

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

Беляновська Олена Анатоліївна

УДК 662.14,662.995;662.997

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ СТВОРЕННЯ АДСОРБЦІЙНИХ
ТЕПЛОТРАНСФОРМАТОРІВ ДЛЯ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ
ТА КОНДИЦІОНУВАННЯ**

05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

Автореферат дисертації на здобуття
наукового ступеня доктора технічних наук

Дніпро – 2025

Дисертацією є рукопис. Робота виконана в Українському державному університеті науки і технологій

Науковий консультант

доктор технічних наук, професор
Сухий Костянтин Михайлович,
Український державний університет
науки і технологій, м. Дніпро, ректор

Офіційні опоненти

доктор технічних наук, професор,
Книш Людмила Іванівна
Дніпровський національний
університет ім. О. Гончара, професор
кафедри комп'ютерних технологій

доктор технічних наук, доцент
Безбах Ігор Віталійович, Навчально-
науковий інститут холоду,
кріотехнологій та екоенергетики
ім. В.С. Мартиновського, Одеський
національний технологічний
університет, МОН України,
доцент кафедри процесів, обладнання
та енергетичного менеджменту

доктор технічних наук, професор,
Федоров Сергій Сергійович, Інститут
чорної металургії ім. З.І.Некрасова
Національної академії наук України,
Старший науковий співробітник
лабораторії теплотехніки та
енергозберігаючих технологій

Захист відбудеться «15» травня 2025 року о 12.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.084.05 при Українському державному університеті науки і технологій за адресом: 49005, м. Дніпро, просп. Науки, 4. Факс: +38 (0562) 47-44-27, e-mail: d0808405-nmetau@metal.nmetau.edu.ua З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Українського державного університету науки і технологій (м. Дніпро, просп. Науки, 4) Автореферат розісланий «10» квітня 2025.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 08.084.05, к.т.н., доц.

С. М. Форись

ВСТУП

Актуальність теми. Ключовими викликами для енергетичних компаній по всьому світу є дві основних проблеми – енергозбереження та скорочення викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище. Довгострокові ініціативи світової спільноти, спрямовані на пом'якшення ситуації, яка виникає через викиди парникових газів і глобальне потепління (Монреальський і Кіотський протоколи, Паризька угода в рамках Рамкової конвенції ООН про зміну клімату), вимагають не лише більш активного використання відновлюваних джерел енергії, але й підвищення ефективності використання тепла від промисловості, транспорту та домогосподарств, в тому числі використання всіх доступних енергоресурсів.

Найперспективнішим способом економії палива та використанням відновлюваних джерел є трансформація теплової енергії, яка є ключовою для використання низько-потенційних енергоресурсів та вирішення проблеми гармонізації періодів споживання – виробництва теплової енергії. Існують чотири основних механізми трансформації теплової енергії, такі як: ємнісне, фазово-перехідне, термохімічне та адсорбційне.

Найбільш детально вивчені ємнісне та фазово-перехідне акумулювання теплової енергії через їх простоту. Однак густина акумулювання теплової енергії на основі цих механізмів сильно обмежена властивостями застосовуваних матеріалів. Термохімічний механізм, який базується на оборотній хімічній реакції, можна вважати одним з найбільш перспективних методів зберігання теплової енергії через високу густину запасання енергії. Тим не менш, незважаючи на високе акумулювання теплової енергії, термохімічні матеріали вимагають надзвичайно високої температури регенерації і не демонструють стабільності своїх властивостей під час тривалого циклу.

Перспективність систем адсорбційної трансформації теплової енергії обумовлена їх високою теплою адсорбції та стабільністю адсорбційних середовищ при тривалому і багаторазовому циклюванні. Крім того, адсорбційне перетворення тепла в порівнянні з термохімічним зазвичай передбачає невеликі значення температури регенерації, що відкриває великі потенціальні можливості для економії викопного палива, а також потребує екологічно безпечних робочих рідин. Проте останні досягнення в області адсорбційного перетворення теплової енергії не можна вважати цілком задовільними через незадовільні властивості використовуваних адсорбційних матеріалів. Так, низька максимальна адсорбція або поглинання адсорбату призводить до великого об'єму адсорбенту для забезпечення необхідного теплового навантаження. Потенціал джерела тепла сильно обмежений температурами регенерації, які перевищують 100°C.

Останні дослідження адсорбційного перетворення теплової енергії були зосереджені на виборі серед існуючих сорбентів або синтезі та дослідженні нових матеріалів. Подальший прогрес у адсорбційному перетворенні теплової енергії стане можливим лише при використанні інноваційних

адсорбентів з додатковими властивостями. Композити «сіль – пориста матриця» розглядають, як перспективні матеріали для адсорбційного перетворення тепла через їх високу адсорбційну здатність до звичайних робочих рідин (води, метанолу та аміаку). Незважаючи на велику кількість публікацій, що описують адсорбенти «сіль – пориста матриця» та їх застосування дані є суперечливими. Іншою перешкодою для комерціалізації адсорбційного перетворення теплової енергії є відсутність процедур розрахунку продуктивності адсорбційної установки. Більшість математичних моделей присвячено лише одній фазі роботи адсорбційного перетворювача теплової енергії, тобто адсорбції, що сильно гальмує інтегральну оцінку ефективності та перешкоджає переходу від лабораторного прототипу до повномасштабних приладів і агрегатів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами – дослідження, що подаються, виконувалися відповідно до держбюджетної тематики науково-дослідних робіт «Розробка технологій створення та експлуатації нанокompозитних сорбентів «силікагель-кристалогідрат» для адсорбційних перетворювачів низькопотенційної теплової енергії» (№ держ. реєстрації 0109U000400) та «Енергетичні комплекси поглинання та акумулювання сонячної енергії на основі полімерних колекторів та полімер-неорганічних теплоакumuлюючих матеріалів" (№ держреєстрації 0116U001489)», «Дослідження процесів виробництва та використання енергії з метою підвищення їх ефективності» (№ держреєстрації 0119U002313), «Підвищення ефективності використання енергоресурсів у теплових системах» (№ держреєстрації 0111U008142).

Мета роботи полягає у розвитку науково-практичних основ адсорбційної трансформації теплової енергії для систем теплопостачання, вентиляції та кондиціонування на базі нових високоефективних адсорбційних матеріалів, підвищенні досконалості промислових технологічних процесів акумулювання та трансформації низькопотенційної теплової енергії.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано такі завдання:

- розробити методику проектування обладнання та вибору технології та матеріалів для акумулювання та трансформації низькопотенційної теплової енергії на основі даних, щодо властивостей адсорбентів, джерел теплової енергії та параметрів термодинамічних циклів,
- розробити технологічний процес отримання адсорбентів з густиною запасання енергії більше 2,0 МДж/кг – композиційних матеріалів силікагель-кристалогідрат,
- дослідити оборотні термохімічні реакції нових адсорбентів силікагель-кристалогідрат в циклах сорбції-десорбції,
- дослідити вплив складу адсорбентів на температурні параметри процесу сорбції-десорбції, на основі чого розробити “лінійку” адсорбентів із заданими технологічними властивостями для різних параметрів

термодинамічних циклів акумулювання та трансформації низькопотенційної теплової енергії;

- вивчити термодинамічні цикли адсорбційних перетворювачів теплової енергії з використанням нових адсорбентів;

- розробити теплотехнічні схеми та обладнання акумулювання та трансформації низькопотенційної теплової енергії на основі нових адсорбентів силікагель-кристалогідрат для гарячого водопостачання, опалення та кондиціонування;

- провести техніко-економічне обґрунтування та впровадити розроблені матеріали і технології в енергетичні галузі України.

Об’єкт дослідження – процеси та технології адсорбційної трансформації теплової енергії для систем опалення, гарячого водопостачання, вентиляції та кондиціонування повітря, процеси масо- та теплопереносу в адсорбційних середовищах в трансформаторах теплової енергії при акумулюванні та трансформації енергії.

Предмет дослідження – склад та структура композитних адсорбентів «силікагель – кристалогідрат», експлуатаційні параметри адсорбційних теплотрансформаторів на їх основі для систем гарячого водопостачання, опалення та кондиціонування.

Наукова новизна.

1. Вперше системно проаналізовані основні фактори, які впливають на ефективність експлуатації адсорбційних трансформаторів теплової енергії на основі нових композитних сорбентів типу силікагель-кристалогідрат, а саме властивості джерел теплової енергії, характеристики обладнання, цільове призначення технології акумулювання та трансформації – опалення, гарячого водопостачання, вентиляції та кондиціонування повітря. На основі аналізу вхідних даних розроблено технології отримання адсорбентів з густиною запасання енергії на рівні 2,0-4,0 МДж/кг принцип дії яких полягає у виділенні енергії і за рахунок сорбції і за рахунок фазових переходів і за рахунок теплопереносу.

2. Порівняно ефективність експлуатації адсорбційних теплотрансформаторів при паровому та ультразвуковому зволоженні потоку повітря. Показано перспективність ультразвукового зволоження повітря, яке дозволяє знизити витрати на зволоження повітря більш ніж в 2 рази порівняно з паровим.

3. Вперше отримані залежності температурних параметрів термодинамічних циклів трансформації енергії з використанням композитних сорбентів типу силікагель-кристалогідрат, при яких забезпечується мінімізація енерговитрат з використанням розроблених матеріалів і технологій.

4. Встановлені основні вимоги до адсорбентів для трансформаторів теплової енергії в умовах експлуатації типових систем теплопостачання та вентиляції, а саме температура регенерації в інтервалі 60 – 90°C, що

дозволить використовувати для регенерації адсорбентів джерела енергії з низьким потенціалом та гранична адсорбція більше, ніж 0,5 кг/кг, що забезпечує використання модулів компактних розмірів. Вперше розроблено алгоритм підбору адсорбентів для адсорбційних теплотрансформуючих модулів для систем теплопостачання, вентиляції та кондиціонування.

5. Встановлено основні фактори, які впливають на ефективність експлуатації адсорбційних регенераторів теплоти та вологи, зокрема, тепловий та вологісний коефіцієнти. Визначено основні вимоги до параметрів режиму їх експлуатації.

6. Визначено холодопродуктивність адсорбційного холодильного модуля в умовах експлуатації типової парокомпресійної холодильної установки, та встановлено, що основними факторами, які впливають на його холодопродуктивність та холодильний коефіцієнт адсорбційного є теплове навантаження на конденсатор, а, отже, маса води, яка десорбується та випаровується.

7. Виконано термодинамічний аналіз процесів експлуатації адсорбційного геліокондиціонера та адсорбційної холодильної геліоустановки на основі композитних адсорбентів «силікагель – натрій сульфат» та «силікагель – натрій ацетат». Встановлено основні фактори, які сприяють підвищенню холодильного коефіцієнта циклу за рахунок зменшення витрат на регенерацію адсорбенту, зокрема, підвищенню вмісту солі в композиті, яке підвищує адсорбцію, а отже, і зменшує розмір адсорбційного модуля, та зниження різниці між температурами адсорбенту після адсорбції та температурою регенерації.

8. Встановлено основні фактори, які впливають на ефективність роботи адсорбційного теплового насоса. Виявлено тотожність оптимальних параметрів режимів експлуатації адсорбційного теплового насоса та адсорбційного акумулятора теплової енергії, а також заходів з підвищення ефективності роботи, а саме використання ультразвукового зволоження повітря, яке сприяє підвищенню коефіцієнта перетворювання теплової енергії майже в 2 рази в порівнянні з паровим зволоженням.

9. Отримала подальший розвиток технологія отримання композитних адсорбентів золь – гель методом. Вперше запропоновано методи регулювання розміру частинок композитного адсорбенту в процесі золь-гель синтезу.

Практична цінність.

1. Розроблена технологія золь – гель синтезу композитних адсорбентів «силікагель – кристалогідрат». Синтезовані адсорбенти характеризуються густиною запасання енергії на рівні 2,0-4,0 МДж/кг в залежності до вимог термодинамічного циклу, обраного виходячи з властивостей джерел низькопотенційної енергії, характеристики обладнання, цільового призначення технології акумуляування та трансформації – опалення, гарячого водопостачання, вентиляції та кондиціонування повітря.

2. Запропоновано процедури розрахунків експлуатаційних характеристик адсорбційних теплотрансформаторів, яка включає обчислення

коефіцієнта масопередачі, адсорбції, корисного адсорбційного тепла, теплової потужності для нагрівання адсорбенту, корпусу пристрою, води в зволожувачі, випаровування води, нагрівання адсорбованої води, десорбції та коефіцієнтів корисної дії. Результати розрахунків згідно запропонованої процедури добре узгоджуються з експериментальними даними та дозволяють встановлювати оптимальний тепловий режим роботи адсорбційних трансформаторів теплової енергії в умовах типової системи тепlopостачання, вентиляції та кондиціонування.

3. Запропоновано та впроваджено конструкцію адсорбційного теплового акумулятора відкритого типу, який дозволяє опалювати приміщення площею 100 м². Енергоспоживання при цьому знижується більш, ніж в 2 рази в порівнянні з традиційними агрегатами.

4. Запропоновано та впроваджена конструкція адсорбційного теплоакумуючого пристрою, що дозволяє регенерувати адсорбент за допомогою теплоти відхідних газів при експлуатації котельного агрегату або печі.

5. Розроблено нові конструкції адсорбційних регенераторів теплової енергії та вологи, які дозволяють підтримувати температуру в приміщенні на рівні 20 – 22°C, а відносну вологість – 50 – 60 %, які дозволяють регенерувати адсорбент протягом експлуатації пристрою.

6. Запропоновано конструкцію адсорбційного теплового насосу та випробувано лабораторний прототип пристрою. Показано, що впровадження ультразвукового зволоження потоку повітря сприяє підвищенню ефективності теплового насоса вдвічі.

7. Розроблено конструкцію адсорбційного регенератора теплоти та вологи для підігріву припливного повітря. запропоновано математичну модель та процедури розрахунку основних проектних характеристик адсорбційного регенератора в умовах вентиляційних систем житлових приміщень.

8. Підтверджено переваги нових композитних сорбентів «силікагель – кристалогідрат» в порівнянні з традиційними адсорбентами.

Результати досліджень експлуатаційних характеристик адсорбційних теплотрансформаторів, розроблені процедури та алгоритми розрахунків конструктивних та експлуатаційних характеристик адсорбційних акумуляторів теплової енергії, теплових насосів та регенераторів теплоти та вологи впроваджено для використання в навчальному процесі на кафедрі енергетики Державного вищого навчального закладу «Український державний хіміко-технологічний університет» під час викладання дисциплін «Теплотехнологічні процеси та установки» та «Методологія і організація наукової діяльності».

Практична цінність роботи підтверджена 13 патентами України на корисну модель.

Розробки впроваджені на багатьох підприємствах України.

Особистий внесок здобувача. Основні результати, узагальнення та висновки, наведені в дисертаційній роботі отримані автором особисто. Здобувачем здійснено наукове обґрунтування формулювання проблеми, завдань та програми досліджень, розроблено методику їх проведення. Наукові положення і концепції наукових досліджень сформульовані спільно з науковим консультантом (Сухим К.М.).

