг води за добу при вологості близько 20%, а багатоступеневі системи дозволяють підвищити продуктивність. [1, с.432] [2]

Ефективність системи визначається параметрами повітря, властивостями сорбенту, інтенсивністю сонячного нагріву та умовами тепловідведення в конденсаторі. Кількість водяної пари в повітрі пов'язана з відносною вологістю співвідношенням:

$$\varphi = \frac{P_v}{P_{sat}(T)} \cdot 100\%,$$

де φ - відносна вологість повітря, %;

P_v - парціальний тиск водяної пари;

$P_{sat}(T)$ - тиск насиченої водяної пари за температури T .

Потенційна маса води, яка може бути вилучена з певного об'єму повітря може бути оцінена виразом:

$$m_w = \rho_{air} \cdot \omega \cdot V,$$

де m_w - маса води;

ρ_{air} - густина повітря;

ω - вологовміст повітря;

V - об'єм повітря, що взаємодіє із сорбентом.

Для опису рівноважного водопоглинання адсорбентів часто застосовують ізотермічні залежності типу Ленгмюра. У спрощеному вигляді адсорбційна ємність може бути представлена формулою:

$$q = \frac{q_{max}bp}{1 + bp},$$

де q - поточна адсорбційна ємність;

q_{max} - гранична адсорбційна ємність;

b - константа рівноваги;

p - парціальний тиск водяної пари.

Ефективність перетворення сонячної енергії в корисно одержану воду доцільно оцінювати через енергетичний показник:

$$\eta = \frac{m_w r}{Q_{solar}},$$

де η — умовний коефіцієнт енергетичної ефективності системи;

r — теплота фазового переходу;

Q_{solar} — кількість підведеної сонячної енергії.



Рис. 1 – Схема автономної геліосистеми періодичної дії для одержання води з атмосферного повітря

Схема ілюструє роботу системи у трьох основних фазах. У нічний період вологе атмосферне повітря надходить до адсорбційного модуля, де відбувається поглинання водяної пари сорбентом. У денний період сонячний колектор забезпечує нагрів адсорбенту, що спричиняє десорбцію вологи. Утворена водяна пара надходить до конденсатора, де охолоджується та перетворюється на рідку воду, яка накопичується в резервуарі. Така схема відображає добову циклічність процесу та взаємодію основних елементів установки.

Перевагами геліосистем періодичної дії є автономність, використання відновлюваної енергії, відсутність компресорного обладнання та простота конструкції. Водночас їх застосування обмежується циклічністю роботи, залежністю від кліматичних умов, обмеженням масообміну в сорбенті та складністю забезпечення ефективної конденсації при високих температурах навколишнього середовища.

Підвищення ефективності систем можливе за рахунок використання сорбентів із високою водопоглинальною здатністю та швидкою кінетикою, оптимізації геометрії адсорбційного шару, а також застосування багатоступеневих схем із рекуперацією теплоти. Для таких систем показано підвищення продуктивності порівняно з одноступеневими аналогами.

Важливим елементом є конденсаційний вузол, ефективність якого визначається можливістю забезпечення температури нижче точки роси водяної пари. У автономних системах це досягається шляхом радіаційного охолодження, природної вентиляції або використання теплоакумулювальних елементів. Сучасні дослідження підтверджують необхідність комплексної оптимізації матеріалів і конструкції системи. [5]

Таким чином, автономні геліосистеми періодичної дії є перспективним напрямом одержання води з атмосферного повітря. Подальші дослідження доцільно спрямувати на оптимізацію режимів роботи, вибір ефективних сорбентів та вдосконалення конструкції системи.

Висновки

1. Одержання води з атмосферного повітря за допомогою автономних геліосистем періодичної дії є перспективним напрямом децентралізованого водозабезпечення.
2. Робота таких систем ґрунтується на послідовній реалізації процесів адсорбції вологи, сонячно-термічної десорбції та конденсації водяної пари.
3. Ефективність системи визначається параметрами атмосферного повітря, властивостями сорбенту, інтенсивністю сонячного нагріву та умовами тепловідведення в конденсаторі.
4. Підвищення продуктивності можливе за рахунок застосування сучасних сорбційних матеріалів, оптимізації геометрії апарата, використання багатоступеневих схем та рекуперації теплоти.
5. Подальше вдосконалення автономних геліосистем доцільно спрямувати на підвищення добової продуктивності, скорочення тривалості циклу та забезпечення стабільної роботи в широкому діапазоні кліматичних умов.

Список інформаційних джерел

1. Kim H., Yang S., Rao S. R., Narayanan S., Kapustin E. A., Furukawa H. et al. Water harvesting from air with metal-organic frameworks // Science. 2017. Vol. 356, No. 6336. P. 430–434.
2. LaPotin A., Zhong Y., Zhang L., Zhao L., Leroy A., Kim H. et al. Dual-Stage Atmospheric Water Harvesting Device for Scalable Solar-Driven Water Production // Joule. 2021. Vol. 5, No. 1. P. 166–182.
3. Sadek S., Deng S., Zhao J., Zayed M. E. Solar-powered adsorption-based atmospheric water harvesting systems: Principles, materials, performance analysis, and configurations // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2022. Vol. 52. 102874.
4. Li T. et al. Scalable and efficient solar-driven atmospheric water harvesting // Nature Water. 2023.
5. Chu W. et al. Advancements in atmospheric water harvesting // Nature Reviews Clean Technology. 2024.

УДК 620.91:697.329

ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМ АКУМУЛЮВАННЯ ЧУТЛИВОЇ ТА ПРИХОВАНОЇ ТЕПЛОТИ ДЛЯ ТЕПЛИЧНИХ ЗАСТОСУВАНЬ

**Писаревський І.О., аспірант, Мукмінов І.І., доктор філософії
Одеський національний технологічний університет**

У роботі досліджено системи низькотемпературного акумулювання теплової енергії для тепличних застосувань, що базуються на використанні акумулятора чутливої теплоти з насипним шаром (SHS) та акумулятора прихованої теплоти [1, 2] на основі фазозмінного матеріалу (PCM) з модифікованого парафіну ТЗ. Експериментальні дослідження проведено на пілотній тепличній установці із замкненим водяним контуром та вертикально ізольованим теплообмінним каналом.

Визначено коефіцієнт теплообміну між теплоносієм та насипним шаром [2], який становить $\alpha = 80 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Показано, що система з використанням PCM забезпечує у 7,5–9,3 раза більшу питому енергоємність акумулювання порівняно з акумулятором на основі щебеню. Валідація математичної моделі продемонструвала узгодженість із експериментальними

даними на рівні понад 90 %, що підтверджує придатність запропонованого підходу для проєктування та оптимізації систем акумулювання теплової енергії.

Теплову поведінку фазозмінного матеріалу описано за допомогою моделі типу Стефана [3] з урахуванням радіальної симетрії та сталих теплофізичних властивостей. Рухома межа розділу фаз визначається умовою Стефана, яка враховує виділення прихованої теплоти під час фазового переходу. Такий підхід забезпечує фізично обґрунтований опис процесів плавлення та кристалізації матеріалу.

Теплообмін у насипному шарі щебеню, який взаємодіє з циркулюючим водяним потоком, описано за допомогою узагальненої енергетичної моделі типу grey-box [3], що базується на балансі енергії. Параметри моделі визначено із застосуванням методів нелінійної ідентифікації в середовищі MATLAB (System Identification Toolbox), зокрема із використанням алгоритму Trust-Region Reflective Newton. Побудовано динамічні моделі у просторі станів, які враховують температурні режими теплоносія, вплив зовнішніх умов та ефективні теплофізичні характеристики акумулюючого середовища. Отримані моделі забезпечують адекватне відтворення динаміки теплових процесів та можуть бути використані для прогнозування роботи системи в різних режимах експлуатації.

Експериментальні дослідження проведено на тепличній установці розмірами $0,5 \times 1,0 \times 0,5$ м, оснащений вертикально ізольованим каналом із насипним шаром (40 кг щебеню), замкненим водяним контуром ($D = 0,02$ м) та шістьма трубками з РСМ (температура плавлення 35°C). Температурні вимірювання здійснювалися з інтервалом 10 с і використовувалися для ідентифікації параметрів моделей (Рис. 1).

Отримані результати показали, що використання води як теплоносія забезпечує суттєве підвищення коефіцієнта теплообміну порівняно з повітрям. Встановлено, що система з фазозмінним матеріалом має значно вищу щільність акумулювання енергії, ніж система з насипним шаром. Ідентифіковані математичні моделі забезпечують високий рівень узгодження з експериментальними даними (понад 90 %), що підтверджує їхню адекватність та можливість використання для аналізу, прогнозування та оптимізації систем акумулювання теплової енергії для тепличних застосувань.

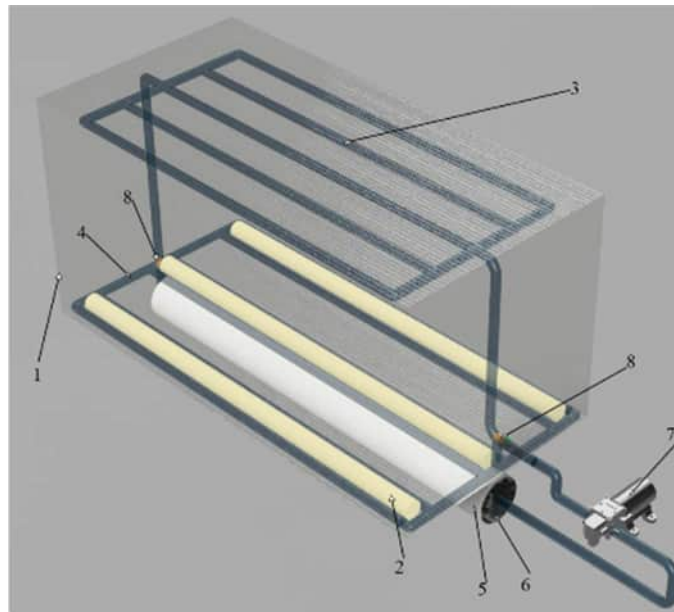


Рис. 1. Схема експериментальної установки: 1 — корпус теплиці; 2 — трубка з парафіном; 3 — водяний канал (денний режим); 4 — водяний канал (нічний режим); 5 — підземні теплоізовані канали для щебеню (1 м, 0,5 м, 0,2 м); 6 — шар щебеню; 7 — насос; 8 — автоматичні клапани для перемикання між денним та нічним режимами.

Література

1. Rabi' A. M., Radulovic J., Buick J. M. Packed bed thermal energy storage system: parametric study. *Thermo*. 2024. Vol. 4, no. 3. P. 295–314. URL: <https://doi.org/10.3390/thermo4030016>
2. Pourhemmati S., Hossainpour S., Haeri S. Z. Experimental and numerical investigation of packed-bed thermal energy storage utilizing two phase change materials (PCM) in spherical capsules. *International journal of thermal sciences*. 2025. Vol. 210. P. 109605. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2024.109605>
- Efficient simulation strategy for PCM-based cold-energy storage systems / G. Bejarano et al. *Applied thermal engineering*. 2018. Vol. 139. P. 419–431. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.05.008>---

УДК 536.24:66.045.132

АНАЛІЗ ПОТЕНЦІАЛУ ВТОРИННИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ

Арику А.В., ст. викладач, ОНТУ, м. Одеса solodkaya140619@gmail.com

Пісаревський І.О., аспірант, ОНТУ, м. Одеса, ellaa@ukr.net

В ході будь-якого технологічного процесу спостерігається неповне використання первинної енергії. Перспективи утилізації вторинних енергетичних ресурсів (ВЕР) надають можливість отримання значної економії палива та істотно знизити капітальні витрати на створення відповідних енергозберігаючих установок [1, 2]. Відповідно існуючій класифікації, розрізняють: горючі ВЕР, теплові ВЕР і ВЕР надлишкового тиску [3]. Теплові ВЕР можуть використовуватися як безпосередньо у вигляді теплоти, так і для роздільного або комбінованого виробництва теплоти, холоду, електроенергії в утилізаційних установках [4].

За ступенем концентрації енергії розрізняють джерела ВЕР [5]:

1. Високотенційні: перш за все теплові ВЕР високотемпературних (400–1000 °С) технологій, пов'язаних з нагріванням, плавленням, випалюванням, термообробкою або сублімацією. Величина втрат енергії з димовими газами від нагрівальних термічних втрат сягає до 70%;
2. Середньопотенційні: димові газы, конденсат, відпрацьована пара, продуктіві потоки з температурою вище 150 °С;
3. Низькопотенційні: системи оборотного водопостачання, охолодження зі зміною температури води на 5–10 °С, скиди пари тиском 1–1,5 атм в атмосферу, побутові стоки, газы температурою 100–150 °С, вентиляційні викиди.

Енергетичний потенціал ВЕР реалізується в утилізаційних установках і системах, до яких відносяться котли-утилізатори, теплообмінники, печі, газотурбіни, системи оборотного водопостачання для зниження витрати

Загальний річний вихід ВЕР в Україні оцінюється величиною 26,18 млн. т. у.п. Однак для залучення його в енергетичний баланс необхідні значні капітальні вкладення, пов'язані з впровадженням енергозберігаючого обладнання і технологій. Теплота промислових викидів навіть в Європейських країнах досягає 30%, що вимагає пильної уваги і аналізу можливості її утилізації. Факторами, що

ускладнюють використання ВЕР, є також змінність їх як джерела енергії і розбіжність режимів роботи установок, які виробляють ВЕР, з режимами попиту на теплову енергію. У зв'язку з цим в схемах використання ВЕР повинні знайти широке застосування акумулятори теплоти.

Димові гази, що відходять, мають високий енергетичний потенціал, при його використанні тільки на 50% можливе отримання додаткової теплової енергії в кількості близько 0,7 млн. Гкал на рік. Використання теплової енергії відхідних газів проводиться в два етапи: регенерацією (поверненням) газів в початковий процес і перетворенням енергії газів в котлах-утилізаторах в більш зручний для споживання вид: енергію пари або гарячої води.

У рамках даного дослідження увага зосереджена на потенціалі теплових ВЕР, які включають фізичну теплоту відхідних газів з промислових підприємств незначної енергетичної потужності, зокрема харчових. До способів використання низькопотенційних ВЕР на підприємствах відносять попередній підігрів повітря в системах вентиляції, води для гарячого водопостачання і автономних систем опалення, підігрівання повітря в приміщеннях різного призначення.

ВИСНОВКИ

1. Використання низькопотенційного тепла має значний енергетичний потенціал, внаслідок чого перетворення (утилізація) теплової енергії в корисну є важливим практичним завданням. До способів використання низькопотенційних ВЕР на підприємствах відносяться попередній підігрів повітря в системах вентиляції, води для гарячого водопостачання і автономних систем опалення.

2. Через існування домішок у відпрацьованих газах для утилізації тепла в даний час використовують виключно рекуперативні теплообмінні установки, в яких теплообмін відбувається через розділову стінку, тобто з'являється додатковий термічний опір, що погіршує ефективність теплопередачі.

3. Ступінь утилізації теплоти залежить від ефективності теплообмінника, яка може бути визначена. Для пластинчастих повітро-повітряних теплообмінників цей показник знаходиться в межах від 0,4 до 0,7. Більш високі показники мають регенеративні теплообмінники з обертовою насадкою ($\epsilon=0,7-0,85$).

4. Регенеративні теплообмінники з рухомих та нерухомих щільним шаром характеризуються високою тепловою ефективністю, компактністю, невеликою масою, простотою конструкції, надійністю, що дозволяє забезпечити значну продуктивність

Список інформаційних джерел

1. Ilyin R. A., Shishkin N. D. Development of a wind power plant that recycles secondary energy resources of marine infrastructure facilities. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies*. 2024. Vol. 2024, no. 4. P. 99–105. URL: <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-4-99-105>.

2. Optimization and economic evaluation of industrial gas production and combined heat and power generation from gasification of corn stover and distillers grains / A. Kumar et al. *Bioresource Technology*. 2010. Vol. 101, no. 10. P. 3696–3701. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.103>.

3. Low grade thermal energy sources and uses from the process industry in the UK / Y. Ammar et al. *Applied Energy*. 2012. Vol. 89, no. 1. P. 3–20. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.06.003>.

4. Копецька Ю. О. Сутність, основні види та класифікація енергетичних ресурсів як складові виробничого потенціалу підприємства. *Науковий вісник*. Ужгород, 2016. Вип. 7, Ч.2. С. 21–26.

