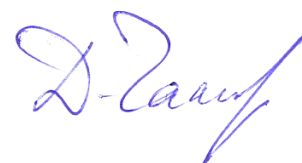


**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ**

ЧАЛАЄВ ДЖАМАЛУТДІН МУРШИДОВИЧ



УДК 621.57:662.99

**РОЗВИТОК ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИКИ СОРБЦІЙНИХ
І ПАРОКОМПРЕСІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
ТРАНСФОРМАЦІЇ ТЕПЛОТИ**

Спеціальність 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук

Київ - 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті технічної теплофізики
Національної академії наук України, м. Київ

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор,
академік НАН України
Снежкін Юрій Федорович,
Інститут технічної теплофізики НАН України,
директор

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
член-кореспондент НАН України
Резцов Віктор Федорович,
Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
заступник директора з наукової роботи

доктор технічних наук, професор
Безродний Михайло Костянтинович,
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського" МОН України, професор кафедри
теоретичної та промислової теплотехніки

доктор технічних наук, професор
Ткаченко Станіслав Йосипович,
Вінницький національний технічний університет
МОН України, завідувач кафедри
теплоенергетики

Захист відбудеться "12" травня 2021 р. о 10.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.224.01 в Інституті технічної теплофізики Національної академії наук України за адресою: 03057, м. Київ, вул. Марії Капніст, 2а.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України за адресою: 03057, м. Київ, вул. Марії Капніст, 2а. Автореферат розісланий "08" квітня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.224.01,
доктор технічних наук

 Ж.О. Петрова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Переведення економіки України на шлях розвитку та ефективного використання паливно-енергетичних ресурсів є пріоритетним напрямком довгострокової енергетичної політики країни, головна мета якої – досягнення енергонезалежності й максимальна диверсифікація імпорту енергоресурсів. У теперішній час досягнення максимально ефективного використання енергоресурсів унеможлиблюється через значні витрати енергії в секторі теплопостачання та промислових технологічних процесах, що пов'язано з використанням неефективних технологій і застарілого обладнання.

Вирішення цих актуальних науково-технічних проблем можливе шляхом широкомасштабного впровадження сучасних енергозберігаючих технологій та залучення в енергообіг низькопотенційних вторинних і поновлюваних джерел енергії. Важливим елементом вирішення проблеми є розвиток технологій енергозабезпечення з використанням теплових насосів.

Нині найбільше практичне застосування мають теплові насоси парокомпресійного типу, які працюють на галогенованих вуглеводнях. Введення міжнародних заходів з обмеження емісії парникових газів стимулює розвиток абсорбційних та адсорбційних теплонасосних систем. Сорбційні системи, як правило, не споживають електричну енергію і працюють від таких джерел як: теплові викиди промисловості та комунального господарства, сонячна і геотермальна енергія. Коефіцієнт перетворення сорбційних теплонасосних установок в залежності від типу коливається в межах 1,6-2,5, що в певних випадках дозволяє їм успішно конкурувати з парокомпресійними тепловими насосами. Найбільший енергозберігаючий та економічний ефекти досягаються в разі використання теплових насосів в технологічних процесах з одночасним споживанням тепла і холоду.

Вагомий внесок в розвиток науково-технічних засад створення сорбційних теплових насосів зробили Л.М. Розенфельд, В.С. Мартиновський, Б.М. Блієр, О.О. Кремньов, Е.Р. Гросман, Б.А. Мінкус, І.С. Бадилькес та інші вчені.

Вдосконалення технології сорбційної трансформації теплоти пов'язано зі створенням нових сорбційних матеріалів, які мають високу енергоемність та великий ресурс роботи, а також з пошуком конструктивних рішень для зниження металоємності та підвищення енергоефективності сорбційних теплових насосів.

Для ефективного використання теплових насосів в промислових технологічних процесах необхідно мати стабільне джерело низькопотенційної теплоти, саме тому, ефективним напрямком використання теплових насосів в промисловості є сушіння. Тепловий насос за своїм принципом дії добре пристосований до інтеграції в процес конвективного сушіння, оскільки низькопотенційна теплота, яка необхідна для його роботи, утворюється в самій сушарці. Зважаючи на те, що термічне зневоднення є одним з найбільш енергоемних технологічних процесів, оснащення конвективної сушильної установки теплонасосним агрегатом є перспективним напрямком енергозбереження, що дозволяє знизити в 2-3 рази енерговитрати на видалення вологи з матеріалу за рахунок утилізації теплоти відпрацьованого теплоносія, створити контрольовані тепловологісні умови сушіння та виключити викиди

парникових газів у навколишнє середовище. Для широкого впровадження теплонасосних сушильних установок в промисловість необхідно розробити науково обґрунтовані методи їхнього розрахунку та проектування.

Наукові основи для розвитку сучасних досліджень з підвищення енергоефективності сушіння закладені в працях А.В. Ликова, А.С. Гінзбурга, В.В. Краснікова, Г.К. Філоненко, М.О. Грішина, А.А. Долінського, Ю.Ф. Снежкіна, М.І. Нікітенко, С.П. Рудобашти, Г.К. Станкевича, О.Г. Бурдо, А.С. Mujumdar, Т. Kudra та інших вчених.

Одним з найбільш енергоємних і соціально значущих секторів економіки є теплопостачання. В цьому секторі споживається близько 40 % енергоресурсів, що використовуються в країні, з яких більш ніж половина приходить на комунально-побутовий сектор. Сектор теплопостачання гостро потребує розробки заходів і технічних рішень, направлених на підвищення надійності, якості та економічності. Економічно ефективним шляхом вирішення даних проблем є розвиток геотермальної енергетики за рахунок отримання геотермальної енергії за рахунок використання державного фонду раніше пробурених законсервованих свердловин.

Суттєвий внесок у розвиток сучасної геотермії був зроблений такими вченими як А.М. Щербань, О.О. Кремньов, А.А. Долінський, О.В. Шурчков, Ю.П. Морозов, А.Б. Алхасов, Е.І. Богуславський, Ю.Д. Дядькін та іншими вченими.

Вирішення даної прикладної проблеми диктує необхідність розроблення методів визначення теплового потенціалу свердловин, що переобладнані для вилучення геотермальної енергії, та створення методів і технологій їх використання в теплових і електричних енергогенеруючих системах.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася у відповідності з науковою тематикою Інституту технічної теплофізики НАН України і безпосередньо пов'язана з державними тематиками «Розробка промислових технологій на основі теплових насосів з метою енергозбереження» (№ ДР 0103U005686), «Дослідження та розробка енергозберігаючих теплонасосних систем децентралізованого теплохолодопостачання для житлово-комунального господарства та промисловості з використанням низькопотенційних ВЕР» (№ ДР 0106U005331), «Дослідження тепломасопереносу в термохімічних і сорбційних процесах та створення теоретичних засад для розробки теплових насосів і акумуляторів теплоти» (№ ДР 0107U002128), цільовими програмами наукових досліджень НАН України «Розробка та створення енергозберігаючих сорбційних термотрансформаторів на базі нових композитних речовин, що працюють з використанням поновлюваних та вторинних джерел енергії» (№ ДР 0106U009785), «Подовження терміну експлуатації сушильного обладнання шляхом удосконалення теплогенеруючих систем» (№ ДР 0116U006295), «Подовження ресурсу роботи раніше пробурених законсервованих свердловин методами геотермальних технологій генерації теплової і електричної енергії» (№ ДР 0116U004293), «Розробка рекомендацій щодо розрахунків, проектуванню та застосуванню систем геотермального енергопостачання в комунальному господарстві і агропромислому комплексі» (№ ДР 0117U002687), конкурсними науковими проектами «Study of solar assisted cooling unit using new adsorbent materials» (INTAS, № 03-51-6260), «Дослідження і

розробка ефективних методів використання «провальної» електроенергії для тепло- і холодопостачання споживачів в Росії і Україні із застосуванням термохімічних процесів» (№ ДР 0109U004981), «Исследование совместных процессов тепло- и массопереноса в многокомпонентных системах для разработки сорбционных преобразователей теплоты нового поколения» (№ ДР 0113U000647) та з госпдоговірними темами «Определение режимов сушки и разработка сушильного оборудования для тропических растений» (Контракт з СРВ НП № 1330/746-1), «Розробка та виготовлення осушувача повітря для пристрою сушки відходів ПЕТФ в лінії гранулювання термопластів ЛГТВ-150» (Договір № 2719), «Розробка та виготовлення модульно-блочної зерносушильної установки з універсальним теплогенератором» (Договір № 2742), у яких автор брав участь як керівник та відповідальний виконавець.

Мета роботи та завдання дослідження. Мета роботи полягає у розвитку науково-практичних засад створення адсорбційних термотрансформаторів і акумуляторів теплоти на нових адсорбційних матеріалах, а також в розробленні практичних шляхів підвищення ефективності промислових технологічних процесів, які ґрунтуються на технологіях сорбційної та парокомпресійної трансформації теплоти.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано такі завдання:

- створити методику відбору адсорбентів, перспективних для застосування як робоче тіло адсорбційних теплових насосів;
- дослідити оборотні термохімічні реакції та запропонувати ефективні хемосорбенти для різного практичного застосування;
- виявити вплив складу хемосорбенту на температурні параметри процесу сорбції-десорбції і розробити технологію синтезу адсорбційних матеріалів із заданими споживчими властивостями;
- дослідити термодинамічні цикли адсорбційних термотрансформаторів на нових хемосорбентах в лабораторних і натурних умовах, вивчити теплофізичні процеси, які проходять в них;
- розробити принципи теплотехнічного розрахунку і проектування апаратів адсорбційних теплонасосних установок на сольових сорбентах;
- дослідити та оптимізувати процеси зневоднення теплоносія при конвективному сушінні з використанням парокомпресійного теплового насоса;
- розробити технологічну схему, виконати техніко-економічне обґрунтування і впровадити систему теплонасосного теплопостачання в комунальній енергетиці;
- вивчити геотермальні властивості раніше пробурених недіючих газових свердловин та дослідити ефективність їх використання в системах геотермального теплонасосного енергопостачання;
- провести виробничу апробацію запропонованих науково-технічних рішень, визначити їхні енергетичні та техніко-економічні показники.

Об'єкт дослідження – засоби підвищення енергетичної ефективності процесів теплонасосної трансформації теплової енергії.

Предмет дослідження – цикли, схеми, конструкції, температурні й енергетичні характеристики сорбційних і парокомпресійних теплових насосів, енергозберігаючі режими їхньої роботи.

Структура та методи дослідження:

- аналітичні та експериментальні дослідження лабораторних зразків з використанням методів теорії тепломасообміну, гідрогазодинаміки, математичної статистики, комп'ютерного моделювання;
- натурні випробування експериментальні зразків з використанням методів теорії вимірювання фізичних величин;
- підконтрольна експлуатація дослідно-промислових зразків.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у тому, що:

- запропонований універсальний методологічний підхід для здійснення пошуку та попереднього відбору перспективних робочих тіл для адсорбційних термотрансформаторів, який базується на принципі температурної інваріантності Поляні;
- обґрунтована і практично доведена можливість суттєвого розширення зони робочих концентрацій сольового адсорбенту в адсорбційному термодинамічному циклі при введенні солі в інертний пористий носій;
- вперше синтезований та досліджений в адсорбційному холодильному циклі сольовий адсорбент на базі сорбційної пари хлорид кальцію-метанол і спученого перліту як носія, на підставі випробувань вивчені енергетичні показники дійсного адсорбційного циклу і розроблені принципи теплотехнічного розрахунку апаратів адсорбційних агрегатів на сольових сорбентах;
- вперше досліджений в натурних умовах сонячний адсорбційний холодильник на сорбційній парі хлорид кальцію-вода, на підставі узагальнення результатів випробувань розроблена методика розрахунку і проектування адсорберів, що працюють в умовах змінної температури гріючого джерела;
- вперше отримані аналітичні залежності, що дозволяють визначити температурні параметри теплонасосного циклу, при яких забезпечується мінімізація енерговитрат на вилучення вологи з сушильного агента при конвективному сушінні з використанням конденсаційного теплового насоса.

Практичне значення одержаних результатів. В дисертаційній роботі одержані такі практично важливі результати:

- розроблено методику пошуку і вибору адсорбентів, перспективних для застосування як робочих тіл сорбційних перетворювачів теплоти, яка дозволяє здійснювати пошук оптимальних адсорбентів на підставі обмеженого набору експериментальних даних, в тому числі за ізотермами адсорбції, що отримані при температурах, які відрізняються від реалізованих в адсорбційному циклі. Із застосуванням цієї методики обрані сорбенти, перспективні для використання як робочі тіла адсорбційних термотрансформаторів;
- в рамках проекту INTAS № 03-51-6260 розроблений, створений та випробуваний на дослідному полігоні Міністерства енергетики України в м. Алушта експериментальний сонячний адсорбційний холодильник;
- розроблена та впроваджена теплонасосна система осушення повітря в лінії виробництва харчових порошків з тропічних фруктів у В'єтнамі (акт приймання від 07.07.2000 р.);

– розроблена конструкція та виготовлений осушувач повітря для пристрою сушіння подрібнених відходів поліетилентерефталату на базі лінії ЛГТВ-100 для ВАТ «УкрНДІпластмаш» (акт приймання-здачі від 10.09.2001 р.);

– розроблена, створена, змонтована та впроваджена теплонасосна сушильна шафа ТШС-2,5 в ІТТФ НАН України (акт впровадження від 17.12.2003 р.);

– розроблена технічна документація, створено та змонтовано зразок модульно-блочної зерносушильної установки з універсальним теплогенератором теплонасосного типу на Державному підприємстві "Український державний центр по випробуванню та прогнозуванню техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва" (УкрЦВТ) (акт приймання-здачі від 10.12.2004 р.);

– розроблено, створено та впроваджено ряд експериментальних конвекційних теплонасосних сушарок для Національного університету харчових технологій (НУХТ) (акт від 08.06.2004 р.), для Харківського державного університету харчування та торгівлі (ХДУХТ) (акт прийняття-здавання від 28.02.2007 р.);

– розроблена технологічна схема та проектно-кошторисна документація на теплонасосну установку гарячого водопостачання потужністю 1,5 МВт в м. Краматорську Донецької області (акт прийняття виконаних робіт від 27.08.2009 р.). У відповідності до розробленої технічної документації створена теплонасосна установка гарячого водопостачання, яка забезпечує отримання розрахункової кількості гарячої води;

– проведені випробування теплогенеруючого осушуючого теплонасосного агрегату для конвективної сушарки камерного типу у виробничих умовах ДП «Інженерний центр «Сушка»» (акт випробувань від 12.11.2020 р.) та компанії «В.Д.Е.–Україна» (акт випробувань від 03.09.2020 р.);

– в ІТТФ НАН України введено в експлуатацію дослідно-промисловий зразок теплогенеруючого осушуючого теплонасосного агрегату для конвективної сушарки камерного типу (акт прийняття в експлуатацію від 20.11.2020) р.

Практичне значення результатів роботи підтверджується одержаними патентами України на винахід на:

– спосіб нагрівання і охолодження рідини в адсорбційному перетворювачі теплоти (Патент 105156 України);

– адсорбційний перетворювач теплоти періодичної дії (Патент 105155 України);

– систему адсорбційного осушення повітря (Патент 100336 України);

– спосіб роботи теплонасосної конвективної сушарки (Патент 85875 України);

– спосіб конвективного сушіння матеріалу (Патент 38971 України).

Особистий внесок здобувача. Всі результати, які наведені в дисертації, отримані автором самостійно. Проведено критичний аналіз стану проблеми, на основі якого здійснено теоретичне обґрунтування, формулювання наукової проблеми, робочої гіпотези, мети, завдань, програми досліджень, розроблено методикку їх проведення. За безпосередньою участю автора виконані експериментальні дослідження в лабораторних і виробничих умовах, здійснений аналіз та узагальнення отриманих результатів, сформульовані висновки і практичні рекомендації. Підготовлені до друку статті, оформлені патенти. Обговорення та узагальнення результатів досліджень проведено спільно з науковим консультантом – академіком НАН України Ю.Ф. Снежкіним.