У співавторстві з к.т.н. Коломієць О.В. було запропоновано алгоритми розрахунку експлуатаційних характеристик адсорбційного теплового акумулятора відкритого типу, на основі якого було в подальшому розроблено математичні моделі експлуатації адсорбційних пристроїв теплової енергії, які дозволяють оцінити тепловий режим їх роботи.

Апробація

Основні положення та результати представленої дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на: XIII та XIV Всеукраїнської конференції з високомолекулярних сполук (Київ, 2013 та 2018), V Міжнар. наук.-практ. конф. «Інноваційна економіка, інтелектуальна власність та трансфер технологій» (Дніпропетровськ, 2014), XVII міжнародної конференції «Теплотехніка та енергетика в металургії» (Дніпропетровськ, 2014), II Міжнародної науково-практичної конференції (Шостка, 2014), VIII Междунар.научн.-практ. инт.-конф. «Актуальные научные исследования в современном мире» (Переяслав-Хмельницкий, 2015), VII Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми технології неорганічних речовин та енергозбереження» (Дніпро, 2015), XVI Міжнар. конфер. «Удосконалення процесів і обладнання харчових та хімічних виробництв» (Одеса, 2016 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні енерготехнології» (Одеса, 2017 та 2018), II Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності» (Харків, 2017), IV та V Міжнародній науково-технічній конференції «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем» (Дніпро, 2018 та 2019 року), VI Всеукраїнській науково-технічній конференції «Сучасні технології у промисловому виробництві» (Суми, 2019 р.), I, III та IV Всеукр. наук. конф. «Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів ТАСХ» (Дніпро, 2017, 2019 та 2020).

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота включає вступ, 7 розділів, висновки, список використаних джерел та додатки. Дисертаційну роботу викладено на 288 сторінках основного тексту, вона містить 33 таблиць та 106 рисунків. Список джерел налічує 259 найменувань, у тому числі 210 іноземних.

Основні результати дисертаційної роботи висвітлені в 83 друкованих працях: 4 монографії, в тому числі 1 видано в Євросоюзі та 1 в США (індексується в базі Scopus), 2 розділи в колективних монографіях, які видано в Євросоюзі, 43 статті в фахових виданнях, з яких 9 індексуються наукометричними базами Scopus та 1 Web of Science, 6 є періодичними виданнями інших країн, 21 тез доповідей в матеріалах міжнародних та українських конференцій, 13 патентів України на корисну модель.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

В першому розділі проаналізовано літературні дані процесів адсорбційних трансформації, акумулювання та перетворювання низько-потенційної теплової енергії та показано їх переваги перед ємнісними та фазово-перехідними теплоакумуючими матеріалами в результаті більш високої густини запасання енергії, наряду з екологічною безпекою більшості робочих рідин, з яких доволі перспективною є вода. Показано, що адсорбційні теплотрансформатори можна використати для сезонного або добового акумулювання теплової енергії, для підігріву припливного повітря, для охолодження середовищ тощо яка в традиційних, так і в індивідуальних системах опалення, вентиляції та кондиціонування. Показано, що основними перепонами на шляху впровадження адсорбційних теплотрансформаторів в системи теплопостачання є з одного боку відсутність алгоритму, що дозволяє оцінити ефективність роботи пристрою, з іншого відсутність технології отримання матеріалів «пориста матриця – сіль».

Другий розділ присвячено загальним принципам підбору робочих пар в системах теплопостачання, вентиляції та кондиціонування. Розроблено алгоритми підбору робочих пар «адсорбент – адсорбат» для адсорбційних трансформаторів теплової енергії. Визначено, що основними критеріями підбору робочих пар є призначення теплотрансформатора (теплопостачання, підігрів або охолодження припливного повітря, відведення теплоти від охолоджуваного середовища), вид та потенціал джерела теплоти для регенерації адсорбента, наявність контакту людини, адсорбента та адсорбата при експлуатації теплотрансформатора, яка обумовлює необхідність використання нетоксичних та неагресивних речовин та обмежує температуру регенерації адсорбента до 90°C. Наряду з нетоксичністю, відсутністю прямої та опосередкованої дії на людину та навколишнє середовище та низькою корозійною активністю, ключовим напрямком при підборі робочих пар для теплотрансформаторів є теплове навантаження та адсорбційна ємність адсорбента, яка визначає теплоту адсорбції, і, отже, масу та об'єм адсорбента, яка необхідна для компенсації необхідного теплового навантаження, що визначає габаритні розміри адсорбційного модуля. Для холодильних машин та установок основними критеріями підбора робочих пар є температура охолоджуваного середовища, яка визначає вид використовуваного адсорбату – хладоагенту, теплота випаровування хладоагенту, вид та потенціал джерела теплової енергії, який використовується для регенерації адсорбента, гранична адсорбція адсорбента.

Третій розділ присвячено конструктивним та експлуатаційним характеристикам адсорбційних теплотрансформаторів. Було розглянуто експлуатаційні характеристики теплоакумуючого пристрою закритого та відкритого типів (рис. 1 та 2). Обидва пристрої працюють за чотирифазним режимом, який включає нагрівання адсорбенту (теплоакумуючого середовища) від температури навколишнього середовища до температури початку адсорбції (близько 30°C), адсорбція водяної пари адсорбентом (екзотермічний процес), регенерація адсорбента (нагрівання до температури

регенерації та десорбція) охолодження адсорбенту до температури початку адсорбції.

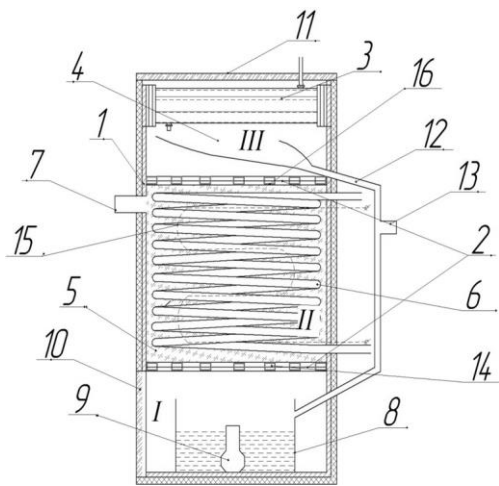


Рис. 1. Конструкція теплоакumuлюючого пристрою закритого типу
1 - теплоізований корпус; 2 - сітчасті перегородки; 3 - конденсатор; 4 - тарілка для збору конденсату; 5 - адсорбційно-десорбційний реактор; 6 - гідралічний контур; 7 - патрубок; 8 - резервуар з водою; 9 - випарник; 10, 11 - кришки; 12 - трубка; 13 - патрубок; 14 - сталеві жалюзі; 15 - резистивний нагрівальний елемент; 16 - сталеві жалюзі

В якості критерію ефективності було використано коефіцієнт корисної дії, який розраховували як відношення корисної теплоти (тобто теплоти адсорбції) та витрат теплоти на експлуатацію пристрою. Для пристрою відкритого закритого Q_{in} витрати теплоти, які розраховували відповідно формулі:

$$Q_{in} = Q_{des} + Q_{ads}^h + Q_{cas}^h + Q_{cp}^h + Q_w^h + Q_{s.w.}^h + Q_w^{ev}, \quad (1)$$

де Q_{des} , Q_{sor}^h , Q_{cas}^h , Q_{cp}^h , Q_w^h , $Q_{s.w.}^h$, Q_w^{ev} – витрати теплоти на десорбцію, нагрівання адсорбента, корпусу приладу, гідралічного контура, води в випарнику та адсорбованої води, та випаровування води, кДж.

Для пристрою відкритого типу витрати теплоти визначали як

$$Q_{in} = Q_{des} + Q_{ads}^h + Q_{cas}^h + Q_w^h + Q_{s.w.}^h + Q_w^{ev} \quad (2)$$

де Q_{des} , Q_{ads}^h , Q_{cas}^h , Q_w^h , $Q_{s.w.}^h$, Q_w^{ev} – теплові витрати на десорбцію, нагрівання адсорбенту, корпусу приладу, води в зволожувачі та адсорбованої води, та випаровування води, кДж.

Пристрої випробували в

двох тестових режимах, які відповідають ввімкненню навантаження електричної енергії вранці або ввечері (перша або друга половина доби). При використанні обох режимів, температура в приміщенні підтримується в межах від 20 °C до 22°C протягом дня або ночі. На графіках середньої температури для обох тестових режимів реєструються два піки, які

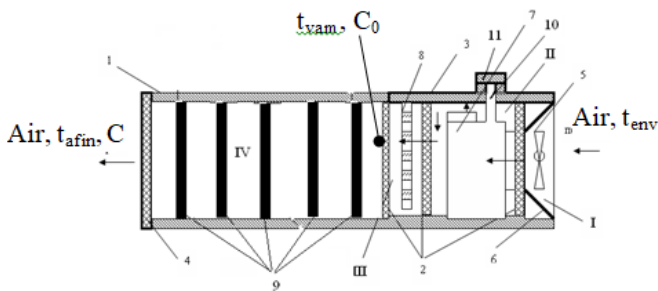


Рис. 2. Лабораторний прототип теплоакumuлятора 1 – теплоізований корпус; 2 - сітчасті перегородки; 3 - теплоізована кришка; 4 – сітчаста кришка; 5 - вентилятор; 6 - напрямний кожух; 7 - зволожувач повітря; 8 - електричний резистивний нагрівальний елемент; 9 - касети з адсорбентом; 11 – кришка патрубка
відповідають розряду та заряду пристрою. Вони реєструються як перший та другий після запуску. При розрядці максимальна температура адсорбенту

становить майже 60°C , що обумовлено охолодженням адсорбенту припливом повітря.

Більш висока температура при заряді обумовлена температурою регенерації композитного адсорбенту. В денні години композит регенерується теплом, що подається сонячним колектором, в нічні години його може подавати елемент опору. Коефіцієнти корисної дії, обчислені із співвідношенням двох пікових коефіцієнтів, складають майже 32% для обох режимів роботи. Ці значення співвідносяться з обчисленими значеннями 33% для тих же умов. Залежності коефіцієнта корисної дії пристрою акумулятора тепла відкритого типу на основі складеного «силікагель – натрій сульфат» від швидкості руху вологого повітря, який обчислено за запропонованим алгоритмом, наведено на рис. 3. Форма цих залежностей виявляється майже ідентичною для теплових акумуляторів закритого та відкритого типів. Зростання коефіцієнта корисної дії акумулятора теплової енергії η відбувається при збільшенні швидкості потоку вологого повітря та його відносним ступенем вологості. Значення η виявилося майже сталим, коли температура регенерації зросла з 90 до 110°C .

Максимальні значення коефіцієнтів корисної дії 55 - 57% встановлені при швидкостях потоку вологого повітря $0,6 - 0,8$ м / с і відносній вологості повітря 40 - 60%. Використання адсорбційного теплоакумуючого пристрою відкритого типу дозволяє зменшити споживання енергії в системі подачі тепла в 10 – 20 разів в порівнянні з традиційними агрегатами.

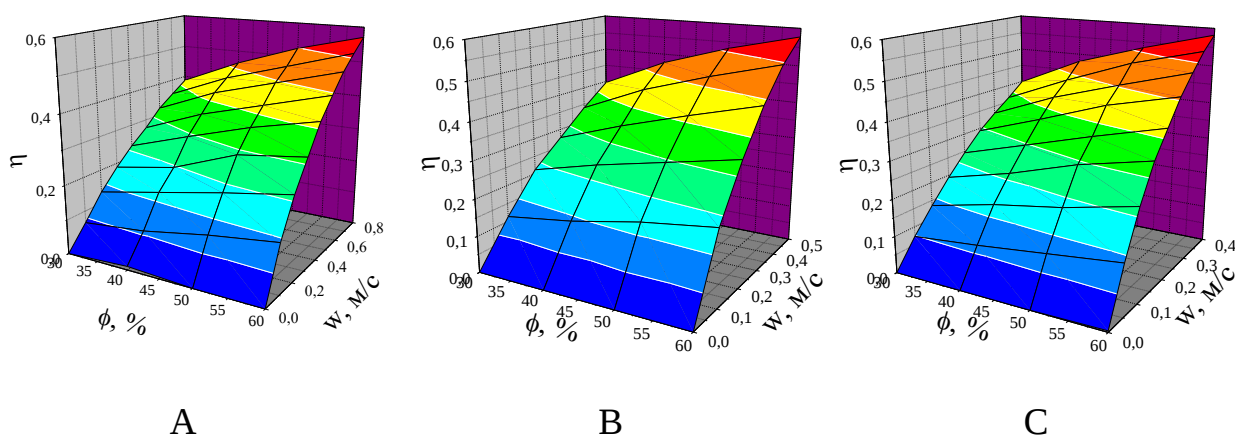


Рис. 3. Залежність коефіцієнта корисної дії адсорбційного теплоакумуючого пристрою відкритого типу від відносної вологості та швидкості потоку вологого повітря. Температури потоку повітря, $^{\circ}\text{C}$: А – 40; В – 50; С – 60. Товщина шару адсорбента 0.5 м.

За його результатами найбільш значущими є витрати на випаровування води (43%) та десорбцію (47%), далі йдуть витрати на нагрівання адсорбованої води (6%), нагрівання води у зволожувачі повітря (3%) і нагрівання корпусу акумулятора теплової енергії (1%). Отже, обмеження інтервалу максимальних коефіцієнтів корисної дії пропонується зменшити за рахунок зміни маси водяної пари, що надходить на шар адсорбенту.

Оптимальні робочі параметри роботи теплоакумуючих приладів зберігання тепла на основі композитного сорбенту «силікагель – натрій

сульфат» вказані як швидкість вологого потоку повітря 0,6 – 0,8 м/с та відносна вологість повітря 40 – 60%, коефіцієнт корисної дії від 53 до 57%.

Тим не менш, діапазон швидкостей повітряного потоку, який відповідає максимальним значенням коефіцієнта корисної дії, доволі вузький. Для розробки методів підвищення коефіцієнта корисної дії було проведено аналіз структури витрат теплоти для роботи пристрою акумулятора відкритого типу.

За умови відповідності подачі води об'єму та абсолютній вологості повітря за формулою $M_{H_2O} = V_{air} \cdot C_0$, на графіку залежності коефіцієнта корисної дії від швидкості повітряного потоку коефіцієнт корисної дії досягає плато на $w = 0,1$ м/с (рис. 4).

Оскільки маса води, що надходить до шару адсорбенту, не тільки залежить від швидкості потоку, але і перевищує значення, відповідне адсорбції водяної пари шаром композиту приблизно в три рази, коефіцієнт корисної дії не перевищує 40%.