5. Derii V. O., Sokolovska I. S., Teslenko O. I. Prospects for using heat pumps in district heating systems around the world and Ukraine. *The Problems of General Energy*. 2021. Vol. 2021, no. 3. P. 43–52. URL: <https://doi.org/10.15407/pge2021.03.043>.

УДК 621.575:621.565.9

АКТУАЛЬНІСТЬ ТА ПРОБЛЕМАТИКА ДОСЛІДЖЕННЯ УДОСКОНАЛЕННЯ АБСОРБЦІЙНИХ ХОЛОДИЛЬНИХ ПРИЛАДІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТЕПЛОВИХ ТРУБ І ДВОФАЗНИХ ТЕРМОСИФОНІВ

Сугер В.В., аспірант, Тітлов О.С., д.т.н, професор, Дорошенко В.М., д.т.н, професор, ОНТУ, м. Одеса, Україна

sugerslava@gmail.com, titlov1959@gmail.com; doroshenkovm444@gmail.com

Розвиток побутової та торговельної холодильної техніки йде в бік жорсткіших вимог до енергоефективності, екологічної безпеки й надійності в експлуатації. Холодильне обладнання споживає дуже суттєву частку електроенергії — як у домогосподарствах, так і в роздрібній торгівлі. Тому пошук принципово нових рішень, які б дозволили серйозно знизити енергоспоживання й підвищити ефективність, залишається вкрай актуальним завданням.

Традиційні парокомпресійні машини, які й досі домінують на ринку, дають досить високий коефіцієнт перетворення (COP 2,5–4,5), але мають низку серйозних мінусів: шум і вібрацію, використання синтетичних холодоагентів, повну залежність від електрики та обмежений ресурс компресора [2]. Саме тому все більшу увагу привертають альтернативні технології, зокрема абсорбційні холодильні прилади (АХП), які можуть працювати від теплової енергії різного походження.

Серед головних переваг абсорбційних систем — можливість використовувати низькопотенційне тепло (відпрацьоване тепло, сонячну енергію, газові джерела), практично повна відсутність рухомих механічних частин, безшумність і значно вища надійність [1]. Завдяки цим якостям АХП дуже перспективні для автономних установок, мобільних систем і роботи в особливих умовах.

Але, попри всі плюси, масового поширення абсорбційних приладів досі немає — головна причина в їх відносно низькій енергоефективності. Значення COP зазвичай не перевищують 0,6–0,8 [2]. Основний «вузький» момент — недосконалість тепломасообмінних процесів у ключових елементах: генераторі, конденсаторі, абсорбері та випарнику. Через це виникають значні теплові втрати й загальна ефективність циклу падає.

Крім того, у реальних конструкціях часто стикаємося з обмеженою холодопродуктивністю та недостатньою інтенсивністю теплообміну всередині холодильної камери. Це призводить до довгого виходу на робочий режим, нерівномірності температур і, як наслідок, гіршого зберігання продуктів.

У низці робіт [3–5] показано, що ефективність АХП дуже сильно залежить від організації теплових потоків і величини сумарного термічного опору в ланцюгу «випарник – охолоджуваний об'єм». Температуру в камері можна приблизно описати такою залежністю:

$$t_{\text{кам}} = t_0 + Q_0 \cdot R,$$

де t_0 — середня температура випарника;

Q_0 — холодопродуктивність;

R — сумарний термічний опір.

З цієї формули видно: щоб підтримувати потрібну температуру, можна або знижувати температуру випаровування (а це автоматично збільшує енергоспоживання), або зменшувати термічний опір — і другий шлях виглядає набагато розумнішим з погляду енергозбереження.

Тут особливо цікавими стають пасивні інтенсифікатори теплообміну — теплові труби (ТТ) та двофазні термосифони (ДФТС). Завдяки фазовим переходам робочої рідини вони забезпечують надзвичайно ефективний перенос тепла. Еквівалентна теплопровідність таких пристроїв може бути на порядки вищою, ніж у звичайних матеріалів, — це дозволяє суттєво зменшити температурні градієнти й вирівняти теплові поля.

Теплова труба — це герметичний пристрій із замкненим циклом випаровування-конденсації, а в двофазному термосифоні рідина циркулює переважно за рахунок гравітації, що робить конструкцію

простішою й надійнішою. Інтеграція таких елементів в АХП дає змогу створити ефективні канали теплопроводу й додаткові ізотермічні поверхні, що значно покращує теплообмін.

Найдоцільніше застосовувати теплові труби та термосифони в таких вузлах:

- у генераторі — для інтенсифікації десорбції аміаку;
- у конденсаторі — для кращого скидання тепла в навколишнє середовище;
- в абсорбері — для покращення процесу поглинання;
- у випарнику та всередині камери — для зниження термічного опору й вирівнювання температури.

За даними досліджень [4,5], таке рішення дозволяє помітно підвищити коефіцієнт теплопередачі, усунути локальні перегріву й переохолодження, а також отримати приріст COP на 15–25 %. Для систем із початково низькою ефективністю це досить суттєвий результат.

Водночас інтеграція теплових труб і термосифонів у конструкцію АХП тягне за собою цілий комплекс науково-технічних питань: оптимальні схеми вбудовування, вибір геометричних і режимних параметрів, вивчення теплових режимів усієї системи, створення достовірних математичних моделей. Отже, основна проблематика дослідження — це комплексне підвищення ефективності абсорбційних холодильних приладів через інтенсифікацію теплообміну, зниження термічних опорів і оптимізацію конструктивних рішень.

Розробка АХП із застосуванням теплових труб і двофазних термосифонів є на сьогодні актуальним і перспективним науково-технічним напрямком. Її успішне вирішення дозволить суттєво підняти енергоефективність холодильних систем, розширити сфери їх використання та ефективніше залучати низькопотенційні джерела енергії.

Список інформаційних джерел

13. Низькопотенційна енергетика : навч. посіб. / Редько А. О., Безродний М. К., Загорученко М. В., Ратушняк Г. С., Редько О. Ф., Хмельнюк М. Г.; Нац. техн. ун-т України "Київський політехнічний університет", Одес. нац. акад. харч. технологій, Харків. нац. ун-т будівництва та архітектури, Вінниц. нац. техн. ун-т. — Харків : Друкарня Мадрид, 2016. — 412 с.
14. Захаров М. Д., Тітлов О. С., Ботук Ю. С., Василів О. Б., Рева Н. В. Енергетичні і екологічні показники компресійної та абсорбційної побутової холодильної техніки. Наукові праці Одеської державної академії харчових технологій. — 1997. — № 17. — С. 167–175.
15. Захаров М. Д., Тітлов О. С., Рева Н. В., Лозовський С. І., Вольневич С. В., Завертаний В. В. Розробка нових схем та дослідження елементів конструкцій апаратів для первинної термічної обробки та збереження харчових продуктів. Наукові праці Одес. держ. акад. харч. технол. — 1995. — № 15. — С. 119–127.
16. Тітлов О. С., Захаров М. Д. Науково-технічні основи створення енергозберігаючих побутових абсорбційних холодильних приладів. Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. — 2009. — № 35, Т. 1. — С. 113–127.
17. Тітлов О. С. Розробка побутової абсорбційної холодильної техніки різного функціонального призначення з використанням сучасних технологій. Наукові праці Одеської державної академії харчових технологій. — 1997. — № 17. — С. 266–272.

УДК 621.575:536.7

АБСОРБЦІЙНА ХОЛОДИЛЬНА МАШИНА НА НОВИХ РОБОЧИХ СУМІШАХ

Пономарьов К.М., PhD, Березовська Л.В., PhD, Тітлов О.С., д.т.н, професор, ОНТУ, м. Одеса, Україна

alic.in.mine@gmail.com, milaberez2016@gmail.com, titlov1959@gmail.com

Метою даної розробки є створення абсорбційної холодильної машини (АХМ) з двома рівнями охолодження.

На рисунку 1 і рисунку 2 наведено схеми заявлених АХМ, що реалізують заявлений спосіб. На рисунку 2 представлено схему АХМ для отримання глибокого холоду.

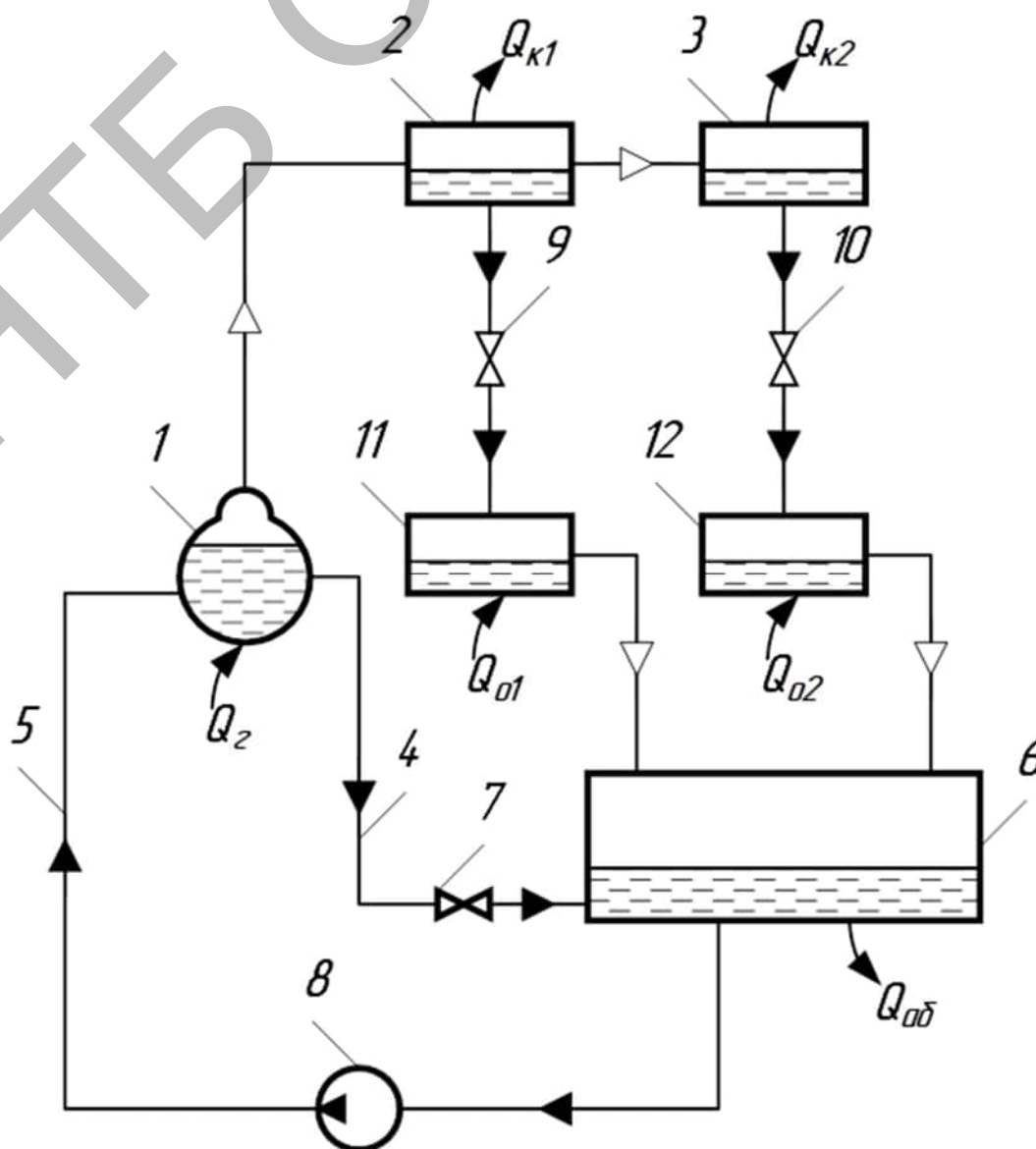


Рис. 1 – абсорбційна холодильна машини з двома рівнями охолодження:
1 – кип’ятильник; 2, 3 – конденсатори; 4 – канал слабкого розчину; 5 – канал міцного розчину;
6 – абсорбер; 7, 9, 10 – дросельні пристрої; 8 – перекачувальний пристрій; 11, 12 – випарники.

Пристрій містить кип'ятильник 1, який зв'язано трубопроводом з конденсатором, виконаним з двох роздільних, послідовно розміщених секцій 2 та 3. Кип'ятильник також зв'язано з каналом слабого 4 та міцного 5 розчинів з абсорбером 6. Канал слабого розчину 4 містить дросельний пристрій 7, а міцного розчину – перекачувальний пристрій (насос) 8. Перша 2 та друга 3 секції конденсатора зв'язані через дросельні пристрої 9 і 10 з двома випарниками 11 і 12 відповідно.

Схема з випарником глибокого охолодження (рис. 2) містить другу секцію конденсатора 3, виконану за типом конденсатора-випарника. В цьому випадку на трубопроводі, що з'єднує першу секцію конденсатора 2 й випарник, міститься додаткова магістраль 13, зв'язана з зоною випаровування другої секції конденсатора-випарника 3. Зона випаровування зв'язана також трубопроводом 14 з абсорбером 6.

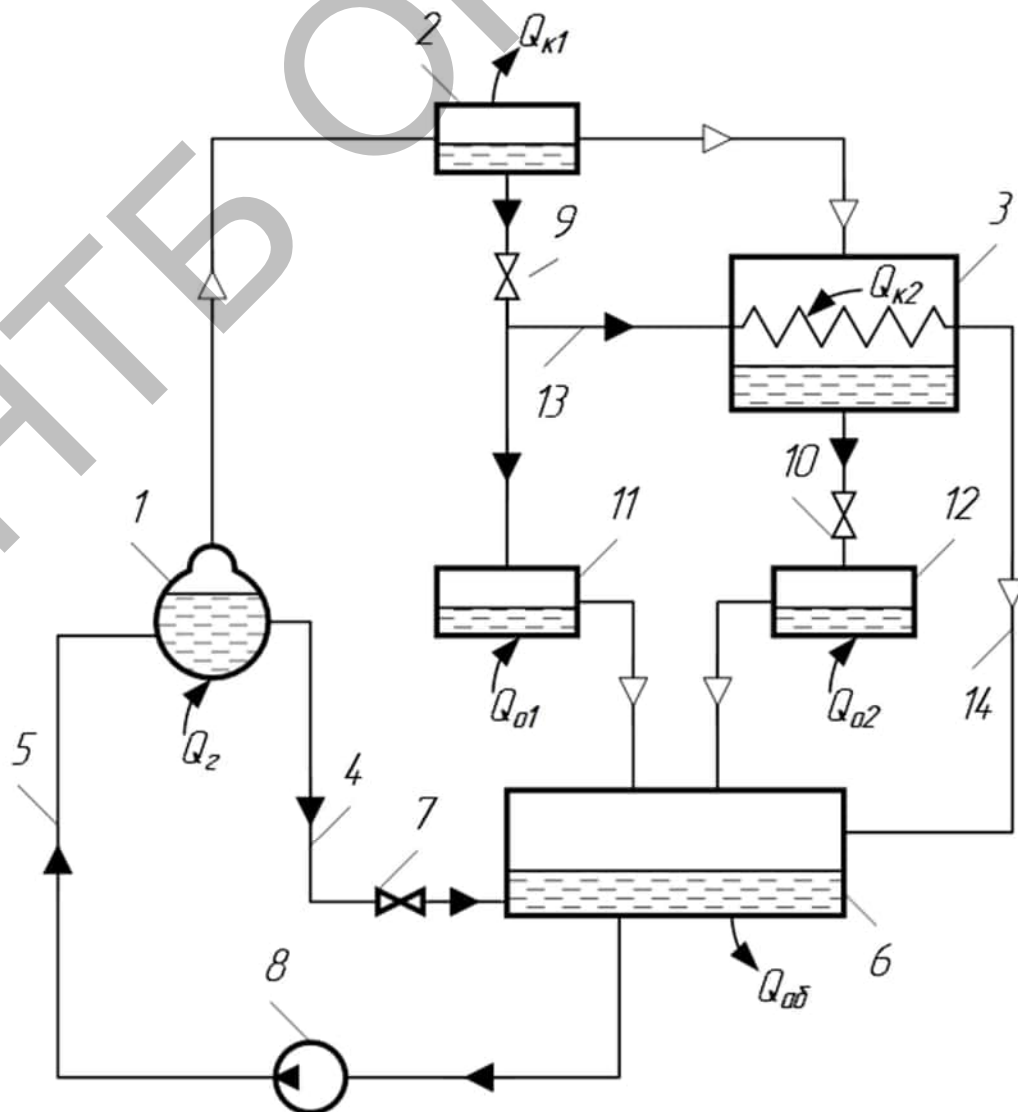


Рис.2 – Абсорбційна холодильна машини з двома рівнями охолодження:
1 – кип'ятильник; 2 – конденсатор; 3 – конденсатор-випарник; 4 – канал слабого розчину;
5 – канал міцного розчину; 6 – абсорбер; 7, 9, 10 – дросельні пристрої;
8 – перекачувальний пристрій; 11, 12 – випарники; 13 – магістраль; 14 - трубопровід.