У сумісних роботах автор планував експеримент, приймав участь у проведенні досліджень, здійснював аналіз експериментальних даних, інтерпретував та узагальнював отримані результати.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи доповідались на V, VI, VII, VIII, IX, X та XI Міжнародних конференціях «Проблеми промислової теплотехніки», м. Київ, 2007, 2009, 2011, 2013, 2015, 2017 рр.; III Міжнародній конференції «Нетрадиционная энергетика в XXI веке», АР Крим, м. Судак, 2002 р.; VI, IX, X, XI, XIX та XX Міжнародних конференціях «Відновлювана енергетика XXI століття», АР Крим, 2005, 2008, 2009, 2010 рр., м. Київ, 2018, 2019 рр.; 1-й, 2-й, 3-й, 4-й та 7-й Міжнародних науково-практичних конференціях «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)», м. Москва, 2002, 2005, 2008, 2011, 2020 рр.; V та XIV Мінських міжнародних форумах з тепломасообміну, м. Мінськ, 2004, 2012 рр.; V Minsk International Seminar “Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators”, Minsk, Belarus, 2003; 1-му, 2-му та 4-му Міжнародних конгресах «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування», м. Львів, 2009, 2012, 2016 рр.; XI, XIV, XV Міжнародних конференціях «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв» м. Одеса, 2006, 2012, 2014 рр.; Міжнародних науково-практичних школах-семінарах «Підвищення енергетичної ефективності харчових і хімічних виробництв», м. Одеса, 2007, 2009, 2010 рр.; I та VI Міжнародних науково-практичних конференціях «Інноваційні енерготехнології», м. Одеса, 2011, 2017 рр.; Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми розвитку систем енергетики і автоматики в АПК», м. Київ, 2012 р.; 1-й та 2-й Міжнародних науково-практичних конференціях «Chemical Technology and Engineering (Хімічна технологія та інженерія)», м. Львів, 2017, 2019 рр. Окремі результати роботи доповідалися на робочих зустрічах, проведених в рамках проекту INTAS № 03-51-6260 (м. Аахен, Німеччина, 2005 р. і м. Мессіна, Італія, 2006 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 65 наукових праць, серед яких 2 монографії, 1 колективна монографія, 34 статті, з яких 8 у виданнях, що входять до наукометричних баз SCOPUS, Web of Science, Index Copernicus, 23 у спеціалізованих фахових виданнях України, 23 публікації у збірниках матеріалів міжнародних конференцій, 5 патентів України на винахід.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел із 339 найменувань, 12 додатків та включає 317 сторінок основного тексту, 119 рисунків і 17 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі подано короткий опис стану наукової проблеми, яка обрана для досліджень, обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами, сформульовано мету роботи і основні задачі, відображено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, визначено особистий внесок здобувача, наведено відомості про апробацію результатів дисертації та публікації.

У першому розділі «Сучасний рівень і перспективи розвитку технології сорбційного перетворення теплоти» проведений аналіз термодинамічних циклів і температурних меж застосування сорбційних термотрансформаторів, зіставлені фізико-хімічні та термодинамічні характеристики робочих речовин, визначені шляхи вдосконалення перетворювачів теплоти адсорбційного типу.

Аналіз наявних в літературі даних показує, що рішення проблеми удосконалення сорбційних холодильних машин і теплових насосів здійснюється за такими основними напрямками:

- підвищення енергетичної ефективності адсорбційного термодинамічного циклу за рахунок застосування нових енергоємних сорбційних матеріалів;
- поліпшення вагових і габаритних показників за рахунок інтенсифікації процесів тепломасопереносу в апаратах та оптимізації температурних параметрів циклів;
- вдосконалення схемних і конструктивних рішень тепломасообмінних апаратів термотрансформатора.

В останні роки велика увага приділяється питанню створення адсорбційних термотрансформаторів, що працюють в режимі теплових насосів. Зростає інтерес до підвищувальних адсорбційних термотрансформаторів. Цей тип теплового насоса є одним з найбільш перспективних, оскільки не потребує високого потенціалу зовнішнього джерела енергії й використовує для роботи тільки низькопотенційну теплоту.

Вибір робочих речовин для різних типів сорбційних термотрансформаторів визначається, перш за все, рівнем температур, при яких відбуваються термодинамічні процеси в апаратах. В даний час переважно застосовуються синтетичні цеоліти та силікагелі.

Перспективним шляхом вирішення проблеми підвищення енергетичної ефективності адсорбційних термотрансформаторів визнане використання як адсорбентів солей лужних і лужноземельних металів, які утворюють з парою холодоагенту тверді хімічні сполуки типу кристалогідратів. Практичне застосування цих робочих речовин має технічні труднощі, що пов'язані з проблемою збереження стабільності гранульованої структури адсорбенту, оскільки при багатократних циклах сорбції-десорбції відбувається розчинення солі та руйнування гранул. Дана проблема вирішується шляхом введення солі в пористі носії різного типу, які утворюють жорсткий пористий каркас, і, не перешкоджаючи процесу сорбції, утримують рідкий сольовий розчин в гранулі носія, що сприяє збереженню структури сорбційного шару під час розчинення солі. Висока сорбційна ємність композитних сольових сорбентів, низька температура регенерації і можливість цілеспрямовано варіювати сорбційні властивості в широкому діапазоні обумовлюють стрімке зростання робіт з їх вивчення в світі.

Не дивлячись на такий інтерес, енергетичні показники дійсного циклу адсорбційних термотрансформаторів на таких композитних сорбентах раніше детально не вивчались, хоча саме ці характеристики визначають експлуатаційні показники реальних адсорбційних пристроїв. У зв'язку з цим актуальним завданням є детальне вивчення процесів тепломасопереносу в апаратах адсорбційних термотрансформаторів на таких робочих тілах.

У другому розділі «Методологія відбору робочих тіл для адсорбційних термотрансформаторів» сформульовані термодинамічні вимоги до властивостей адсорбентів, перспективних для застосування в адсорбційних холодильних та теплонасосних установках, запропонований універсальний методологічний підхід, який дозволяє здійснювати пошук і вибір ефективних робочих тіл для адсорбційних термотрансформаторів на підставі обмеженого набору експериментальних даних.

Для розрахунку ефективності сорбентів в циклі адсорбційного теплового насоса (АТН) необхідно мати ізотерми або ізобари адсорбції, що охоплюють весь діапазон робочих температур адсорбційного циклу. Виконання таких вимірювань є тривалим процесом і потребує значних зусиль. У зв'язку з цим, для попереднього відбору перспективних адсорбентів, розроблено методику оцінювання ефективності роботи сорбентів в циклі АТН за ізотермами адсорбції, що отримані при одній температурі. Такі дані для більшості адсорбентів відомі і є в літературних джерелах.

В основу методики розрахунку покладений принцип температурної інваріантності Поляні, згідно з яким при різних температурах T_1 і T_2 адсорбент має однаковий ступінь заповнення адсорбційного простору адсорбатом при тисках пари P_1 і P_2 , що пов'язані співвідношенням

$$T_1 \cdot \ln h_1 = T_2 \cdot \ln h_2, \quad (1)$$

де $h = P/P_s$ – відносний тиск адсорбату.

У циклі АТН величини P/P_s в ключових точках циклу зазвичай відомі, оскільки температури конденсації і сорбції визначаються температурою навколишнього середовища і складають 30...40°C, температура випарника змінюється в межах 0...+10°C, а температура дегідратації адсорбенту відповідає температурі використовуваного джерела тепла.

Вважаючи, що процеси дегідратації-гідратації адсорбенту є рівноважними, адсорбційний холодильний цикл можна побудувати в діаграмі Клапейрона (рис. 1). Холодильний коефіцієнт циклу COP_x дорівнює відношенню кількості теплоти Q_1 , що поглинається у випарнику, до теплоти, що підводиться до адсорбенту на стадії ізостеричного нагрівання Q_2 (стадія 1-2) та ізобаричної десорбції Q_3 (стадія 2-3)

$$COP_x = \frac{Q_1}{Q_2 + Q_3} = \frac{\Delta H_{вип} \cdot \Delta w}{c_p \cdot (T_2 - T_1) + \Delta H_{дес} \cdot \Delta w + c_p^{cp} \cdot (T_3 - T_2)}, \quad (2)$$

де $\Delta H_{вип}$ – теплота випаровування сорбату в випарнику, $\Delta H_{дес}$ – теплота десорбції сорбату з адсорбенту, $\Delta w = w_{max} - w_{min}$ – змінювання вмісту вологи в сорбенті на стадії 2-3, c_p – теплоємність насиченого адсорбенту, c_p^{cp} – середня теплоємність адсорбенту на стадії 2-3.

З рівняння (2) випливає, що зі збільшенням кількості Δw сорбату, який бере участь в циклі, пропорційно зростає холодопродуктивність $Q_{охол} = \Delta H_{вип} \Delta w$, і збільшується холодильний коефіцієнт циклу COP_x , наближуючись по асимптоті до $\Delta H_{вип} / \Delta H_{дес}$, що схематично показано на рис. 2. Отже, для підвищення обох цих

характеристик необхідно використовувати адсорбент, який має велику різницю вологовмістів Δw між крайніми ізостерами циклу (стадії 1-2 і 3-4 на рис. 1).

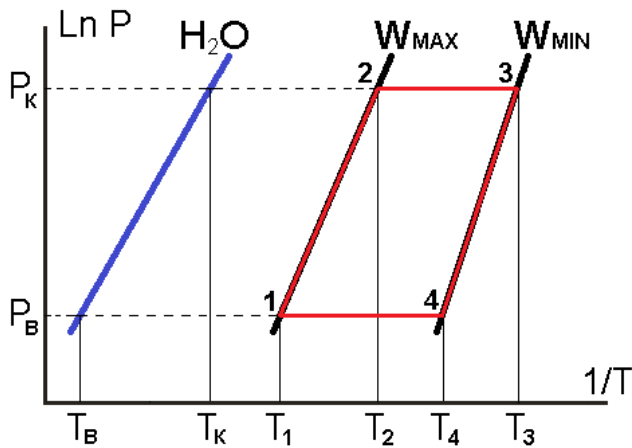


Рис. 1. Термодинамічний адсорбційний холодильний цикл

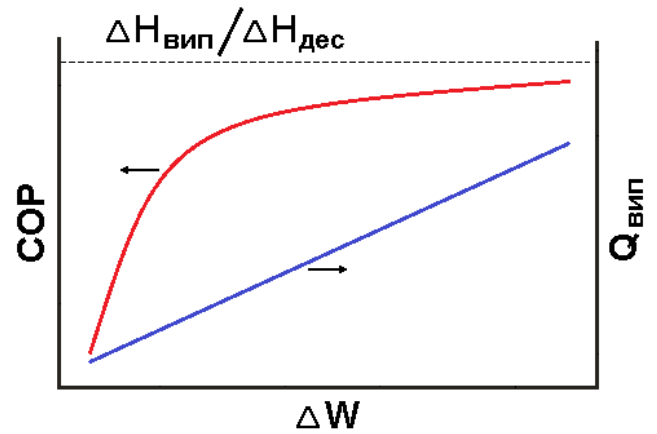


Рис. 2. Якісна залежність COP і питомої потужності адсорбційного холодильника від кількості десорбованої вологи

Для порівняння різних адсорбентів адсорбцію вологи зручно представити у вигляді температурно-інваріантної кривої адсорбції

$$A = A_0 \cdot \exp(-B \cdot \Delta F),$$

де A_0 і B – емпіричні константи; $\Delta F = -RT \cdot \ln h$ – адсорбційний потенціал.

При цьому для крайньої лівої ізостери, що відповідає $w = w_{\max}$, виконується співвідношення

$$\Delta F(w_{\max}) = -RT_1 \ln[P_1/P_s(T_1)] = -RT_2 \ln[P_2/P_s(T_2)] = K_1, \quad (3a)$$

а для правої ізостери, що відповідає $w = w_{\min}$, співвідношення

$$\Delta F(w_{\min}) = -RT_3 \ln[P_2/P_s(T_3)] = RT_4 \ln[P_1/P_s(T_4)] = K_2. \quad (3б)$$

Як найбільш перспективні для адсорбційного охолодження можна виділити ті матеріали, для яких різниця величини сорбції при адсорбційних потенціалах ΔF , що дорівнюють K_1 і K_2 , буде максимальною.

У таблиці 1 наведені розрахункові значення параметрів K_1 і K_2 при типових температурах циклу для холодильних систем, що працюють від теплоти сонячного випромінювання з використанням плоских геліонагрівачів.

Таблиця 1

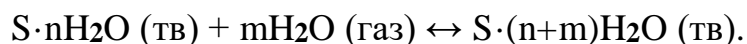
Значення адсорбційного потенціалу при різних співвідношеннях температур адсорбційного холодильного циклу

$T_{\text{дес}},$ °C	$T_{\text{конд}},$ °C	$T_{\text{кип}},$ °C	$K_1,$ кДж/моль	$K_2,$ кДж/моль
372	30	5	3,98	9,78
372	40	5	5,55	8,10
372	30	7	3,63	9,78
372	40	7	5,19	8,10
372	30	10	3,11	9,78
372	40	10	4,66	8,10

Грунтуючись на запропонованому підході, можна обрати перспективні адсорбенти для інших адсорбційних теплових пристроїв – теплових насосів, систем глибокого охолодження тощо. При цьому для певного пристрою і його джерела теплоти визначаються особливі вимоги до оптимального адсорбенту, що відповідають температурним параметрам даного адсорбційного циклу.

В третьому розділі «Фазова рівновага оборотних термохімічних реакцій «тверде тіло – газ» наведені результати систематизації даних за термохімічними реакціями утворення/розкладання кристалогідратів, які можуть бути використані як робочі тіла адсорбційних термотрансформаторів.

Основним недоліком відомих адсорбційних теплових насосів є невисока енергоємність традиційних адсорбційних матеріалів і велика матеріалоемність апаратів, що перешкоджає їх широкому впровадженню. Перспективним напрямком вирішення даної проблеми є застосування як адсорбентів солей лужних і лужноземельних металів, які працюють з використанням оборотних термохімічних реакцій і утворюють з парою холодоагенту тверді хімічні сполуки типу кристалогідратів



Сольові сорбенти мають набагато більшу вологоємність у порівнянні з традиційними адсорбційними матеріалами, однак їхнє застосування в чистому вигляді пов'язане з проблемою розчинення гранул солі за умови перенасичення холодоагентом. Ефективним способом підвищення стабільності сольових сорбентів є використання пористих носіїв, в пори яких вводять частинки солі. В останні роки, завдяки дослідженням Ю.І. Арістова, Л.Г. Гордєєвої, G. Restuccia, В. Dawoud, сорбційні матеріали такого типу набувають все більшого застосування.

На підставі опрацювання відомих літературних даних для перспективних хемосорбентів були побудовані лінії рівноваги хімічних реакцій в діапазоні температур кипіння/конденсації холодоагенту (води) 0-50 °С (рис. 3). Відповідно до рівня температури розкладання/утворення хімічних сполук визначено сорбційні пари з високо-, середньо- і низькотемпературною регенерацією.

Вибір оптимальних робочих тіл для адсорбційного теплового насоса в кожному окремому випадку залежить від необхідного температурного рівня тепlopостачання і температурних параметрів наявних джерел високо- і низькопотенційної теплоти. Наприклад, при використанні електричного нагріву регенерацію сорбенту можна здійснювати за високої температури, тому для такого варіанту найбільш придатними є реакції з великою температурною депресією (лінії 3, 4, 5, 6 на рис. 3).

При роботі теплового насоса з використанням джерела низькопотенційної теплоти з температурою нижчою за температуру замерзання води, замість випарника і конденсатора, адсорбційний агрегат може бути обладнаний низькотемпературним сорбером-десорбером. Вивчено можливість використання як робочого тіла такого сорбера-десорбера кристалогідратів зі слабким зв'язком кристалізаційної води, тиск пари над якими близький до тиску пари над чистою водою. Приклади сполук, які відповідають цим вимогам, наведені на рис. 4. Завдяки розвиненій поверхні гранульованої структури такі матеріали забезпечують високу інтенсивність масообміну навіть за низького тиску пари води. Заміна процесу

конденсації процесом сорбції сприяє зростанню теплового ефекту і підвищенню коефіцієнта перетворення адсорбційного циклу.

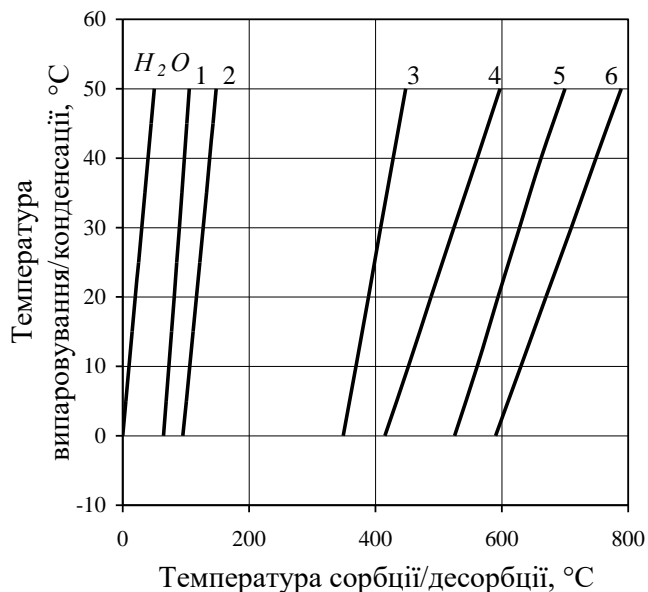


Рис. 3. Лінії рівноваги хімічних реакцій:

- 1 – $BaCl_2 \cdot H_2O \leftrightarrow BaCl_2 + H_2O$;
- 2 – $CuSO_4 \cdot H_2O \leftrightarrow CuSO_4 + H_2O$;
- 3 – $Ca(OH)_2 \leftrightarrow CaO + H_2O$;
- 4 – $Sr(OH)_2 \leftrightarrow SrO + H_2O$;
- 5 – $2LiOH \leftrightarrow 2LiO + H_2O$;
- 6 – $Ba(OH)_2 \leftrightarrow BaO + H_2O$.