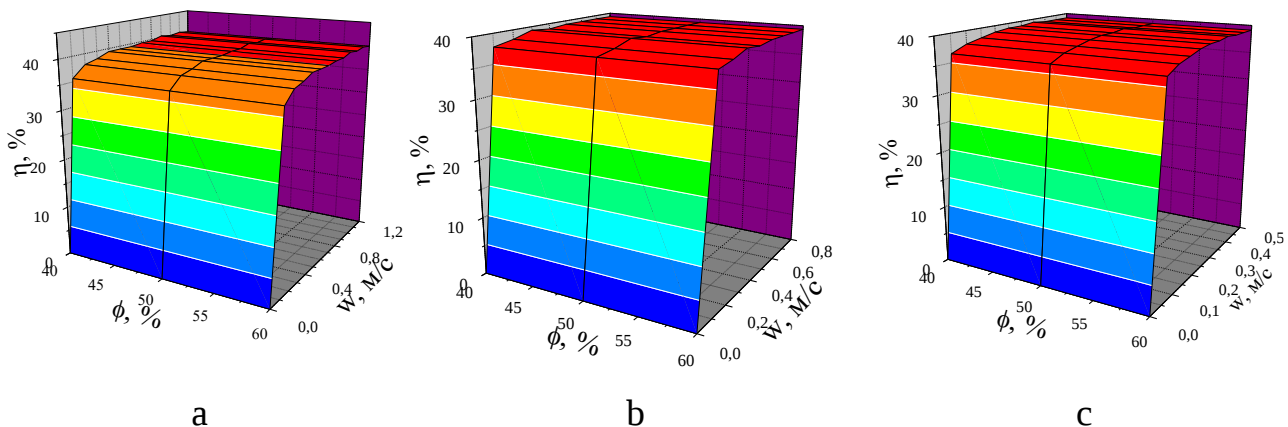


Рис. 4. Вплив швидкості потоку повітря та відносної вологості на коефіцієнт корисної дії теплоакумуючого приладу відкритого типу. Температура повітряного потоку, °C: а - 40, б - 50, с - 60. Товщина шару адсорбенту 0,5 м.

Очевидно, що кількість води, що надходить до шару адсорбенту, з урахуванням впливу абсолютної вологості на адсорбцію, може бути відкоригована регулюванням об'єму повітря шляхом зміни перерізу пристрою акумулятора тепла і, отже, товщина шару адсорбенту. Таким чином, зменшення площі поперечного перерізу з 0,1662 до 0,0831 м² призводить до збільшення коефіцієнта корисної дії з 42 до 50%.

У цьому випадку максимальні значення коефіцієнтів корисної дії спостерігаються в більш широкому діапазоні швидкостей потоку пари порівняно з подачею вологи відповідно до максимальної адсорбції. Однак максимальні значення адсорбції, очевидно, спостерігаються при значеннях $w = 0,5 - 0,8$ м/с при температурі 40 – 60 °C і відносній вологості повітряного потоку не нижче 40 – 50%. Тому для забезпечення максимального теплового навантаження, доцільно експлуатувати пристрій зберігання тепла відповідно до вищезазначених робочих параметрів. Більш перспективним заходом підвищення ефективності адсорбційного приладу зберігання тепла є ультразвукове зволоження повітряного потоку.

Це дозволяє не тільки розширити інтервал швидкості потоку повітря при дотриманні максимальних факторів ефективності, але і збільшити коефіцієнт корисної дії принаймні на 10%. Це підвищення є результатом зміни структури витрат на експлуатацію теплоакumuлюючого пристрою. Витрати на зволоження повітря скорочуються до 1,3 %, а найбільшою статтею витрат стає теплота десорбції 75 %.

Таким чином, за результатами математичного моделювання ефективність адсорбційного приладу зберігання тепла визначається швидкістю потоку вологого повітря, а також його температурою та відносною вологістю, тобто абсолютною вологістю повітря біля входу в шар адсорбенту. Збільшення швидкості сприяє збільшенню коефіцієнта корисної дії за рахунок збільшення обсягу поданого повітря і, отже, кількості води, що надходить в шар адсорбенту, і адсорбції або поглинання води.

Максимальні значення коефіцієнтів корисної дії спостерігаються при швидкостях потоку вологого повітря близько 0,3 – 0,5 м/с і абсолютній вологості повітря 50 – 60%. Використання ультразвукового зволоження може значно зменшити витрати для зволоження повітряного потоку та збільшити коефіцієнт корисної дії адсорбційного приладу зберігання тепла не менше ніж на 10% порівняно з паровим зволоженням.

До основних експлуатаційних параметрів належить і температура повітряного потоку біля вихідного теплоакumuлятора та коефіцієнт корисної дії. Температура повітряного потоку на виході теплоакumuлятора визначається за рівнянням теплового балансу:

$$t_{\text{afin}} = \frac{\Delta H_{\text{ads}} \cdot M_{\text{ads}} + V_{\text{air}} \cdot t_{\text{vam}} \cdot [4.19 \cdot C_0 + C'] + (M_{\text{cor}} \cdot c_{\text{cor}} + M_{\text{ads}} \cdot c_{\text{ads}} + 4.19 \cdot M_{\text{ads}} \cdot A) \cdot (t_{\text{vam}} - 10)}{V_{\text{air}} \cdot C' + V_{\text{air}} \cdot 4.19 \cdot C + (M_{\text{ads}} \cdot c_{\text{ads}} + 4.19 \cdot M_{\text{ads}} \cdot A + M_{\text{cor}} \cdot c_{\text{cor}})} \quad (3)$$

де t_{afin} – температура повітряного потоку біля виходу теплоакumuлятора, °C, V_{air} – об'єм повітря, що проходить через шар адсорбенту, м³, M_{ads} – маса адсорбенту, кг, M_{cor} – маса корпусу пристрою, кг; ΔH_{ads} – теплота адсорбції, кДж/кг, t_{vam} – температура вологого повітря, °C, C' – об'ємна теплоємність повітря, що напливає, кДж/м³ · K, C_0 – початкова абсолютна вологість повітря, кг/м³, C – кінцева абсолютна вологість повітря, що надходить, кг/м³, c_{ads} – питома теплоємність адсорбенту, кДж/кг · K.

Коефіцієнт дифузії D розраховували за формулою:

$$\ln D = -2.95 - 6282.02 \cdot \frac{1}{T} \quad (4)$$

де D – коефіцієнт дифузії, T – абсолютна температура шару адсорбента.

Запропонований алгоритм розрахунку підтверджено експериментальними даними для теплоакumuлятора відкритого типу на основі композиту «силікагель – натрію сульфат». Різниця між експериментальними даними та розрахунковими температурами не перевищує 5°C протягом 1,5 год. розряду. Отже, цей алгоритм доцільний для оцінки теплового режиму теплоакumuлятора відкритого типу.

Потім для традиційної системи вентиляції типового житлового приміщення моделювали роботу адсорбційного теплоакumuлятора на основі

композитів «силікагель – натрію сульфат». Запропонували масу адсорбенту «силікагель – натрію сульфат» 96 кг. Графіки залежності кінцевої температури повітряного потоку біля виходу теплоаккумулятора від часу наведені на рис. 5.

Очевидно, що криві вирівнюються протягом досить великих проміжків часу, що відповідає наближенню до максимальних значень адсорбції та коефіцієнтів ефективності. Час досягнення цього плато зменшується, коли швидкість повітряного потоку, абсолютна вологість і температура повітряного потоку збільшуються. Одночасно зростає температура повітря, що подається у вентилязоване приміщення.

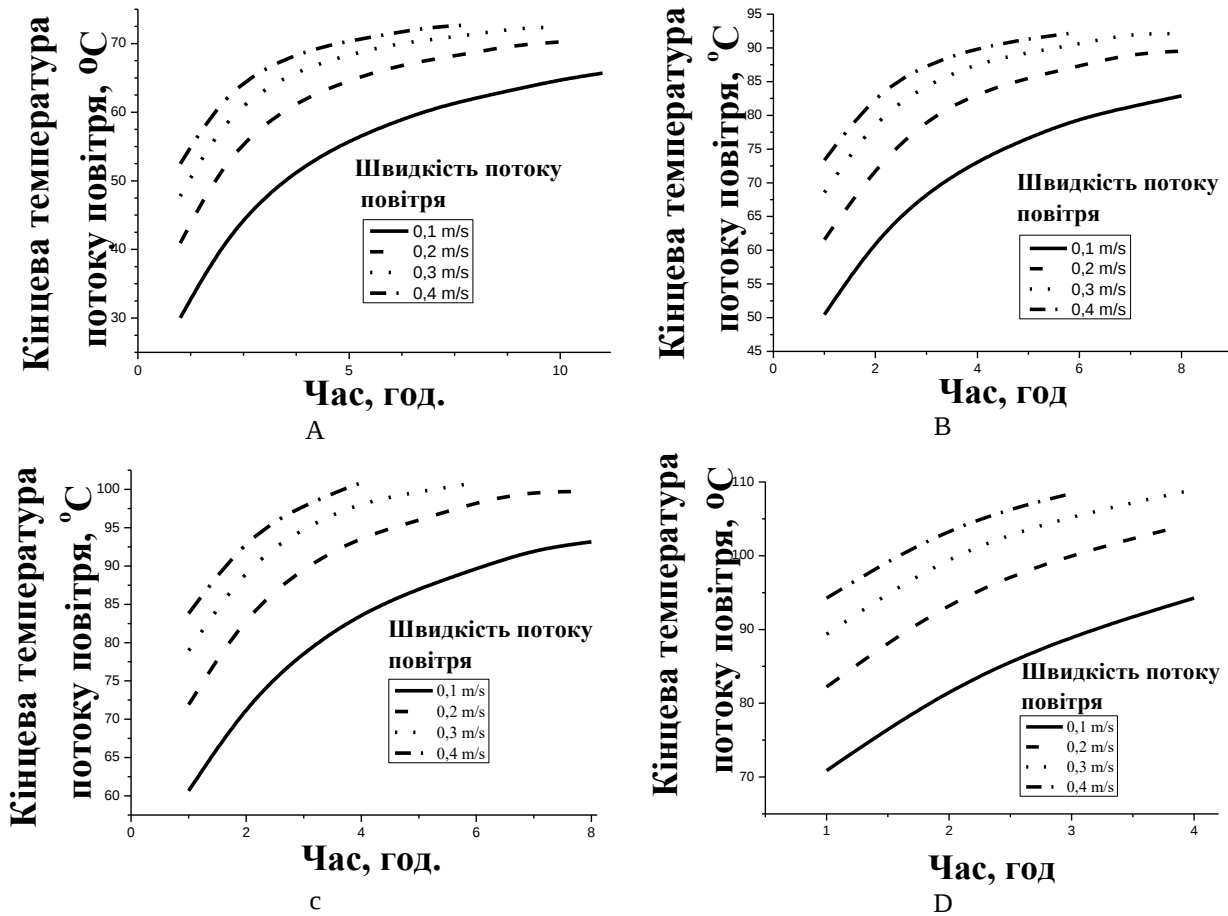


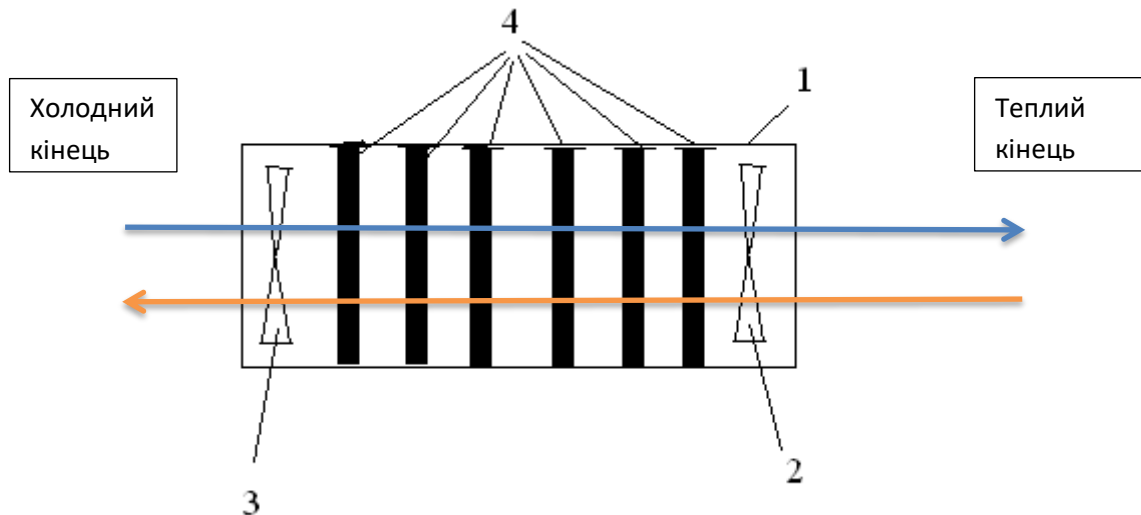
Рис. 5. Криві температура-час для теплоаккумулятора, що працює у відкритому режимі. Адсорбент «силікагель 20 % – натрію сульфат 80 %». Температура повітряного потоку 20°C (а), 40 (b), 50 (c) і 60°C (d). Абсолютна вологість 0,04 кг/м³.

Однак температури повітряного потоку 80 – 90°, близькі до температур регенерації адсорбенту, досягаються досить швидко, протягом 1 – 2 годин після початку розряду, що відповідає значенням адсорбції не більше $0,2A_{\max}$, що призводить до досить низьких значень коефіцієнта корисної дії. Плато при температурах, що не перевищують 80 – 90°C, спостерігається при температурах вихідного повітряного потоку, що подається в теплоаккумулятор, в інтервалі 20 – 30°C при абсолютній вологості припливного повітря 0,03 – 0,04 кг/м³ та швидкості повітряного потоку 0,4 м/с, що відповідає максимальним значенням коефіцієнтів корисної дії 45 – 50 %. Ці умови відповідають максимальним значенням ексергетичного

коефіцієнта корисної дії. Іншим найпростішим технічним рішенням можна вважати скорочення періодів заряду та розряду в 5 разів. За цих умов теплий потік повітря може подаватись у вентилязовані приміщення відповідно до санітарних правил.

Ексергетичний коефіцієнт корисної дії сильно залежить від температури зовнішнього повітря та припливного вологого повітря. Максимальні значення вказані при температурі зовнішнього повітря $-5 - 0^{\circ}\text{C}$ і вологого повітря, що подається до шару адсорбенту $20-30^{\circ}\text{C}$, що є результатом мінімальних значень ексергії, що подається.

Четвертий розділ присвячено адсорбційній регенерації теплоти та вологи в системах вентиляції та кондиціонування. Лабораторний прототип адсорбційного регенератора теплоти та вологи з набором касет з теплоакумуючим матеріалом призначено для підтримання комфортного стану повітря в приміщенні (температура 20°C та відносна ступінь вологості 50 – 60% згідно з Державним стандартом України В EN 15251: 2011) при підтримання постійної концентрації кисню. Принципова схема адсорбційного регенератора теплоти та вологи наведена на рис. 6.



1 – корпус; 2 – вентилятор для подачі; 3 – вентилятор для викиду; 4 – касети з теплоакуючим матеріалом.

Рис. 6. Адсорбційний регенератор теплоти та вологи

Запропонований адсорбційний регенератор теплоти та вологи включає наступні основні блоки: циліндричний корпус (труби) (1), зовнішній (2) та внутрішній (3) вентилятори, касети (4), заповнені адсорбційним теплоакуючим матеріалом. Сумарна товщина касет в прототипу регенератора – 0,6 м. Пристрій для підігріву припливного повітря працює в двох режимах «подача» та «викид», які періодично змінюють один одного. При роботі на «викид» вентилятор 3 всмоктує повітря з приміщення і викидає його в навколишнє середовище. При цьому повітря проходить через касети з теплоакуючим матеріалом 4 і нагріває їх до температури яку потрібно підтримувати у приміщенні.