Пристрій заправляється сумішшю холодоагенту-сорбату та абсорбенту (поглиначу). При цьому, в якості холодоагенту використовується суміш холодоагентів з різними нормальними

температурами кипіння. Холодоагенти підбираються таким чином, щоб кожен з компонентів є сорбатом, тобто поглинається абсорбентом.

Пристрій працює наступним чином.

При підведенні теплової потужності Q_2 до кип'ятильника 1 має місце генерація парів холодоагенту з рідинної трикомпонентної суміші. Бінарна суміш парів холодоагенту потрапляє в секцію 2 та 3 конденсатора. Через наявності різниці нормальних температур кипіння в першій секції конденсатора 2 конденсується висококиплячий компонент (ВКК) бінарної суміші холодоагентів, а в другій секції конденсатора 3 конденсується вже низькокиплячий компонент (НКК). Конденсація НКК стає можливою за рахунок того, що в другій секції конденсатора 3 парціальний тиск НКК зростає до повного тиску в системі. При зниженні парів холодоагенту виділяється теплота пароутворення Q_{K1} і Q_{K2} . Зріджені ВКК і НКК розділено дроселюються і поступають у випарники 11 і 12 відповідно. У випарниках 11 і 12 здійснюється кипіння ВКК і НКК з відбором тепла від об'єкту охолодження (або навколишнього середовища) Q_{O1} і Q_{O2} відповідно. Процес кипіння забезпечується за рахунок постійного відкачування парів холодоагенту в абсорбер. В абсорбері 6 пари холодоагенту поглинаються слабким розчином абсорбенту, що поступає з кип'ятильника 1 по трубопроводу 4 через дросельний пристрій 7. В процесі поглинання парів холодоагенту виділяється теплота абсорбції Q_{ab} . Насичений розчин абсорбенту по каналу 5 насосом 8 подається в кип'ятильник 1 і цикл завершується.

Влаштування АХМ дозволяє забезпечити роботу на двох температурних рівнях в зоні кипіння. У випарнику 11 забезпечується кипіння ВКК, а у випарнику 12 – НКК. Постійне відкачування парів холодоагенту з випарників 11 і 12 за рахунок процесу абсорбції дозволяє підтримувати деякий рівень тиску в абсорбері 6 і випарниках 11 і 12. При цьому у випарниках повний тиск дорівнює парціальному тиску НКК і ВКК. У зв'язку з цим, у випарниках підтримується різний рівень робочих температур: у випарнику ВКК 11 – більш високий, у випарнику НКК – більш низький.

Схема АХМ для отримання низьких від'ємних температур містить другу секцію конденсатора 3, в якій зрідження НКК здійснюється в процесі кипіння частини ВКК. У цьому випадку можна використовувати НКК з нормальною температурою кипіння «мінус» 30 ... «мінус» 40 °С. температура конденсації у цьому випадку може бути забезпеченою близько 0 °С.

Розглянемо конкретний приклад роботи заявленого способу та пристрою АХМ.

В якості компонентів суміші холодоагентів візьмемо НКК – R22, а ВКК – R21 з нормальними температурами кипіння «мінус» 40,8 °С та 8,9 °С відповідно.

Абсорбентом в обох випадках буде тетраетиленгліколю диметиловий ефір (ТЕГДМЕ) з нормальною температурою кипіння 275,3 °С

При повному тиску в абсорбері 6 та випарниках 11 і 12 близько 1 бар температурний рівень у випарнику 11 з R21 складе близько 8 ... 9 °С, а у випарнику 12 з R22 – «мінус» 40 ... «мінус» 42 °С. при роботі за схемою послідовного розміщення конденсаторів (рисунок 1) тиск у них буде визначатись температурою конденсації НКК – R22. При повітряному охолодженні рівень тиску складе 15 ... 20 бар, а при водяному охолодженні 10 ... 12 бар. Температура конденсації ВКК (R21) у цих випадках складатиме 100 ... 122 °С і 77 ... 87 °С відповідно, тобто в конденсаторі ВКК 2 буде забезпечено й переохолодження холодоагенту. При роботі за другою схемою за тиску в абсорбері 1 бар температура в зоні випаровування випарника-конденсатора буде підтримуватись на рівні 8 ... 9 °С, тобто тиск конденсації R22 складе 6,5 бар. У цьому випадку температура конденсації ВКК (R21) – близько 69 °С. При роботі АХМ за другою схемою знижуються енерговитрати при роботі насосного пристрою 8, так як перепад тиску складає 5,5 бар замість 9 ... 10 бар або 14 ... 19 бар (при роботі за першою схемою).

Таким чином, позитивний ефект заявленого способу та пристрою полягає в наступному:

1) забезпечується принципово нова можливість реалізації АХМ з двома температурними рівнями в зоні випаровування;

2) з'являється можливість використання в якості холодоагенту АХМ з низькими нормальними температурами кипіння і при цьому використовувати повітряну систему охолодження зон теплоскидання.

УДК 621.575.932: 575.565.92

АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВ ПОПЕРЕДНЬОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ НА КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЯХ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВІДІВ

Фелонюк С.А., аспірант, Тітлов О.С., д.т.н., професор

Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

s-feloniuk@ukr.net, titlov1959@gmail.com;

Для транспортування природного газу магістральними трубопроводами на численних компресорних станціях (КС) встановлені газоперекачувальні агрегати (ДПА), енергоносієм для яких, в більшості випадків, є природний газ, що транспортується. На привід перекачувальних агрегатів витрачається (спалюється) 0,5...1,5 % від обсягу газу, що транспортується [1].

Ситуація із заміною існуючого обладнання сучасним пов'язана зі значними інвестиціями, з одного боку, та невизначеністю із транзитом російського природного газу через газотранспортні системи України у найближчій перспективі. Найбільш перспективним є шлях збільшення ККД циклу ДПА за рахунок застосування схем з попереднім охолодженням газу, що компресується.

Метою цього дослідження є вивчення перспектив застосування технології попереднього охолодження технологічного газу перед стисненням ДПА.

Для аналізу впливу попереднього охолодження технологічного природного газу на КС магістральних газопроводів обрано газоперекачувальний агрегат – ДПА 370-18-1.

Характеристики роботи нагнітача ГПА 370-18-1 зображено на рис. 1 [2].

Вихідні дані:

1) об'ємний склад газу, %:

$\text{CH}_4 = 96.9$;

$\text{C}_2\text{H}_6 = 1.22$;

$\text{C}_3\text{H}_8 = 1.88$;

2) продуктивність перекачування $Q = 72$ млн. $\text{м}^3/\text{добу}$;

3) тип нагнітача – ГПА 370-18-1;

4) продуктивність ГПА – $Q_k = 37$ млн. $\text{м}^3/\text{добу}$;

5) тиск на вході КС $P_{\text{вх}} = 6.08$ МПа;

6) тиск на виході з нагнітача $P_{\text{вих}} = 7.55$ МПа;

7) температура на вході КС $t_{\text{вх}} = 15^\circ\text{C} = 288\text{ K}$;

8) номінальна частота обертання ротора $n_n = 4800$ об/хв;

9) фактична частота обертання ротора $n = 4600$ об/хв;

10) коефіцієнт зовнішньо-адіабатичного стиснення $k = 1.31$;

11) номінальна потужність $N_n = 10$ МВт;

12) політропний ККД номінальний $\eta_n = 0.81$.

Виконано розрахунок споживаної потужності ДПА та витрату паливного газу за різних температур технологічного газу на вході в нагнітач природного газу типу 370-18-1 зі ступенем стиснення 1.22 – 1.24. Початковий тиск газу - тиск газу при вході в патрубок нагнітачів. Остаточний тиск газу – тиск при виході з нагнітального патрубка. Ступінь підвищення тиску (або ступінь стиснення) – відношення кінцевого тиску газу до початкового.

Результати розрахунків зведено в табл. 1.

Таблиця 1. Результати розрахунку робочих параметрів нагнітача газу

Найменування параметра/характеристики	Температура на всмоктування $T_{вс}$, К			
	283	288	293	298
Внутрішня потужність, споживана нагнітачем N_i , кВт	9368	9437	9558	9634
Температура кінця стиснення $T_{вих}$, К	300	305	311	316

На газокompресорних станціях використовують одно- та двоступінчасті схеми (групи ДПА) для компримування газу. Група ДПА складається з двох неповнонапорних відцентрових нагнітачів, які послідовно з'єднані по газу за допомогою кранової обв'язки («гітари»). Розрахункова ступінь стиснення у цій схемі (групі) забезпечується двома нагнітачами і становить 1,45-1,50.

Проведено розрахунок робочих параметрів ДПА та показано енергетичні перспективи технології охолодження технологічного газу перед стисненням у ДПА КС.

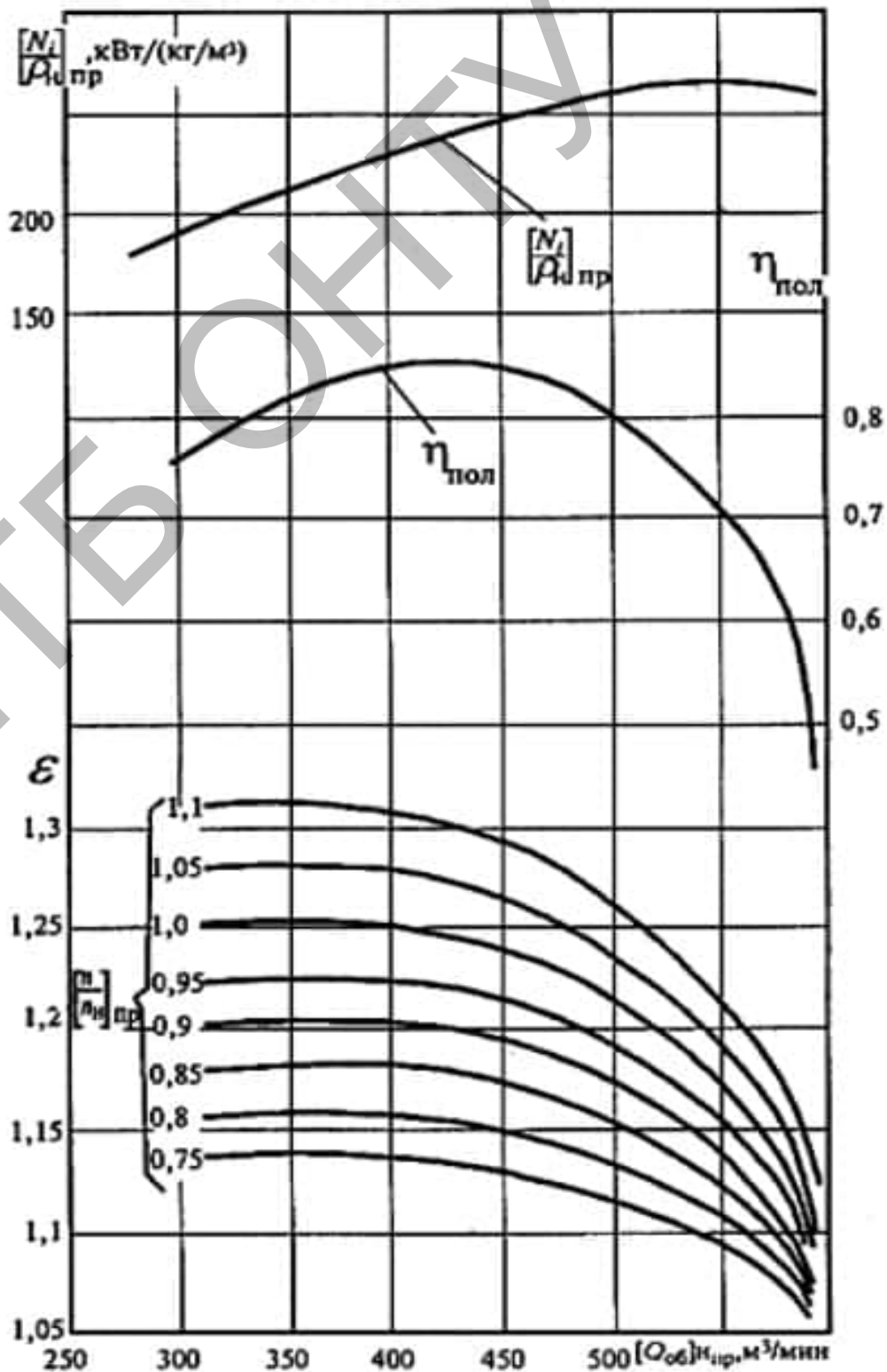


Рис. 1 Характеристики нагнітача типу 370-18-1

Аналіз результатів показав, що при зниженні температури компримованого технологічного газу знижується потужність ДПА і, відповідно, витрата паливного газу [3].

Так, зниження температури компримованого технологічного газу від 288 К (15 °С) до 268 К (мінус 5 °С) споживана потужність ДПА знижується на: 8,4 % при транспортуванні технологічного газу 25 млн. м³/добу; 8,8 % - при 28 млн.м³/добу; 9,3 % - при 31 млн. м³/добу.

Зниження температури компримованого технологічного газу від 278 К (5 °С) до 268 К (мінус 5 °С) споживана потужність знижується на 5,1 % при транспортуванні технологічного газу 34 млн. м³/добу.

Зниження температури компримованого технологічного газу від 288 К (15 °С) до 268 К (мінус 5 °С) дозволяє знизити витрату паливного газу на: 4,7 % (0,007 млн. м³/добу) при транспортуванні технологічного газу 25 млн. м³/добу; 5,7 % (0,009 млн. м³/добу) – при 28 млн. м³/добу; 5,9 % (0,010 млн. м³/добу) – за 31 млн. м³/добу; 7,1 % (0,013 млн. м³/добу) – за 34 млн. м³/добу.

ВИСНОВКИ

Виконано аналіз методів зниження енерговитрат при транспортуванні природного газу магістральними трубопроводами.

Показано, що зниження температури газу перед стисненням призводить і до зниження роботи, що витрачається на стиск газу, а вирішити завдання охолодження найбільш енергетично ефективно можна за допомогою тепловикористовуючих холодильних машин з широким діапазоном температур охолодження, які використовують для своєї роботи теплову енергію продуктів згорання, що відходять.

Для оцінки перспектив попереднього охолодження технологічного газу перед стисненням проведено розрахунок робочих параметрів типового ДПА та на основі аналізу результатів розрахунку показано енергетичні

Технологія попереднього охолодження технологічного газу дозволяє знизити рівень температур стисненого газу і отримати додатковий економічний ефект за рахунок відключення апаратів повітряного охолодження, який може бути оцінений для конкретних кліматичних умов регіону розташування компресорних станцій.

Список інформаційних джерел

1. Титлов А.С., Сагала Т.А., Артюх В.Н., Дьяченко Т.В. Анализ перспектив использования парожекторной и абсорбционной холодильных установок для охлаждения технологического газа и получения жидкого углеводородного топлива. Холодильная техника та технологія. – 2017. – № 53(6). – С. 11-18. http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILE=&2_S21STR=htit_2017_53_6_4
2. Titlov O., Vasylyv O., Sahala T., Bilenko N. Evaluation of the prospects for preliminary cooling of natural gas on main pipelines before compression through the discharge of exhaust heat of gas-turbine units. EUREKA: Physics and Engineering. – 2019. – № 5. – P. 47-55. <https://dea.digar.ee/?a=d&d=AKEurekaphysics201909.2.7.1&e=-----en-25--1--txt-txIN%7ctxTI%7ctxAU%7ctxTA----->
3. Тітлов, О., & Фелонюк, С. (2025). Аналіз перспектив попереднього охолодження природного газу на компресорних станціях магістральних газопроводів. Refrigeration Engineering and Technology, 61(4), 294-300. <https://doi.org/10.15673/ret.v61i4.3352>

УДК 621.592.3

АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВ ЗАСТОСУВАННЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ СЕПАРАЦІЇ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

Волчок В.О., к.т.н., Чернявська А.С., СВО «Бакалавр»
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

Аналіз перспектив низькотемпературної підготовки природного газу є ключовим етапом у вдосконаленні технологій очищення та переробки цього цінного енергоносія. У контексті сучасних технологічних процесів така підготовка дозволяє не лише підвищити якісні характеристики готового продукту, але й оптимізувати витрати на його обробку. У низькотемпературних умовах відбувається більш ефективне видалення механічних домішок, вологи та небажаних домішкових компонентів, що значно покращує кінцеві параметри газу, забезпечуючи відповідність до встановлених стандартів [1].