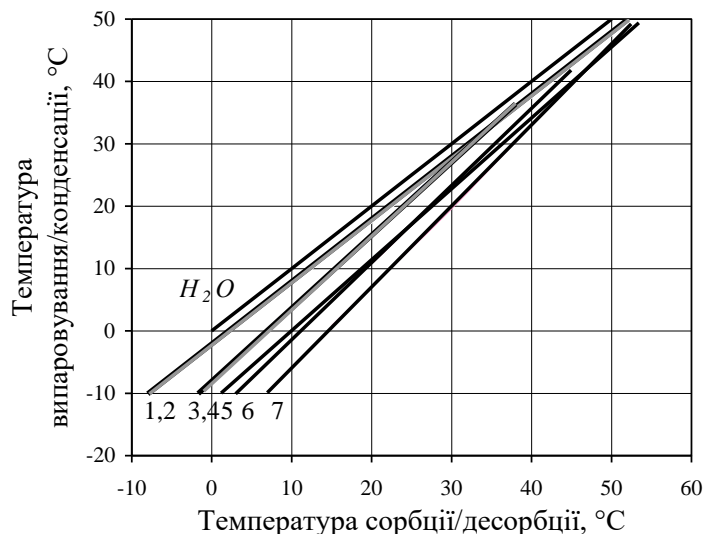


Рис.4. Лінії рівноваги хімічних реакцій:

- 1 – $Ba(OH)_2 \cdot 16H_2O \leftrightarrow Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O + 8H_2O$;
- 2 – $Sr(OH)_2 \cdot 8H_2O \leftrightarrow Sr(OH)_2 \cdot 2H_2O + 6H_2O$;
- 3 – $Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O \leftrightarrow Na_2HPO_4 \cdot 7H_2O + 5H_2O$;
- 4 – $Na_2SO_3 \cdot 7H_2O \leftrightarrow Na_2SO_3 + 7H_2O$;
- 5 – $FeSO_4 \cdot 7H_2O \leftrightarrow FeSO_4 \cdot 6H_2O + H_2O$;
- 6 – $ZnSO_4 \cdot 7H_2O \leftrightarrow ZnSO_4 \cdot 6H_2O + H_2O$;
- 7 – $MgSO_4 \cdot 7H_2O \leftrightarrow MgSO_4 \cdot 6H_2O + H_2O$.

У четвертому розділі «Дослідження робочих процесів в адсорбційних термотрансформаторах на сольових сорбентах» викладена методика теплотехнічного розрахунку і конструювання апаратів адсорбційної холодильної установки, яка працює з використанням теплоти сонячного випромінювання, а також наведені результати натурних випробувань експериментальних зразків адсорбційних термотрансформаторів з використанням нових робочих тіл.

Генератор-адсорбер сонячного адсорбційного холодильника – це плоский герметичний короб з внутрішнім ребренням, який заповнений адсорбентом і розміщений в геліонагрівачі типу «гарячий ящик» (рис. 5).

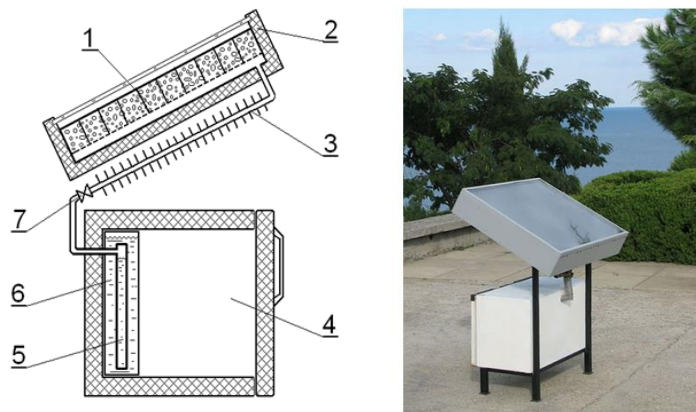


Рис. 5. Експериментальний сонячний адсорбційний холодильник:

- 1 – генератор-адсорбер;
- 2 – сонячний колектор;
- 3 – повітряний конденсатор;
- 4 – холодильна камера;
- 5 – випарник;
- 6 – акумулятор холоду;
- 7 – запірний вентиль.

Верхня площина генератора-адсорбера, що обернена до скла, є теплосприймаючою, нижня сторона і бічні стінки теплоізовані. Процес поглинання-випаровування пари холодоагенту здійснюється в шарі засипки. Для забезпечення рівномірної подачі та відведення пари між шаром сорбенту і нижньою пластиною розміщений щілинний колектор.

Кількість сприйнятої генератором-адсорбером енергії $Q_{ген}$ є функцією часу τ інтенсивності сонячного випромінювання $I = f(\tau)$, а також ККД сонячного приймача. Енергія, яка поступає в площину сонячного приймача та його ККД, визначаються за методикою Дж.А. Даффі. Енергетичний баланс генератора можна представити у вигляді

$$H_b R_b + H_d R_d = Q_{ген} + Q_L, \quad (4)$$

де H_b і H_d – густина потоку сонячного випромінювання (відповідно, прямого і розсіяного), яке падає на горизонтальну поверхню; R_b та R_d – коефіцієнти переходу до густини потоку випромінювання в площині орієнтації сонячного приймача; Q_L – теплові втрати генератора в навколишнє середовище через скло і ізоляцію нижньої частини.

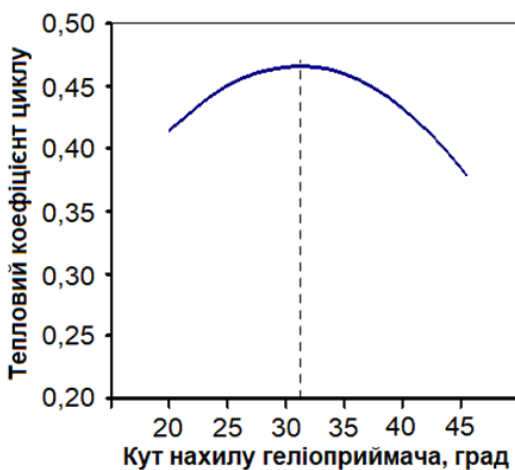


Рис. 6. Вплив кута нахилу геліоприймача на холодопродуктивність сонячного адсорбційного холодильника в кліматичних умовах півдня України.

Оптимальна орієнтація (кут нахилу) не поворотних сонячних колекторів обчислюється за сезонними тепловими характеристиками і залежить від призначення системи. Особливість систем сонячного холодопостачання полягає в тому, що ефективність сонячних колекторів повинна бути максимальною в літні місяці (червень-серпень) і в години (приблизно з 10 до 15), коли інтенсивність сонячного випромінювання і температура колектора достатні для регенерації сорбенту. Результати оптимізації величини кута нахилу геліоприймача сонячного адсорбційного холодильника для кліматичних умов півдня України показані на рис. 6.

При сонячному нагріванні адсорбенту в умовах низької густини сонячної радіації та її змінювання в часі теплова ефективність генератора-адсорбера значною мірою залежить від кількості сорбенту, що припадає на одиницю сонце-сприймаючої поверхні. Сумарна кількість енергії, яка сприймається геліонагрівачем в денний час залежить від інтенсивності й тривалості сонячного саява. При цьому швидкість розігрівання генератора-адсорбера визначається його тепловою інерційністю, яка в основному залежить від кількості сорбенту, що міститься в системі. Надмірна та недостатня кількість сорбенту однаково призводять до зниження енергетичної ефективності адсорбційного агрегату.

При надмірній масі адсорбенту велика частина сонячної енергії, що підводиться, витрачається непродуктивно на нагрівання конструкції, і за час світлового дня

генератор-адсорбер може не вийти на необхідну робочу температуру, а при недостатній кількості сорбенту нагрівання та регенерація відбуваються занадто швидко, і не все падаюче сонячне випромінювання використовується корисно.

Розрахункова кількість десорбованого холодоагенту і змінювання температури сонячного генератора-адсорбера протягом дня при різному завантаженні адсорбера показані на рис. 7. Розрахунки виконано з використанням усереднених погодинних даних з інтенсивності сонячного випромінювання в м. Алушта, АР Крим, де проводилися натурні випробування сонячного адсорбційного холодильника.

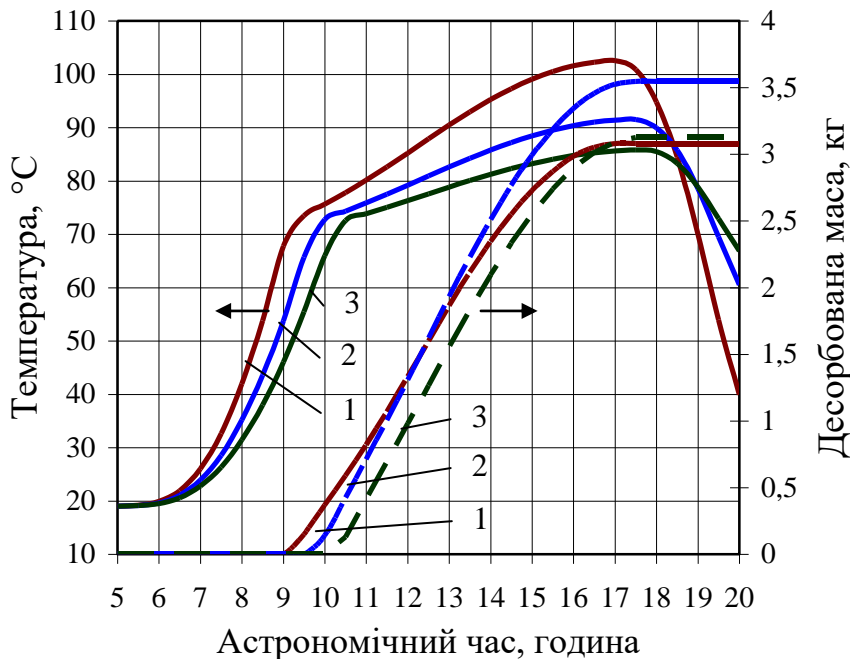


Рис.7. Показники стадії десорбції сонячного адсорбційного холодильника при різному завантаженні адсорбера.

Кількість сорбенту в генераторі-адсорбері:

- 1 – 20 кг/м²;
- 2 – 32,5 кг/м²;
- 3 – 45 кг/м².

Для вивчення енергетичних показників нових робочих речовин і виявлення їхніх експлуатаційних особливостей були проведені натурні випробування експериментального зразка адсорбційного холодильника із сонячним нагріванням генератора-адсорбера, об'єм холодильної камери якого становив 70 л.

Адсорбційний агрегат розроблений з урахуванням наступних технічних вимог:

- регіон експлуатації холодильника – кліматична зона півдня України;
- охолодження конденсатора – повітряне;
- генератор-адсорбер поєднаний з сонячним колектором;
- температура в холодильній камері – +4...+7°C;
- тривалість роботи холодильника за рахунок акумулятора холоду – 1 доба.

Як робоче тіло використовувався композитний сорбент SWS-1L на основі сорбційної пари хлорид кальцію-вода, розроблений в Інституті каталізу СВ РАН. При проектуванні холодильника, з урахуванням результатів лабораторних досліджень сорбенту, були визначені та обґрунтовані найбільш раціональні параметри адсорбційного шару, а також розраховані теплообмінні поверхні апаратів (випарника, конденсатора, сонячного приймача). Експериментальний зразок холодильника був виготовлений в Дослідному виробництві Інституту технічної теплофізики НАН України. Принципова схема і фотографія сонячного адсорбційного холодильника на місці проведення натурних випробувань наведені на рис. 5.

Технічні характеристики сонячного генератора-адсорбера:

– площа тепло сприймаючої поверхні	0,7 м ² ;
– площа оребрення внутрішньої поверхні	2,42 м ² ;
– маса адсорбенту в генераторі-адсорбері	22,75 кг;
– маса конструкції генератора-адсорбера	14,5 кг.

Натурні випробування проводилися на дослідному полігоні Міністерства енергетики України в м. Алушта. На рис. 8 наведено результати одного дня випробувань. Вибраний день – типовий з огляду на погодні умови, тобто характеризується невеликою хмарністю і слабким вітром 5-7 м/с. Типовий добовий цикл роботи адсорбційного холодильника відбувався таким чином. Генератор-адсорбер нагрівався до необхідної температури за 1,5-2 години. При температурі сорбенту 60-65 °С починалася десорбція холодоагенту з сорбенту. Температура в повітряному конденсаторі при цьому складала 30-35 °С. Стадія десорбції тривала приблизно 5,5-6 годин і закінчувалася при температурі адсорбенту близько 85 °С. В середньому за день десорбувалося 0,90-0,95 кг холодоагенту. В різні дні, в залежності від інтенсивності сонячного випромінювання, кількість десорбованого холодоагенту коливалася від 0,5 до 1,3 л. Після охолодження генератора-адсорбера до 45-50 °С починався процес сорбції і випарник швидко охолоджувався за рахунок кипіння холодоагенту при низькій температурі. Цикл вироблення холоду тривав майже 10 годин, і до початку нового циклу температура в холодильній камері знижувалася до 5-6 °С.

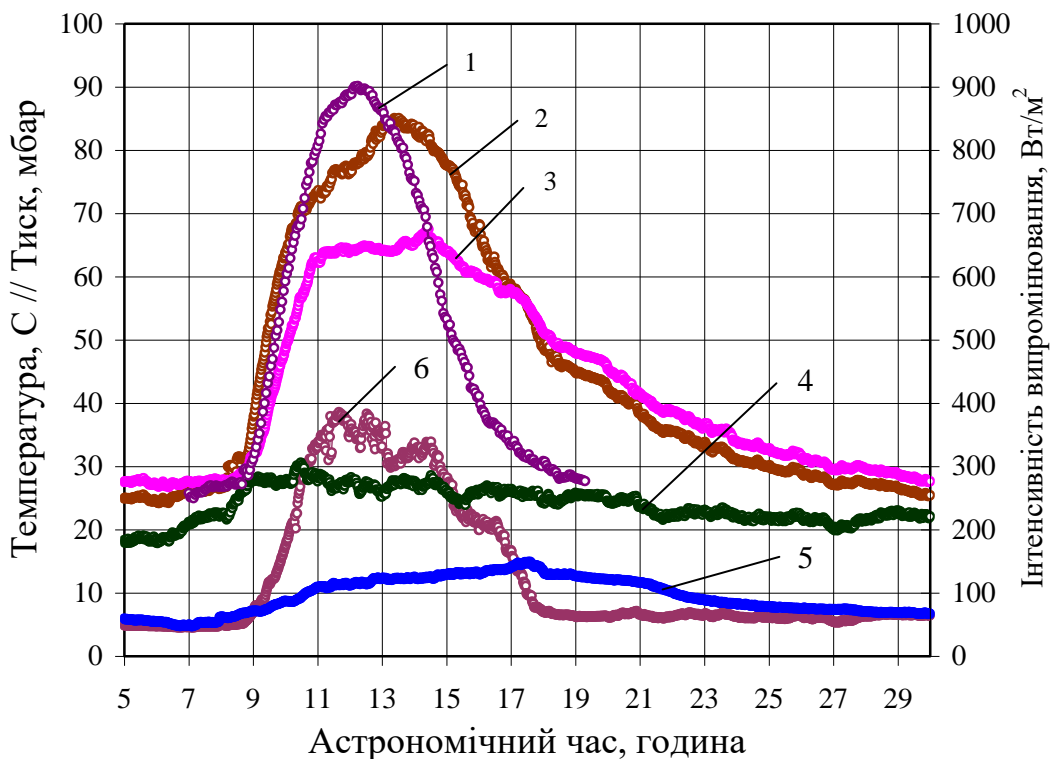


Рис. 8. Добовий цикл роботи сонячного адсорбційного холодильника:

1 – інтенсивність сонячного випромінювання; 2 – температура на поверхні генератора-адсорбера; 3 – температура в шарі сорбенту; 4 – температура навколишнього середовища; 5 – температура в холодильній камері; 6 – тиск в системі.

Як видно з графіка на рис. 8, температура в холодильній камері протягом доби коливалася в межах $+4...+13$ °С. При температурі конденсації холодоагенту 35 °С регенерація сорбенту відбувалася при температурах в шарі $65-85$ °С, що підтвердило результати лабораторних досліджень. Випробування показали, що використання нового композитного сорбенту дозволяє при низькій температурі десорбції ($75-90$ °С) досягти високої ефективності адсорбційного агрегату (холодильний коефіцієнт знаходився в інтервалі $0,4-0,45$). Питома добова холодопродуктивність склала $2700-2900$ кДж/м².

Енергетичні характеристики композитного сорбенту SWS-1L також були вивчені в циклі адсорбційного теплового насоса (АТН), що працює з використанням електричної енергії для регенерації адсорбенту.

Дослідження проводилися на лабораторному прототипі АТН (рис. 9), адсорбер-десорбер 1 якого виконаний у вигляді оребреного теплообмінника, міжреберний простір якого заповнений гранульованим адсорбентом. Адсорбер-десорбер, що розміщений в теплоізолюваному корпусі, з'єднується паропроводом з ємнісним конденсатором-випарником 2, який має скляний зовнішній корпус. Адсорбер-десорбер і конденсатор-випарник підключені до термостатів 3, 4, які імітують зовнішні джерела нагрівання/охолодження.