При роботі в режимі «подача» вентилятор 3 вимикається, а вмикається вентилятор 2, який забирає повітря з навколишнього середовища і пропускає його через касети 3 до вентилязованого приміщення. При проходженні через

шар адсорбенту, зовнішнє повітря нагрівається і залишає в ньому надлишок вологи, таким чином у приміщенні здійснюється вентиляція та підтримуються сталі значення температури і вологості. Даний пристрій може бути використаний в децентралізованих системах вентиляції або для підтримання необхідного температурно-вологісного режиму в пікові періоди. Композитні адсорбенти «силікагель – натрій сульфат» та «силікагель - натрій ацетат» використовуються як теплоакумуючі матеріали. Їх синтезують золь - гель методом.

Ефективність експлуатації пристрою в умовах типової системи вентиляції оцінювали на основі температурного та вологісного коефіцієнтів корисної дії, потужності, яку споживає вентилятор, а також часу досягнення максимальної адсорбції, тобто час насичення адсорбенту. Як критерії ефективності експлуатації регенератора використані температурний коефіцієнт корисної дії, η_{tem} , та вологісний коефіцієнт корисної дії, η_{hum} , тобто коефіцієнти регенерації теплоти та вологи. Алгоритм включає розрахунок температурного коефіцієнта корисної дії, тобто коефіцієнта регенерації теплоти та вологи.

Різниця між експериментальними та розрахунковими температурами нижча на 2 – 3°C та 1 – 5°C на холодних і теплих кінцях регенератора. Різниця між експериментальними та обчисленими значеннями абсолютної вологості не перевищує 1 г/м³ на обох кінцях регенератора. Розрахункові значення коефіцієнтів регенерації та вологості складають відповідно 91 та 59%. Їх експериментальні значення – 96 та 64%. Можна зробити висновок, що ця математична модель є адекватною для якісної оцінки експлуатаційних характеристик адсорбційних регенераторів теплоти та вологи у вентиляційних системах.

Найбільш ефективними адсорбентами для нагрівання припливного повітря, мабуть, є композити, що містять 80 % сульфату натрію та 20% силікагелю. Маса та об'єм композиту «силікагель – натрій сульфат» для подачі розрахункового теплового навантаження оцінюються як 96,5 кг та 0,134 м³. Через можливість роботи з регенераторами доцільно встановити чотири менших адсорбційних регенератора замість одного великого. В результаті маса композиту становить 25 кг на регенератор, об'єм якого становить 0,035 м³.

При збільшенні часу перемикання, тобто зміни напрямку повітряних потоків, зростають амплітуди часово-температурних залежностей як біля холодного, так і теплого кінців пристрою, збільшуються. Аналогічним образом змінюється і концентрація біля холодного (зовнішнього) та теплого (внутрішнього) кінців пристрою. Це призводить до зниження температурного коефіцієнта корисної дії.

В той же час, поблизу теплого кінця регенератора абсолютна вологість залишається майже сталою і вологісний коефіцієнт корисної дії (коефіцієнт регенерації вологи) є постійним і дорівнює 59,1%. Він, вочевидь, визначається лише кінетикою адсорбції та абсолютною вологістю внутрішнього та зовнішнього повітря.

Максимальні значення температурного коефіцієнта корисної дії можна досягти, коли швидкість повітряного потоку та час перемикавання не перевищують 0,22 м/с і 5 хв. відповідно. Час досягнення максимальної адсорбції сильно визначається швидкістю повітряного потоку. Він монотонно зменшується при збільшенні швидкості повітряного потоку через одночасне збільшення об'єму повітря та кількості вологи, що надходить до шару адсорбенту. Найдовші часи досягнення максимальної адсорбції спостерігаються при швидкості повітряного потоку не більш за 0,22 м/с. Цим швидкостям відповідають і максимальні значення часу насичення адсорбенту, тобто досягнення максимальної адсорбції.

Вологісний коефіцієнт корисної дії досягає максимальних значень при абсолютній вологості зовнішнього та внутрішнього повітря 4,0 – 5,0 г/м³ та 2,75 – 3,0 г/м³ відповідно. Час досягнення максимальної адсорбції також залежить від концентрації вологи в зовнішньому та внутрішньому повітрі. Максимальні значення досягання максимальної адсорбції відповідають абсолютним вологостям зовнішнього та внутрішнього повітря 4-5 г/м³ та 1-1,5 г/м³, відповідно.

Конструкційні характеристики адсорбційного регенератора сильно впливають на температурний коефіцієнт корисної дії та втрати тиску.

Споживана потужність стандартних кондиціонерів, що працюють на нагрівання повітря в приміщеннях площею 15 - 140 м², коливається в межах від 0,6 до 2,9 кВт. Більш того, на відміну від адсорбційного регенератора, в режимі нагрівання такі кондиціонери регулюють лише відносну вологість внутрішнього повітря.

Коефіцієнти регенерації тепла приладів на основі композитів «силікагель – натрію сульфат» перевищують ці значення для регенераторів з «силікагель - CH₃COONa» як мінімум на 9 - 10%. Проте абсолютна вологість повітря, що припливає, залишається практично постійною. Таким чином, показники вологовіддачі не змінюються. Вологісний коефіцієнт корисної дії оцінюються як 58% і 59% при використанні «силікагелю - CH₃COONa» і «силікагелю - Na₂SO₄».

Отже, в якості вирішальних параметрів для оптимізації експлуатаційних характеристики адсорбційного регенератора теплоти та вологи можна вважати температурний коефіцієнт корисної дії, час досягнення максимальної адсорбції та споживану потужність вентилятора. Температурний коефіцієнт корисної дії може бути використаний для оцінки конструкції цього пристрою.

Ексергетичний ККД визначається експлуатаційними параметрами регенератора. Як і температурний коефіцієнт регенерації теплоти він підвищується при зменшенні швидкості потоку повітря і часу перемикавання потоків. Максимальні значення ексергетичного ККД встановлені при швидкості потоку повітря 0,12 – 0,22 м/с, які відповідають мінімальним значенням споживаної потужності вентилятора 70 – 250 Вт.

П'ятий розділ присвячено аналізу процесів експлуатації адсорбційних кондиціонерів та холодильних установок. Конструкція адсорбційного сонячного кондиціонера наведена на рис. 7. Основні його модулі включають адсорбер (1), об'єднаний з сонячним колектором, конденсатор (9) та випарник (5), який розміщено в холодильній камері (8). Для зменшення впливу погодних умов на час регенерації в шарі адсорбенту встановлено гідравлічний контур (3). Холодильна камера об'ємом 3 м³ виготовлена із сталі марки 30Х товщиною 0,5 мм. В якості теплоізоляції використовували пінополістирол.

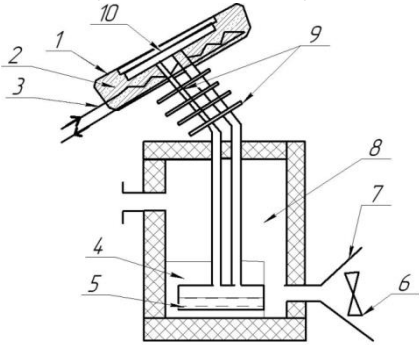


Рис. 7. Адсорбційний кондиціонер: 1 - адсорбер; 2 - теплоакumuлюючий матеріал (адсорбент); 3 - гідравлічний контур; 4 - водяний акумулятор холоду; 5 - випарник; 6 - вентилятор; 7 - кожух; 8 - холодна камера; 9 - конденсатор; 10 - прозорий стільниковий полікарбонатний пластик

Адсорбційного кондиціонер, як і холодильник, працює відповідно до термодинамічного циклу. Експлуатація відбувається в двостадійному режимі. Перша стадія відповідає отриманню холоду (адсорбція та випаровування води).

Водяна пара починає дифундувати через конденсатор до адсорбера, де поглинається шаром адсорбента, що сприяє випаровуванню

води в випарнику (5), і, отже, відведенню теплоти від холодної камери (8), і, отже, від охолоджуваного повітря, який прокачується через холодильну камеру за допомогою вентилятора (6). Через великий об'єм води, що міститься в стінках холодної камери та акумуляторі холоду (4), температура в ній підтримується на рівні 5 - 10°C протягом 10 - 20 годин, поки не почнеться наступний цикл. Температура в адсорбері (1) значно зростає за рахунок адсорбції води адсорбентом (2). Для відведення цього тепла вода подається до контура (3). Гаряча вода може бути підведена споживачеві в систему гарячого водопостачання або опалення або використовується для регенерації адсорбційного матеріалу на другому етапі роботи кондиціонера.

Друга стадія відповідає регенерації адсорбенту (десорбція та конденсація води). Адсорбент (2) нагрівається за допомогою сонячної енергії та/або пропускаючи через контур (3) гарячу воду, нагріту на першій стадії. Отже, вплив погодних умов на час відновлення матеріалу зменшується. Вода збирається в конденсаторі (9) і стікає до випарника (5). Потім починається процес охолодження.

Маса адсорбента для заданої холодопродуктивності, вочевидь, майже в два рази більше для композиту «силікагель – натрій ацетат», оскільки його гранична адсорбція майже в два рази менше, ніж у композита «силікагель – натрій сульфат». Витрати теплоти на регенерацію адсорбентів є практично ідентичними, але необхідна маса композита «силікагель – натрій сульфат» менше в два рази, що вимагає менших витрат на його нагрівання, і, отже

дещо менших значень площі сонячного колектора.

На холодильний коефіцієнт сильно впливає кількість тепла для регенерації композиту Q_3 і, як наслідок, різниця в температурі адсорбенту та температурі регенерації ΔT_1 , яка визначається температурою регенерації. По мірі зменшення різниці температур адсорбента після адсорбції та температури регенерації ΔT_1 спостерігається монотонне зростання холодильного коефіцієнту циклу. Максимальні значення COP встановлюються при $\Delta T_1 = 50^\circ\text{C}$ або $20 - 30^\circ\text{C}$ при використанні композиту «силікагель - натрію сульфат» або «силікагель - натрію ацетат». Вочевидь, основні конструктивні та експлуатаційні характеристики сонячного адсорбційного кондиціонера, які і холодильної установки визначаються властивостями композитного адсорбента.

При застосуванні адсорбентів з нижчими температурами регенерації, наприклад, «силікагель - натрію ацетат» (60°C), можна досягти зменшення теплоти регенерації порівняно з «силікагелем - натрію сульфат» (90°C).

Значення експлуатаційного COP (COP_n) для адсорбційних кондиціонерів на основі обох композитів майже рівні. Тим не менше, COP_n адсорбційних холодильників на основі композитного «силікагелю - натрію ацетату» перевершує пристрої, що використовують «силікагель - натрію сульфат», майже на 1%. Очевидно, що це обумовлено нижчою температурою регенерації композитного «силікагелю - натрію ацетату» порівняно з «силікагелем - Na_2SO_4 ». В той же час, для досягнення необхідних значень холодопродуктивності протягом циклу маса композиту «силікагель - натрій сульфат» в два рази менше в порівнянні з композитом «силікагель - натрій ацетат», що є результатом більшого значення граничної адсорбції.

В розділі 6 розглянуто конструктивні та експлуатаційні характеристики адсорбційного теплового насоса.

Ефективність адсорбційних теплових насосів оцінюється за коефіцієнтом перетворення теплової енергії COP, який дорівнює відношенню теплоти, що подається споживачеві з більш високою температурою, до витраченого при цьому тепла. COP можна розрахувати двома методами:

1) як відношення корисної теплоти, яка дорівнює сумі теплоти адсорбції та теплоти конденсації адсорбата, до суми десорбційного тепла та зовнішнього тепла, що подається на адсорбент під час його нагрівання до температури регенерації (COP_h^c);

2) як відношення корисної теплоти до тепла, що подається сонячним колектором (COP_h^n) (експлуатаційний).

Враховуючи стадії експлуатації адсорбційного теплового насоса запропоновано алгоритм розрахунку для оцінки ефективності роботи адсорбційного теплового насоса. Стадії його експлуатації подібні тепловому акумулятору. Ключеві відмінності полягають:

- 1) в безперервній експлуатації адсорбційного теплового насоса, тоді як для теплового акумулятора можлива пауза між стадіями розряду та заряду;
- 2) використанні теплоти конденсації адсорбата.

Процедура розрахунку експлуатаційних характеристик адсорбційного теплового насосу подібна розрахунку адсорбційного теплоакumuлюючого пристрою.

Вона також передбачає визначення кінцевої концентрації води в повітрі після проходження через шар адсорбента, адсорбції, теплоти адсорбції, витрат на експлуатацію пристрою та розрахунок коефіцієнта перетворення теплової енергії як відношення корисної теплоти та витрат на експлуатацію пристрою, але корисна теплота дорівнює сумі теплоти адсорбції та теплоти конденсації адсорбата, тобто води:

$$Q_{\text{кор}} = M_{\text{ads}} \cdot \Delta H_{\text{ads}} + M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \Delta H_{\text{cond}} \quad (5)$$

Вплив витрати та абсолютної вологості повітря на коефіцієнт перетворення теплової енергії адсорбційного теплового насосу практично ідентичний коефіцієнту корисної дії адсорбційного теплового акумулятора. Максимальні значення коефіцієнта перетворення теплової енергії відповідають витраті повітря 0,08 – 0,1 м³/с та абсолютній вологості повітря 0,03 – 0,04 кг/м³ на вході до шару адсорбента.

При скиданні теплоти конденсації до навколишнього середовища коефіцієнт перетворення теплової енергії практично співпадає з аналогічними величинами для адсорбційних теплових акумуляторів і більше, ніж в два рази менше в порівнянні з величиною коефіцієнта перетворення теплової енергії при використанні теплоти конденсації.

Підвищення температури потоку вологого повітря практично не впливає на величину коефіцієнта перетворення теплової енергії, оскільки ключовим фактором в даному випадку є кількість випаровуваної води для зволоження повітря, що зростання якої, тобто підвищення абсолютної вологості та витрати повітря, яка подається до шару адсорбента, сприяє підвищенню адсорбції, а отже, теплоти адсорбції та теплоти конденсації. Результати розрахунку наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Коефіцієнт перетворення енергії адсорбційного теплового насосу при використанні ультразвукового зволоження повітря

Місяць	Загальний усереднений потік сонячної радіації (кВт-ч/м ²)	«силікагель – Na ₂ SO ₄ »		«силікагель – CH ₃ COONa»	
		COP _h ^c	COP _h ⁿ	COP _h ^c	COP _h ⁿ
Травень	5.99	2.084	1.130	2.021	1.189
Червень	5.86	2.084	1.133	2.021	1.193
Липень	6.06	2.084	1.128	2.021	1.187
Серпень	5.66	2.084	1.137	2.021	1.200
Вересень	4.41	2.084	1.176	2.021	1.257

Зазначається, що COP_c та COP_hⁿ адсорбційних теплових насосів на основі обох композитних сорбентів мають практично однакову величину. Це обумовлено нижчою температурою регенерації композиційного «силікагелю – ацетату натрію» (60°C) порівняно з «силікагелем – сульфатом натрію»

(90°C). Незначне зменшення COP_c при застосуванні композиційного «силікагелю – CH_3COONa » є наслідком меншої адсорбційної здатності порівняно з «силікагелем – Na_2SO_4 ». Більш високі значення COP_h^n при використанні композиційного «силікагелю – CH_3COONa » обумовлені його нижчою температурою регенерації.