Окрім очевидного поліпшення якості, важливо також оцінити енергетичну та економічну доцільність застосування низькотемпературних технологій. Ці методи потребують значних енергетичних ресурсів для підтримання необхідного температурного режиму, однак вони здатні забезпечити суттєві переваги у тривалому горизонті експлуатації. Наприклад, зменшення витрат на транспортування завдяки зниженню корозійної активності газу або можливість вилучення побічних цінних компонентів, дозволяють компенсувати початкові інвестиції.

За даними Міжнародного газового союзу (IGU - International Gas Union), до 15% аварій на магістральних газопроводах пов'язані із гідратами. Для запобігання гідратоутворенню застосовуються різні методи, включаючи зниження вмісту води в газі, додавання інгібіторів (метанол, гліколі), підігрів трубопроводів та регулювання тиску. Ці підходи мають свої обмеження, особливо за високих обсягів транспортування.

В даний час серед основних низькотемпературних процесів переробки газу, таких як абсорбція, сепарація, конденсація і ректифікація, особливого значення набуває технологічна схема з детандер-компресорним агрегатом. Її використання обумовлено можливістю досягнення значно нижчих температур при тому ж перепаді тиску, порівняно з дросельною або ежекторною технологією.

Метод низькотемпературної сепарації газу (НТС), що використовує турбодетандер у поєднанні з діетиленгліколем як інгібітором, показує відмінну ефективність. Завдяки процесу турбодетандування відбувається значне зниження температури газу, що сприяє конденсації води та важких вуглеводнів [2]. При цьому застосування діетиленгліколю відіграє важливу роль, запобігаючи утворенню гідратів і забезпечуючи стабільну роботу системи. У цьому процесі газ спершу проходить через теплообмінник, де охолоджується шляхом рекуперації тепла. Далі він потрапляє до турбодетандера, в якому відбувається зниження тиску, що спричиняє значне зменшення температури. Унаслідок цього утворюється рідка фаза, до складу якої входять вода, важкі вуглеводні та домішки.

Застосування методу НТС з використанням турбодетандера разом із додаванням інгібітора діетиленгліколю є високоефективним способом запобігання утворенню гідратів, що дозволяє забезпечити надійну та безперебійну роботу систем транспортування газу. Ця методика не лише гарантує стабільність експлуатації газотранспортної інфраструктури, але й відповідає сучасним стандартам безпеки та екологічним нормам. Як наслідок, впровадження таких технологій сприяє сталому розвитку національної газотранспортної системи, збільшуючи її ефективність і мінімізуючи негативний вплив на довкілля.

Базуючись на експериментальних результатах дослідників у сфері НТС газу та врахувавши аналіз існуючих розробок, можна дійти висновку, що одним із найперспективніших напрямів розвитку цієї технології є оптимізація та застосування турбодетандера у поєднанні з інгібіторами під час процесу сепарації.

Окрім цього, додаткову перевагу могла б забезпечити обробка парової фази з низькотемпературного сепаратора під високим тиском перед її розширенням у дроселі або детандері при максимально низьких температурах, доступних у циклі.

Таким чином, аналіз перспектив ефективності низькотемпературної підготовки природного газу є обов'язковим кроком перед впровадженням цих технологій у виробничий процес. Він включає

розгляд технічної доцільності, енергетичних затрат і фінансової вигоди для забезпечення максимальної рентабельності та екологічної безпеки.

Література

1. Врагов А.П., Михайловський Я.Е., Якушко С.І. Матеріали до розрахунків процесів та обладнання хімічних і газонафтопереробних виробництв. - Суми: Вид-во СумДУ, 2008.
2. Світлицький В.М., Волчок В.О., Щербатюк О.Я. Аналіз ефективності низькотемпературної підготовки попутного нафтового газу / В.М. Світлицький, В.О. Волчок, О.Я. Щербатюк // Зб. наукових праць XIV Всеукраїнської науково-технічної конф. «Сучасні проблеми холодильної техніки та технології», 21-22 вересня 2023, Одеса. – Одеса: ОНТУ, 2023. – С. 68-70.
УДК 536.7

АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ МІКРОХВИЛЬОВОГО НАГРІВУ ВИСОКОВ'ЯЗКИХ НАФТОПРОДУКТІВ

Волгушева Н. В., к.т.н, доц., Альтман Е. І. к.т.н, доц.
Одеський національний технологічний університет

Для опису процесу нагріву циліндричного резервуара з нафтопродуктами, що піддаються впливу високочастотного електромагнітного випромінювання, в [1] застосовано рівняння теплопровідності в циліндричних координатах. Аналіз роботи дозволяє зробити висновок, що запропонований метод математичного моделювання мікрохвильового нагрівання нафтопродуктів може бути прийнятий за основу. Моделювання мікрохвильового нагріву високов'язких нафтопродуктів доцільно проводити на основі диференціального рівняння теплопровідності з урахуванням внутрішніх джерел теплоти. Однак безпосередньо використовувати запропоновані результати неможливо, тому що в даній роботі розглядається процес нагріву великого об'єму, який не може бути описаний циліндричними координатами. Математична модель нагрівання нафтопродукту в резервуарі від дії мікрохвильового джерела ґрунтується на припущенні, що розповсюдження теплоти здійснюється в необмеженому масиві в процесі теплопровідності в умовах дії внутрішніх джерел енергії. Приймаючи, що теплофізичні властивості постійні і потужність мікрохвильового поля визначається дією внутрішніх джерел теплоти q_v , диференціальне рівняння теплопровідності приймає наступний вигляд:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{q_v}{\rho c_p}, \quad (1)$$

де a - коефіцієнт температуропровідності, ρ - густина нафтопродукту, c_p - його теплоємність. Умови однозначності прийняті наступні:

- нафтопродукт представляє необмежений масив;
- початковий розподіл температури масиву є однорідним.

Завдання вирішувалася в сферичних координатах, для яких оператор Лапласа ∇^2 за умови, що температура змінюється тільки по радіусу r , має такий вигляд:

$$\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial t}{\partial r}, \quad (2)$$

Граничною умовою є $\left(\frac{\partial t}{\partial r} \right)_{r=\infty} = 0$, де $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ (Початок координат поміщено в

розглянутий об'єм).

При розрахунку температур застосовувався метод кінцевих різниць.

У розрахунках були використані наступні значення фізичних характеристик: $\rho = 950 \text{ кг/м}^3$, $c_p = 3 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$, $L = 300 \text{ кДж/кг}$, $\lambda = 0.125 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ [1]. Відповідно до [2], для мазуту відносна діелектрична проникність $\epsilon' = 3,5-4,5$ і глибина проникнення $\text{tg} \delta = 0,013-0,03$, що характерно для діелектриків, які досить ефективно поглинають мікрохвильову енергію.

При проведенні розрахунків передбачалося, що на початковому етапі злив не проводиться, йде нагрів нерухомого об'єму нафтопродукту (мазут). Після досягнення температури мазуту $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рекомендована для зливу) близько зливного отвору, починається його відкачування. При цьому до випромінювача починають підходити потоки не розігрітого продукту. Процес нагріву може тривати до тих пір, поки нафта не опуститься до рівня зливного отвору. Існують рекомендації [3], згідно з якими при об'ємах матеріалу, що розігрівається понад 20 м^3 і температурах навколишнього середовища нижче $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, доцільно використання мікрохвильових установок потужністю не менше 50 кВт . На відміну від цих рекомендацій, при установці магнетрона на невеликій висоті щодо зливного отвору потужність магнетрона може бути істотно знижена, оскільки немає необхідності розігріву всього об'єму нафтопродукту.

Розрахунки температур мазуту проведені на відстані від 0 (джерело мікрохвильової енергії) до 30 см (зливний отвір). На рис. 1 представлено температурне поле в нафтопродукті для різних проміжків часу. Температура мазуту в часі зростає, фронт нагрітої області розширюється. Через 65 хв цей фронт досягає зливного отвору, однак температура нафти недостатня для запуску процесу відкачування. З рис. 1 видно, що температура мазуту $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ у зливного отвору буде досягнута через 116 хв. Витрата мазуту при його відкачуванні з урахуванням того, що довколишні шари є більш нагрітими, складе $0,17\text{ кг/с}$. Щоб збільшити витрату, забезпечивши досягнення необхідної температури у зливного отвору $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, можна встановити магнетрон більшої потужності, наприклад, 15 кВт . Тоді витрата збільшиться до $0,93\text{ кг/с}$.

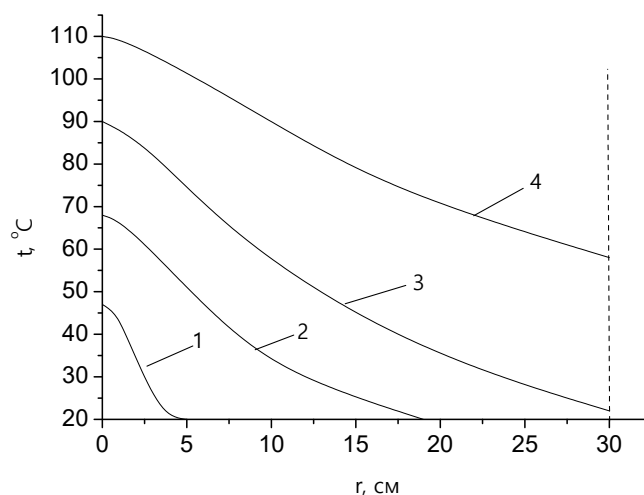


Рисунок 1 - Розрахункова зміна температури мазуту в цистерні при мікрохвильовому нагріванні.

1 - $\tau = 1\text{ хв}$, 2 - $\tau = 10\text{ хв}$, 3 - $\tau = 65\text{ хв}$, 4 - $\tau = 116\text{ хв}$,

При розробці пристрою для мікрохвильового нагріву має враховуватися наступне [3]: об'єм продукту в цистернах може змінюватися в широких межах, і, відповідно, змінюється опір навантаження (об'єму, що нагрівається), тому виникає необхідність узгодження останнього з мікрохвильовим генератором щоб уникнути пошкоджень магнетрона, який повинен бути надійно захищений від неузгодження навантаження.

Література

1. Temperature field distribution analysis for cargo oil on microwave heating process / W. Wu et al. *Thermal Science*. 2020. Vol. 24, no. 5 Part B. P. 3413–3421. URL: <https://doi.org/10.2298/tsci191226133w>.
2. Microwave treatment in oil refining / A. Porch et al. *Applied Petrochemical Research*. 2012. Vol. 2, no. 1-2. P. 37–44. URL: <https://doi.org/10.1007/s13203-012-0016-4>.
3. Дослідження ефективності мікрохвильового нагріву нафтопродуктів / І. Л. Бошкова та ін. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2021. Т. 57, № 2. С. 98–105. URL: <https://doi.org/10.15673/ret.v57i2.2023>.

УДК 628.81:697.1

АНАЛІЗ СХЕМ ПРИЄДНАННЯ СИСТЕМИ ВОДЯНОГО ОПАЛЕННЯ ДО ТЕПЛОВОЇ МЕРЕЖІ

Волчок В.О., к.т.н., Коростельов К.І., СВО «Бакалавр»
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

Приєднання системи водяного опалення до централізованих теплових мереж здійснюється у тепловому пункті будівлі за залежною чи незалежною схемами. При залежній схемі приєднання теплоносія централізованих теплових мереж використовується безпосередньо до системи опалення. При незалежній схемі приєднання застосовується теплообмінник, що розділяє теплоносії системи опалення та теплової мережі [1].

Залежна схема є найбільш дешевою і простою у монтажі та експлуатації. Незалежна схема приєднання використовується при недостатньому або високому для системи опалення гідростатичному тиску на введенні теплової мережі в тепловий пункт будівлі. На рис. 1 представлено варіанти залежних схем приєднання системи водяного опалення до теплової мережі.

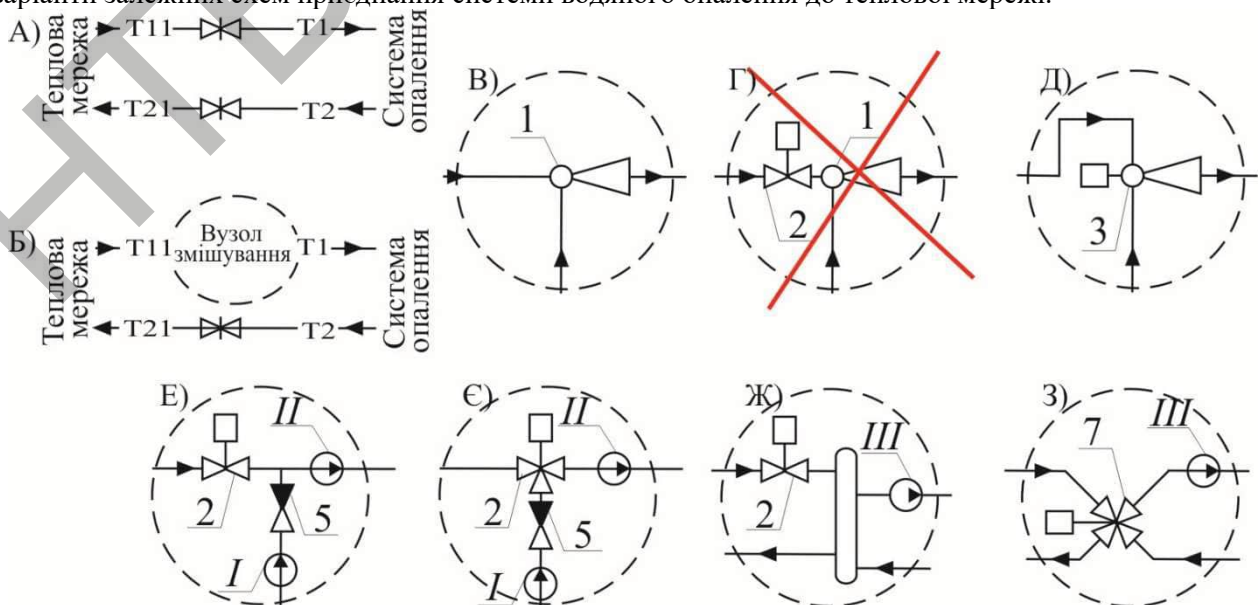


Рис. 1 - Схеми приєднання системи водяного опалення до теплової мережі [2]:

1 - водоструминний нерегульований елеватор; 2 - регулюючий двоходовий (дроселюючий) клапан; 3 - водоструминний регульований елеватор; 4 - регулюючий змішувальний триходовий клапан із приводом до нього; 5 - зворотний клапан;

6 - гідравлічний роздільник; 7 - чотириходовий регулюючий клапан

- а) схема безпосереднього приєднання;
- б) схема приєднання з вузлом змішування;
- в) вузол змішування у вигляді нерегульованого водоструминного елеватора;
- г) те саме з регулюючим клапаном (неправильне рішення);
- д) те саме у вигляді регульованого водоструминного елеватора;
- е) те саме з регулюючим двоходовим (дроселюючим) клапаном і підмішуючим I або циркуляційним II насосом;
- є) те саме із регулюючим змішувальним триходовим клапаном з приводом до нього 400 Н (або 500 Н, 800 Н) і підмішуючим I або циркуляційним II насосом;
- ж) те саме у вигляді гідравлічного роздільника з регулюючим двоходовим (дроселюючим) клапаном та циркуляційним насосом III;

з) те саме у вигляді чотириходового регулюючого клапана та циркуляційного насоса III.