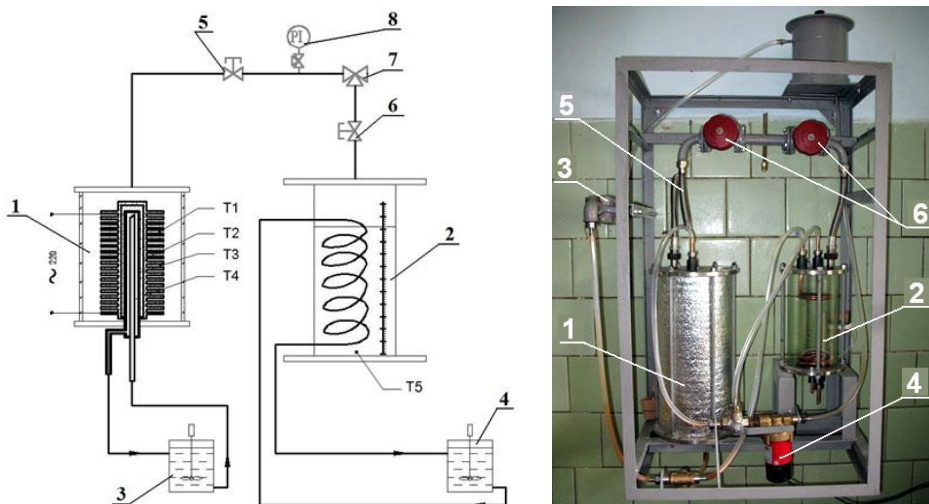


Рис. 9. Принципова схема та загальний вигляд АТН:
1 – адсорбер-десорбер;
2 – конденсатор-випарник;
3 – термостат контуру адсорбера-десорбера;
4 – термостат контуру конденсатора-випарника;
5-7 – вентилі;
8 – датчик тиску;
T1-T5 – термопари.

При проведенні експериментів моделювався добовий цикл роботи теплового насоса, під час якого процес десорбції здійснювався протягом періоду дії пільгового тарифу на електроенергію в нічний час, а процес адсорбції – протягом решти часу доби (рис. 10).

Для визначення експлуатаційних характеристик АТН і вивчення впливу температурних параметрів адсорбційного циклу на кількість енергії, яка може бути накопичена в сорбенті, була проведена серія експериментів при різних співвідношеннях температур сорбції, десорбції, конденсації і випаровування. За результатами експериментальних досліджень одержано дані щодо енергоемності сорбенту при різних температурних режимах роботи АТН (рис. 11). Регенерація сорбенту в експериментах здійснювалася до залишкового вологовмісту 55 г/кг. При цьому, в залежності від температурних параметрів циклу, температура нагрівання, що потрібна для осушення сорбенту до 55 г/кг, змінювалася від 125 до 157 °С.

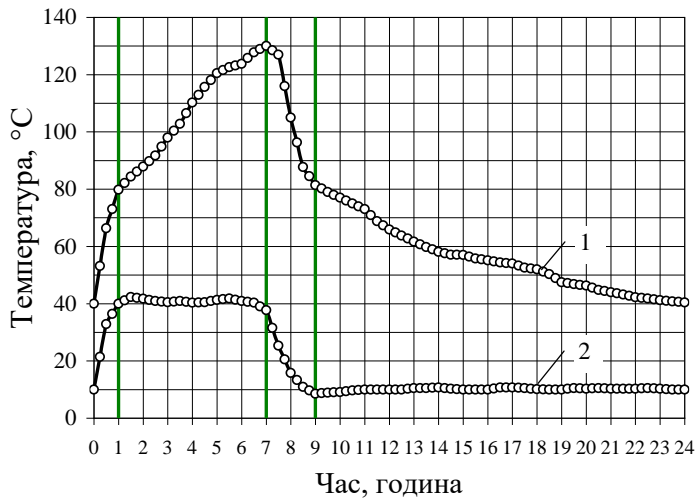


Рис. 10. Добовий цикл роботи АТН:
1 – адсорбент; 2 – холодоагент

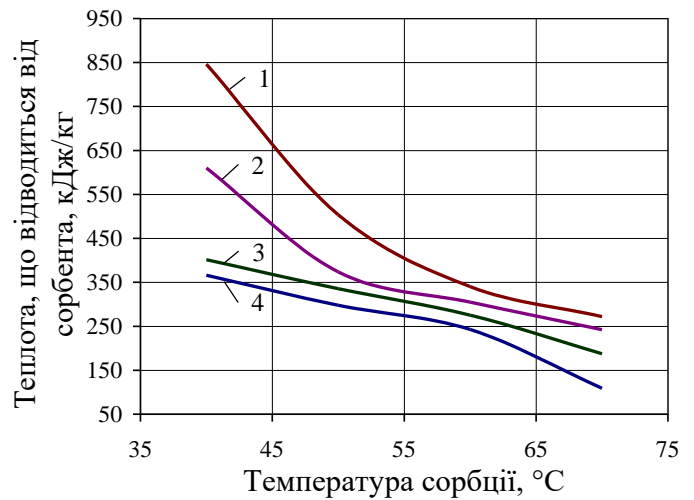


Рис. 11. Залежності енергоємності композитного сорбенту від температурних параметрів адсорбційного циклу.
Температура випаровування сорбату:
1 – 15 °С; 2 – 10 °С; 3 – 5 °С; 4 – 1 °С.

Максимальна кількість теплоти, яка була відведена від композитного сорбенту на стадії адсорбції, склала 846 кДж/кг. З урахуванням теплоти конденсації сорбату, яка виділяється під час регенерації сорбенту і може бути корисно використана, ця величина досягає 1400 кДж/кг.

За результатами опрацювання дослідних даних розраховано показники дійсного термодинамічного циклу АТН. Характер впливу температурних параметрів адсорбційного циклу на коефіцієнт перетворення і питому енергоємність АТН наведений на рис. 12.

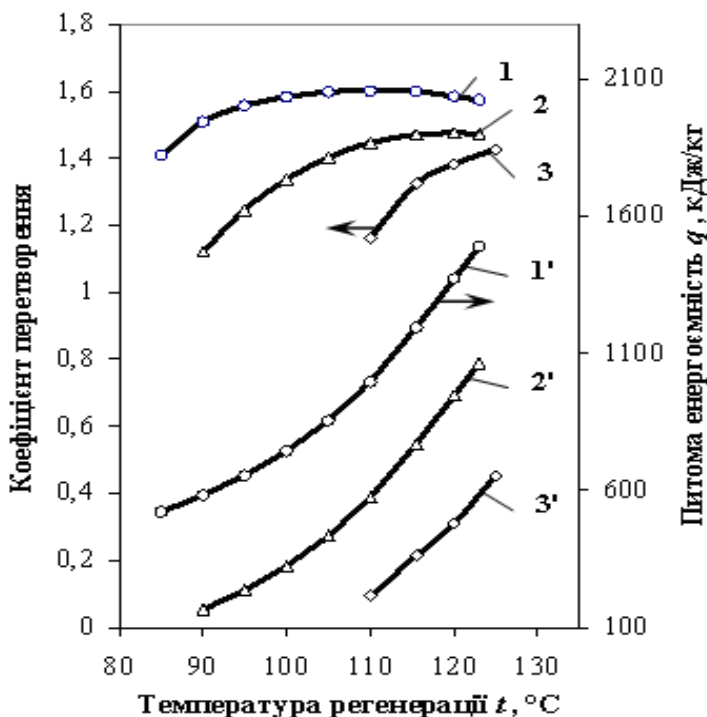


Рис. 12. Залежність питомої енергоємності та коефіцієнта перетворення АТН від температури регенерації сорбенту при різних температурах сорбції, випаровування і конденсації:

1, 1' – $t_{сор} = t_{кон} = 40$ °С, $t_{вип} = 10$ °С, $\Delta w = 0,242$ кг/кг;
2, 2' – $t_{сор} = t_{кон} = 40$ °С, $t_{вип} = 5$ °С, $\Delta w = 0,157$ кг/кг;
3, 3' – $t_{сор} = t_{кон} = 50$ °С, $t_{вип} = 5$ °С, $\Delta w = 0,063$ кг/кг.

Основним чинником, який впливає на величину коефіцієнта перетворення є кількість вологи, яка десорбується за цикл і визначається властивостями сорбенту, а також залежить від співвідношення температур десорбції-конденсації та випаровування-сорбції. Питома енергоємність сорбенту пропорційна десорбованій масі сорбата (рис. 12), а величина коефіцієнта перетворення АТН збільшується зі зростанням температури регенерації сорбенту. При досягненні високих температур коефіцієнт перетворення вже мало залежить від температури низькопотенційного джерела.

Високе значення енергоємності дослідженого адсорбенту (в 3-4 рази більше в порівнянні з теплоакумулюючими матеріалами з фазовим переходом) показує перспективність його застосування в АТН, які призначені для застосування в системах акумулювання тепла, що працюють з використанням так званої «провальної» електроенергії. З урахуванням цінового коефіцієнта 0,5 на нічний тариф на електроенергію і коефіцієнта перетворення АТН 1,5, визначено, що ефективний коефіцієнт перетворення досягає 3.

Для вироблення холоду мінусових температур був розроблений і синтезований новий композитний адсорбент на базі сорбційної пари хлорид кальцію-метанол. Носієм солі служив спучений перліт з відкритими порами. Співвідношення компонентів в 1 кг сорбенту становить: спучений перліт – 0,08 кг, хлорид кальцію – 0,584 кг, метанол – 0,336 кг. В насиченому стані сорбент є сольватом хлориду кальцію і має склад $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{CH}_3\text{OH}$.

На лабораторному прототипі холодоакумулюючого адсорбційного термотрансформатора (рис. 13) були досліджені експлуатаційні характеристики нового адсорбенту. При моделюванні адсорбційного циклу параметри процесів (температура сорбції, температура конденсації, а також тривалість процесів сорбції і десорбції) встановлювалися згідно вимог добового циклу роботи адсорбційного агрегату.

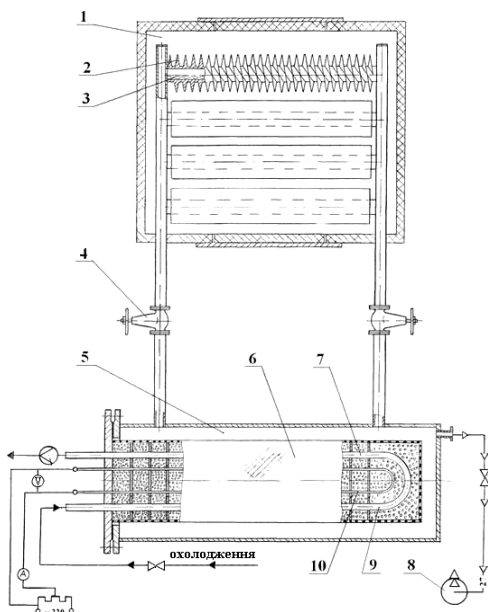


Рис. 13. Схема і загальний вигляд лабораторної моделі адсорбційного термотрансформатора:
 1 – теплоізольована камера;
 2 – конденсатор-випарник;
 3 – холодоагент;
 4 – запірний вентиль;
 5 – генератор-адсорбер;
 6 – касета з адсорбентом;
 7 – теплообмінник;
 8 – вакуумна помпа;
 9 – гранульований сорбент;
 10 – електронагрівач.

За результатами експериментальних досліджень створено модульну сорбційну касету, з якої можна збирати пакети потрібного розміру для апаратів більшої холодопродуктивності. Основу модульної касети становить оребрена теплообмінна поверхня з пластинчатими ребрами і центральним отвором для розміщення електронагрівача. Маса сорбенту сорбційної касети становить 4 кг, середня холодопродуктивність за цикл – 1500 кДж.

Для оптимізації параметрів шару сорбенту в модульній сорбційній касеті проведені дослідження з вивчення кінетики тепло- і масообміну при різній щільності адсорбційного шару. Одержано коефіцієнти масовіддачі в модульних сорбційних касетах в діапазоні температур і концентрацій, які відповідають параметрам дійсного адсорбційного циклу.

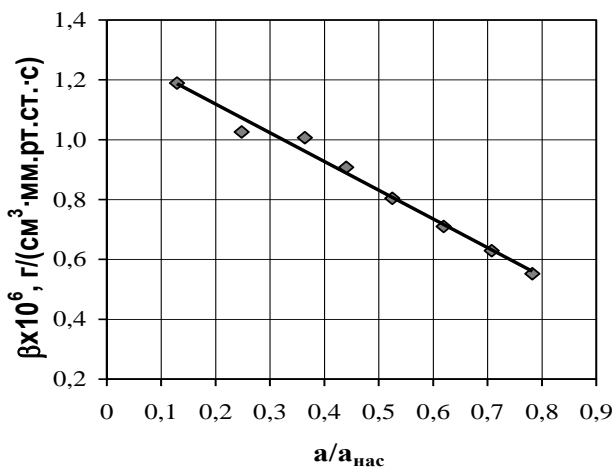


Рис. 14. Залежність об'ємного коефіцієнта масовіддачі від ступеня регенерації сорбенту

На рис. 14 наведено отриману залежність об'ємного коефіцієнта масовіддачі від ступеня насичення сорбенту при середньому розмірі гранул 0,5мм.

Встановлено, що після 100 робочих циклів термотрансформатора в режимі: регенерація адсорбенту при 125°C, сорбція і конденсація при +40°C, кипіння холодоагенту при -25°C, властивості композитного сорбенту залишаються незмінними і руйнування гранульованої структури не відбувається (рис. 15). Не було

також виявлено слідів хлориду кальцію в холодоагенті, що доводить високу гідротермальну стабільність сорбенту і підтверджує можливість його практичного використання як робочого тіла адсорбційного термотрансформатора.

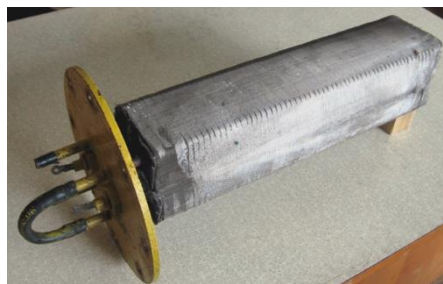


Рис. 15. Теплообмінна поверхня сорбційної модульної касети та сорбційна касета після 100 циклів сорбції-десорбції

У п'ятому розділі «Оптимізація процесу конвективного сушіння з використанням теплового насоса» наведено результати аналітичних і експериментальних досліджень з оптимізації процесу конвективного сушіння термолабільних матеріалів у замкнутому циркуляційному контурі з примусовим зневоднюванням сушильного агента за допомогою конденсаційного теплового насоса.

При конденсаційному сушінні ефективність роботи теплового насоса оцінюється величиною енерговитрат на конденсацію вологи з повітря. Ця величина залежить від тепловологісного стану осушуваного повітря і температурного режиму його

зневоднювання, тому завдання оптимізації процесу конденсаційного сушіння полягає в визначенні температурних параметрів теплонасосного циклу, при яких питомі енерговитрати на вилучення вологи будуть мінімальні.

Вилучення вологи з теплоносія в циклі теплонасосного сушіння може бути здійснено такими способами:

1. Після проходження над висушуваним продуктом (рис. 16-а, процес $a-b$) весь потік зволоженого теплоносія охолоджується у випарнику теплового насоса (процес $b-c-d$) до заданої температури точки роси (стан d), після чого осушений теплоносій нагрівається в конденсаторі теплового насоса (процес $d-a$) і повертається до сушильної камери.