Ультразвукове зволоження повітря, яке подається до шару адсорбенту, сприяє підвищенню коефіцієнта корисної дії адсорбційного теплового насосу не менш, ніж в два рази в порівнянні з паровим зволоженням. Після регенерації сухий композитний адсорбент має доволі високу температуру. Для композита «силікагель – натрій сульфат» вона, як відомо, складає, не менш за 90°C. Охолодження композитного матеріалу може здійснюватись, перш за все, шляхом подачі холодної води – звичайним шляхом (тобто проточну), або шляхом циркуляції по гідравлічному контуру.

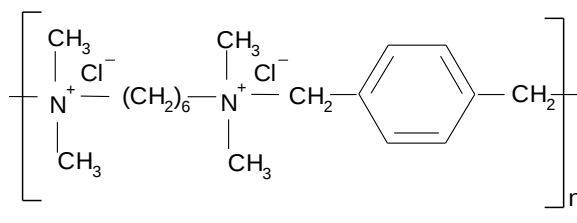
Показано, що швидкість охолодження визначається перш за все об'ємом води, яка нагрівається в гідравлічному контурі. Найменший час відповідає 75 л води, яка циркулює в гідравлічному контурі. Температура води при цьому складає 20 – 30°C в залежності від температури регенерації, яка змінюється в інтервалі 90 – 110°C. При зменшенні об'єму води, яка циркулює в контурі, час охолодження підвищується.

При використанні за першим варіантом корисну теплоту можна розрахувати як:

$$Q_{кор} = M_{ads} \cdot \Delta H_{ads} + M_{H_2O} \cdot \Delta H_{cond} + M_{конт}^{води} \times c_{ср.в} \times (t_{вих} - t_{в}^{поч}) \quad (5)$$

В цих умовах коефіцієнт перетворення теплоти при підвищенні витрати повітря та його абсолютної вологості також досягає максимальних значень при абсолютній вологості близько 0,04 кг/м³ та витраті повітря в інтервалі 0,075 – 0,1 м³/с. Власне кількість теплоти, яка отримана при підігріві води незначна в порівнянні з теплотою адсорбції та конденсації. І, отже, величина коефіцієнта перетворення теплоти при цьому підвищується лише на 1 %.

В сьомому розділі запропоновано метод темплатного синтезу композитних матеріалів шляхом гідролізу силікатного прекурсуру – тетраетоксисилану, який проводиться згідно модифікованого методу Штобера в спиртово-аміачному середовищі з наступним мольним співвідношенням компонентів: 1ТЕОС:0,3Х:11NH₃:144H₂O:58C₂H₅ОН, де Х – темплатний агент (як темплатний агент використовували (а) – цетилтриметиламонійбромід (C₁₆ТМАВr), (b) – суміш C₁₆ТМАВr та полііонену, (c) – полііонен І-4Me-Ph наступної будови:

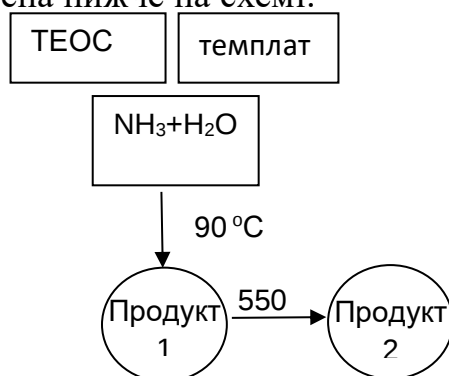


). Співвідношення ТЕОС: темплатний агент зберігається незмінним для всієї серії дослідів. При темплатному синтезі відбувається взаємодія силікат-аніонів з амонієвими катіонами, тому враховано той факт, що молекула C₁₆ТМАВr містить один четвертинний атом азоту, а елементарна ланка полііонена два. У таблиці 2 наведені склади темплатних агентів.

Таблиця 2 - Склад темплатних агентів, які використовувалися під час синтезу

Темплатний агент	Мольне спів- відношення TEOS/ темплат- ний агент	Вміст полііонену в темплатному агенті, мол. %
C ₁₆ TMABr	0.3	-
C ₁₆ TMABr + I-4Me-Ph	0.3	1
C ₁₆ TMABr + I-4Me-Ph	0.3	10
C ₁₆ TMABr + I-4Me-Ph	0.3	33
I-4Me-Ph	0.3	100

Схема синтезу наведена нижче на схемі:



Результати диференційно-термічного аналізу нанокompозитів з вмістом полііонену у якості темплатного агента у кількості 33 та 100% представлені на рис. 8.

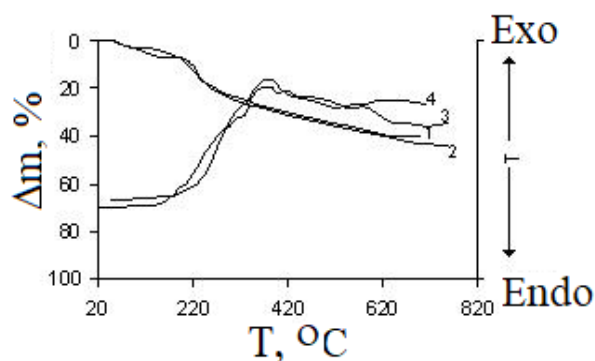


Рис. 8. TG-(1, 2) та ДТА-криві (3, 4) для нанокompозитів з вмістом полііонену у якості темплатного агента у кількості 33 (1, 3) та 100% (2, 4): 1 – кількість темплатного агента 33 %; 2 – кількість темплатного агента 100 %; 3 – кількість темплатного агента 33 %; 4 – кількість темплатного агента 100 %

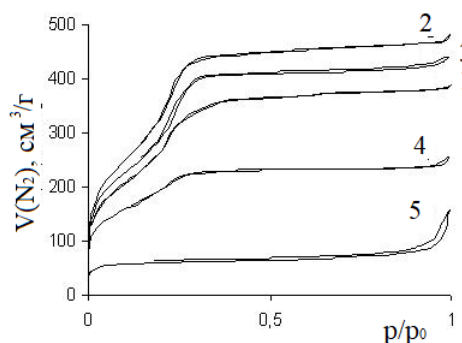


Рис. 9. Ізотерми адсорбції азоту синтезованих нанокompозитів з різним вмістом полііонену у темплатному агенті: 1 – вміст полііонену у темплатному агенті 0 %; 2 – вміст полііонену у темплатному агенті 1 %; 3 – вміст полііонену у темплатному агенті 10 %; 4 – вміст полііонену у темплатному агенті 33 %; 5 – вміст полііонену у темплатному агенті 100 %

TG та ДТА-криві демонструють типовий профіль розкладу з початковою втратою маси приблизно 5 % при температурі менше 100°C, що

пов'язано з видаленням залишкової води, спирту та аміаку. Головна втрата маси (приблизно 35 %) з екзотермічними ефектами спостерігається у діапазоні 200-700°C та пов'язана з розкладом темплатного агенту..

В діапазоні температур 200-250°C спостерігається стрімка втрата маси (20 %), яка уповільнюється в діапазоні 250-700°C, що можна пояснити взаємодією між поверхнею силікату та продуктами розкладу органічних темплатів. Ізотерми адсорбції азоту синтезованих нанокмполіітів представлені на рис. 9.

Як і для інших мезопористих кремнеземів типу MCM-41, на ізотермах нанокмполіітів з вмістом полііонену у темплатній складовій від 1 до 10% можна виділити три характерні області. В області I при малому відносному тиску азоту (p/p_0) відбувається адсорбція на всій доступній зовнішній поверхні зразка. Особливість області II — досить крутий підйом в інтервалі $p/p_0 = 0,15-0,27$, що може бути пояснено початком капілярної конденсації всередині мезопор. Незначна ширина області II свідчить про однорідність пор за розмірами. При більших значеннях p/p_0 починається область III, де адсорбція виходить на насичення. Криві десорбції на ізотермах практично збігаються з адсорбційними кривими і вираженої петлі гістерезису не спостерігається. Розраховані за рівнянням БЕТ питомі поверхні зразків складають 800-1200 м²/г, розміри пор зразків знаходяться в межах 23-25 Å.

Подальше збільшення вмісту полііонену у темплатній складовій до 33 % супроводжується зменшенням питомої поверхні зразків до 700 м²/г, розміри пор зменшуються до 21 Å, при цьому з'являється широкий пік у діапазоні 500-1000 Å. Область капілярного ущільнення стала слабо вираженою, і це може бути пояснено зменшенням мезопор. Адсорбційні ізотерми нанокмполііту, синтезованого з використанням полііонену у якості темплатного агенту свідчать про низьку питому поверхню зразка (240 м²/г) та широкий розподіл пор за розмірами в діапазоні 100-1000Å.

На кривих розсіювання рентгенівських променів в діапазоні кутів від 0 до 10°. Для зразків синтезованих з малим вмістом полііонену у темплатній складовій (до 10 %) наявні три рефлекси в діапазоні 2.5-7.0°, що відповідають індексації (100), (110) і (200) і характеризують упорядковану гексагональну структуру пор. Використовуючи значення d_{100} , по формулі $a_0 = 2d_{100}/3^{0,5}$ розраховали параметр решітки (відстань між центрами пор), що складає 4 нм.

З огляду на те, що подібні кремнеземні матриці мають товщину стінок близько 1 нм, діаметр пор синтезованого зразка дорівнює 3 нм, що узгоджується з розрахунками розмірів пор, наведеними вище. На дифрактограмі зразка з вмістом полііонену в темплатному агенті 33% наявний лише один слабкий пік, а для зразка, де використовувався виключно полііонен, як темплат піки взагалі відсутні, що свідчить про аморфний характер ближньої структури.

Показано, що структурні параметри синтезованих нанокмполіітів впливають залежать від вмісту полііонена в темплатному агенті. Так, до 10 % спостерігається гексагональна організована структура пор, при вмісті 33 % -

слабо організована (при цьому питома площа поверхні зменшується на третину), а при 100 % - неупорядкована (питома площа поверхні знижується більш, ніж в 1.5 рази).

На мікрофотографіях часток синтезованих нанокмполіітів, отримані за допомогою скануючої електронної мікроскопії, можна бачити, що зразки з низьким вмістом полііонену у темплатній складовій утворені з досить однорідних часток правильної сферичної форми із середнім діаметром 0,5 мкм. Підвищення вмісту полііонену у темплатній складовій приводить до зменшення діаметру пор та утворенню нерегулярної аморфної структури.

Отже, за допомогою модифікованого методу Штобера з використанням цетилтриметиламонійброміда та полііонена у якості темплатних агентів розроблена методика синтезу однорідномезопористих кремнеземних матриць на основі тетраетоксисилану з упорядкованою гексагональною структурою пор, високим значенням питомої поверхні й однорідною сферичною грануляцією часток.

ВИСНОВКИ

1. Розглянуто основні принципи створення та експлуатації адсорбційних трансформаторів теплової енергії для систем теплопостачання, вентиляції та кондиціонування. Розроблено загальні принципи та алгоритми підбору робочих пар «адсорбент – адсорбат» для адсорбційних трансформаторів теплової енергії типу “силікагель-кристалогідрат”. Обґрунтовано, що основними критеріями підбору робочих пар є призначення теплотрансформатора (теплопостачання, підігрів або охолодження припливного повітря, відведення теплоти від охолоджуваного середовища), вид та потенціал джерела теплоти для регенерації адсорбента, наявність контакту людини, адсорбента та адсорбата при експлуатації теплотрансформатора, яка обумовлює необхідність використання нетоксичних та неагресивних речовин та обмежує температуру регенерації адсорбента до 90°C. Показано, що головним чинником при підборі робочих пар для теплотрансформаторів є теплове навантаження та адсорбційна ємність адсорбента, яка визначає теплоту адсорбції, і, отже, масу та об’єм адсорбента, яка необхідна для компенсації необхідного теплового навантаження, що, в свою чергу, визначає габаритні розміри адсорбційного модуля.

2. Проаналізовано кореляцію теплового навантаження та теплоти адсорбції і маси та об’єму адсорбента, які необхідні для його компенсації. Доведена гранична ефективність використання адсорбентів з вологопоглинанням не менш за 0,5 – 1,0 кг/кг для компенсації теплових навантажень потужністю 300 – 400 МДж/добу, які зазвичай і є типовими при опалюванні та вентиляції житлових та складських приміщень. Доведено, що найбільш перспективними матеріалами, які задовольняють цим вимогам є синтезовані композити силікагель-кристалогідрат. Показано, що ключовими факторами, які впливають на властивості подібних матеріалів є сіль, яка утворює кристалогідрат, її вміст в композиті, що визначається методом його синтезу має бути не менше 60%. Підтверджені перспективність та переваги

золь – гель методів отримання композитних адсорбентів перед вологим та сухим імпрегнуванням.

3. Розроблено метод темплатного золь-гель синтезу композитних матеріалів типу “силікагель-кристалогідрат”, який передбачає гідроліз силікатних прекурсорів – тетраетоксисилану або силікатів натрію у кислотних середовищах з одночасним утворенням солей сульфату або ацетату натрію і кремній-кисневої матриці. В якості темплатних агентів – структуроутворюючих добавок використовувалися полімерні четвертинні амонієві солі. Проаналізовано вплив співвідношення води, кислоти та силікатних прекурсорів, вмісту полііонена на розподіл пор в синтезованому нанокompозиті за рахунок взаємодії позитивно заряджених четвертинних атомів азоту з негативно зарядженими макроаніонами полікремнієвої кислоти, що утворюється в результаті каталітичного гідролізу силікатних прекурсорів з утворенням композитних адсорбентів типу “силікагель-кристалогідрат”. Розроблено технологію синтезу композитних адсорбентів типу “силікагель-кристалогідрат” з вмістом кристалогідрату від 40 до 80% з розміром гранул від 0,5 до 3,0 мм для використання у теплотрансформаторах різного призначення.

4. Встановлено основні фактори, які впливають на ефективність роботи адсорбційного теплоакumuлюючого модуля: конструкція приладу, швидкість потоку повітря, температура та вологість потоку припливного повітря, а саме абсолютна вологість припливного повітря має бути не меншою за $0,03 \text{ кг/м}^3$, швидкість повітряного потоку $0,4\text{--}0,6 \text{ м/с}$, температура $20\text{--}30^\circ\text{C}$. В цих умовах кінцеві температури $65\text{--}80^\circ\text{C}$ досягаються протягом 6 – 7 годин, що відповідає максимальним значенням коефіцієнтів корисної дії 45 – 70 %. Запропоновано інше технічне рішення – скорочення періодів заряду та розряду в 5 разів, що дозволить подавати потік теплого повітря до вентильованих приміщень відповідно до санітарних правил та норм. Показано, що запропонований режим експлуатації теплоакumuлюючого пристрою відповідає максимальним значенням, як коефіцієнта корисної дії, так і ексергетичного коефіцієнта корисної дії.