Оптимальним є варіант схеми приєднання, показаний на рис. 2.5а, при якій забезпечується безпосередній зворотний зв'язок між користувачем теплової енергії та тепловиробником. Однак таке пряме приєднання можливе тільки при використанні низькотемпературних теплових мереж з постійними протягом року параметрами теплоносія, і тільки для двотрубних систем опалення з дроселюючими радіаторними термостатами. Теплові мережі у разі реагують на зміну попиту споживача в теплоті через датчики перепаду тиску на вводах.

Схема, наведена на рис. 2.5б, застосовується для приєднання до теплових мереж, розрахункові температурні параметри яких вищі за параметри системи опалення.

Водоструйний елеватор, показаний на рис. 2.5в, поєднує в собі функції змішувача та циркуляційного насоса, але з низьким ККД. Дана схема широко застосовується для нерегульованих систем опалення, оскільки є простою та надійною в експлуатації, не потребує електроенергії.

У практиці автоматизації та переобладнання теплових вузлів має місце використання схеми рис. 2.5г з установкою клапана 2 перед елеватором 1. Таке рішення є вкрай невірним, оскільки при дросілювання потоку клапаном 2 різко падають насосні якості елеватора. Тому розробники зазвичай додатково встановлюють у цю схему насос та зворотний клапан, для яких елеватор стає лише на заваді.

За його усунення має місце схема рис. 2.5е. За наявності достатнього для роботи елеватора перепаду тиску на вході хороші характеристики має вузол змішування у вигляді водоструйного елеватора, що регулюється (рис. 2.5д), в якому за допомогою сервомотора змінюється переріз сопла елеватора.

Схеми змішування, показані на рис. 2.5е, 2.5є, найбільш поширені при приєднанні до централізованих теплових мереж.

Схема з використанням триходового клапана (рис. 2.5є) позитивно відрізняється від інших, зокрема значно ширшим діапазоном коефіцієнта змішування порівняно зі схемою на рис. 2.5е. Насос І, що підмішує, використовується за наявності достатнього для роботи системи опалення перепаду тиску на вході з теплової мережі. В іншому випадку встановлюється циркуляційний насос ІІ.

Змішувальні вузли з використанням гідравлічного роздільника 6 (рис. 2.5ж) та чотириходового клапана 7 (рис. 2.5з) застосовуються в основному при приєднанні до місцевих теплових мереж або котельні при використанні котлів на твердому паливі. Гідравлічні роздільники бувають вертикальні (рис. 2.5ж) та горизонтальні. Конструкція гідравлічного роздільника проста і являє собою трубу круглого або прямокутного перерізу, площа поперечного перерізу якої приблизно в 10...20 разів більше сумарного поперечного перерізу 4-х трубопроводів, що приєднуються до неї. Вертикальний гідравлічний роздільник може поєднувати в собі також функції повітровідділювача та шламоуловлювача.

Відповідно до представленої систематизації розроблено методику конструювання та гідравлічного розрахунку вертикальної одноконтурної системи опалення будівлі з нижнім розведенням. Методично різними є принципи підбору арматури. Визначено основні положення щодо підбору регуляторів перепаду тиску, циркуляційного насоса та розширювального бачка.

Література

1. ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування» [чинний від 01.09.2013 р.]–К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2013. –168 с. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-1018>
2. Боженко, М. Ф. Системи опалення, вентиляції і кондиціонування повітря будівель: навч. посібник для студентів спец. 144 «Теплоенергетика» / М. Ф. Боженко; КПІ ім. І. Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 380 с.
УДК 666.76:537.86

СУШІННЯ ЦЕОЛІТІВ 13Х В МІКРОХВИЛЬОВОМУ ПОЛІ

Бошкова І.Л., д.т.н., проф., Гречановський А.П., аспірант
Одеський національний технологічний університет

Регенерація цеолітів є найважливішою стадією, що відповідає за ефективність багаторазового використання цеолітів та визначається якістю процесу. Для цього необхідно вирішити проблему швидкої та ефективної десорбції. Для здійснення процесу десорбції цеолітів може застосовуватися мікрохвильове нагрівання, яке має безліч переваг у порівнянні з конвективним, наприклад, пряме і об'ємне нагрівання опромінюваного матеріалу, а також вибіркове нагрівання [1]. Через низьку теплопровідність цеоліту ($\sim 0,1-0,2 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) виникають значні обмеження при нагріванні та охолодженні у кондуктивному та конвективному методі, що призводить до зниження ефективності та збільшення часу зарядки. У разі мікрохвильового нагріву на енергоефективність впливають ККД перетворення електричної енергії на мікрохвилі та ККД перетворення мікрохвиль на тепло. Якщо перший характерний для використовуваного магнетрона та є незмінним, то другий визначається умовами процесу. Природно, що чим вище ККД, тим краще економічні показники мікрохвильового нагріву. Відповідні енергетичні аспекти МХ-регенерації цеолітів розглядалися рядом дослідників [1 - 3]. Зазначається [4], що застосування мікрохвильового нагріву дозволяє вести процес набагато швидше, чистіше та з нижчою енергоємністю порівняно з традиційними методами. Результати [5] підтверджують, що мікрохвильове нагрівання не погіршує адсорбційні властивості цеолітів, оскільки наступні випробування виявили ідеальну відтворюваність результатів адсорбції та десорбції. Аналіз наведених літературних даних показує, що застосування мікрохвильового нагріву для сушіння цеолітів характеризується важливими перевагами в порівнянні з конвективним та кондуктивним методом, проте не вистачає експериментальних даних за кінетикою сушіння та перерозподілом теплових потоків в процесі МХ обробки для цеолітів, які визнані як раціональні в технологіях термохімічного накопичення теплоти.

Таблиця 1 – Результати експериментального дослідження сушіння цеоліту 13Х_с в мікрохвильовому полі

τ , с	$m_{ц}$, г	Δm , г	t , °C	u , кг/кг	$c_{вол.i}$, кДж/кг·К	ККД
0	100	-	22,8	0,163	1,5216	
30	99	1	61	0,151	1,4832	0,33
60	98	1	85	0,140	1,4464	0,24
90	95	3	99	0,105	1,336	0,36
120	93	2	120	0,081	1,2592	0,29
150	92	1	145	0,070	1,22336	0,31
180	89	3	170	0,035	1,11168	0,38

Середній ККД перетворення МХ енергії в теплову складає 31 %. Відносно низький ККД обумовлений малою товщиною шару, яка складала $\delta=5$ мм. Питома теплоємність шару вологого цеоліту $c_{вол.i}$ розраховувалась за правилом адитивності з урахуванням вологовмісту u :

$$c_{\text{вол.і}} = c_{\text{сух.ц}}(1-u) + c_{\text{в}} \cdot u \quad (1)$$

де $c_{\text{сух.ц}}$ - теплоємність сухого цеоліту, $c_{\text{в}}$ - теплоємність води.

На рис. 1 представлена діаграма розподілу теплоти, яка витрачається на випаровування води та нагрівання цеоліту 13X_с масою 100 г в задані проміжки часу при МХ сушінні. Витрата теплоти на випаровування води з шару цеоліту визначається першим доданком в рівнянні (3), а витрата теплоти на нагрівання другим доданком.

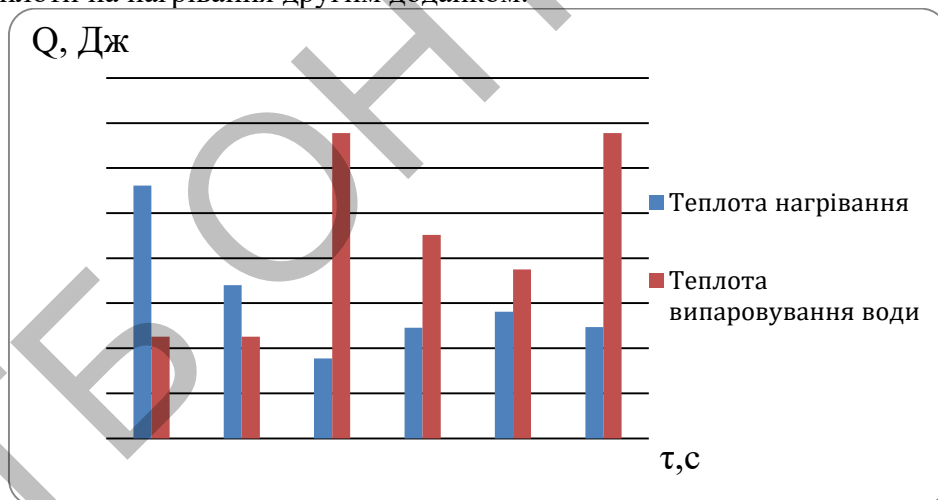


Рис. 1 - Діаграма розподілу теплоти випаровування води та нагрівання цеоліту 13X_с масою 100 г в задані проміжки часу при сушінні в МХ полі

Аналіз діаграми показує, що на початку процесу сушіння більша частка енергії від магнетрону витрачається на нагрівання цеолітів, а менша – на випаровування вологи. При $\tau \geq 90$ с значно зростає витрата теплоти на випаровування, що пов'язано з ростом температури шару.

Література

1. Cherbański R. Calculation of Critical Efficiency Factors of Microwave Energy Conversion into Heat / R. Cherbański // Chemical Engineering & Technology. – 2011. – Vol. 34, no. 12. – P. 2083–2090. <https://doi.org/10.1002/ceat.201100405>.
2. Intensification of TSA processes using a microwave-assisted regeneration step / E. Meloni et al. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification. 2021. Vol. 160. P. 108291. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108291>.
3. Експериментальне дослідження сушіння цеоліту «4а» у мікрохвильовому полі [Електронний ресурс] / І. Л. Бошкова [та ін.] // Refrigeration Engineering and Technology. – 2023. – Т. 59, № 3. – С. 197–204. <https://doi.org/10.15673/ret.v59i3.2658>.
4. Microwave-induced regeneration of activated carbons polluted with phenol. A comparison with conventional thermal regeneration [Electronic resource] / C. O. Ania [et al.] // Carbon. – 2004. – Vol. 42, no. 7. – P. 1383–1387. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.01.010>.
5. Experimental and Numerical Assessment of a Novel All-In-One Adsorption Thermal Storage with Zeolite for Thermal Solar Applications / M. Di Palo et al. Applied Sciences. 2020. Vol. 10, no. 23. P. 8517. URL: <https://doi.org/10.3390/app10238517>

УДК 666.76:537.86

СПІКАННЯ ТЕХНІЧНОЇ КЕРАМІКИ З ЗАСТОСУВАННЯМ ЕНЕРГІЇ МІКРОХВИЛЬОВОГО ПОЛЯ

Борец С. О., аспірант, Тортіка Д. М., аспірант, Комендант С. Г., аспірант
Одеський національний технологічний університет

Протягом останнього десятиліття було проведено багато досліджень та експериментів з мікрохвильового нагрівання та обробки кераміки та композитних матеріалів [1 - 3]. Значна частина цих зусиль була стимульована унікальними та потенційними перевагами, які мікрохвильова енергія може забезпечити порівняно з традиційними методами обробки. Хоча мікрохвильова обробка кераміки все ще перебуває на ранній стадії розвитку, існує багато областей, які ще потребують вивчення, викликів, які потрібно вирішити, та економічних та комерційних переваг, які потрібно обґрунтувати. Хоча багато потенційних переваг використання мікрохвиль для обробки кераміки були визнані вже понад 30 років, лише протягом останніх 5-8 років універсальність та повний потенціал цього процесу набули широкої уваги [4]. Зростаюча знаність про переваги обробки за допомогою мікрохвильової енергії очевидна з швидкого зростання кількості та обсягу доповідей, представлених на технічних зустрічах та симпозіумах, присвячених мікрохвильовій обробці. Взаємодія та поглинання (зчеплення) багатьох керамічних матеріалів, таких як оксиди, карбіди, бори́ди, нітриди та комбінації цих матеріалів (тобто композити з керамічною матрицею та багатофазні системи), викликали значний інтерес та уможливили абсолютно нові, і часто унікальні, способи обробки цих матеріалів [5].

Досліджено нагрівання композиційного порошку на основі порошку оксиду алюмінію. Проблема отримання зносостійких керамік за традиційними технологіями пов'язана з тим, що особливістю даних технологій є відносно повільне нагрівання, що призводить до тривалого циклу спікання. Досліджувався вплив добавки порошку карбіду кремнію на температуру нагрівання порошку оксиду алюмінію у мікрохвильовому полі. Відомо, що до температури 1100 °C Al_2O_3 прозорий для мікрохвильового випромінювання, інтенсивне поглинання мікрохвильової енергії відбувається на рівні температури спікання – близько 1400 °C. На рис. 1 представлені результати нагрівання в мікрохвильовому полі композиційного порошку з наступним складом: $\text{Al}_2\text{O}_3 + 5$ об. % SiC-частинки. Як сполучний використовувався лігносульфонат (технічний, рідкий) 10 об. %. Початкова температура становила 50 °C, оскільки для якісного перемішування сполучного з порошком рідину слід підігріти для зменшення в'язкості. Аналіз кривих показує, що темп нагрівання матеріалу з додаванням 10 % ЛСТ збільшується після температури вище 150 °C (криві 1, 2). Це з розкладанням лігносульфонату, унаслідок чого продукти терморозпаду, які починають утворюватися за температури вище 130 °C. Найбільш інтенсивно поглинають мікрохвильову енергію. Темп нагрівання сягав 2 К/с. Однак такий інтенсивний характер нагріву спостерігався для маси 20 г і 50 г і при додаванні сполучного суміш порошків. Без сполучного (крива 4) темп нагрівання становив 0,226 К/с. Таким чином, на інтенсифікацію нагріву впливає в першу чергу добавка сполучного ЛСТ, а потім - добавка кремнію карбіду. Слід зазначити, що для обраних малих мас нагрівання відбувалося в умовах значної концентрації мікрохвильової енергії у зразку.

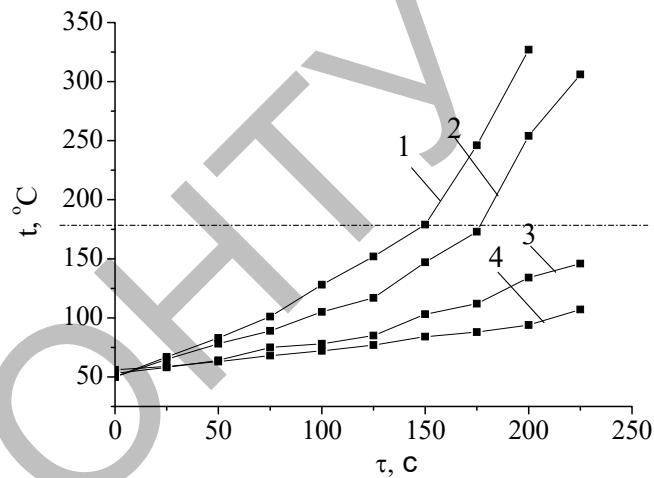


Рисунок 1 – Нагрів композиційного порошку на основі діоксиду алюмінію ($\text{Al}_2\text{O}_3 + 5$ об.% SiC) із застосуванням сполучного 10% ЛСТ у мікрохвильовій камері
1 – маса зразка 20 г; 2 – маса зразка 50 г; 3 – маса зразка 70 г; 4 – маса зразка 20 г без сполучного. Вихідна потужність магнетрону 600 Вт.

Аналіз результатів нагрівання порошків, які використовують для виготовлення технічної кераміки, довів, що при мікрохвильовому нагріванні зразків нерівномірність температури дуже велика. Відхилення температури по товщині для відкритої пластини карбиду кремнію завтовшки 10 мм може досягати 27 %. Відхилення між центром і краєм (відстань 1,75 см) зразків масою до 50 г досягає 50%. Застосування як сполучного лігносульфонату при мікрохвильовій обробці порошків показує, що внаслідок його високих діелектричних властивостей нагрівання в мікрохвильовому полі проходить інтенсивно, причому починаючи з температури 320 °С темп нагрівання посилюється, що пов'язано зі збільшенням діелектричних характеристик продуктів терморозпаду. Збільшення рівномірності нагріву в мікрохвильовій камері може бути досягнуто за рахунок покриття внутрішньої поверхні форми або поверхні матеріалу речовиною, що ефективно поглинає мікрохвильове випромінювання, наприклад, сажею.