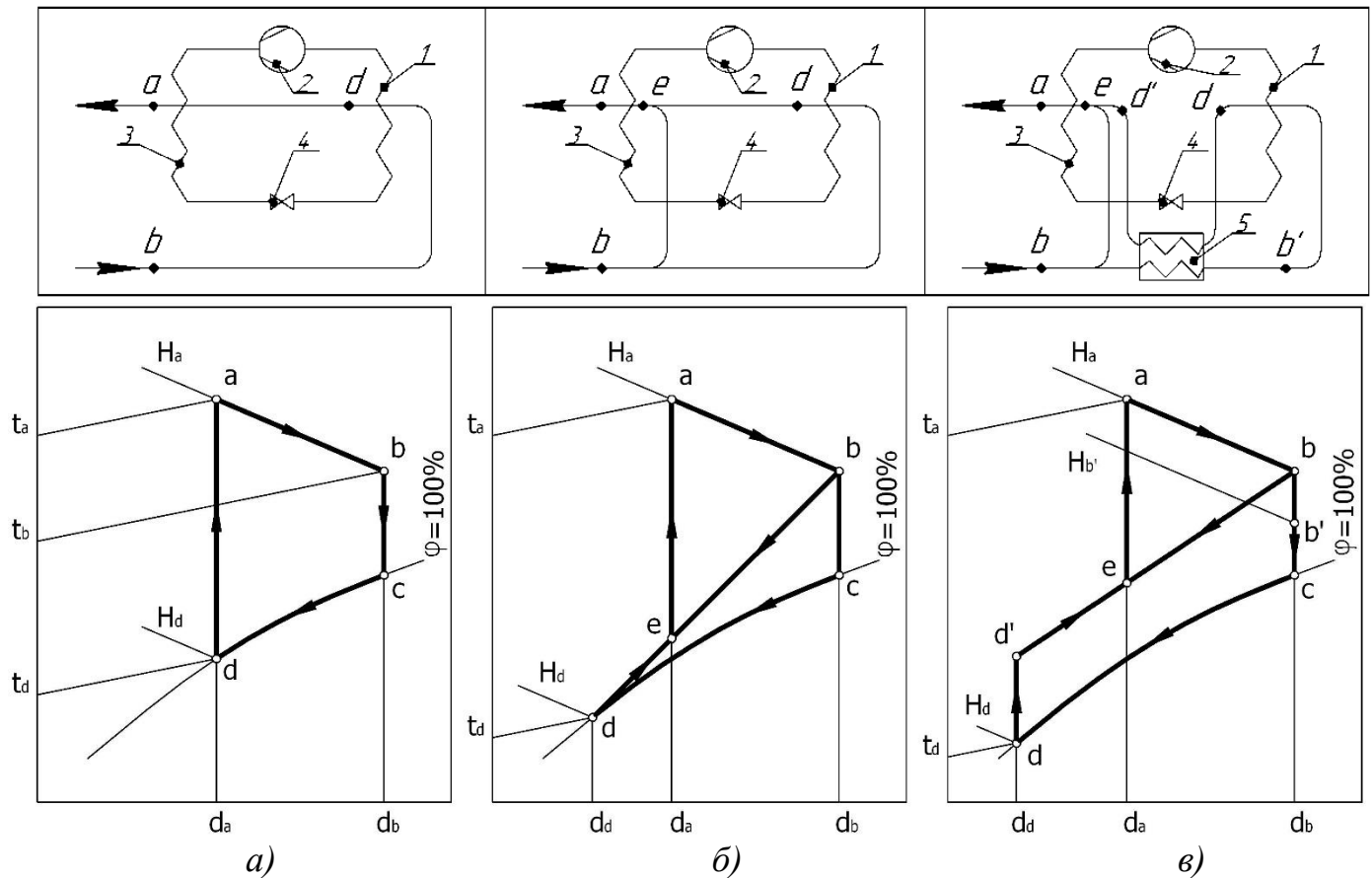


Рис. 16. $H-d$ діаграма процесу теплонасосного сушіння:

- з осушенням усього теплоносія ($a-b-c-d-a$);
- з осушенням частини теплоносія ($a-b-c-d$, $d-e + b-e$, $e-a$);
- з осушенням частини теплоносія і рекуперацією холоду ($b-b'$, $d-d'$).

2. Теплоносій, який пройшов над висушуваним продуктом, (рис. 16-б, процес $a-b$) розділяється на два потоки, один з яких піддається зневодненню шляхом глибокого охолодження (процес $b-c-d$), після чого змішується з частиною вологого теплоносія, що залишилася (процеси $d-e$ і $b-e$), і в стані e надходить на нагрівання до конденсатора теплового насоса (процес $e-a$).

3. Після адіабатичного зволоження теплоносія (рис. 16-в, процес $a-b$) і охолодження його частини до стану d , аналогічно попередньому варіанту, холодний осушений потік вступає в теплообмін з потоком, що надходить на охолодження

(процеси $d-d'$ і $b-b'$), і після змішування з частиною вологого теплоносія (процеси $d'-e$ і $b-e$) в стані e подається на нагрівання до конденсатора теплового насоса (процес $e-a$).

Як видно з діаграм (рис. 16), у всіх варіантах, незалежно від режиму видалення вологи, досягається однаковий ступінь осушення теплоносія. Але це ще не означає, що енерговитрати на осушення також будуть однакові – залежно від співвідношення температур у випарнику і конденсаторі тепловий коефіцієнт теплонасосного циклу і, відповідно, витрата енергії на привод теплового насоса в даних випадках може значно різнитися.

При роботі теплового насоса за першим варіантом з осушенням усього потоку циркулюючого теплоносія (рис. 16-а) питома витрата «холоду» на конденсацію вологи з повітря дорівнює

$$q'_{o} = L \cdot \frac{H_b - H_d}{d_b - d_d}, \quad (5)$$

де H_b, H_d, d_b, d_d – відповідно, ентальпія і вологовміст теплоносія на початку і в кінці процесу охолодження.

Витрати енергії в компресорі на одержання холоду

$$N'_e = \frac{q'_{o}}{K_e} = L \cdot \frac{H_b - H_d}{d_b - d_d} \cdot \frac{1}{K_e}, \quad (6)$$

де $K_e = f(T_{\text{кд}}, T_o)$ – питома холодопродуктивність теплонасосного агрегату; $T_{\text{кд}}$ та T_o – температури в конденсаторі та випарнику, відповідно.

При другому варіанті підключення теплового насоса (рис. 16-б) енерговитрати на конденсацію вологи складають

$$N''_e = L_o \cdot \frac{H_b - H_d}{d_b - d_d} \cdot \frac{1}{K_e}, \quad (7)$$

де $L_o = L \cdot \frac{H_g - H_e}{d_g - d_d}$ – частка потоку теплоносія, що проходить через випарник.

При роботі за третьою схемою (рис. 16-в) питомі енерговитрати складають

$$N'''_e = L_o \cdot \frac{H_{b'} - H_d}{d_b - d_d} \cdot \frac{1}{K_e}, \quad (8)$$

де $H_{b'} = H_b - E \cdot (H_b - H_d)$, а E – ефективність рекуператора.

Для кожного заданого тепловологісного стану осушуваного повітря відповідно до залежності (7) існує оптимальна температура охолодження, при якій енерговитрати на видалення вологи мінімальні. На рис. 17 у вигляді графічних залежностей показані температури охолодження, які забезпечують мінімальне електроспоживання компресора при різних тепловологісних станах осушуваного повітря. З наведених даних видно, що чим вища температура відпрацьованого теплоносія і чим менший вологовміст, який необхідно одержати, тим більш низькі температури необхідно мати у випарнику теплового насоса. Виходячи з заданих режимів сушіння, наведені графіки дозволяють вибрати необхідні температурні

параметри функціонування теплонасосного агрегату і встановити оптимальний режим вологовидалення.

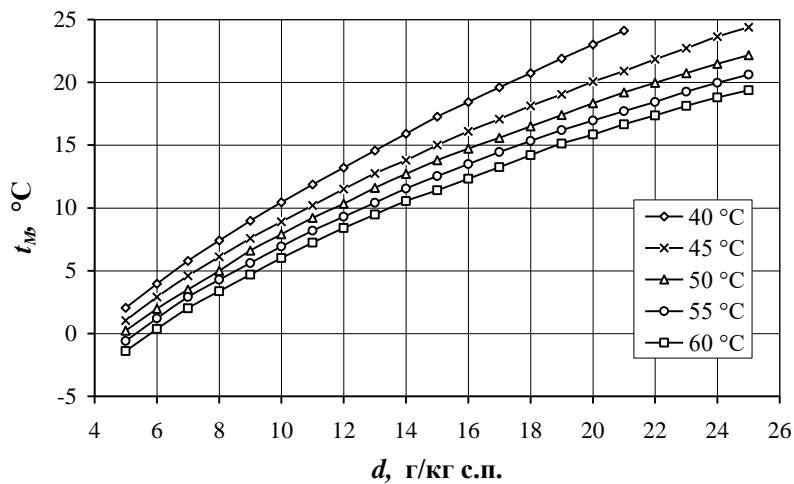


Рис. 17. Залежність оптимальної температури охолодження від параметрів осушувачого повітря для теплового насоса на холодоагенті R-22.

Розрахункові величини питомих енерговитрат, відповідних даним температурам охолодження наведені на рис. 18 і рис. 19. З графіків видно, що енергоспоживання теплового насоса в зоні низького вологовмісту сушильного агента різко збільшується. Це відбувається тому, що при низькому вологовмісті значна частина виробленого холоду витрачається непродуктивно на охолодження маси сухого повітря. В зв'язку з цим роботу теплового насоса при малих величинах вологовмісту сушильного агента доцільно здійснювати з рекуперацією холоду (рис. 16-в). Застосування рекуператора «повітря-повітря» дозволяє зменшити теплове навантаження на випарник на величину $H_b - H_b'$.

Розрахункові криві енерговитрат на осушення при середній ефективності рекуператора $E = 0,4$ наведені на рис. 19. З графіків випливає, що при даній схемі роботи теплонасосного агрегату енергоспоживання зменшується в 1,3-1,5 рази.

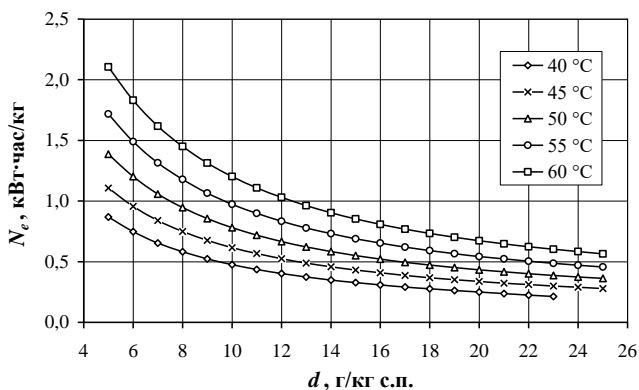


Рис. 18. Залежність енерговитрат на видалення вологи від параметрів осушувачого повітря при роботі теплонасосного агрегату за схемою на рис. 16-б.

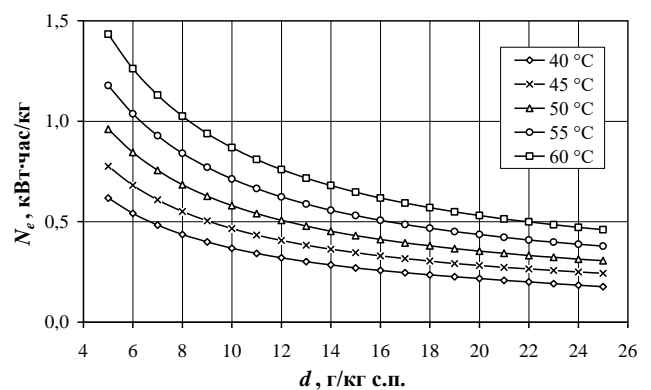


Рис. 19. Залежність енерговитрат на видалення вологи від параметрів осушувачого повітря при роботі теплонасосного агрегату за схемою на рис. 16-в при середній ефективності рекуператора $E = 0,4$.

Як видно, навіть при невисокій ефективності рекуператора вираш від його застосування значний, особливо в області низьких вологовмістів сушильного агента.

З отриманих залежностей випливає, що для ефективної роботи теплового насоса вигідні режими сушіння з високою вологістю сушильного агента, оскільки питомі витрати енергії на видалення вологи з повітря при таких умовах менші. Але при високій вологості сушильного агента збільшується тривалість сушіння. При цьому може виникнути ситуація, коли при низьких питомих витратах і великій тривалості процесу витрати енергії на весь процес сушіння будуть вищими, ніж при високих питомих енерговитратах і меншій тривалості. Тому для визначення раціональних режимів роботи теплового насоса, при яких забезпечуються мінімальні витрати енергії на весь процес сушіння, проведено дослідження кінетики сушіння термолабільного матеріалу при різних вологовмістах сушильного агента.

На підставі одержаних експериментальних даних оптимізовано параметри функціонування теплонасосної сушарки на всіх стадіях процесу сушіння і розроблено спосіб теплонасосного конвективного сушіння з перемінним режимом роботи теплонасосного агрегату, що забезпечує оптимальний з точки зору енерговитрат режим роботи на всіх стадіях сушіння.

Показано, що на початковій стадії доцільно здійснювати процес сушіння не в замкнутому контурі, а з підживленням деякою кількістю свіжого повітря. Така послідовність проведення конвективного сушіння матеріалу зумовлена тим, що спочатку з матеріалу видаляється вільна волога, а тому достатнім є невеликий ступінь осушення агента, менш глибоке його охолодження і, відповідно, більш висока температура у випарнику. В свою чергу, підвищення температури кипіння холодоагенту приводить до збільшення коефіцієнта перетворення теплового насоса, тобто до збільшення кількості теплоти, що виходить у конденсаторі теплового насоса в розрахунку на одиницю витраченої енергії. Для максимально повного використання теплоти конденсації і зниження питомих витрат на першій стадії сушіння доцільно надлишки вологи, що не можуть бути сконденсовані, відводити в пароподібному стані за рахунок подання в сушарку свіжого повітря для підживлення і викиду відпрацьованої частини.

На другій стадії процесу сушіння необхідно знизити температуру у випарнику теплового насоса. Це пов'язано з тим, що в міру зменшення вологовмісту матеріалу знижується парціальний тиск водяної пари над ним, тобто зменшується масообмінний потенціал процесу. Для підтримки постійної різниці масообмінного потенціалу між матеріалом, що зневоднюється, і агентом необхідно в міру зниження парціального тиску пари над матеріалом відповідно знижувати вологовміст сушильного агента, збільшуючи таким чином ступінь його осушення за рахунок зменшення температури охолодження.

На кінцевій стадії зневоднювання з матеріалу необхідно видалити капілярно- і адсорбційно-зв'язану вологу, яка важко видаляється, і тому основним фактором, що визначає енерговитрати на даному етапі, є тривалість процесу. Для збільшення швидкості сушіння і збереження якості матеріалу необхідно максимально можливо збільшити ступінь осушення сушильного агента, тобто максимально знизити температуру точки роси. Нижньою межею є температура замерзання конденсату, тому що при роботі випарника в зоні мінусових температур відбувається швидке

заростання льодом його теплообмінної поверхні, що викликає різке падіння ефективності роботи устаткування.

Для кожної з трьох стадій експериментально визначені оптимальні температура і вологовміст сушильного агента. Діапазон оптимальних параметрів процесу сушіння наданий в табл. 2.

Таблиця 2.

Оптимальні параметри процесу низькотемпературного зневоднення
рослинної сировини

№ з/п	Найменування стадії технологічного процесу	Температура сушильного агента, °С	Вологість сушильного агента, %	Тривалість етапу, год.
1.	Інтенсивне вилучення вільної вологи з матеріалу	50 ÷ 55	70 ÷ 50	3 ÷ 5
2.	Зневоднення матеріалу з поступовим зниженням вологовмісту сушильного агента	45 ÷ 50	50 ÷ 20	2 ÷ 4
3.	Досушування матеріалу до кінцевої вологості	40 ÷ 50	20 ÷ 10	2 ÷ 3

В шостому розділі «Вдосконалення технологічних процесів з застосуванням теплових насосів» викладено результати досліджень з підвищення енергетичної ефективності систем теплопостачання з використанням сорбційних і парокомпресійних теплових насосів та наведені дані щодо промислової апробації розроблених теплонасосних установок.

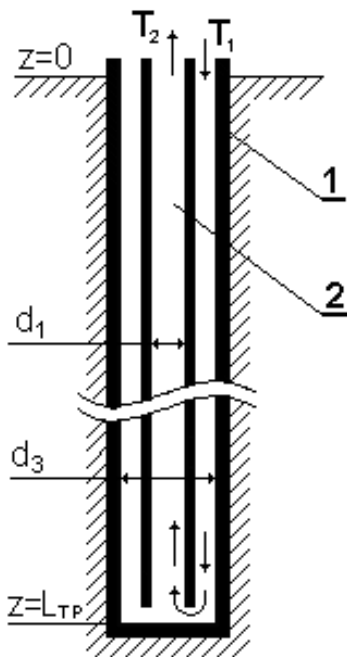


Рис. 20. Конструкція ГСТО:
1 – обсадна труба;
2 – підйомна труба.

Впровадження в практику теплонасосних систем великої теплопродуктивності вимагає наявності потужних джерел низькопотенційної теплоти з достатньо високою та стабільною в часі температурою. Одним з шляхів вирішення даної проблеми є отримання низькопотенційної теплоти шляхом використання законсервованих вироблених газовидобувних свердловин.

На основі аналізу даних реєстру свердловин нафтових і газових родовищ України з підвищеними значеннями пластових температур, наданих Національною акціонерною компанією «Нафтогаз України», досліджено геотермальні властивості фонду недіючих свердловин та технологічні можливості їх використання.

Встановлено, що більшість газовидобувних свердловин практично є сухими, тобто не містять термальної води. В таких свердловинах запропоновано здійснювати відбір геотермальної теплоти за допомогою глибинних свердловинних теплообмінників (ГСТО) (рис. 20). Вилучення

геотермального тепла в ГСТО здійснюється за рахунок використання стовбура свердловини як ґрунтового теплообмінника, через який по замкненому контуру циркулює проміжний теплоносій.

Для визначення теплового і температурного потенціалу свердловини в довгостроковій перспективі запропоновано квазістаціонарну аналітичну модель ГСТО, і на її основі розроблено інженерну методику розрахунку теплопередачі в свердловині.