5. Встановлено, що ключовими статтями витрат на експлуатацію адсорбційного модуля є випаровування води та десорбція (регенерація сорбента після використання), які складають 43% та 48%, відповідно. Досліджено підвищення ефективності експлуатації адсорбційного теплотрансформатора відкритого типу при використанні ультразвукового зволоження не менш, ніж на 25 % за рахунок зниження витрат на зволоження повітря.

6. Спроековано, виготовлено та досліджено роботу адсорбційних регенераторів тепла та вологи на основі композитних адсорбентів «силікагель – натрій сульфат» та «силікагель – натрій ацетат». Проведена симуляція процесів експлуатації адсорбційних регенераторів теплоти і вологи на основі композитів «силікагель – натрій сульфат» та «силікагель – натрій ацетат» в умовах типової системи вентиляції житлових приміщень. Встановлена залежність величини коефіцієнта регенерації тепла від швидкості повітряного потоку та часу перемикання потоків. Оптимальними значеннями часу перемикання потоків і швидкості повітряного потоку, які

відповідали максимальним значенням коефіцієнта регенерації тепла та ексергетичного коефіцієнта корисної дії встановлені не більше 5 хв. і 0,12 – 0,22 м/с.

7. Проведено дослідження процесів експлуатації адсорбційних геліокондиціонерів та адсорбційної холодильної геліоустановки на основі композитних адсорбентів «силікагель – натрій сульфат» та «силікагель – натрій ацетат». Визначено основні фактори, які впливають на холодильний коефіцієнт циклу: склад адсорбенту (вміст солі), а також різниця між температурами адсорбента після адсорбції та температурою регенерації. Показано збільшення холодильного коефіцієнту циклу при зростанні вмісту натрій сульфату в композиті. Підтверджено кореляцію режиму процесу регенерації композита та холодильним коефіцієнтом установки. Встановлено зростання величини холодильного коефіцієнту при зменшенні різниці температур адсорбенту та температури регенерації ΔT_1 . Максимальні значення холодильного коефіцієнта, які спостерігалися, відповідають $\Delta T_1 = 55^\circ\text{C}$ для композитів, які містять близько, мас. %: силікагель – 20 та натрій сульфат – 80.

8. Запропоновано використання теплоти адсорбції для підігріву теплоносія (води) який використовується для підігріву адсорбента при регенерації. Розроблено схему утилізації теплоти адсорбції. Показана можливість підігріву води за рахунок теплоти адсорбції до $50 - 90^\circ\text{C}$ при цьому маса води дорівнює 187,92 – 766,64 кг при холодопродуктивності 89,5 – 358 МДж/добу, і, отже масам адсорбента «силікагель 20 % – натрій сульфат 80%» 53,91 – 217,56 відповідно. Встановлено, що використання акумульованої теплоти близько 6,5 – 53,9 МДж на регенерацію та підігрів адсорбента дозволяє знизити площу сонячного колектора близько на 2 м^2 , що сприяє підвищенню експлуатаційного холодильного коефіцієнта на 0,05–1,5 %.

9. Показано підвищення ефективності процесів утилізації низькопотенційної теплової енергії при експлуатації парових компресійних холодильних установок. Запропонована схема парової компресійної холодильної установки з адсорбційним холодильним модулем. Оцінено холодопродуктивність адсорбційного холодильного модуля в умовах експлуатації типової парокомпресійної холодильної установки. Показано, що холодопродуктивність та холодильний коефіцієнт адсорбційного холодильного модуля визначаються тепловим навантаженням на конденсатор, і, отже, масою води, яка десорбується та випаровується.

10. Визначено основні фактори, які впливають на ефективність його роботи адсорбційного теплового насоса. Показано тотожність параметрів режимів експлуатації адсорбційного теплового насоса та адсорбційного акумулятора теплової енергії – витрата повітря $0,08 - 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ та абсолютна вологості повітря $0,03 - 0,04 \text{ кг}/\text{м}^3$, які дозволяють здійснювати процес експлуатації найбільш ефективно. Температуру потоку вологого повітря, який направляється до шару адсорбента можна підтримувати на рівні $20 - 40^\circ\text{C}$. Показано, що використання ультразвукового зволоження повітря дозволяє підвищити коефіцієнт адсорбційного перетворення теплової енергії майже в 2 рази в порівнянні з паровим зволоженням.

12. Впроваджено розроблені адсорбційні пристрої на підприємствах України (регенератори, теплові насоси, теплові акумулятори). Показано, що впровадження дозволяє знизити вартість однієї Гкал теплової енергії в 2 – 3 рази порівняно з тепловою енергією, отриманою при спалюванні газу або вугілля.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії

1. Сухий К.М., Коломієць О.В., Бесяновська О.А., Сергієнко Я.О., Суха І.В., Губинський М.В. Композитні сорбенти «силікагель – кристалогідрат». Синтез. Властивості. Використання / Монографія. – Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2021. – 196 с. *Дисертантом проаналізовано основні стадії роботи адсорбційних модулів на основі композитів «силікагель – кристалогідрат» та встановлено кореляцію властивості адсорбента – ефективність роботи адсорбційного теплоакумуляуючого модуля.*

2. Sukhyu, K.M. Technology Development for Adsorptive Heat Energy Converters: Emerging Research and Opportunities. / K.M. Sukhyu, E.A. Belyanovskaya, M.P. Sukhyu. – San Fransisco: IGI-GLOBAL, USA, 2020 – 328 pp. (Індексується в Scopus). *Дисертантом проведено аналіз літературних джерел за тематикою дослідження, розроблено алгоритми розробки конструктивних та визначення експлуатаційних характеристик, а також критеріїв ефективності адсорбційних теплотрансформаторів.* <https://www.igi-global.com/book/technology-development-adsorptive-heat-energy/244455#table-of-contents>

3. Sukhyu K.M., Belyanovskaya E.A., Kolomiyets E.V. Design and performance of adsorptive transformers of heat energy. – Riga, Latvia: LAP Lambert Academic Publishing, 2018. – 117 p. *Дисертантом проаналізовано режими експлуатації адсорбційних трансформаторів теплової енергії, запропоновано основні алгоритми та процедури розрахунку їх експлуатаційних характеристик.*

4. Сухий К.М., Козлов Я.М., Бесяновська О.А., Сухий М.П. Системи акумуляування і трансформації сонячної енергії: Монографія/ Сухий К.М., Козлов Я.М., Бесяновська О.А., Сухий М.П. – Д.: ДВНЗ УДХТУ, 2017. – 168 с. *Дисертантом розглянуто можливості використання адсорбційних теплотрансформаторів для поглинання, акумуляування та перетворення сонячної енергії.*

Розділи монографій, які видано в Євросоюзі

1. Belyanovskaya E.A., Lytovchenko R.D., Sukhyu K.M., Prokopenko E.M., Yeromin O.O., Sukhyu M.P. Improving the Performance of Open-Type Adsorptive Converters of Heat Energy for Heating Inflow Air // Wissenschaft für den modernen menschen: technik und technologie, informatik, sicherheit. Book 1. Part 1 / [team of authors: Choporov O.N., Lvovich I.Y., Osadchuk A.V., Preobrazhenskiy A.P., Romanyuk O.N., Sukhyu K.M. and etc.]. – Karlsruhe:

NetAkhatAV, 2020 – Р. 34 – 51 *Дисертантом розглянуто режими експлуатації адсорбційних теплотрансформаторів відкритого типу для підігріву припливного повітря, запропоновано та проаналізовано заходи для підвищення ефективності їх експлуатації.*

2. Belyanovskaya E., Sukhyu K., Kolomiyets E., Gubinskyi M. Operating characteristics of heat conversion units in heat supply system // The Actual Problems of the World Today. – Vol. 2. – London: Sciemcee Publishing, 2019. – Р. 207 – 219. *Дисертантом проаналізовано процеси експлуатації адсорбційних теплових акумуляторів, встановлено основні статті витрат на експлуатацію, запропоновано заходи для підвищення ефективності їх роботи.*

Scopus

1. Rimar M., Sukhyu K., Belyanovskaya E., Yeromin O., Prokopenko E., Kulikov A., Fedak M., Frolova L., Pustovoy G., Kulikova O., Savko V. Selection Criteria of Working Pairs Adsorbent – Adsorbate for Thermal Energy Transformers // MM Science Journal. – 2022. – № 12. – Р. 6246 – 6250. *Дисертантом запропоновано основні критерії та розроблено алгоритми підбору адсорбентів для систем теплопостачання, вентиляції та кондиціонування.*

2. Belyanovskaya, E.A., Rimár, M., Lytovchenko R.D., Variny M.V., Sukhyu K.M., Yeromin O.O., Sykhyu M. P, Prokopenko E. M., , Sukha I.V., Gubinskyi M. V., Kizek, J. Performance of Adsorptive Heat-Moisture Regenerator Based on Composites 'Silica Gel – Sodium Sulphate' // Sustainability. – 2020. – Vol. 12. – Р. 5611. *Дисертантом допрацьовано математичну модель роботи адсорбційного регенератора теплоти та вологи, оцінено гідравлічний опір шару адсорбенту та потужність допоміжних пристроїв*

3. Serhiienko, Yana O. Technology of obtaining new materials for adsorptive heat energy transformation type «silica gel – crystalline hydrate»/ Yana O. Serhiienko, Kostyantyn M. Sukhyu, Elena A. Belyanovskaya, Elena V. Kolomiyets, Mykhailo V. Gubynskyi, Olga I. Tkalya, Irina V. Sukha, Oleksandr V. Zaichuk // J. Chem. and Chem. Technology. – 2019. – Vol. 27, № 2. – Р. 239 – 246. <http://chemistry.dnu.dp.ua/issue/view/08192701> *Дисертантом сформульовано основні вимоги до адсорбентів, за участю аспіранта Я.О. Сергієнко сплановано основні стадії синтезу композитних адсорбентів.*

4. Belyanovskaya, E.A., Lytovchenko R.D., Sukhyu K.M., Yeremin O. O., Sukha I. V., Prokopenko E.M. Operating regime of adsorptive heat-moisture regenerators based on composites «silica gel – sodium sulphate» and «silica gel – sodium acetate» // J. Chem. and Chem. Technology – 2019. – Vol. 27, № 2. – Р. 158 – 168. <http://chemistry.dnu.dp.ua/issue/view/08192701> *Дисертантом проаналізовано основні стадії експлуатації адсорбційного регенератора теплоти та вологи, розроблено математичну модель роботи, перевірено її адекватність, запропоновано алгоритм розрахунку експлуатаційних характеристик адсорбційного регенератора теплоти та вологи, порівняно*

ефективність роботи модулів на основі композитів «силікагель – натрій сульфат» та «силікагель – натрій ацетат».

5. Sukhyu K., Belyanovskaya E., Kovalenko V., Kotok V., Sukhyu M., Kolomiyets E., Gubynskyi M., Yeromin O., Prokopenko O. The study of properties of composite adsorptive materials “silica gel – crystalline hydrate” for heat storage devices // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – Vol. 91, № 1. – P. 52 – 58. (DOI: 10.15587/1729-4061.2018.123896) *Дисертантом проведено дослідження властивостей композитних адсорбентів «силікагель – кристалогідрат» та встановлено кореляцію теплоти адсорбції та складу адсорбента.*

6. Sukhyu K.M., Belyanovskaya E.A., Sukha I.V., Kolomiyets E.V., Gavrillko A.V., Sukhyu M.P. Solar Adsorptive Chiller based on Composite Sorbent ‘Silica Gel – Sodium Acetate’, synthesized by Sol – Gel Method // Вопросы химии и химической технологии. – 2015. – Т. 6 (104). – С. 80 – 86. *Дисертантом розглянуто основні стадії процесів експлуатації адсорбційних холодильних установок на основі композиту «силікагель – натрій сульфат» та порівняно основні критерії оцінки їх ефективності.*

7. Sukhyu K.M., Gomza Yu.P., Belyanovskaya E.A., Klepko V.V., Shilova O.A., Sukhyu M.P., Gavrillko A.V. Proton-Conducting Organic-Inorganic Silicophosphates doped by Polyionenes // Вопросы химии и химической технологии. – 2015. – Т. 5 (103). – С. 95 – 102. *Дисертантом досліджено вплив полііоненів на швидкість реакції гідролітичної конденсації тетраетоксисилану.*

8. Sukhyu Kostyantyn M., Gomza Yuri P., Belyanovskaya Elena A., Klepko Valeriy V., Shilova Olga A., Sukhyu Mikhaylo P. Resistive humidity sensors based on proton-conducting organic-inorganic silicophosphates doped by polyionenes // J Sol-Gel Sci Technol. – 2015. – Vol. 74, № 2. – P. 472 – 481 (DOI 10.1007/s10971-015-3622-7) *Дисертантом розглянуто вплив умов синтезу на склад та структуру органо-неорганічного нанокompозиту.*

9. Kostyantyn M. Sukhyu, Elena A. Belyanovskaya, Yaroslav N. Kozlov, Elena V. Kolomiyets, Mikhaylo P. Sukhyu. Structure and Adsorption Properties of the Composites ‘Silica Gel – Sodium Sulphate’, obtained by Sol – Gel Method // Applied Thermal Engineering. – 2014. – Vol. 64, № 1 – 2. – P. 408 – 412. (DOI 10.1016/j.applthermaleng.2013.12.013) *Дисертантом сплановано випробування адсорбційного теплоакумуючого пристрою на основі композиту «силікагель – натрій сульфат», синтезованих золь – гель методом, та проведено аналіз отриманих результатів.*

Web of Science

10. Belyanovskaya E.A., Pustovoy G.N., Sukhyu K.M., Sergiyenko Ya.O., Yeromin O.O., Prokopenko E.M., Gubynskyi M.V., Kizek J., Lukáč L. Adsorptive solar refrigerators based on composite adsorbents ‘silica gel – sodium sulphate’ // Civil and environmental engineering reports. – 2019. – № 30(3). – P. 200 – 208. *Дисертантом розроблено процедуру розрахунків адсорбційних сонячних холодильних установок.*

Фахові журнали

1. Belyanovskaya, E. Performance of Heat Pump Based on Composite Adsorbent 'Silica Gel –Crystalline Hydrate' [Text] / E. Belyanovskaya, K. Sukhyu, Y. Serhiienko, M. Sukhyu, I. Sukha // Scientific Works. – 2023. – Vol. 87, №1. – P. 81 – 86. *Дисертантом проведено аналіз основних факторів, які впливають на ефективність роботи адсорбційного теплового насосу, розроблено процедуру оцінки коефіцієнта корисної дії пристрою.*