Література

1. Temperature Assessment Through Decal Color in Microwave-Fired Porcelain / T. Santos et al. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2025. Vol. 9, no. 7. P. 213. URL: <https://doi.org/10.3390/jmmp9070213>
2. Goffé B. Microwave Firing of Ceramics: Developing Homemade Susceptors and Their Practical Applications. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, no. 24. P. 13053. URL: <https://doi.org/10.3390/app152413053>
3. Microwave Heating of Ceramics. *Ceramic Industry Magazine* | The exclusive global voice of ceramic & glass business manufacturing. URL: <http://www.ceramicindustry.com/articles/95044-microwave-heating-of-ceramics>
4. Sharma A., Karunakar D. B. Development and investigation of densification behavior of ZrB₂-SiC composites through microwave sintering. *Materials Research Express*. 2019. Vol. 6, no. 10. P. 105072. URL: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab3aca>
5. Rapid microwave sintering of functional electroceramic materials (CA-4:IL02) / S. V. Egorov et al. *Ceramics International*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.11.203>

УДК 536.2:628.54

ВДОСКОНАЛЕННЯ КОМБІНОВАНОГО ТЕПЛООБМІНУ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ЗАБРУДНЕНИХ ҐРУНТІВ

Воробйов Н.О., аспірант

Одеський національний технологічний університет

Забруднення ґрунтів нафтопродуктами, важкими металами та стійкими органічними сполуками є однією з ключових екологічних проблем сучасності [1-3]. Джерелами забруднення виступають промислові підприємства, транспорт, аварійні витоки та полігони відходів, що призводить до деградації екосистем і втрати родючості ґрунтів. Серед існуючих методів очищення ґрунтів важливе місце займають термічні технології, які базуються на нагріванні ґрунту до температур, за яких відбувається випаровування, деструкція або окиснення забруднювачів. Зокрема, методи термічної десорбції дозволяють ефективно видаляти органічні сполуки шляхом їх переходу в газову фазу з подальшою утилізацією. Встановлено, що при нагріванні ґрунту до температур 100–300 °С забезпечується інтенсивне видалення летких компонентів. Однак традиційні методи нагріву характеризуються значними енерговитратами та нерівномірністю температурного поля. У зв'язку з цим актуальним є використання комбінованого теплообміну, що поєднує теплопровідність, конвекцію та внутрішнє джерело тепла (наприклад, мікрохвильове випромінювання) [4, 5].

Мікрохвильові технології є перспективними для очищення ґрунтів, оскільки забезпечують об'ємний нагрів матеріалу та високу швидкість підвищення температури. Дослідження показують, що мікрохвильове нагрівання дозволяє досягти більш ефективного видалення забруднювачів у порівнянні з традиційним резистивним нагрівом за рахунок кращого поглинання енергії та прискорення процесів десорбції. Крім того, поєднання мікрохвильового впливу з окиснювальними процесами може забезпечувати ступінь очищення понад 80 % за короткий час. Переваги використання мікрохвильових технологій у ремедіації забруднених ґрунтів обумовлені особливостями взаємодії електромагнітного поля з дисперсними вологими середовищами та специфікою тепломасопереносу. Мікрохвильові технології в ремедіації ґрунтів мають суттєві переваги завдяки здатності забезпечувати об'ємний і вибірковий нагрів, при якому енергія безпосередньо поглинається вологими та забрудненими зонами. Це дозволяє значно прискорити процеси десорбції та випаровування забруднювачів, підвищуючи ефективність очищення. Крім того, мікрохвильове нагрівання забезпечує більш рівномірний температурний розподіл і зменшує енерговитрати порівняно з традиційними методами [6]. Такі технології легко поєднуються з іншими методами очищення, формуючи ефективний комбінований тепло- та масообмін.

Комбінований теплообмін у ґрунтах має складний характер і визначається їх фізико-механічними властивостями, зокрема пористістю, вологістю та теплопровідністю. У малопроникних ґрунтах переважає теплопровідність, тоді як у більш пористих середовищах значну роль відіграє конвекція, що впливає на ефективність нагріву та рівномірність температурного поля.

Вдосконалення процесу очищення ґрунтів досягається за рахунок:

- оптимізації співвідношення кондуктивного та конвективного теплообміну;
- регулювання вологості ґрунту, що впливає на поглинання мікрохвильової енергії;
- застосування комбінованих джерел енергії (електричний + мікрохвильовий нагрів);
- використання каталізаторів та окисників для інтенсифікації процесів руйнування забруднювачів.

Сучасні технології, такі як enhanced thermal conduction, дозволяють підвищити ефективність передачі тепла в ґрунті та зменшити енерговитрати за рахунок оптимізації теплових потоків. Поєднання таких технологій із мікрохвильовим нагрівом створює передумови для розробки енергоефективних систем очищення.

Таким чином, використання комбінованого теплообміну є перспективним напрямом підвищення ефективності ремедіації забруднених ґрунтів. Подальші дослідження мають бути спрямовані на математичне моделювання процесів тепломасопереносу та оптимізацію режимів обробки.

Висновки

Термічні методи очищення ґрунтів є ефективними для видалення органічних забруднювачів. Використання комбінованого теплообміну дозволяє підвищити рівномірність нагріву та зменшити енерговитрати. Мікрохвильове нагрівання є перспективним інструментом інтенсифікації процесів очищення. Подальший розвиток технологій пов'язаний із оптимізацією параметрів теплового впливу та поєднанням різних фізичних методів.

Література

1. Pyrene contaminated soil remediation using microwave/magnetite activated persulfate oxidation / D. Wu et al. *Chemosphere*. 2022. Vol. 286. P. 131787. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131787>.
2. Крикля М. В. Аналіз фітотоксичності ґрунтів забруднених нафтопродуктами: кваліфікаційна робота магістра: спец. 101 - Екологія; наук. кер. О. В. Коляда. Харків: ДБТУ, 2024. 69 с. <https://repo.btu.kharkov.ua/handle/123456789/62752>.
3. Xu J., Liu S., Chen C. Impact of Soil Type and Moisture Content on Microwave-Assisted Remediation of Hydrocarbon-Contaminated Soil. *Sustainability*. 2024. Vol. 17, no. 1. P. 101. URL: <https://doi.org/10.3390/su17010101>.
4. Thermal based remediation technologies for soil and groundwater: a review / M. Y. D. Alazaiza et al. *Desalination and water treatment*. 2022. Vol. 259. P. 206–220. URL: <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28433>.
5. Fundamental experiments on thermal desorption of contaminants from soils / J. S. Lighty et al. *Environmental Progress*. 1989. Vol. 8, no. 1. P. 57–61. URL: <https://doi.org/10.1002/ep.3300080115>.
6. Thermal desorption: an effective remediation technique for treating soils heavily impacted by recalcitrant pollutants - Ortec Group. *Ortec Group*. URL: <https://ortec-group.com/en/newsroom/thermal-desorption-depollution/>.

УДК 620.91:697.329

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СОНЯЧНОГО ПОВІТРЯНОГО КОЛЕКТОРА З РІЗНИМИ ТИПАМИ ПРОЗОРОГО ПОКРИТТЯ

Єрохін Д.М., аспірант
Одеський національний технологічний університет

Розглядається проблематика повітряних сонячних колекторів, що дозволяють безпосередньо використовувати сонячну енергію для нагрівання повітря для гібридних системах теплопостачання, в яких поєднується декілька джерел теплової енергії з різними принципами роботи. Сонячні повітряні колектори в складі гібридних систем теплопостачання виконують важливу функцію, а саме зменшують навантаження на основне джерело тепла та підвищують загальну енергоефективність. Доведено, що одним із ключових елементів, що істотно впливає на теплотехнічні характеристики колектора, є прозоре покриття, яке визначає рівень пропускання сонячного випромінювання та величину теплових втрат у навколишнє середовище. Особу увагу слід приділяти питанню зменшення маси та собівартості сонячного колектору. Концепція використання полімерних матеріалів полягає у частковій або повній заміні традиційних матеріалів (мінерального скла, міді, алюмінію) полімерними матеріалами, які забезпечують прийнятні оптичні й теплотехнічні характеристики за значно нижчої вартості, маси та енергомісткості виробництва. Ідея виготовлення дешевших та легших сонячних колекторів (СК) з використанням полімерних матеріалів не є новою [1, 2]. Сучасні виробники полімерних матеріалів виробляють сучасні пластмаси, стійкі до ультрафіолетового випромінювання. Ця властивість робить їх придатними для застосування в сонячній енергетиці. Полімерні матеріали також мають меншу вагу, що зменшує матеріалоємність сонячного колектора та їх опорних конструкцій.

Основною ідеєю дослідження [3] було створення плоского полімерного СК з низькою вартістю та високими теплотехнічними характеристиками, що відповідають характеристикам традиційних СК. В результаті порівняльного експериментального дослідження різних сонячних колекторів було визначено, що ефективність полімерного колектора на 8–15% нижча за ефективність традиційного колектора зі скла, проте оцінка життєвого циклу показала переваги застосування полімерних матеріалів у конструкції сонячних колекторів. В [4] розглядається можливість застосування сонячних колекторів, основним структурним елементом яких є стільникові полікарбонатні плити для гарячого водопостачання та опалення будівель.

Потреба у створенні експериментальної установки для дослідження сонячних повітряних колекторів пов'язана з необхідністю підтвердження ефективності використання рішень стосовно кількості повітряних каналів, способу розташування плоского абсорбера, вибору типу абсорбера, вибору прозорого покриття, вибору типу ізоляції та інші важливі для практики питання. Для порівняльного аналізу в дослідницьких експериментальних установках в галузі сонячної енергетики використовують дві або більше альтернативні конструкції, які відрізняються лише одним з елементів, вплив якого потрібно вивчити. Такий підхід обумовлений тим, що умови сонячного випромінювання змінні з часом і сильно залежать від стану атмосфери, що не дає можливості точного їх відтворення. Тому альтернативні рішення повинні проходити випробування одночасно в однакових умовах. Виходячи з цього в проекті експериментальної установки передбачено спорудження двох однакових повітряних каналів,

в яких розташований абсорбер, які мають однакове прозоре покриття і які мають достатню однакову теплоізоляцію. Повітря в каналах рухається зверху вниз під дією однакових вентиляторів. Така конструкція дозволяє міняти розташування абсорберів та їх тип, а також проводити порівняння різних видів прозорого покриття. Після остаточного монтажу установки були проведені випробування її дієздатності. Після встановлення установки у вертикальному положенні з орієнтацією на Сонце були підключені вентилятори для створення циркуляції повітря в каналах. Швидкість потоку повітря на виході з установки визначалась за допомогою анемометра HoldPeak HP-866B/ D. В обох каналах вона встановила 1,194 м/с. Потужність сонячного випромінювання на 1 м² вертикальної площадки і площадки, перпендикулярної до сонячних променів, під час випробувань вимірювали за допомогою пірметра SolData Instruments Hand Pyranometer 4890.20. Вимірювання температури навколишнього середовища, на виході з одноканального та двоканального сонячного підігрівачів здійснювали за допомогою цифрового термометру опору. За результатами випробувань зафіксовано нагрів повітря в одноканальному підігрівачі на 7,9 °С, в двоканальному підігрівачі на 8,9 °С. Це свідчить про більшу ефективність двоканальної системи.

Аналіз результатів експериментів показав особливості у функціонуванні прозорого покриття в залежності від матеріалу. Так, для віконного скла пропускна спроможність майже не змінюється в залежності від співвідношення прямої і розсіяної радіації, зберігаючись на рівні 0,79-0,78 пропускної спроможності.

Результати для полікарбонату погіршуються разом із погодою: більша доля розсіяного випромінювання призводить до чутливої зміни у пропускній спроможності від 0,78 у ясні дні до 0,74 у помірно похмурі дні.

Звертає на себе увагу факт зростання пропускної спроможності текстурованого прозорого листа полістиролу у відповідності до зростання долі розсіяного випромінювання у сонячній радіації з 0,74 до 0,81. Відповідно до зовнішнього вигляду лист, мав одну поліровану поверхню, а друга була текстурована мікрорізерунками так, щоб виглядати матовою. Матова поверхня сприяла проникненню світла у зону абсорбера сонячного колектора. Це явище потребує подальшого дослідження, зокрема, порівняння структурованого полістиролу матеріалом тієї ж фірми з глянсовими поверхнями або зі структурованими поверхнями з іншим видом мікрорізерунка. В подальшому необхідно створення нової конструкції повітряного колектора, яка б дозволяла паралельний монтаж двох різних прозорих покриттів на два існуючих каналу, або створення ще одного-двох ідентичних повітряних колекторів для забезпечення порівняння ефективності і інших характеристик в однакових умовах випромінювання.

Результати експериментів дозволили визначити, що значення ККД в створеній установці сонячного повітряного колектору змінюється від 0,69 до 0,76 в залежності від прозорого покриття.

Література

1. Köhl, M., Meir, M. G., Papillon, P., Wallner, G. M., & Saile, S. (2012). *Polymeric Materials for Solar Thermal Applications*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. <https://doi.org/10.1002/9783527659609>
2. Raman, R., Mantell, S., Davidson, J., Wu, C., & Jorgensen, G. (2000). A Review of Polymer Materials for Solar Water Heating Systems. *Journal of Solar Energy Engineering*, 122(2), 92–100. <https://doi.org/10.1115/1.1288214>.

3. Chen, G., Doroshenko, A., Koltun, P., & Shestopalov, K. (2015). Comparative field experimental investigations of different flat plate solar collectors. *Solar Energy*, 115, 577–588. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.03.021>.
4. Пізнак, Б., Желих, В. (2011). Полімерні сонячні колектори в системах теплопостачання. *Геодезія, архітектура та будівництво: матеріали IV Міжнародної конференції молодих вчених GAC-2011, 24–26 листопада 2011 р., Україна, Львів*, 160–161. <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/19390>.

УДК 666.76:537.86:66.047

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СПІКАННЯ ОКСИДУ АЛЮМІНІЮ В МІКРОХВИЛЬОВОМУ ПОЛІ НА ЕТАПІ СУШІННЯ

А. Г. Крятов, аспірант
Одеський національний технологічний університет

Перспективним напрямом інтенсифікації тепломасообмінних процесів є застосування енергії мікрохвильового поля, яке забезпечує об'ємний нагрів матеріалу, підвищення швидкості видалення вологи та можливість керування структуроутворенням керамічної матриці ще на етапі сушіння [1]. Подальше вдосконалення та оптимізація мікрохвильової обробки призведе до поглибленого розуміння поведінки мікрохвиль під час взаємодії з матеріалами, розробки математичних співвідношень між різними матеріалами та параметрами мікрохвиль. Під час виробництва технічної кераміки стадія сушіння найчастіше потрібна, та при застосуванні мікрохвильового поля її режим і тривалість можуть істотно відрізнятись від класичної. Вплив параметрів мікрохвильового опромінення (потужності, частоти, тривалості обробки) на кінетику сушіння, формування мікроструктури та подальші властивості технічної кераміки на основі оксиду алюмінію потребує детального дослідження. У зв'язку з цим виникає науково-практичне завдання встановлення оптимальних режимів мікрохвильового сушіння, які забезпечують інтенсифікацію процесу без погіршення якості матеріалу, а також визначення закономірностей впливу мікрохвильової енергії на формування структури та експлуатаційних характеристик керамічних виробів [2, 3].

Дослідження процесу сушіння оксиду алюмінію з ПВС проведені при різних значеннях маси заправки матеріалу m – від 10 г до 100 г, товщини шару δ – від 7 мм до 15 мм, площі поверхні зразка F – від 0,00078 м² до 0,0083 м², вихідної потужності магнетрону $P_{\text{вих}}$ – від 180 до 400 Вт. Отримані дані були основою отримання даних по кінетиці сушіння та визначення ефективності перетворення мікрохвильової енергії в теплову. Типові первинні дані наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Результати дослідження процесу сушіння зразка $Al_2O_3 + PVC$ в мікрохвильовому полі. $\delta = 8$ мм;; $m = 0,07$ кг

τ , с	$\Delta m \cdot 10^3$, кг	$\bar{u}$, кг/кг	$\bar{t}$, °C
$P_{вих} = 240$ Вт			
0	0	0,455	21
30	0,3	0,443	103
60	1,1	0,364	165
90	0,9	0,322	165
120	1,9	0,220	156
150	1,6	0,106	148
180	0,7	0,029	136
210	0,1	0,017	129
$P_{вих} = 180$ Вт			
0	0	0,455	21
30	0,3	0,441	69
60	0,8	0,401	107
90	1,0	0,339	111
120	1,2	0,267	105
150	0,8	0,210	99
180	1,1	0,133	91
210	1,4	0,054	86

Експерименти довели, що при сушінні зразків масою від 10 г до 40 г навіть при потужності 180 Вт якість зразків є незадовільною: спостерігались тріщиноутворення, а при $m=10$ г – навіть активне розкладання та обуглювання органічного сполучного ПВС. Після розкладання ПВС вуглець, що утворюється починає активно поглинати мікрохвильову енергію, в результаті спостерігалось стрибкоподібне нагрівання і руйнування зразка. На рис. 1 наведені криві, які отримані для мас 100 г, 90 г, 80 г та 70 г при потужності $P_{вих}=240$ Вт. В даних режимних параметрах були отримані зразки з необхідною якістю.