Модель замкненого ГСТО полягає в наступному. Вода тече вниз кільцевим простором між обсадною колоною і центральною трубою. При цьому температура суміжних гірських порід зростає з глибиною, і температура циркулюючої води підвищується в напрямку потоку. Одночасно навколо свердловини розвивається осісиметрична теплова неоднорідність, яка викликана радіальною теплопровідністю в напрямку свердловини. Підігріта вода по центральній трубі надходить вгору, і її температура частково знижується за рахунок теплообміну через стінку труби з потоком, який опускається вниз. Задача вирішується в циліндричній системі координат. При перенесенні теплоти в твердих тілах за умови, що коефіцієнт теплопровідності не залежить від температури і однаковий у всіх точках простору, рівняння збереження енергії (рівняння теплопровідності) в циліндричній системі координат в загальній формі має вигляд

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (9)$$

При вирішенні відповідних стаціонарних або квазістаціонарних задач, коли $\partial T / \partial \tau = 0$ рівняння теплопровідності (9) спрощується до закону Фур'є в одномірному формулюванні

$$q_r = -\lambda \cdot \frac{dT}{dr}, \quad (10)$$

де q_r – потік тепла в напрямку r або кількість теплоти, що проходить в одиницю часу через одиницю площі в напрямі r .

Це рівняння може бути застосоване для розрахунку квазістаціонарного радіального теплового потоку від гірського масиву до свердловини на відстані z від поверхні ґрунту, якщо переписати його у вигляді

$$q_r(z) = -\lambda \cdot \frac{T_{zp}(z) - T_1(z)}{R_{zp}}, \quad (11)$$

де R_{zp} – радіус зони навколо свердловини, за межами якої гірська порода зберігає природний вигляд всередині породи на глибині z на відстані $r \geq R_{zp}$ від обсадної труби; $T_1(z)$ – температура води в обсадній трубі на глибині z .

Для розрахунку радіального теплового потоку від гірського масиву до свердловини було застосовано відомий в теорії теплопровідності параметр “глибини проникнення теплового фронту δ_T ”, який стосовно даної задачі визначає величину радіуса R_{zp} і який може бути розрахований за формулою

$$R_{zp} = 2\sqrt{a \cdot \tau}, \quad (12)$$

де a – коефіцієнт температуропровідності гірської породи; τ – час.

Змінення температури гірської породи з глибиною визначається з рівняння

$$T_{zp}(z) = T_0 + \Gamma \cdot z, \quad (13)$$

де T_0 – температура поверхні масиву; Γ – геотермічний градієнт; z – глибина.

Рівняння теплообміну між гірським масивом і теплоносієм в ГСТО та між потоками теплоносія в ГСТО

$$G \cdot c_p \cdot dT_1 = k_{mp} \cdot (T_2 - T_1) \cdot dz + k_{zp} (T_{zp} - T_1) \cdot dz, \quad (14-a)$$

$$G \cdot c_p \cdot dT_2 = k_{mp} \cdot (T_2 - T_1) \cdot dz. \quad (14-b)$$

Коефіцієнти теплопередачі k_{mp} та k_{zp} в рівняннях (14) визначаються як

$$k_{mp} = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_{1mp}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}}; \quad (15-a)$$

$$k_{zp} = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_3 d_3} + \frac{1}{2\lambda_{2mp}} \ln \frac{d_4}{d_3} + \frac{1}{2\lambda_{zp}} \ln \frac{d_{zp}}{d_4}}, \quad (15-b)$$

де d_1 і d_2 – внутрішній і зовнішній діаметри підйомної труби; d_3 і d_4 – внутрішній і зовнішній діаметри обсадної труби; λ_{1mp} та λ_{2mp} – коефіцієнти теплопровідності підйомної і обсадної труби.

Тепловий розрахунок ГСТО проводиться методом ітерацій – задається початкова температура води T_1 на вході в ГСТО ($z = 0$) і шляхом послідовного наближення знаходиться температура T_2 на виході з ГСТО, при якій в нижній точці повороту потоку ($z = L_{mp}$) дотримується умова $T_1 = T_2$.

У розрахунках використано усередненні дані за характеристиками глибинних свердловин газових родовищ України. Прийнято такі значення: глибина свердловини $L_{mp} = 5000$ м, діаметр обсадної труби $d_1 = 0,245$ м, діаметр внутрішньої труби ГСТО $d_1 = 0,1$ м; геотермічний градієнт $\Gamma = 0,03$ °С/м, середня теплопровідність гірських порід $\lambda_{zp} = 2,4$ Вт/м·°С.

Результати теплового розрахунку свердловинного теплообмінника при різних режимах його роботи показали, що температура нагріву теплоносія і теплова потужність ГСТО залежать від таких параметрів:

1. Тривалість експлуатації свердловинного теплообмінника.
2. Ступінь теплоізоляції центральної підйомної труби.
3. Витрата теплоносія через свердловинний теплообмінник.
4. Температура теплоносія, що закачується в теплообмінник.

Теплопродуктивність системи вилучення геотермального тепла на базі ГСТО залежить від температури та теплопровідності прилеглого гірського масиву. В

процесі роботи теплообмінника відбувається поступове охолодження ділянки гірського масиву навколо свердловини, і кількість теплової енергії, що вилучається, зменшується. Вплив часу роботи ГСТО на теплову потужність системи представлено на рис. 21. Розрахунки показують, що існує короткий початковий період швидкого зниження продуктивності, після чого швидкість змінювання зменшується, і через 2-3 роки роботи ГСТО встановлюється практично стаціонарний режим із зменшенням теплової потужності до 40 % від початкової.

Теплова потужність системи суттєво збільшується також із зростанням витрати теплоносія через свердловину. Як видно з рис. 22, при збільшенні витрати теплоносія через розглянуту свердловину від 2 до 10 кг/с теплова потужність ГСТО збільшується майже в 3 рази.

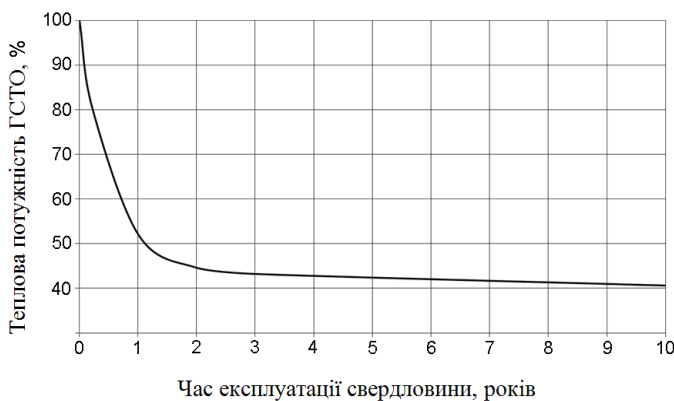


Рис. 21. Зміна теплової потужності ГСТО в часі.

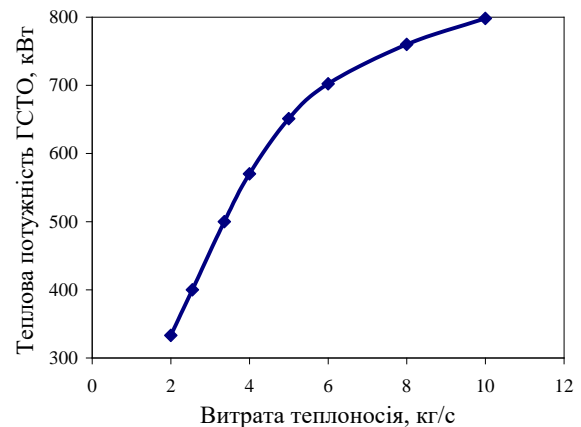


Рис. 22. Залежність теплової потужності ГСТО від витрати теплоносія

Значно впливає на рівень температури на виході з ГСТО внутрішній теплообмін між зустрічними потоками нагрітого та холодного теплоносія в центральній і обсадній трубах. ГСТО – це фактично теплообмінник «труба в трубі» довжиною кілька кілометрів. Розрахункові дані по температурах теплоносія на виході з ГСТО при різних варіантах теплоізоляції центральної труби надані на рис. 23. Як бачимо, якість теплоізоляції має важливе значення: у всіх варіантах теплоізоляції, крім вакуумної, теплоносій під час руху вгору охолоджується на 30-40 °С.

Рівень температури теплоносія на виході з ГСТО залежить також від витрати теплоносія через теплообмінник. На рис. 24 показано розподіл температури по глибині свердловини в кільцевому зазорі й центральній трубі ГСТО при різних масових витратах теплоносія. Із збільшенням витрати теплоносія від 2 до 10 кг/с температура на виході зі свердловини знижується на 20 °С, а теплова потужність, як видно з графіка на рис. 22, зростає втричі.

За результатами аналітичного дослідження ГСТО визначені оптимальні режими його експлуатації при роботі в складі системи тепlopостачання з різними типами теплових насосів. Розроблені та розраховані технологічні схеми підвищення температурного потенціалу теплоносія з застосуванням теплових насосів адсорбційного типу. Показано, що за допомогою підвищувального адсорбційного теплового насоса на нових сольових адсорбентах температура теплоносія на виході з ГСТО може бути збільшена до рівня достатнього для вироблення електричної енергії за допомогою ORC-установок.

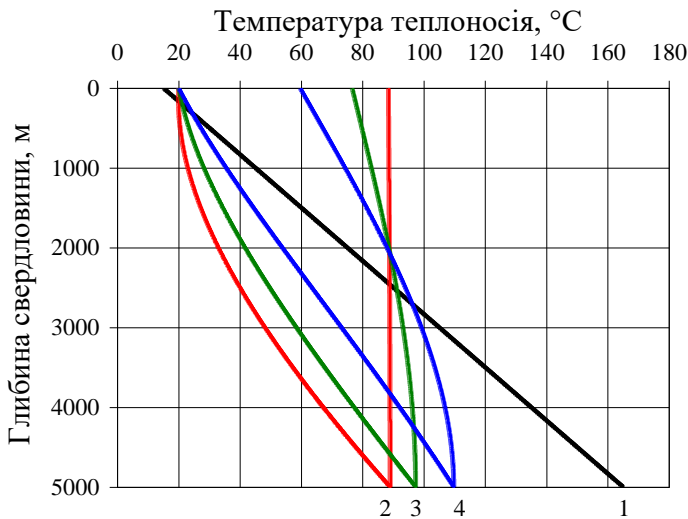


Рис. 23. Розподіл температури по довжині ГСТО при різних варіантах теплоізоляції центральної труби:
 1 – температура гірських порід;
 2 – вакуумна ізоляція ($\lambda = 0,006 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$);
 3 – пінополіуретан ($\lambda = 0,045 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$);
 4 – полістирол ($\lambda = 0,15 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$).

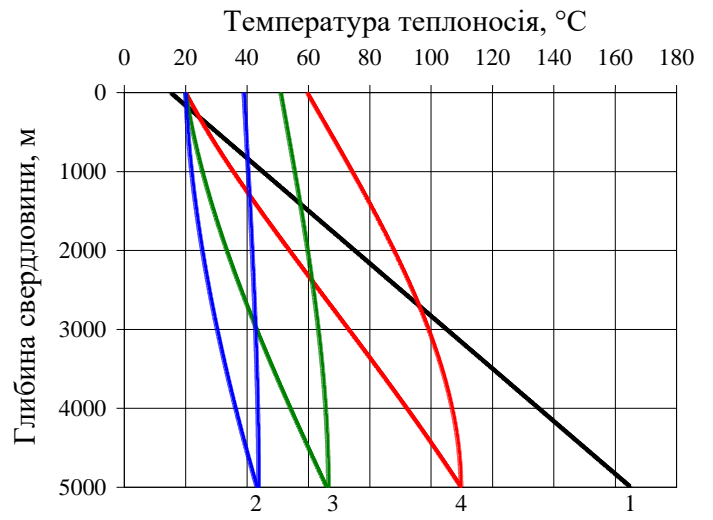


Рис. 24. Розподіл температури по довжині ГСТО при різних витратах теплоносія:
 1 – температура гірських порід;
 2 – витрата теплоносія 15 кг/с;
 3 – витрата теплоносія 10 кг/с;
 4 – витрата теплоносія 5 кг/с.

Технологічна схема підвищення температурного потенціалу геотермального джерела енергії за допомогою адсорбційного теплового насоса надана на рис. 25.

Робочі процеси в адсорбційному тепловому насосі здійснюються в дві стадії: десорбції (регенерації адсорбенту) і адсорбції (виробництва теплової енергії).

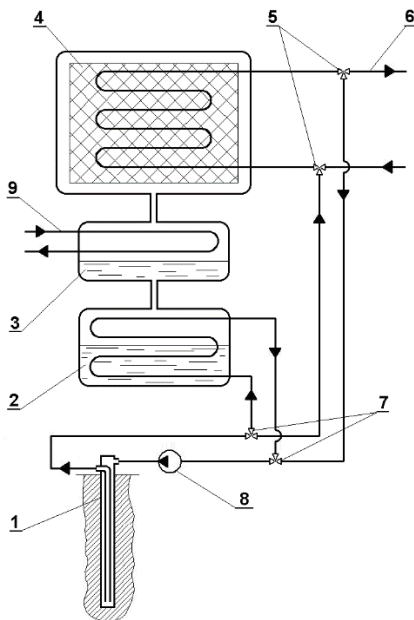


Рис. 25. Технологічна схема підвищення температурного потенціалу геотермального джерела енергії за допомогою адсорбційного теплового насоса:
 1 – ГСТО;
 2 – випарник;
 3 – конденсатор;
 4 – генератор-адсорбер;
 5, 7 – триходові вентиля;
 6 – споживач теплової енергії;
 8 – циркуляційна помпа проміжного теплоносія;
 9 – контур охолодження конденсатора.

На стадії десорбції генератор-адсорбер 4 підключається до ГСТО 1, і включається контур охолодження 9 конденсатора 3. Стадія десорбції закінчується виділенням холодоагенту з сорбенту і накопиченням його в зрідженому стані в випарнику 2. При переході до стадії адсорбції циркуляція гріючого теплоносія переключається на контур ГСТО - випарник, а генератор-адсорбер підключається до споживача

теплової енергії 9. При цьому холодоагент кипить в випарнику, а пара, що утворюється при кипінні, надходить до генератора-адсорбера і поглинається адсорбентом. Поглинання пари супроводжується нагрівом адсорбенту до високої температури за рахунок виділення теплоти адсорбції, яка відводиться в контур тепlopостачання.

На рис. 26 показаний термодинамічний цикл підвищувального адсорбційного теплового насоса в діаграмі Клапейрона. З діаграми видно, що при температурі геотермального теплоносія близько $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ і температурі конденсації $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ за допомогою адсорбційного теплового насоса температурний потенціал теплоносія можна підвищити до $95\text{ }^{\circ}\text{C}$. Коефіцієнт перетворення теплоти при даних режимах роботи адсорбційного теплового насоса становить 0,49.

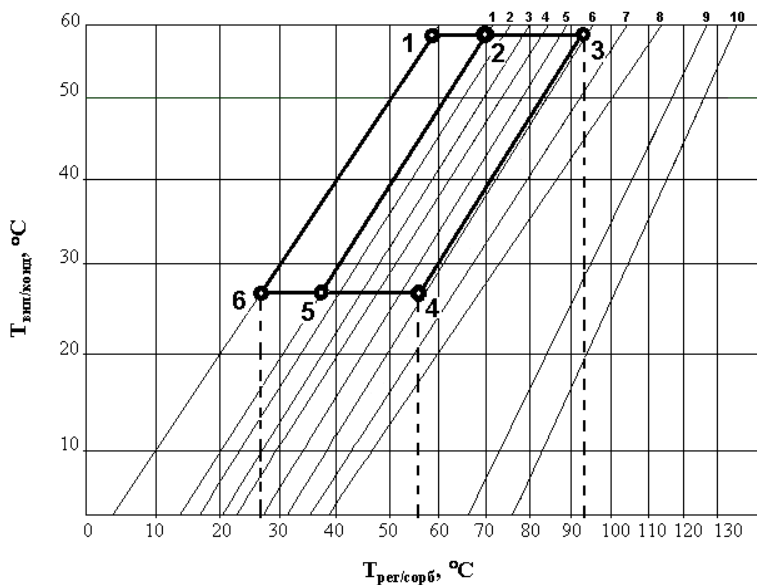


Рис. 26. Термодинамічний цикл підвищувального адсорбційного теплового насоса на робочій парі SWS-1L – H₂O. Вологовміст сорбенту:

- 1 – 0,550 кг/кг; 2 – 0,495 кг/кг;
- 3 – 0,440 кг/кг; 4 – 0,385 кг/кг;
- 5 – 0,330 кг/кг; 6 – 0,275 кг/кг;
- 7 – 0,220 кг/кг; 8 – 0,165 кг/кг;
- 9 – 0,110 кг/кг; 10 – 0,055 кг/кг.

На підставі отриманих в роботі результатів експериментальних і аналітичних досліджень розроблені, створені та впроваджені теплонасосні установки для систем тепlopостачання та підготовки теплоносія в процесах конвективного сушіння. Проведена виробнича апробація впроваджених установок, визначені їхні енергетичні та техніко-економічні показники.