2. Бебяновська О.А., Сухий К.М., Пустовой Г.М., Єрьомін А.О., Сухий М.К., Фролова Л.А. Критерії підбору робочих пар для адсорбційних холодильних пристроїв // Вчені записки Таврійського Національного університету. Сер. Технічні науки. – 2022. – № 6. – С. 136 – 140. *Дисертантом розроблено основні та розроблено алгоритм підбору робочих пар «адсорбент – хладоагент» для адсорбційних холодильних установок, визначено загальні умови до адсорбентів та хладоагентів, порівняно основні переваги та недоліки, а також показано границі хладоагентів – води, аміаку, метанолу та етанолу, показано переваги використанні композитів «сіть в пористій матриці» перед традиційними адсорбційними середовищами.*

3. Belyanovskaya, E., Sukhyu, K., Serhiienko, Y., Sukhyu, M., Pustovoy, G., Sukha, I. Exergy Analysis of an Open-Mode Adsorptive Heat Storage Unit based on Composite Adsorbent 'Silica Gel – Crystalline Hydrate' // Scientific Works. – 2022. – Vol. 86(1). – P. 51 - 56. *Дисертантом проведено аналіз основних факторів, які впливають на ексергетичний коефіцієнт корисної дії адсорбційного теплового акумулятора відкритого типу, розроблено процедуру оцінки ексергетичного коефіцієнта корисної дії теплоакумуючого модуля.*

4. Бебяновська, О.А. Термічні маси адсорбційних теплоакумуючих пристроїв на основі композитів «силікагель – натрій сульфат» та «силікагель – натрій ацетат»/ О.А. Бебяновська, К.М. Сухий, Р.Д. Литовченко, І.В. Суха, Я.О. Сергієнко // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки – 2021. – № 2. – С. 44 – 48. *Дисертантом запропонована процедура розрахунку термічної маси адсорбційного теплоакумуючого пристрою, проведена оцінка термічних мас, оцінено основні фактори, які впливають на величину термічної маси.*

http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2021/2_2021/part_2/9.pdf

5. Belyanovskaya, E., Lytovchenko, R., Sukhyu K., Serhiienko Y., Sukhyu M., Sukha I. Thermal conditions of adsorptive heat storage device operating in open-mode for heating inflowing air // Scientific Works. –2021. – Vol 85. – № 1. – P. 15 – 19 (Наукові праці, Одеська Національна Академія харчових технологій) *Дисертантом розроблена методика розрахунку динамічних залежностей температура – час протягом розряду адсорбційного тепло акумулятора відкритого типу, проведена перевірка на адекватність запропонованої математичної моделі, встановлені найбільш ефективні та безпечні режими експлуатації адсорбційного модуля в умовах типової системи вентиляції.*

<https://journals.onaft.edu.ua/index.php/swonaft/article/view/2062/2267>

6. Беляновська О.А., Пустовой Г.М., Суха І.В., Скляренко О.І., Сухий М.П., Губинський М.В., Сухий К.М. Експлуатаційні характеристики адсорбційного холодильного модуля парової компресійної холодильної установки // Вісник Таврійського Національного університету. Сер. Технічні науки. – 2020. – № 4. – С. 136 -140. *Дисертантом проаналізовано шляхи утилізації теплоти конденсації при експлуатації парової компресорної холодильної установки, запропонована схема установки з адсорбційним холодильним модулем, оцінено його холодопродуктивність та холодильний коефіцієнт.*

7. Беляновська О.А., Литовченко Р.Д., Сухий К.М., Єрьомін О.О., Сухий М.П., Губинський М.В., Суха І.В. Процеси експлуатації адсорбційного регенератора теплоти та вологи на основі композитного адсорбенту «силікагель – натрій сульфат» // Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова. – 2020. – № 2. – С. 48 – 57 (*Дисертантом розвинуто методика визначення експлуатаційних характеристик регенератора теплоти та вологи, та проаналізовано вплив конструктивних характеристики на ефективність роботи адсорбційного регенератора теплоти та вологи*) <http://znp.nuos.mk.ua/archives/2020/2/9.pdf>

8. Беляновська О.А., Пустовой Г.М., Скляренко О.І., Сухий М.П., Сухий К.М., Єрьомін О.О., Прокопенко О.М. Алгоритм розрахунку експлуатаційних характеристик парової компресійної холодильної установки з адсорбційним холодильним модулем // Комп'ютерне моделювання: аналіз, управління, оптимізація. – 2020. – № 2 (8). – С.3-9. (*Дисертантом розроблено алгоритм розрахунку експлуатаційних характеристики парової компресорної холодильної установки, розроблено критерії підбору адсорбентів для адсорбційних холодильних модулів*).

9. Belyanovskaya E.A., Lytovchenko R.D., Sukhyy K.M., Sukhyy M.P., Gubynskyi M.V., Sukha I.V. Performance of adsorptive heat-moisture regenerator // Наукові праці. – 2020. – Том 84, вип. 1. – С. 99 – 104. <https://journals.onaft.edu.ua/index.php/swonaft/article/view/1877> *Дисертантом проведено порівняння ефективності експлуатації адсорбційних регенераторів теплової енергії на основі композитів «силікагель – натрій сульфат» та «силікагель – натрій ацетат»*

10. Беляновська О.А., Литовченко Р.Д., Михайлов А.Г., Сухий К.М., Суха І.В. Алгоритм розрахунку конструктивних та експлуатаційних характеристик адсорбційного акумулятора теплової енергії відкритого типу на основі композитних адсорбентів // Комп'ютерне моделювання, аналіз, управління та оптимізація. – 2019. – №. 1. – С. 3-8. *Дисертантом дорацьовано алгоритм розрахунку конструктивних та експлуатаційних характеристик адсорбційного тепло акумулятора відкритого типу на основі композитних сорбентів.*

11. Беляновська, О.А. Експлуатаційні характеристики адсорбційного регенератора теплоти та вологи на основі композиту «силікагель - натрій ацетат» [Текст] / О.А. Беляновська, Р.Д. Литовченко, К.М. Сухий, О.О. Овчіннікова, М.В. Губинський // Збірник наукових праць Національного

університету кораблебудування ім. адмірала Макарова. – 2019. – № 1. – С. 74 – 81. *Здобувачем проаналізовано вплив експлуатаційні характеристики адсорбційних регенераторів теплоти та вологи на основі композитного адсорбенту «силікагель – натрій ацетат».*

12. Belyanovskaya E.A., Pustovoy G. N., Sergiyenko Ya.O., Sukhyu K. M., Yeromin O.O., Prokopenko E. M., Gubinskyi M. V., Kizek J. Performance of the Adsorptive Solar Refrigerators Based on Composite Adsorbents 'Silica Gel – Sodium Sulphate' // *Advances in Thermal Processes and Energy Transformation.* – 2019. – Vol. 2. – 2019. – P. 19-23. *Дисертантом проаналізовано основні заходи з підвищення ефективності експлуатації адсорбційних холодильних установок.*

13. Belyanovskaya E.A., Lytovchenko R.D., Sukhyu K.M., Prokopenko O.M., Yeromin O.O., Sukha I.V. Choice criteria of adsorbents for heat energy converters in ventilation systems // *Наукові праці Одеської Національної академії харчових технологій.* – 2019. – Т. 83. – С. 3 – 9. *Здобувачем проаналізовано вплив характеристик адсорбенту на ефективність роботи адсорбційних регенераторів теплоти та вологи в системах вентиляції, розроблено алгоритм розрахунку експлуатаційних характеристик, встановлено основні критерії підбору адсорбентів.*

14. Беляновська, О., Пустовой, Г., Сухий, М., Сухий, К., Литовченко, Р. Performance evaluation of adsorptive refrigerators based on composite adsorbents "silica gel – sodium sulphate" and "silica gel – sodium acetate" // *Наукові праці ОНАХТ.* – 2019. – Т. 83(2). – Р. 96-101. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v2i83.1514> *Дисертантом розроблено процедуру оцінки ефективності процесів експлуатації адсорбційних холодильних пристроїв, проаналізовано вплив властивостей адсорбента на ефективність експлуатації адсорбційних холодильних установок.*

15. Беляновська О.А., Литовченко Р.Д., Сухий К.М., Бузов А.Є., Сухий М.П. Енергоефективні процеси експлуатації адсорбційного акумулятора теплової енергії на основі композитного адсорбенту «силікагель – натрій сульфат» // *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова.* – 2019. – № 3. – С. 27 – 34 *Дисертантом запропоновано заходи з підвищення ефективності експлуатації адсорбційного теплового акумулятора на основі композитного адсорбенту «силікагель – натрій сульфат».*

16. Беляновська, О. А., Пустовой, Г. М., Сухий, К. М., Губинський, М. В., Сухий, М. П., Дорошенко, О. В., Сергієнко, Я. О. Експлуатація адсорбційних холодильних установок на основі композитів «силікагель – натрій сульфат» для зберігання сільськогосподарської продукції // *Холодильна техніка та технологія.* – 2019. – Т. 55(3). – Р. 165 - 171. *Дисертантом розглянута експлуатація адсорбційних холодильних установок на основі «силікагель – натрій сульфат», запропонована процедура розрахунку конструктивних та експлуатаційних характеристик.*

17. Беляновская Е.А., Литовченко Р.Д., Сухой К.М., Губинский М.В., Сухой М.П. Алгоритм расчета эксплуатационных

характеристик адсорбционного регенератора теплоты и влаги // Комп'ютерне моделювання, аналіз, управління, оптимізація. Збірник наукових праць – 2018. – № 2. – С. 3 – 8. *Дисертантом розроблено алгоритм розрахунку експлуатаційних характеристик адсорбційного регенератора теплоти та вологи, показано кореляцію ефективності та параметрів режиму експлуатації.*

18. Belyanovskaya E.A., Sukhyu K.M., Lytovchenko R.D., Gubinskyi M.V., Prokopenko E.M., Yeromin O.O. Performance of Adsorptive Heat Energy Converters for Heat Supply Systems // *Advances in Thermal Processes and Energy Transformation*. – 2018. – Vol. 1, № 3. – P. 55 – 16. *Дисертантом визначено основні експлуатаційні характеристики адсорбційних теплоакумуючих пристроїв відкритого та закритого типу.*

19. Belyanovskaya E.A., Lytovchenko R.D., Sukhyu K.M., Sukhyu M.P., Gubinskyi M.V. Performance characteristics of adsorptive regenerator of low-potential heat and moisture based on composite adsorbents 'silica gel – sodium sulphate' synthesized by sol – gel method // *Наукові праці ОНАХТ*. – 2018. – Т. 82, вип. 1. – P. 37 – 41. *Дисертантом розроблено процедуру розрахунку адсорбційного регенератора теплоти та вологи, запропонована модель його експлуатації встановлена адекватність запропонованої моделі, показано вплив режиму експлуатації на ефективність роботи регенератора.*

20. Беляновская Е.А., Пустовой Г.Н., Сухой К.М., Коломиец Е.В., Сухой М.П. Адсорбционные холодильные установки на основе композитных адсорбентов «силикагель – сульфат натрия» // *Вісник Національного технічного університету «ХП» Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія*. – 2018. – № 39(1315). – С. 38 – 42. *Дисертантом розроблено алгоритм розрахунку адсорбційної холодильної установки.*

21. Сухий К.М., Козлов Я.М., Беляновська О.А., Прокопенко О.М., Суха І.В., Дорошенко О.М. Експлуатаційні характеристики полімерних сонячних колекторів для адсорбційних холодильних геліоустановок // *Холодильна техніка і технологія*. – 2018. – Т. 54, № 1. – С. 9-15 (DOI 10.15673/ret.v54i1.984). *Дисертантом показано загальні принципи підбору сонячних колекторів для адсорбційних холодильних установок.*

22. Kolomiyets, O.V. Operating properties of composite materials “silica gel – sodium sulphate” and «silica gel – sodium acetate» for solar adsorptive heat pumps [Text] / O.V. Kolomiyets, E. A. Belyanovskaya, I.V. Sukha, M.P. Sukhyu, K.M. Sukhyu, O.M. Prokopenko // *Вісник Дніпропетровського державного аграрно-економічного університету*. – 2017. – № 2. – С. 83 – 86. ISSN 2413 – 4899. *Дисертантом проаналізовано основні експлуатаційні характеристики адсорбційних теплових насосів на основі композитів «силикагель – натрій сульфат» та «силикагель – натрій ацетат».*

23. Belyanovskaya E. A., Sukhyu K.M., Kolomiyets O.V., Sukhyu M.P. Operating processes parameters of open-type heat storage devices in heat supply systems // *Наукові праці ОНАХТ*. – 2017. – Т. 81, вип. 1. – С. 4 – 9. *Дисертантом сплановано експеримент, запропоновано процедуру розрахунку*

експлуатаційних характеристик теплоакумуючого пристрою відкритого типу.

24. Сухий, К.М. Алгоритм розрахунку об'єму адсорбційного теплового акумулятора для системи децентралізованого опалювання [Текст] / К.М. Сухий, О.В. Коломієць, О.М. Прокопенко, А.В. Гаврилко, О.А. Беляновська // Комп'ютерне моделювання, аналіз, управління, оптимізація. Збірник наукових праць – 2017. – С. 72 – 76. *Дисертантом запропоновано алгоритм розрахунку об'єму адсорбційного теплоакумуючого пристрою в умовах системи децентралізованого теплопостачання.*

25. Коломієць, О. В. Технологія регенерації низькопотенційного тепла та вологи композитним сорбентом «Силікагель/натрій сульфат» [Текст] / О. В. Коломієць, К. М. Сухий, О. А. Беляновська, В. І. Томіло, М. П. Сухий // Вопр. химии и хим. технологии. – 2016. – 5 – 6 (109). – С. 68 – 73. *Дисертантом сплановано експеримент та проаналізовано режим експлуатації адсорбційного регенератора теплової енергії.*

26. Сухой, К. М. Алгоритм расчета эксплуатационных характеристик адсорбционного аккумулятора тепловой энергии для системы децентрализованного отопления [Текст] / К. М. Сухой, Е. В. Коломиец, Е. А. Беляновская // Комп'ютерне моделювання: аналіз, управління, оптимізація : збірник наукових праць. – 2016. – № 1 (1). – С. 65 – 69. *Дисертантом запропоновано алгоритм розрахунку експлуатаційних характеристик адсорбційного акумулятора теплової енергії.*

27. Kolomiyets, O. V. Operating characteristics of adsorptive regenerator of low-potential heat and moisture based on composite sorbents 'silica gel – sodium sulphate and silica gel – sodium acetate' synthesized by sol – gel method [Text] / O. V. Kolomiyets, K. M. Sukhyu, E. A. Belyanovskaya, V. I. Tomilo, O. M. Prokopenko // Наукові праці ОНАХТ. – 2016. – Т. 80, вип. 1. – С. 108 – 113. *Дисертантом сплановано експериментальне дослідження експлуатаційних характеристик адсорбційних регенераторів та проаналізовано вплив характеристик адсорбентів на властивості регенераторів.*