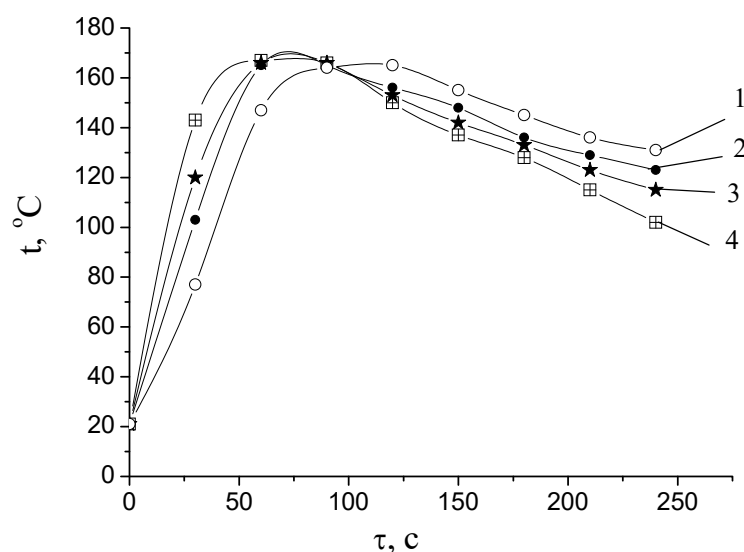


Рисунок 1. Середня температура поверхні зразків $Al_2O_3 + PVC$ при мікрохвильовому сушінні. $P_{вих} = 240$ Вт, $\delta = 8$ мм.

$$1 - m = 100 \text{ г}, 2 - m = 90 \text{ г}, 3 - m = 80 \text{ г}, 4 - m = 70 \text{ г}$$

Видно, що у всіх зразках максимальна температура становила 164-166 °С. При досягненні цієї температури волога практично видалена і далі мікрохвильова енергія дедалі менше поглинається матеріалом. Як показують температурні криві, температура зразків знижується, причому темп охолодження залежить від завантаження. Частка поглиненої мікрохвильової енергії знижується, а частка енергії, що йде у навколишнє середовище, збільшується.

Література

1. Le, T., Ju, S., Koppala, S., Peng, J., Pan, B., Zhang, L., Wang, Q., & Li, X. (2018). Kinetics study of microwave enhanced reactions between diasporic bauxite and alkali solution. *Journal of Alloys and Compounds*, 749, 652–663. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.03.323>.
2. Lin, M.-S., & Chu, K.-R. (2025). On the Non-Thermal Mechanisms in Microwave Sintering of Materials. *Materials*, 18(3), 668. <https://doi.org/10.3390/ma18030668>.
3. S. Othman^a, Y. H. Lua^b, E. S. Sazali^a, Y. S. Yap^b, R. (2025). Hisam' Influence of heat treatment on microwave dielectric properties of erbium doped borotellurite glass ceramics. Advanced Optical Materials Research Group, Department of Physics, *Chalcogenide Letters*, 22(5), 451-459. <https://doi.org/10.15251/CL.2025.225.451>.

УДК 621.565

14 ПОРІВНЯННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ЯВНОГО ТА ПРИХОВАНОГО АКУМУЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ У ТЕПЛИЦЯХ

Писаревський І.О. аспірант, ОНТУ, м. Одеса, rori@ukr.net

Акумуляування теплової енергії є важливим напрямом підвищення енергоефективності систем, що використовують відновлювані джерела енергії [1]. Особливий інтерес становить накопичення низькопотенційної теплоти в тепличних комплексах для зменшення добових коливань температури повітря та зниження енерговитрат на опалення [1, 2]. Найбільш поширеними є системи акумуляування явної теплоти, в яких енергія запасасться за рахунок зміни температури матеріалу, та системи прихованого теплонакопичення з використанням матеріалів з фазовим переходом [3, 4].

Метою роботи є дослідження експлуатаційних характеристик систем акумуляування низькопотенційної теплоти на основі щільного шару щебеню та модифікованого парафіну ТЗ для умов теплиці.

Для дослідження було створено експериментальну установку у вигляді макета теплиці з акрилового скла, що містила два типи теплоакумулявальних елементів: вертикальний теплообмінний канал із щільним шаром щебеню та полімерні трубки, заповнені модифікованим парафіном ТЗ. У системі з щебенем теплоносієм була вода, яка вдень нагрівалася сонячним випромінюванням у трубках під покрівлю теплиці та подавалася у верхню частину теплообмінного каналу. Для зниження температури плавлення до парафіну додавали вазелінову оливу та гліцерин, унаслідок чого температура фазового переходу зменшилася до 34–35,5 °С.

У процесі експериментів вимірювали температуру води в циркуляційному контурі, температуру щебеню по висоті каналу, температуру парафіну, температуру повітря в теплиці та

навколишнього середовища, а також інтенсивність освітлення. Реєстрація даних здійснювалася автоматизованою системою на базі Arduino Mega 2560 R3, ESP32 та Raspberry Pi 5 з інтервалом 10 с.

Результати показали, що температура повітря в макеті теплиці суттєво залежить від інтенсивності сонячного випромінювання і вдень досягала 42–45 °С, тоді як температура зовнішнього повітря не перевищувала 24 °С. Встановлено, що теплообмін між водою та щільним шаром щебеню відбувається достатньо інтенсивно, а середній коефіцієнт міжкомпонентного теплообміну становить $\alpha = 80 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, що істотно перевищує значення, характерні для повітряного теплоносія.

За результатами теплових розрахунків визначено, що питома кількість теплоти, акумульована щебенем, становить 18,4–22,8 кДж/кг. Для модифікованого парафіну в аналогічних умовах питома акумулювання теплоти досягало 171,2 кДж/кг, тобто було у 7,5–9,3 раза вищим, ніж для щебеню. При цьому маса використаного парафіну була у 23,6 раза меншою за масу щебеню.

Аналіз експериментальних кривих показав, що зміна температури води та щебеню задовільно описується функцією типу GaussAmp, а зміна температури повітря в теплиці та парафіну — функцією типу Cubic. Узгодження математичної моделі з експериментальними даними для температури повітря в теплиці становило 98,8 %.

Таким чином, система прихованого теплонакопичення з модифікованим парафіном ТЗ є значно ефективнішою за питоמוю теплоакумулювальною здатністю. Разом з тим використання вертикального теплообмінного каналу зі щебенем є конструктивно простішим та зручнішим для інтеграції в діючі теплиці без суттєвої реконструкції. Остаточний вибір типу теплоакумулювальної системи повинен здійснюватися з урахуванням енергетичної ефективності, вартості матеріалів, конструктивної складності та умов інтеграції в тепличний комплекс.

Список інформаційних джерел

5. Ali H. M., Rehman T.-u., Arıcı M., Said Z., Duraković B., Mohammed H. I. et al. Advances in thermal energy storage: Fundamentals and applications // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2024. Vol. 100. 101109. DOI: 10.1016/j.pecs.2023.101109.
6. Suresh C., Saini R. P. Thermal performance of sensible and latent heat thermal energy storage systems // *International Journal of Energy Research*. 2020. Vol. 44, No. 6. P. 4743–4758. DOI: 10.1002/er.5255.
7. Faraj K., Khaled M., Faraj J., Hachem F., Castelain C. A review on phase change materials for thermal energy storage in buildings: Heating and hybrid applications // *Journal of Energy Storage*. 2021. Vol. 33. 101913. DOI: 10.1016/j.est.2020.101913.
8. Bouadila S., Lazaar M., Skouri S., Kooli S., Farhat A. Assessment of the greenhouse climate with a new packed bed solar air heater at night, in Tunisia // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 35. P. 31–41. DOI: 10.1016/j.rser.2014.03.051.

УДК 536.631:620.22-022

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ ТЕПЛОЄМНОСТІ ПОРОШКІВ НАНОЧАСТИНОК CuO МЕТОДОМ МОНОТОННОГО НАГРІВАННЯ В АДІАБАТНОМУ КАЛОРИМЕТРІ

Желєзний В.П. професор, Квасницький Б.А. аспірант, Івченко Д.О. доцент, Халак В.Ф. викладач
Одеський національний технологічний університет Одеса, Україна

Глек Я.О. доцент
Одеський національний морський університет Одеса, Україна

E-mail: zheleznyv@gmail.com

Розвиток сонячної енергетики стимулює пошук нових матеріалів і теплоносіїв, здатних ефективно накопичувати та передавати теплову енергію в діапазоні температур від 100 до 400 °С. Ключовими характеристиками таких матеріалів є теплоємність, теплопровідність і температуропровідність. Для традиційних теплоносіїв – мінеральних олив, органічних рідин і водно-гліколевих сумішей – недостатність даних про теплофізичні властивості стримує розвиток систем концентрованої сонячної енергетики (CSP) [1].

Перспективним напрямком вважається введення наночастинок у базові рідини або розплави: завдяки високому співвідношенню площі поверхні до об'єму такі нанофлюїди можуть істотно покращувати характеристики теплопередачі. Проте вплив наночастинок на теплофізичні властивості носіїв залишається неоднозначним і залежить від матеріалу, розміру та концентрації частинок, а також від умов експерименту.

Серед наноматеріалів особливий інтерес представляє оксид міді (CuO) – хімічно та термічно стабільний, відносно дешевий матеріал з помірною теплопровідністю. Нанофлюїди на основі CuO ефективно поглинають випромінювання у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах, що робить їх придатними для прямих абсорбційних сонячних колекторів. [2]

При цьому експериментальні дані щодо теплоємності нанопорошків CuO залишаються обмеженими, особливо для середньотемпературних режимів. Це ускладнює розробку розрахункових моделей для нанотеплоносіїв та термоаккумуляторних матеріалів.

Мета описаного дослідження — експериментальне вивчення теплоємності порошку наночастинок CuO методом монотонного нагрівання: встановлення її температурної залежності та оцінка впливу поверхневих домішок у діапазоні 20–120 °С.

В якості об'єкта дослідження використовувався порошок наночастинок CuO . Порошок наночастинок був вироблений SIGMA-ALDRICH CHEMIEG mbH., чистота зразка 99,5%; діаметр наночастинок $50 \leq \text{nm}$; CAS:1317-38-0 CuO MW: 79,55 г/моль; питома поверхня $65,38 \text{ м}^2/\text{г}$.

Перед проведенням експериментальних досліджень теплоємності була визначена максимальна адсорбційна здатність порошку наночастинок CuO . З цією метою порошок наночастинок піддавався вакуумному сушінню при температурі 180 °С протягом 8 годин. Після процедури десорбції води зразок порошку наночастинок масою 148,297 г протягом 9000 хвилин констатував з вологим повітрям при температурі 16 °С і середній вологості повітря 80%. Сухий порошок інтенсивно сорбує пари води з повітря. Максимальне значення маси води, сорбованої зразком порошку наночастинок CuO , становило 0,2377 г, що відповідає вологості порошку 0,16 %. З отриманих даних випливає, що для виключення попадання парів води на поверхню наночастинок, десорбцію зразків порошків наночастинок необхідно проводити безпосередньо в калориметрі перед проведенням калориметричного дослідження

Дослідження ефективної теплоємності порошку наночастинок CuO було виконано методом монотонного нагрівання в калориметрі змінної температури, докладний опис якого наведено в [3]. У цю установку були внесені конструктивні зміни, які дозволили істотно зменшити величину теплових втрат за рахунок поліпшення системи створення адіабатних умов при проведенні експерименту. Особливістю калориметричної посудини, в якій проводилися дослідження теплоємності порошку наночастинок CuO, є її великий об'єм $165,54 \text{ см}^3$ та наявність диференціальної термопари, яка дозволяє вимірювати радіальний градієнт температури зразка протягом усього експерименту. Крім того, на кришці калориметричного посуду є мідна трубка діаметром 2 мм. Через цю трубку можна проводити вакуумну десорбцію води з порошку наночастинок безпосередньо під час калориметричного експерименту.

Результати проведених калориметричних досліджень наведено на рисунку 1

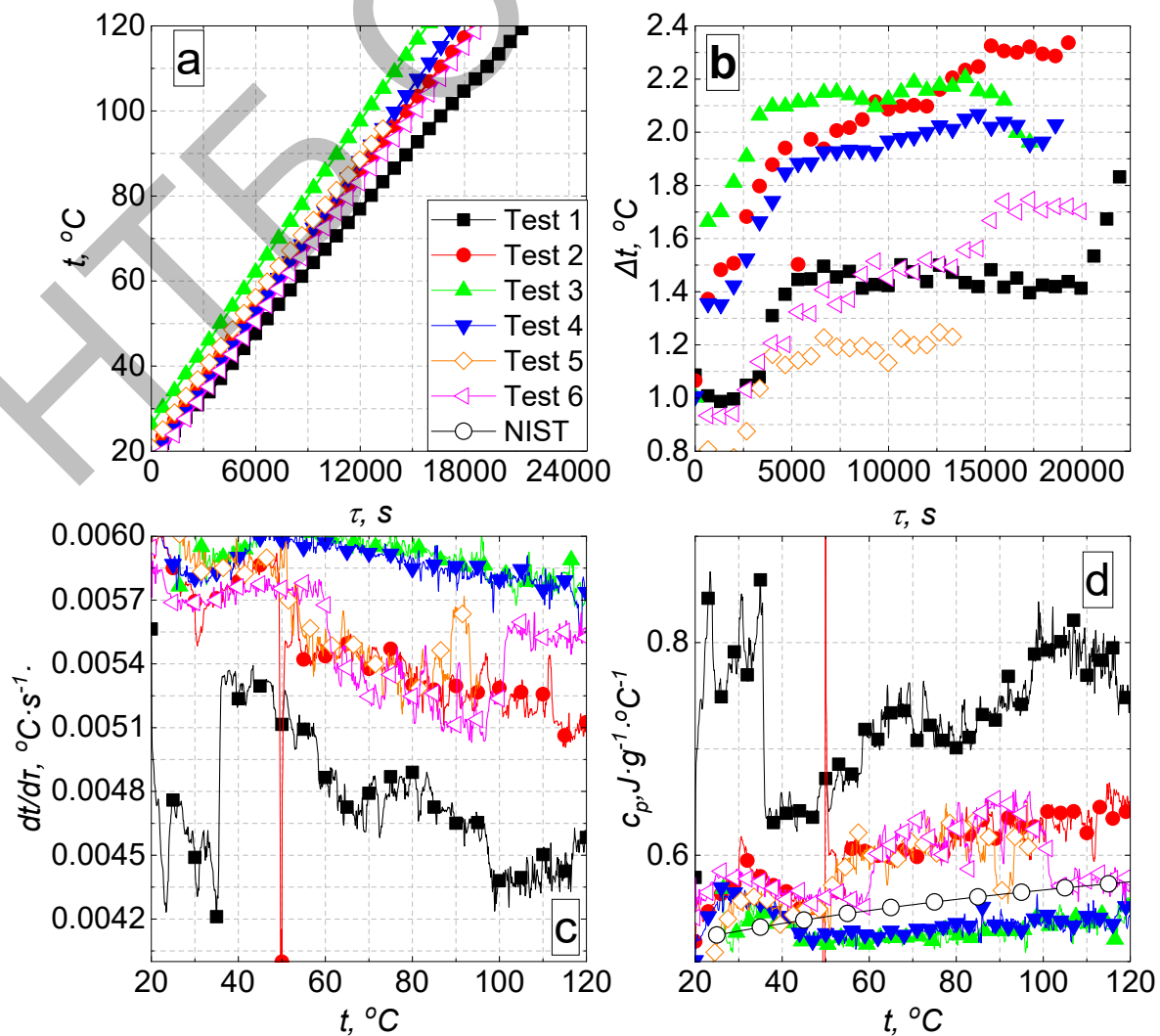


Рисунок 1а Термограми тестів 1-4 при відкритому калориметрі та тестів 5-6 при закритому калориметрі; 2b – зміна радіальної різниці температур зразка порошку наночастинок CuO від; 2с – температурна залежність швидкості зміни температури зразка порошку наночастинок CuO; 2d – температурна залежність теплоємності порошку наночастинок від температури

Таблиця 1 – Основні характеристики об'єктів дослідження теплоємності порошків наночастинок

№	Маса зразка,	Потужність калориметричного нагрівача, Вт	Інтервал температур, °С	Умова міжтестового зберігання	Час експерименту, мин	Запаяний капіляр
1	140,583	0,75	20-120	10 днів сорбція повітря	357	Відкрита т/д система
2	140,583	0,75	20-120	Зразок був під гелієм	309	Відкрита т/д система
3	140,583	0,75	20-120	Зразок був під гелієм	264	Відкрита т/д система

Продовження таблиці 1

4	140,583	0,75	20-120	Зразок був під сухим повітрям	291	Відкрита т/д система
5	140,583	0,75	20-96	Зразок був під сухим повітрям	224	Замкнута т/д система
6	140,583	0,75	20-120	Зразок був під сухим повітрям	314	Замкнута т/д система

Аналіз наведених на рисунку 1а ч термограм показує істотну різницю в зміні температури зразків порошкоподібних наночастинок для відкритої термодинамічної системи (з відкритим капіляром) і замкнутої термодинамічної системи. При відкритому капілярі швидкість зміни температури збільшується в міру десорбції води з пористої структури наночастинок в різних тестах.