Створена теплонасосна система осушення повітря в промислово-технологічній лінії з виробництва порошків з тропічних фруктів в умовах високовологого середовища В'єтнаму, в якій зневоднення сировини здійснюється в чотиризонній сушарці тунельного типу. Перші три зони працюють за традиційною схемою з викидом вологого повітря та підживленням свіжого з атмосфери. Четверта зона має замкнутий контур циркуляції з теплонасосною системою осушення сушильного агента. Підготовка теплоносія здійснюється за допомогою парокомпресійної теплонасосної установки с рекуперацією холоду. В зону сушіння подається сушильний агент з температурою $55\text{--}60\text{ }^{\circ}\text{C}$ і вологовмістом 20 г/кг с.п., що на 10 г/кг с.п. нижче, ніж в навколишньому середовищі. Згідно техніко-економічним розрахункам Замовника, термін окупності лінії становить 1,5 роки.

Розроблений і досліджений теплонасосний конденсаційний осушувач повітря для пристрою сушіння полімерних матеріалів при їх переробці та утилізації. Осушувач повітря впроваджений в дослідному виробництві УкрНДППластмаш і призначений

для забезпечення ефективної роботи пристрою сушіння відходів ПЕТФ на лінії гранулювання термопластів ЛГТВ-150. Дослідна експлуатація технологічної лінії показала, що зниження вологовмісту повітря до $d = 5$ г/кг с.п. (що на 5-7 г/кг с.п. нижче за вологовміст атмосферного повітря) дозволяє скоротити тривалість зневоднення матеріалу на 25 %

Розроблений та реалізований проект системи теплонасосного гарячого водопостачання житлового мікрорайону в м Краматорську. Теплонасосна установка тепловою потужністю 1,5 МВт працює з використанням низькопотенційної теплоти каналізаційних стоків. У відповідності зі схемою утилізація теплоти каналізаційних стоків відбувається в підземному теплообміннику-утилізаторі типу «труба в трубі». Багаторічна експлуатація теплонасосної установки показала стабільність теплових характеристик системи та підтвердила ефективність розробленого технічного рішення. Середньорічна величина коефіцієнта перетворення теплового насоса склала 3,5, а в окремі місяці досягала значення 4,5. Економія природного газу за умови цілорічної експлуатації теплонасосної установки на повну теплову потужність складає 1,56 млн. м³.

ВИСНОВКИ

У дисертації на основі комплексних експериментальних досліджень визначено і вирішено актуальну наукову проблему - вдосконалення технологій сорбційного перетворення теплоти та підвищення ефективності промислових технологічних процесів, які ґрунтуються на технологіях сорбційної та парокомпресійної трансформації теплоти.

Результати проведених досліджень дають підстави сформулювати такі основні висновки:

1. Ґрунтуючись на принципі температурної інваріантності Полянї розроблено методику пошуку та попереднього відбору адсорбентів, придатних для застосування як робочих тіл АТН. Методика дозволяє вибрати оптимальні сорбенти на підставі обмеженого набору експериментальних даних, у тому числі з ізотерм адсорбції, що одержані при температурах, які відрізняються від температур, при яких здійснюється певний адсорбційний цикл. Із застосуванням цієї методики створена і систематизована база даних сорбційних матеріалів, перспективних для використання в АТН.

2. Обґрунтована та практично підтверджена на експериментальних зразках АТН можливість суттєвого розширення зони робочих концентрацій сольових сорбентів в адсорбційному термодинамічному циклі за рахунок введення солі в інертний носій. Такий адсорбент здатний утримувати в собі сіль навіть при її розчиненні, що забезпечує ефективну роботу адсорбенту як у зоні твердого, так і рідкого сольового розчину.

3. Розроблено методику розрахунку апаратів сонячного адсорбційного холодильника, яка на основі кліматичних даних про сонячну радіацію в заданому регіоні дозволяє визначити оптимальні параметри адсорбційного шару в генераторі-адсорбері холодильника та оптимальну орієнтацію (кут нахилу, азимут) сонячного приймача. Для кліматичних умов півдня України оптимальний кут нахилу геліоприймача сонячного адсорбційного холодильника склав 32 градуси.

4. Розроблений, виготовлений та досліджений в натурних умовах експериментальний зразок сонячного адсорбційного холодильника, що працює на робочій парі сольовий сорбент SWS-1L – H₂O. Показано, що застосування даних робочих речовин забезпечує зниження матеріалоемності адсорбера в 1,7 рази у порівнянні з відомими аналогами. В результаті проведених досліджень отримані енергетичні показники дійсного адсорбційного циклу і встановлено, що в умовах сонячного нагрівання температура десорбції не перевищувала 90 °С, а добова холодопродуктивність холодильника склала 2000 кДж, що відповідало проектним даним і підтвердило коректність розробленої методики теплотехнічного розрахунку генератора-адсорбера.

5. За результатами досліджень лабораторної моделі АТН, що працює на сорбційній парі SWS-1L – H₂O, визначена залежність енергетичних показників адсорбційного циклу від співвідношення температур сорбції, десорбції, конденсації і випаровування. Експериментально встановлено, що величина теплової потужності й тривалість циклів сорбції/десорбції в АТН можуть регулюватися в широких межах шляхом змінювання температурних параметрів адсорбційного циклу. Отримано, що при температурі десорбції біля 100 °С величина коефіцієнта перетворення АТН досягає значення 1,6.

6. Показано, що АТН дозволяють рознести в часі процеси споживання і постачання теплової енергії, тому перспективним є їх запровадження в системах тепlopостачання, які працюють з використанням електричної енергії за пільговим нічним тарифом. За результатами випробувань АТН в режимі добового циклу роботи (7 годин стадія десорбції і 17 годин стадія сорбції) виявлено, що енергоемність адсорбенту досягає 850 кДж/кг, що в 3-4 рази більше в порівнянні з традиційними теплоакмулюючими матеріалами.

7. Розроблені три технологічні схеми вилучення вологи з сушильного агента при конвективному сушінні з використанням конденсаційного теплового насоса. Для кожної схеми підключення теплового насоса до сушарки визначені залежності енерговитрат на видалення вологи від параметрів осушувачого повітря. Отримані аналітичні залежності дозволяють, виходячи з заданих режимів сушіння, визначити температурні параметри теплонасосного циклу, при яких забезпечується мінімізація енерговитрат на вилучення вологи з сушильного агента.

8. На підставі експериментальних досліджень оптимізовані параметри функціонування теплових насосів на всіх стадіях процесу сушіння і розроблений спосіб теплонасосного конвективного сушіння з перемінним режимом роботи теплонасосного агрегату, що забезпечує необхідний масообмінний напір за рахунок підтримання постійної різниці між парціальними тисками водяної пари на поверхні матеріалу і в потоковій сушильній агента на всіх стадіях сушіння.

9. На підставі опрацювання даних реєстру свердловин нафтових і газових родовищ України з підвищеними значеннями пластових температур, наданих Національною акціонерною компанією «Нафтогаз України», досліджені геотермальні властивості фонду недіючих свердловин та визначені можливості їх технологічного використання. Розроблена технологічна схема підвищення температурного потенціалу геотермального джерела енергії за допомогою адсорбційного теплового насоса на нових сольових адсорбентах. Показано, що за

допомогою підвищувального адсорбційного теплового насоса температура теплоносія на виході з ГСТО може бути збільшена на 30-35 °С, що достатньо для вироблення електричної енергії за допомогою ORC-установок.

10. Результати дисертаційних досліджень апробовані при натурних випробуваннях та впровадженні в різних кліматичних регіонах таких промислових та дослідно-промислових установок: сонячний адсорбційний холодильник, теплонасосна система осушення повітря в лінії виробництва харчових порошків, осушувач повітря для пристрою сушіння подрібнених відходів поліетилентерефталату на базі лінії ЛГТВ-100, модульно-блочна зерносушильна установка з універсальним теплогенератором теплонасосного типу.

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ ТА ІНДЕКСИ

a – коефіцієнт температуропровідності; c_p – питома теплоємність; G_1 – масова витрата; d – діаметр; d_b, d_d – початковий та кінцевий вологовміст теплоносія; $H_b, \Delta H_{vap}$ – теплота випаровування; ΔH_{des} – теплота десорбції; H_d – початкова та кінцева ентальпія теплоносія; k – коефіцієнт теплопередачі; L_{tr} – довжина труби; N_e – питомі енерговитрати; P – тиск; Q – кількість теплоти; q – питома енергоемність; R – газова стала; T, t – температура; w – вологовміст сорбенту; α – коефіцієнт тепловіддачі; β – коефіцієнт масовіддачі; λ – коефіцієнт теплопровідності; τ – час.

Індекси: *vap* – випаровування; *gr* – ґрунт; *des* – десорбція; *kip* – кипіння; *кон* – конденсація; *сор* – сорбент; *tr* – труба.

Скорочення: АТН – адсорбційний тепловий насос; ГСТО – глибинний свердловинний теплообмінник; COP_x – холодильний коефіцієнт циклу.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Шаврин В.С., Дабіжа Н.О. Теплові насоси в системах теплохолодопостачання / під ред. академіка НАН України А. А. Долінського; НАН України, Ін-т техн. теплофізики. Київ: «Поліграф-Сервіс», 2009. 104 с. (*Особистий внесок – аналіз термодинамічних циклів термотрансформаторів, визначення критеріїв вибору типу теплонасосного обладнання*).

2. Снежкін Ю.Ф., Пазюк В.М., Петрова Ж.О., Чалаєв Д.М. Теплонасосна зерносушарка для насінневого зерна. Монографія. Київ: «Поліграф-Сервіс», 2012. 154 с. (*Особистий внесок – оптимізація технологічних схем конвективного сушіння з використанням конденсаційних теплових насосів*).

3. Чалаєв Д.М., Шаврин В.С. Енергозберігаючі екологічно чисті системи теплохолодопостачання для комунальної енергетики з використанням термотрансформаторів / Комунальна теплоенергетика України: стан, проблеми, шляхи модернізації. Том 1. К.: «Поліграф-Сервіс», 2007. С. 286-312. (*Особистий внесок – розроблення, теплотехнічний розрахунок, аналіз схемних рішень систем теплохолодопостачання на базі термотрансформаторів*).

4. Aristov Yu.I., Chalaev D.M., Dawoud B., Heifets L.I., Popel O.S., Restuccia G. Simulation and design of a solar driven thermochemical refrigerator using new chemisorbents. *Chemical Engineering Journal*. 2007. V. 134. № 1-3. P. 58-65. [*Scopus*] (*Особистий внесок – вивчення рівноважних температур утворення і розкладання кристалогідратів солей, аналіз термодинамічного адсорбційного холодильного циклу*).

5. Chalaev D.M., Aristov Yu.I. Assessment of the operation of a low-temperature adsorption refrigerator. *Thermal Engineering*. 2006. V. 53. № 3. P. 240-244. [*Scopus*] (*Особистий внесок – розроблення методики відбору перспективних адсорбентів для адсорбційних холодильників*).

6. Чалаев Д.М., Аристов Ю.И. Оценка работы низкотемпературного адсорбционного холодильника. *Теплоэнергетика*. 2006. № 3. С. 73-77. [*Web of Science*] (*Особистий внесок – розроблення методики відбору перспективних адсорбентів для адсорбційних холодильників*).

7. D. Chalaev, N. Silnyagina, A. Shmatok, A. Nedbailo. Heat transfer enhancement in corrugated tube heat exchanger. *Ukrainian Food Journal*. Volume 5. Issue 2. 2016. P. 376-386. [*Index Copernicus*] (*Особистий внесок – обробка та аналіз експериментальних даних*).

8. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Дабіжа Н.О. Аналіз енергетичних показників процесу теплонасосного сушіння. *Промышленная теплотехника*. 2017. т.39. № 3. С. 39-44. [*Index Copernicus*] (*Особистий внесок – розроблення спрощеної математичної моделі процесу*).

9. Морозов Ю.П., Чалаєв Д.М., Величко В.В. Вилучення геотермальної теплоти за допомогою теплових труб. *Наукові праці ОНАХТ*. Одеса, 2017. Вип. 1, Т. 81. С. 23-27. [*Index Copernicus*]. (*Особистий внесок – проведення теоретичних розрахунків, аналіз впливу теплофізичних властивостей робочих тіл на теплові характеристики геотермального зонда на базі конденсаційного термосифона*).

10. Снежкін Ю.Ф., Сюн Цзянь, Чалаєв Д.М., Уланов М.М., Дабіжа Н.О. Энергозберігаючі технології сушіння термолабільних матеріалів. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2019. Т. 41. №4. С. 5-12. [*Index Copernicus*]. (*Особистий внесок автора полягає у співавторстві наведених положень*).

11. Сильнягіна Н.Б., Степанова О.Є., Чалаєв Д.М., Переяславцева О.О., Базеєв Р.Є. Research of a new shell and tube heat exchanger for use in geothermal heating systems. *Енергетика і автоматика*. 2019. №5(45). С. 87-96. [*Index Copernicus*]. (*Особистий внесок – обробка та аналіз експериментальних даних*).

12. Морозов Ю.П., Чалаєв Д.М., Ніколаєвська Н.В., Добровольський М.П. Оцінка ефективності використання теплового потенціалу доквілля та верхніх шарів землі України. *Відновлювана енергетика*. 2020. №4. С. 80-88. [*фахове видання*]. (*Особистий внесок – аналіз схеми роботи теплонасосних установок з використанням низькопотенційної теплоти підземних вод*).

13. Морозов Ю.П., Чалаєв Д.М., Олійніченко В.Г., Величко В.В. Експериментальне дослідження добового акумулювання холоду шляхом використання води підземних горизонтів м. Києва. *Відновлювана енергетика*. 2019. №3. С. 67-77. [*фахове видання*] (*Особистий внесок – розрахунок*

холодопродуктивності системи «пасивного» кондиціонування з використанням підземних вод).

14. Морозов Ю.П., Барило А.А., Чалаєв Д.М., Добровольський М.П. Енергетична ефективність використання перших від поверхні водоносних горизонтів для тепло- і хладопостачання. Відновлювана енергетика. 2019. №2. С. 70-78. [фахове видання] (Особистий внесок – аналіз схеми роботи теплонасосних установок з ступінчастим спрацьовуванням температурного потенціалу підземних вод).

15. Морозов Ю.П., Чалаєв Д.М., Величко В.В. Децентрализованное теплоснабжение с помощью геотермальных тепловых насосов. Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2017. № 4-6 (216-218). С. 70-79. [фахове видання]. (Особистий внесок – проведення теоретичних розрахунків, аналіз впливу теплофізичних властивостей робочих тіл на теплові характеристики глибинного геотермального термосифона).

16. Чалаєв Д.М., Долинский А.А., Орлов А.А., Алексеенко С.В., Аристов Ю.И., Гирник И.С. Связанный тепломассоперенос в сорбционных преобразователях теплоты. Энергетика та електрифікація. 2014. № 4. С. 14-19. [фахове видання] (Особистий внесок – обробка та аналіз експериментальних даних, формулювання висновків).

17. Грабов Л.М., Чалаєв Д.М., Данько І.О., Демченко В.Г., Дуняк О.В. Перспективи використання українських природних цеолітів в адсорбційних перетворювачах теплоты. Промышленная теплотехника. 2014. Т. 36. № 4. С. 11-17. [фахове видання] (Особистий внесок – аналіз експериментальних даних, формулювання висновків).

18. Грабов Л.Н., Чалаєв Д.М., Переяславцева Е.А., Сильнягина Н.Б. Разработка конкурентноспособных трубчатых теплообменных аппаратов. Наукові праці ОНАХТ. Одеса, 2014. Вип. 45. Т. 2. С. 93-97. [фахове видання]. (Особистий внесок – розробка методики розрахунку теплопередачі в профільованих трубах)

19. Чалаєв Д.М., Грабов Л.Н., Данько І.О. Адсорбційний перетворювач теплоты періодичної дії. Наукові праці ОНАХТ. Одеса, 2014. Вип. 45. Т. 3. С. 209-211. [фахове видання]. (Особистий внесок автора полягає у співавторстві наведених положень).

20. Корінчук Д.М., Чалаєв Д.М., Дабіжа Н.О., Корінчевська Т.В. Обґрунтування використання композиційного сорбенту на керамічній основі в адсорбційних тепло акумуляторах. Керамика: наука и жизнь. 2013. Т. 19. № 1. С. 17-31. [фахове видання] (Внесок здобувача – постановка задачі, аналіз результатів та формулювання висновків).

21. Долинский А.А., Чалаєв Д.М., Грабов Л.Н. Сорбционные трансформаторы: опыт создания и перспективы развития. Промышленная теплотехника. 2013. Т.35. №3. С. 64-77. [фахове видання] (Особистий внесок автора полягає у співавторстві наведених положень).

22. Долінський А.А., Чалаєв Д.М., Грабов Л.Н., Переяславцева О.О., Сильнягина Н.Б., Ковальов В.В. Розробка ефективних теплообмінників нового покоління на основі труб з дискретними турбулізаторами. Энергетика та електрифікація. 2013. Т.13. № 4. С. 28-33. [фахове видання] (Особистий внесок – розроблення методики розрахунку теплопередачі в профільованих трубах).