Проведені дослідження ефективної теплоємності порошків наночастинок CuO показують, що інтенсивний процес дегідратації в початковий період проведення тестів (до 5000 с) супроводжувався збільшенням радіальної різниці температур у зразку порошку наночастинок. Причому цей ефект простежується як для відкритої, так і замкнутої термодинамічної систем (див. рисунки 1б).

Слід звернути увагу, що швидкості зміни температури зразків порошку наночастинок CuO для відкритої і замкнутої термодинамічних систем істотно відрізняються (див. рисунки 1с). При відкритому калориметрі швидкість зміни температури з кожним наступним тестом збільшувалася за рахунок дегідратації зразка порошку наночастинок CuO . Навпаки, в герметичному калориметрі (запаяний капіляр) при температурах вище 50 °С швидкість зміни температури практично залишалася незмінною з тенденцією зменшення абсолютного значення.

З інформації, наведеної на рисунку 1d, випливає, що до температури 50 °С ефективне значення теплоємності нанопорошків у відкритому калориметрі істотно вище теплоємності оксиду міді для великих частинок (об'ємного матеріалу) за рахунок випаровування незв'язаної води з поверхні наночастинок. У кожному наступному тесті значення ефективної теплоємності ставало меншим у зв'язку зі зменшенням концентрації води в порошку наночастинок (десорбцією води з пор порошку наночастинок). Слід зазначити, що повністю видалити домішки води з пор у наночастинок CuO , ефективний діаметр яких може бути менше нанометра, практично неможливо. Разом з тим, в останніх тестах (1-4, рисунок 1d) значення ефективної теплоємності порошку наночастинок CuO стає меншим за теплоємність об'ємного матеріалу. Однак ці відхилення не перевищують сумарну похибку порівнюваних значень теплоємності.

Аналізуючи отриману інформацію про температурні залежності порошків наночастинок CuO , можна дійти висновку, що гідратація відіграє важливу роль у стабілізації наночастинок у порошках і є основним джерелом похибок, що виникають при вимірюванні теплоємності порошків наночастинок.

Література

- [1] Gil, A., Medrano, M., Martorell, I., Lázaro, A., Dolado, P., Zalba, B., & Cabeza, L. F. (2010). State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 31–55. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.035>
- [2] Mahian, O., Kianifar, A., Kalogirou, S. A., Pop, I., & Wongwises, S. (2013). A review of the applications of nanofluids in solar energy. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 57(2), 582–594. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.10.037>
- [3] Zhelezny, V., Hlek, Y., Grosu, Y., Kvasnytskyi, B., & Ivchenko, D. (2024, September). Effect of Fullerene Additives on the Optical and Thermodynamic Properties of Eicosane. In 2024 IEEE 14th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP) (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/NAP62956.2024.10739675>

УДК 536.252

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФУЛЕРЕНУ C₆₀ НА ТЕПЛООБМІН ТЕТРАЛІНУ ПРИ ВИМУШЕНІЙ КОНВЕКЦІЇ

Железний В.П. професор, Шумський О.А. аспірант, Борисов В.О. асистент,
Івченко Д.О. доцент, Халак В.Ф. викладач

Одеський національний технологічний університет Одеса, Україна

Глек Я.О. доцент

Одеський національний морський університет Одеса, Україна

E-mail: zheleznyv@gmail.com

Підвищення ефективності процесів теплообміну за рахунок модифікації теплоносіїв, є ключовим завданням розвитку сучасних енергетичних систем. Використання нанотехнологій дозволяє цілеспрямовано змінювати теплофізичні властивості високотемпературних теплоносіїв і регулювати поглинання сонячного випромінювання за рахунок застосування гібридних нанофлюїдів [1]. Крім того, присутність наночастинок у теплоносії сприяє збільшенню інтенсивності тепловіддачі в теплообмінних пристроях, зниженню їх масогабаритних характеристик, а також зменшенню енерговитрат на прокачування теплоносія [2,3]. У зв'язку з цим дослідження впливу наночастинок на теплофізичні властивості, енергоспоживання системи циркуляції та коефіцієнт тепловіддачі є актуальним завданням. У цьому дослідженні експериментально вивчено новий теплоносіє, що складається з тетраліну та фулерену C₆₀ як перспективну альтернативу для систем сонячних енергетичних установок. З метою дослідження впливу фулерену C₆₀ на теплообмін при ламінарному та турбулентному режимах в умовах вимушеної конвекції було створено експериментальний стенд. Схема експериментальної установки показана на рисунку 1.

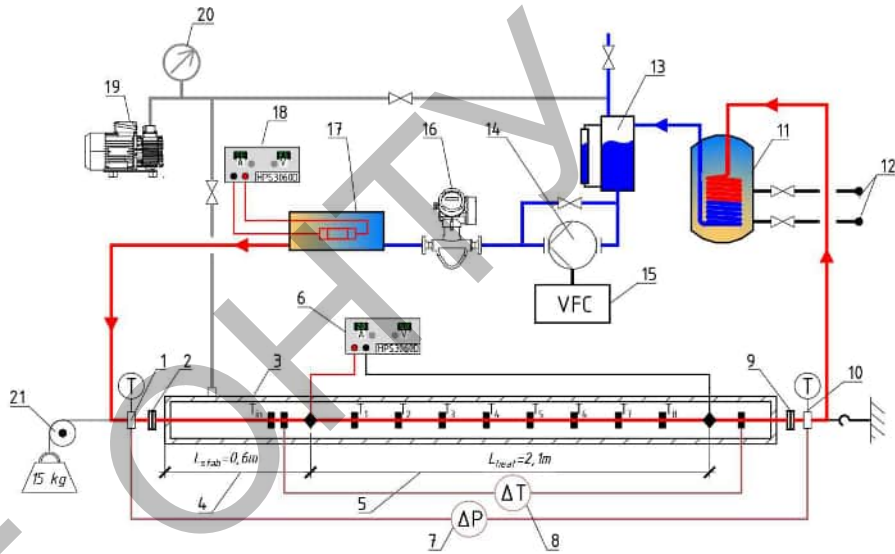


Рисунок 1 – Схема експериментальної установки: 1,9 – ізолятор, 2,10 – термометричні кишені, 3 – вакуумна камера, 4 – ділянка стабілізації, 5 – робоча ділянка вимірювань, 6,18 – стабілізовані джерела живлення Masteram HPS3060D, 7 – датчик тиску WIKA 0-25 bar, 8 – диференціальна мідь-константанова термопара, 11 – бак охолодження, 12 – підключення охолоджувальної системи, 13 – бак приймач, 14 – циркуляційний насос 15WBX-12, 15 – частотно-регульований привід BLDH350, 16 – коріолісовий витратомір Proline Promass 83F, 17 – попередній нагрівач, 19 – вакуумний насос Value VE225N, 20 – вакуумметр WIKA, 21 – розтягувальний пристрій

Тип конвекції визначається співвідношенням між вимушеним рухом рідини, створюваним насосом або іншим зовнішнім впливом, та вільною конвекцією, що виникає під дією архімедових сил. Вільна конвекція розвивається через температурний градієнт між стінкою і ядром потоку, який викликає відмінність щільності і формує підйомні сили. У горизонтальних трубах це може призводити до виникнення вторинних течій, посилення тепловіддачі, збільшення гідравлічного опору та більш раннього переходу до турбулентного режиму. Існує кілька методів визначення типу конвекції в рідині, таких як карти режиму потоку та коефіцієнт периферійної теплопередачі. Для ідентифікації типу конвекції в донному дослідженні використано метод чисел Річардсона.

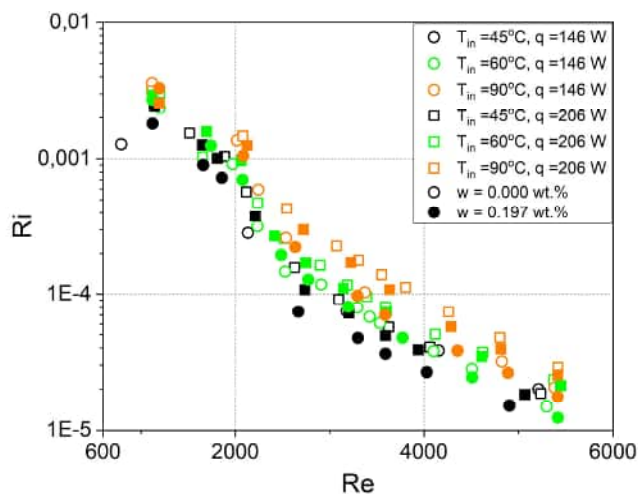


Рисунок - 2 Зависимость числа Ричардсона от числа Рейнольдса при постоянной температуре на входе в участок и тепловой нагрузке для чистого тетралина ($w = 0.000 \text{ wt.}\%$) и тетралин/ C_{60} ($w = 0.197 \text{ wt.}\%$)

Рисунок 2 демонструє, що зі зростанням числа Рейнольдса число Річардсона у всіх серіях монотонно зменшується і залишається на низькому рівні, що свідчить про домінування інерційних сил над підйомними. Отже, у всьому дослідженому діапазоні режимів теплообмін протікає переважно в умовах вимушеної конвекції,

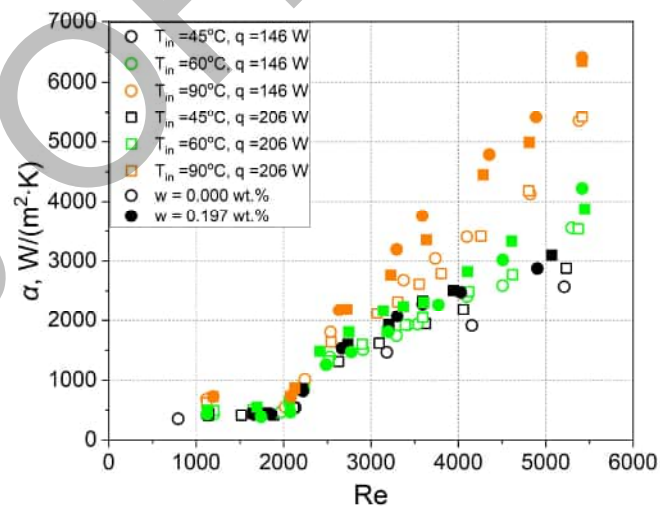


Рисунок - 3 Залежність коефіцієнта тепловіддачі від числа Рейнольдса при постійній температурі на вході в ділянку та тепловому навантаженні для чистого тетраліну ($w = 0.000 \text{ wt.}\%$) та тетралін/ C_{60} ($w = 0.197 \text{ wt.}\%$)

Експериментальні значення, отримані для коефіцієнта тепловіддачі, зображено на рисунку 3. Отримані дані вказують на те, що у ламінарному режимі коефіцієнт тепловіддачі практично не змінився порівняно з чистим тетраліном. Однак у турбулентному режимі помічено збільшення коефіцієнта тепловіддачі. У діапазоні чисел Рейнольдса $4000 \leq Re \leq 6000$ збільшення досягло 20%.

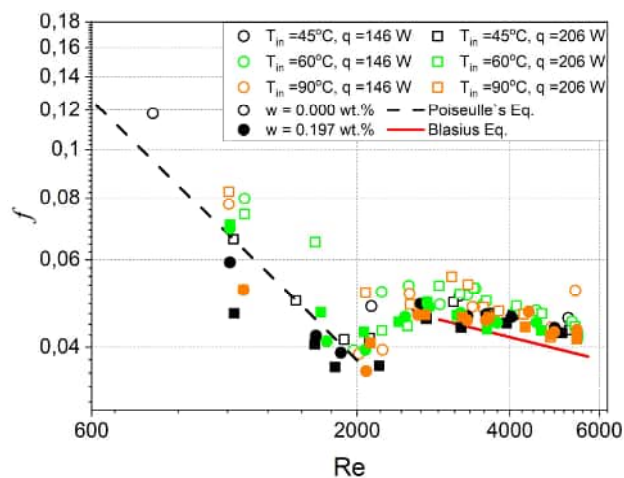


Рисунок - 4 Залежність коефіцієнта тертя від числа Рейнольдса при постійній температурі на вході в ділянку та тепловому навантаженні для чистого тетраліну ($w = 0.000 \text{ wt.}\%$) та тетралін/ C_{60} ($w = 0.197 \text{ wt.}\%$)

На рисунку 4 представлено коефіцієнт тертя от числа Рейнольдса. Було встановлено, що зниження в'язкості розчинів тетраліну/ C_{60} призвело до зменшення гідравлічних втрат на випробувальній ділянці від 10 до 20% для різних режимів у діапазонах, що радять, порівняно з чистим тетраліном. Також споживання електроенергії циркуляційним насосом знизилося приблизно на 10%. Таким чином, добавка фулерену C_{60} сприяла одночасному підвищенню інтенсивності теплообміну і поліпшенню термогідравлічних характеристик потоку, включаючи зниження гідравлічних втрат і зменшення електричної потужності, що споживається насосом.

Література

- 1) Желєзний, В. П., Борисов, В. О., Квасницький, Б. А., Шумський, О. А., & Івченко, Д. О. (2024). Вплив домішок фулерена C_{60} на спектральні коефіцієнти поглинання світла в технічних рідинах. Фізика аеродисперсних систем, (62), 48-56. <https://doi.org/10.18524/0367-1631.2024.62.318548>
- 2) Okonkwo, E. C., Wole-Osho, I., Almanassra, I. W., Abdullatif, Y. M., & Al-Ansari, T. (2021). An updated review of nanofluids in various heat transfer devices: EC Okonkwo et al. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 145(6), 2817-2872. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09760-2>
- 3) Panduro, E. A. C., Finotti, F., Largiller, G., & Lervåg, K. Y. (2022). A review of the use of nanofluids as heat-transfer fluids in parabolic-trough collectors. Applied Thermal Engineering, 211, 118346. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118346>

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

**Навчально-науковий інститут холоду, кріотехнологій та
екоенергетики
ім. В.С. Мартиновського**

**ВСЕУКРАЇНСЬКА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ
МОЛОДИХ ВЧЕНИХ ТА ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ**

**СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ТЕХНІКИ ТА
ЕКОЛОГО-ЕНЕРГЕТИЧНІ ПРОБЛЕМИ СУЧАСНОСТІ**

**STATE AND PROSPECTS OF LOW-TEMPERATURE TECHNOLOGY AND
CURRENT ENVIRONMENTAL AND ENERGY PROBLEMS**

14-15 квітня 2026 року

ЗБІРНИК ДОПОВІДЕЙ

'''Матеріали, занесені до збірника, друкуються за авторськими оригіналами. За достовірність інформації відповідає автор публікації

Комп'ютерний набір і верстка: Жихарєва Н.В.

Одеса - 2026