23. Корінчук Д.М., Чалаєв Д.М., Корінчевська Т.В., Дабіжа Н.О. Оптимізація параметрів процесу регенерації шару сорбенту адсорбційного теплоаккумулятора. Наукові праці ОНАХТ. Одеса, 2012. Вип. 41. Т. 1. С. 197-201. [фахове видання] (Особистий внесок – аналізі результатів та формулювання висновків).

24. Чалаєв Д.М. Перспективные рабочие вещества для адсорбционных тепловых насосов. Наукові праці ОНАХТ. Одеса, 2011. Вип. 39. Т. 2. С. 336-341. [фахове видання]

25. Чалаєв Д.М., Шаврин В.С., Дабіжа Н.О., Корінчевська Т.В., Осадча Л.С. Дослідження адсорбційного теплового насоса, що працює із застосуванням оборотних термохімічних реакцій. Наукові праці ОНАХТ. Одеса, 2010. Вип. 37. С. 255-261. [фахове видання] (Особистий внесок – аналізі результатів досліджень, формулювання висновків).

26. Чалаєв Д.М., Шаврин В.С., Дабіжа Н.О., Корінчевська Т.В. Натурні випробування сонячного адсорбційного холодильника. Наукові праці ОНАХТ. – Одеса, 2009. Вип.35. Т.2. С.232-236. [фахове видання] (Особистий внесок – аналізі результатів досліджень, формулювання висновків).

27. Корінчевська Т.В., Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Шаврин В.С., Дабіжа Н.О. Перспективні матеріали для акумуляторів теплової енергії. Вісник НУ «Львівська політехніка». Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація. Львів, 2009. № 659. С. 139-141. [фахове видання]. (Особистий внесок – аналізі результатів досліджень, формулювання висновків).

28. Чалаєв Д.М., Шаврин В.С., Дабіжа Н.А., Трощенко Ю.Н. Сорбционные термотрансформаторы на базе природных цеолитов. Промышленная теплотехника. 2007. Т.29. № 7. С. 34-38. [фахове видання] (Особистий внесок автора – проведення експериментальних досліджень, обробка та аналізі результатів).

29. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Шаврин В.С., Дабіжа Н.А., Гатилов К.А. Эффективность применения тепловых насосов в процессах конвективной сушки. Наукові праці ОНАХТ. Одеса: 2007. Вип.30. Т.1. С.185-189. [фахове видання] (Особистий внесок – аналізі факторів впливу на енергетичні показники теплонасосного циклу).

30. Чалаєв Д.М., Хавін О.О., Шаврін В.С., Шапар Р.О. Теплонасосна сушарка для насінневого зерна. Наукові доповіді НАУ. 2006. № 2(3). С. 1-5. [фахове видання]. (Особистий внесок автора полягає у співавторстві наведених положень).

31. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Шаврін В.С., Хавін О.О., Дабіжа Н.О. Використання теплових насосів у процесах сушіння. Промышленная теплотехника. 2006. Т. 28. № 2. С. 106-110. [фахове видання] (Особистий внесок автора полягає у співавторстві наведених положень).

32. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Дабіжа Н.А., Шаврин В.С. Создание композитных сорбентов с повышенной влагоемкостью для процессов тепловлажностной обработки воздуха. Наукові праці ОНАХТ. Одеса, 2002. №23. С. 175-177. [фахове видання] (Особистий внесок – обґрунтування технології синтезу композитних сорбентів).

33. Снежкін Ю.Ф., Хавин А.А., Наумов С.Е., Чалаєв Д.М. Сушка термолабильных материалов низкопотенциальным теплоносителем пониженной влажности. Промышленная теплотехника. 2002. Т.24. № 4. С. 63-65. [фахове

видання] (Особистий внесок автора – проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз результатів).

34. Журавленко В.Я., Чалаєв Д.М. Адсорбционные холодоаккумулирующие агрегаты на новых рабочих веществах. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: Науково-технічний збірник. К.:КНУБА, 2001. Вип.2. С. 95-99. [фахове видання] (Особистий внесок автора полягає у співавторстві наведених положень).

Наукові праці, які засвідчують апробацію результатів дисертації:

35. Снежкин Ю.Ф., Дабижа Н.А., Уланов М.Н., Чалаєв Д.М. Комбинированная сушка термолabileльных материалов. В сборнике: Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы) СЭТТ - 2020. Сборник научных трудов Седьмой Международной научно-практической конференции, посвященной 110-летию со дня рождения Академика А.В. Лыкова. 2020. С. 226-231.

36. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Дабіжа Н.О., Шапар Р.О., Малащук Н.С. Теплонасосна сушильна установка. Матеріали ХХ міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у ХХІ столітті», 15-16 травня 2019 р. Київ. С. 621-624.

37. Dabizha N., Sniezhkin Yu., Chalaev D., Malashchuk N. Research in low-temperature heat pump drying. Proceedings of the 2nd International Scientific Conference “Chemical Technology and Engineering”, June 24-28th, 2019. Lviv, Ukraine. P. 98-99.

38. Сильнягіна Н.Б., Чалаєв Д.М., Переяславцева О.О., Базєєв Р.Є. Дослідження нового кожухотрубного теплообмінника для використання в системах геотермального теплопостачання. Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК», 19 грудня, 2019 р. Київ. С. 37.

39. Чалаєв Д.М., Шматок О.І., Грабова Т.Л., Сильнягіна Н.Б. Використання відпрацьованих газових свердловин для вилучення геотермального тепла. Збірник тез Регіональної науково-практичної конференції «Енергія. Бізнес. Комфорт.», 26 грудня, 2018 р. Одеса. С. 17-19.

40. Дабіжа Н., Снежкін Ю., Чалаєв Д., Шапар Р., Гусарова О. Ефективність використання теплових насосів в процесах сушіння. Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Хімічна технологія та інженерія», 26-30 червня, 2017 р. Львів. С. 100-101.

41. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Дабіжа Н.О. Вплив тепловологісного стану теплоносія на енергетичні показники процесу теплонасосного сушіння. Збірник наукових праць дев'ятої міжнародної науково-практичної конференції «Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні», 6-7 квітня, 2017. Львів. С. 279.

42. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Шапарь Р.О., Дабіжа Н.О., Сорокова Н.М., Гусарова О.В. Удосконалення теплогенеруючих систем сушильного обладнання. Збірник матеріалів IV Міжнародного конгресу «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування.», Національний університет «Львівська політехніка», 21-23 вересня 2016 року. Львів. С. 146.

43. Данько І.О., Чалаєв Д.М. Перспективні галузі застосування адсорбційних перетворювачів теплоти. Матеріали ІХ Міжнародної конференції «Проблеми промислової теплотехніки», 20-23 жовтня, 2015 р. Київ. Промышленная теплотехника. 2015. Т. 37. № 7. С. 63-64.

44. Уланов М.М., Чалаєв Д.М. Автономні теплонасосні водонагрівачі – перспективне направлення енергозбереження, як для населення, так і для установ з малим використанням гарячої води. Матеріали ІІІ Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК», 17-18 грудня, 2015 р. Київ. С. 41-43.

45. Чалаєв Д.М. Сорбционные тепловые насосы: разработка, внедрение, перспективы. Материалы международной конференции «Тепловые насосы в странах СНГ», 14-16 мая, 2013 г. Тепловые насосы. № 3 (12). 2013. С. 4-9.

46. Чалаєв Д.М. Натурні випробування сонячного адсорбційного холодильника на базі сольового сорбенту. Матеріали VII Міжнародної конференції «Проблеми промислової теплотехніки», 15-19 жовтня, 2012 р. Київ. Промышленная теплотехника. 2012. Т. 34. № 7. С. 38-39.

47. Корінчук Д.М., Чалаєв Д.М., Дабіжа Н.О., Корінчевська Т.В. Дослідження кінетики термохімічних реакцій в модельних адсорбційних акумуляторах. Збірник матеріалів 2-го Міжнародного конгресу «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування.», Національний університет «Львівська політехніка», 19-22 вересня, 2012 р. Львів. С. 147.

48. Снежкин Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Шаврин В.С., Осадчая Л.С., Дабіжа Н.А., Коринчевская Т.В. Термовлажностная обработка сушильного агента сорбционным методом. Труды IV Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ-2011», 20-23 сентября, 2011 г. Москва. Том 2. С. 337-341.

49. Снежкин Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Шаврин В.С., Уланов Н.М. Теплоснабжение с использованием альтернативных и возобновляемых источников энергии. Матеріали VII Міжнародної конференції «Проблеми промислової теплотехніки», 18-22 жовтня, 2011 р. Київ. Промышленная теплотехника. 2011. т.33. №7. С. 82

50. Чалаєв Д.М., Снежкін Ю.Ф., Шаврин В.С., Дабіжа Н.О., Воспітанніков Г.К. Адсорбційний тепловий насос. Матеріали XI міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика ХХІ століття», 13-17 вересня, 2010 р. АР Крим, смт. Миколаївка. С. 319-322.

51. Чалаєв Д.М., Шаврин В.С., Дабіжа Н.О. Сонячний адсорбційний холодильник. Матеріали 10-ї ювілейної міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика ХХІ століття», АР Крим, смт. Миколаївка, 14-18 вересня 2009 р. – Крим, 2009. – С. 191-194.

52. Снежкин Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Шаврин В.С. Энергосберегающие аспекты пароконденсационных сушильных установок. Труды 3-й Международной научно-практической конференции “Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ-2008”, 16-20 сентября, 2008 г. Москва-Тамбов. С.299-300.

53. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Шаврин В.С., Шапарь Р.О., Дабіжа Н.О., Корінчевська Т.В. Теплонасосні технології в енергетиці. Матеріали ІХ Міжнародної конференції “Відновлювана енергетика ХХІ століття”, 15-19 вересня 2008 р., АР Крим, смт. Миколаївка, с.238-241

54. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Шаврин В.С., Шапарь Р.А., Коринчевская Т.В. Комплексные системы теплохладоснабжения на базе сорбционных термотрансформаторов. Тези V Міжнародної конференції «Проблеми промислової теплотехніки», 22-26 травня, 2007 р. Київ. С. 252-253.

55. Aristov Yu.I., Chalaev D.M., Dawoud B., Heifets L.I., Popel O.S., Restuccia G. Solar driven adsorptive chiller: at the interfaces between chemical and thermal engineering. XVII Int. Conf. on Chemical Reactors and post-Symposium “Catalytic Processing of Renewable Sources: Fuel, Energy, Chemicals”, Athens-Crete, Greece, May 15-19, 2006. Chemical Engineering Journal. 2007. V. 128. № 5. P. 845.

56. Снежкін Ю. Ф., Чалаєв Д. М., Дабіжа Н. А. Обезвоживание коллоидных капиллярно-пористых материалов в условиях высоковлажной окружающей среды. Тезисы докладов и сообщений 5-го Минского Международного форума по тепло- и массопереносу - ММФ-2004, 24-28 мая, 2004 г. Минск, Беларусь:Т. 2. С. 256-258.

57. Chalaev D.M., Aristov Yu.I. Analysis of adsorptive chiller operation: influence of water sorbent properties. Proc. V Minsk International Seminar “Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators”, Sept. 8-11, 2003. Minsk, Belarus. P. 471-477.

58. Чалаєв Д.М., Дабіжа Н.А., Шаврин В.С., Хавин А.А. Оптимизация режимов работы теплонасосной конденсационной сушильной установки. Труды 1-й Международной научно-практической конференции “Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) – СЭТТ, 2002 г. Москва. Т. 4. С. 234-236.

Наукові праці, які додатково відображують наукові результати дисертації:

59. Долинский А., Снежкін Ю., Чалаєв Д., Шаврин В., Уланов Н., Дабіжа Н. Перспективы развития теплонасосной техники в Украине. Насосы и оборудование. 2009. № 3 (56). С. 40-44.

60. Багдугев Г.Б., Чалаєв Д.М. Солнечное охлаждение. Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2008. № 3 (4). С. 5-11.

61. Патент 105156 України, МПК F26B 17/00. Спосіб нагрівання і охолодження рідини в адсорбційному перетворювачі теплоти / Долінський А.А., Чалаєв Д.М., Грабов Л.М., Данько І.О.; власник Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України. Держпатент України. – № а201313205; заявл. 13.11.2013; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 7/2014.

62. Патент 105155 України, МПК F26B 17/06. Адсорбційний перетворювач теплоти періодичної дії / Долінський А.А., Чалаєв Д.М., Грабов Л.М., Данько І.О.; власник Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України. Держпатент України. – № а201313204; заявл. 13.11.2013 ; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 7/2014.

63. Патент 100336 України, МПК F26B 3/06, F24F 13/04, F24J 2/28. Система адсорбційного осушення повітря / Чалаєв Д.М., Пісарев О.В., Корінчук Д.М.,

Дабіжа Н.О.; власник Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України. Держпатент України. – № а201113128; заявл. 07.11.2011 ; опубл. 10.12.2012, Бюл. № 23/2012.

64. Патент 85875 України, МПК F26B 9/06, F26B 21/00. Спосіб роботи теплонасосної конвективної сушарки / Долінський А. А. Снежкін Ю. Ф., Чалаєв Д.М., Шаврін В. С., Дабіжа Н. О.; власник Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України. Держпатент України. – № а200612097; заявл. 17.11.2006 ; опубл. 10.03.2009, Бюл. № 5/2009.

65. Патент 38971 України, МПК: F26B 9/06, F26B 21/02, F26B 21/06. Спосіб конвективного сушіння матеріалу. Грабов Л.М., Мерщій В.І., Чалаєв Д.М.; власник Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України. Держпатент України. – № а200612097 ; заявл. 17.11.2006; опубл. 15.09.2004, Бюл. № 9/2004.

АНОТАЦІЯ

Чалаєв Д. М. Розвиток теорії та практики сорбційних і парокомпресійних технологій трансформації теплоти. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. – Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України, Київ, 2021.

Дисертація присвячена вирішенню науково-практичної проблеми вдосконалення технологій трансформації теплоти з використанням сорбційних і парокомпресійних теплових насосів. Поставлена проблема вирішується шляхом створення адсорбційних термотрансформаторів на нових енергоємних сорбентах і розроблення енергозберігаючих технологічних процесів конвективного сушіння із застосуванням парокомпресійних теплових насосів. На підставі аналізу термодинамічних циклів теплових насосів сорбційного типу розроблено методологію пошуку і відбору адсорбційних матеріалів, перспективних для використання як робочих тіл адсорбційних термотрансформаторів. Створені та випробувані експериментальні зразки адсорбційних теплових насосів і адсорбційних холодильників з використанням адсорбентів на основі солей лужних і лужноземельних металів, сорбційна дія яких заснована на ефекті оборотних термохімічних реакцій. На підставі узагальнення результатів випробувань отримані енергетичні показники дійсного адсорбційного циклу і розроблені основи теплотехнічного розрахунку та проектування апаратів адсорбційних агрегатів на сольових адсорбентах. Розроблені технологічні схеми теплопостачання з використанням вироблених газових свердловин. Досліджені та оптимізовані процеси конвективного сушіння термолабільних матеріалів в замкненому циркуляційному контурі з примусовим зневодненням сушильного агента за допомогою конденсаційного теплового насоса. Визначені температурні параметри теплонасосного циклу, при яких витрати енергії на вилучення вологи з сушильного агента мінімальні, та отримані аналітичні залежності, що дозволяють оптимізувати процес вологовидалення й інтенсифікувати процес конвективного сушіння.

Ключові слова: тепловий насос, коефіцієнт перетворення, адсорбція, тепломасообмін, сушіння, геотермальна енергія, теплопостачання.

SUMMARY

Chalaev D. M. „Development the theory and practice of sorption and vapor compression technologies for heat transformation”. – Qualifying scientific work of the manuscript rights-based.

Thesis for a Doctor of Science Degree by specialty 05.14.06 – „Engineering thermophysics and industrial heat power engineering”– Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021.

The purpose of the dissertation is to solve the scientific and practical problem of improving technologies for heat transformation using sorption and vapor compression heat pumps. The problem is solved by creating adsorption thermal transformers based on new energy-intensive sorbents and developing energy-saving technological processes of convective drying using vapor compression heat pumps. A methodology based on the analysis of thermodynamic cycles of sorption-type heat pumps has been developed for the search and selection of adsorption materials promising for the use as working fluid of adsorption thermal transformers. Experimental samples of adsorption heat pumps and adsorption refrigerators using adsorbents reached from salts of alkali and alkaline-earth metals have been created and tested, the sorption effect of which is formed on the effect of reversible thermochemical reactions. Due to the generalization of the test results, the energy indicators of the actual adsorption cycle were obtained and the basics of thermal engineering calculation and design of adsorption units on salt adsorbents were developed. Technological schemes of heat supply with the use of abandoned gas wells have been developed. The processes of thermolabile materials convective drying in a closed circulation circuit with forced dehydration of the drying agent using a condensation heat pump have been investigated and optimized. The temperature parameters of the heat pump cycle have been determined, at which the energy consumption for the removal of moisture from the air is minimal. Analytical dependences to optimize the dehumidification process and to intensify the convective drying process have been obtained.

Keywords: heat pump, coefficient of performance, adsorption, heat and mass transfer, drying, geothermal energy, heat supply.