28. Коломієць, О. В. Основні експлуатаційні характеристики композитних сорбентів «силікагель/сульфат натрію» та «силікагель/ацетат натрію» для адсорбційних холодильників [Текст] / О. В. Коломієць, К. М. Сухий, О. А. Беляновська, П. В. Вакулюк, В. І. Томіло, О. М. Прокопенко // Наукові записки НаУКМА. Сер. Хімічні науки і технології. – 2016. – Т. 183. – С. 36 – 42. *Дисертантом визначено основні вимоги до композитних сорбентів в умовах адсорбційних холодильних установок та сплановано експерименти з дослідження експлуатаційних характеристик композитних адсорбентів «силікагель – натрій сульфат» та «силікагель – натрій ацетат».*

29. Коломієць О.В., Беляновська О.А., Сухий К.М., Прокопенко О.М., Козлов Я.М., Сухий М.П. Основні робочі характеристики сонячного адсорбційного холодильника на основі композитного сорбенту

«силикагель/ Na_2SO_4 » // Одеська національна академія харчових технологій. Наукові праці. – 2015. – вип. 47, Т.2. – С. 176 – 181. *Дисертантом проаналізовано основні характеристики режиму роботи сонячного адсорбційного холодильника на основі композиту «силикагель – натрій сульфат».*

30. Коломієць О.В., Козлов Я.М., Беляновська О.А., Сухий М.П., Сухий К.М. Дослідження роботи сонячного адсорбційного холодильника на основі композитного сорбенту силикагель/ Na_2SO_4 // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2014. – вип. 4. – С. 86 – 88. *Дисертантом сплановано експериментальне дослідження експлуатації адсорбційного сонячного холодильника на основі композиту «силикагель – натрій сульфат».*

31. Сухой М.П., Козлов Я.Н., Беляновская Е.А., Сухой К.М., Коломиец Е.В., Томило М.М. Эксплуатационные характеристики композитного сорбента «силикагель – сульфат натрия» // «Металлургическая теплотехника». – 2013. – Вып. 5 (20). – С. 137 – 142. *Дисертантом розглянуто експлуатаційні характеристики адсорбентів «силикагель – натрій сульфат».*

32. Сухий М.П., Сухий К.М., Козлов Я. М., Коломієць О. В., Беляновська О. А., Аміруллоєв Р.С. Энергетичний комплекс поглинання, трансформації та акумулювання сонячного випромінювання. // Вопросы химии и химической технологии. – 2013. – №3. – С. 222 – 225 *Дисертантом розглянуто режим експлуатації модуля поглинання та акумулювання сонячного випромінювання.*

33. Сухой К.М., Сухой М.П., Козлов Я.Н., Коломиец Е.В., Беляновская Е.А., Чупейдо В.Г. Аккумуляция тепловой энергии композитными сорбентами «силикагель – сульфат натрия» // Одеська національна академія харчових технологій. Наукові праці. – 2013. – вип. 43, Т.1. – С. 150 – 155. *Дисертантом проаналізовано кореляцію властивостей композитного адсорбента «силикагель – натрій сульфат» та експлуатаційних характеристик адсорбційного теплового акумулятора.*

Тези доповідей

1. Sukhyy K.M., Belyanovskaya E.A., Yeromin O.O., Sukha I.V., Prokopenko Elena M., Sukhyy M.K. Sol Gel Technology of Obtaining Composite Materials ‘Salt inside Silica Gel Matrix’ for Adsorptive Heat Energy Conversion // East West Chemistry Online Conference. October 7 – 9, 2021, Kiev. – P. 101 – 102. *Дисертантом проаналізовано вплив ультразвуку на формування гелю.*

2. Литовченко Р. Д., Беляновська О. А., Сухий К. М., Суха І. В. Процедура розрахунку експлуатаційних характеристик адсорбційного регенератора низькопотенційної теплоти та вологи // Комп'ютерне моделювання в хімії та технологіях і системах сталого розвитку – КМХТ-2020: Збірник наукових статей Восьмої міжнар. наук.-практ. конф. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020 – С. 239 – 244. *Дисертантом розроблена процедура розрахунку експлуатаційних характеристик адсорбційного регенератора низькопотенційної теплоти та вологи.*

3. Беляновська О.А., Пустовой Г.М., Сухий К.М., Скляренко А.І., Сухий М.П. Полімер-неорганічні нанодисперсні композитні матеріали для адсорбційних холодильних геліоустановок // Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів ТАСХ-2020: Матеріали IV Всеукраїнської наукової конференції, 10 квітня 2020 р., м. Дніпро. – Дніпро: “Середняк Т.К.”, 2020. – С. 44 – 45. *Дисертантом встановлено основні вимоги до нанодисперсних композитних адсорбційних матеріалів для трансформаторів теплової енергії та показана перспективність композитів «силікагель – кристалогідрат».*

4. Беляновська, О.А. Розрахунок конструктивних характеристик адсорбційного перетворювача теплової енергії для систем вентиляції [Текст] / О.А. Беляновська, Р.Д. Литовченко, К.М. Сухий, М.В. Губинський, О.М. Прокопенко, О.О. Єрьомін // Комп’ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОС-2019): матеріали V Міжнар. наук.-техн. конф. (Дніпро, 6 – 8 листопада 2019 року). – Дніпро: Баланс-клуб, 2019. – С. 20 – 21. *Дисертантом розроблено алгоритм розрахунку конструктивних характеристик адсорбційного перетворювача теплової енергії.*

5. Сергієнко, Я.О. Критерії вибору кристалогідратів для композитних адсорбентів із високою густиною запасання енергії [Текст] / Я. О. Сергієнко, О.А. Беляновська, К.М. Сухий, О.В. Коломієць, М.П. Сухий // Інноваційні енерготехнології-2019: Збірник тез доп. VII Міжнар. наук.-практ. конф.(Одеса, 9 – 13 вересня 2019 р.). – Одеса: ОНАХТ, 2019. – С. 23 – 24. *Дисертантом визначено основні вимоги до характеристик композитних адсорбентів, які сприяють підвищенню густини запасання енергії.*

6. Сергиенко, Я.А. Технология получения новых материалов для аккумуляирования тепла типа «силікагель-кристаллогидрат» [Текст] / Я.А. Сергиенко, Е.В. Коломиец, К.М. Сухой, Е.А. Беляновская, Е.М. Прокопенко // Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів ТАСХ-2019: Матеріали III Всеукр. наук. конф. (10 квітня 2019 р., м. Дніпро.) – Дніпро: Середняк Т.К., 2019. – С. 28 – 29. *Дисертантом запропоновано основні стадії процесів отримання композитних матеріалів «силікагель – кристалогідрат».*

7. Литовченко, Р.Д. Моделювання процесів експлуатації адсорбційного регенератора теплоти та вологи [Текст]/ Р.Д. Литовченко, К.М. Сухий, О.А. Беляновська, М.П. Сухий // Комп’ютерне моделювання хіміко-технологічних та біохімічних процесів і систем – 2019. – Ч. 2. – Київ: КПІ, 2019. – С. 134 – 138. *Дисертантом запропоновано алгоритм розрахунку експлуатаційних характеристик адсорбційного регенератора теплоти та вологи.*

8. Беляновська О. А., Литовченко Р. Д., Сухий К. М., Губинський М. В. Алгоритм розрахунку експлуатаційних характеристик адсорбційного регенератора на основі композиту «силікагель – натрій сульфат» // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції «Комп’ютерне моделювання та оптимізація складних систем» (Дніпро, 1-2 листопада 2018 року). – Дніпро: Баланс-клуб, 2018. – С. 40 – 43. *Дисертантом дороблено*

алгоритм розрахунку експлуатаційних характеристик адсорбційного регенератора.

9. K.M. Sukhyu, E.A. Belyanovskaya, G.M. Pustovoy, R.D. Lytovchenko, M.V. Gubinskiy. Polymer-Inorganic Nano-Dispersed Composite Materials for Adsorptive Solar Refrigerators // Тези доповідей XIV Української конференції з високомолекулярних сполук, Київ, Україна, 15-18 жовтня 2018. – С. 285 – 287. *Дисертантом запропоновано основні вимоги до адсорбційних середовищ для адсорбційної холодильної установки та визначено основні критерії підбору адсорбентів.*

10. Бебяновська О.А., Пустовой Г.М., Суха І.В., Губинський М.В., Литовченко Р.Д., Сухий К.М. Композитні матеріали для адсорбційних холодильних геліоустановок // Збірник праць XVII Міжнародній науковій конференції «Удосконалення процесів і обладнання харчових та хімічних виробництв» (Одеса, 3 – 8 вересня 2018 р.). – Одеса: ОНАХТ, 2018 – С. 106 – 110 *Дисертантом порівняно властивості адсорбентів в умовах експлуатації адсорбційних холодильних установок.*

11. Коломиец Е.В. Экономия энергоресурсов и поддержание комфортных условий в помещении за счет использования в системе вентиляции адсорбционного регенератора тепла и влаги / О.В. Коломиец, К.М. Сухой, Е.А. Бебяновская, Е.М. Прокопенко // Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності : друга між нар. наук.-практ. конф., 5–7 вересня 2017 р.: [матеріали конференції] / під заг. ред. Г. В. Дейниченка. – Харків : ХДУХТ, 2017. – с. 59 – 60. *Дисертантом запропоновано використання адсорбційного регенератора теплоти та вологи для підігріву припливного повітря в житлових приміщеннях.*

12. Kolomiyets O.V., Belyanovskaya E.A., Sukhyu K.M., Prokopenko O.M., Sukha I.V. Operating features of composite materials ‘silica gel – sodium sulphate’ and ‘silica gel – sodium acetate’ for solar adsorptive heat pumps // Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів: Матеріали І Всеукраїнської наукової конференції, 10 квітня 2017 р., м. Дніпро: “Середняк Т.К.”, 2017. –С. 14 . *Дисертантом показана кореляція загальних характеристик композитних адсорбентів та експлуатаційних характеристик адсорбційних теплових насосів.*

13. Energy-efficient operational processes of adsorptive heat energy storage devices for warming of inflowing air / Belyanovskaya E.A., Sukhyu K.M., Lytovchenko R.D., Sukhyu M.P., Yeromin O.O., Prokopenko E.M., Pissis P. // Теплотехніка, енергетика та екологія в металургії: колективна монографія . У двох книгах. – Книга перша / Під заг. ред. д.т.н., проф.. Ю.С. Продайка. – Дніпро: Нова ідеологія, 2017. – с. 4 – 8. *Дисертантом дорацьовано загальні принципи підбору режиму експлуатації адсорбційного теплового акумулятора для підігріву припливного повітря.*

14. Коломиец, О. В. Особливості експлуатації адсорбційного сонячного теплового насосу на основі композитних сорбентів «силікагель – натрій сульфат» та «силікагель – натрій ацетат» [Текст] / О. В. Коломиец,

О. А. Беляновська, К. М. Сухий, І. В. Суха, А. В. Гаврилко // Удосконалення процесів і обладнання харчових та хімічних виробництв : зб. праць XVI Міжнар. конфер. (Одеса, 5 – 9 вересня 2016 р.). – Одеса, 2016. – С. 297 – 301. *Дисертантом проведено порівняльний аналіз експлуатаційних характеристик адсорбційних теплових насосів на основі композитних адсорбентів «силікагель – натрій сульфат» та «силікагель – натрій ацетат».*

15. Коломієць О.В., Сухий К.М., Прокопенко І.М., Томіло В.І, Беляновська О.А. Адсорбційний сонячний холодильник на основі композитного матеріалу «силікагель/кристалогідрат» // Актуальні наукові дослідження в сучасному світі: VIII Міжнародна науко.-практ. інт.-конф., 22-23 грудня 2015 г., Переяслав-Хмельницький. // Зб. наукових статей - Переяслав-Хмельницький, 2015. -Вип. 8, ч. 6 – С. 60 – 63. *Дисертантом сплановано експеримент з експлуатації сонячного адсорбційного холодильника.*

16. Коломієць О.В., Сухий К.М., Беляновська О.А. Дослідження впливу швидкості парогазової суміші на ККД теплового акумулятора // Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОСС-2015): матеріали I Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Дніпропетровськ, 3-5 листопада 2015 року) / Міністерство освіти і науки України, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет»: в 2-х ч. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2015. – Ч. 1. – С. 85 – 87. *Дисертантом запропонована процедура розрахунку коефіцієнта корисної дії адсорбційного теплоакumuлюючого пристрою.*

17. Коломієць О.В., Беляновська О.А., Сухий К.М., Сухий М.П., Козлов Я.М. Експлуатаційні характеристики сонячного адсорбційного холодильника на основі композитного сорбенту «силікагель/ CH_3COONa » // VII Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми технології неорганічних речовин та енергозбереження». 30 вересня – 2 жовтня 2015 р. Збірник матеріалів. – С. 120. *Дисертантом показано вплив властивостей адсорбента на експлуатаційні характеристики сонячної адсорбційної геліосистеми.*

18. Коломієць О.В., Беляновська О.А., Сухий К.М., Сухий М.П., Козлов Я.М. Економія енергоресурсів за рахунок використання сорбційних теплоакumuляторів обігрівачів // Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво : матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції, м. Шостка, 27–29 листопада 2014 року. – Суми : Сумський державний університет, 2014. – С. 139 – 140. *Дисертантом проаналізовано результати випробувань сорбційних теплоакumuляторів-обігрівачів.*

19. Коломієць О.В., Козлов Я.М. Сухий К.М., Сухий М.П., Беляновська О.А. Сонячний сорбційний тепловий насос // Праці XVII міжнародної конференції «Теплотехніка та енергетика в металургії», НМетАУ, м. Дніпропетровськ, Україна, 7 – 9 жовтня 2014 р. –

Дніпропетровськ: НМетАУ, 2014. – С. 102 – 103. *Дисертантом запропоновано конструкцію сорбційного теплового насоса.*

20. Коломієць О.В., Сухий К.М., Козлов Я.М., Сухий М.П., Бесяновська О.А. Сонячний холодильник на основі композитного сорбенту «Силікагель/ Na_2SO_4 // Інноваційна економіка, інтелектуальна власність та трансфер технологій : матеріали V міжнар. наук.-практ. конф. 16–18 квіт. 2014 р., м. Дніпропетровськ / ред. кол. : В.Я. Швець [та ін.]; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д. : НГУ, 2014. – С. 254 – 257. *Дисертантом запропоновано загальні напрямки модернізації сонячного адсорбційного холодильника.*

21. Коломієць О.В., Козлов Я.М., Сухий К.М., Сухий М.П., Бесяновська О.А., Гомза Ю.П., Клепко В.В. Композитний сорбент силікагель/сульфат натрію – основний елемент сорбційного акумулятора // Тези доповідей XIII Української конференції з високомолекулярних сполук, Київ, Україна, 7 – 10 жовтня 2013 р. – С. 456 – 458. *Дисертантом показано основні властивості адсорбенту, які впливають на ефективність теплового акумулятора.*

Патенти

1. Патент 142178 України, МПК (2020) B01J 20/02, B01J 2/00. Спосіб отримання композитного сорбенту "силікагель - натрію сульфат" [Текст] / Коломієць О.В., Сухий К.М., Сергієнко Я.О., Бесяновська О.А., Сухий М.К. (Україна); заявник і патентовласник Державний вищий навчальний заклад "Український державний хіміко-технологічний університет".– № у 201908838; заявл. 22.07.2019; опубл. 25.05.2020, Бюл. № 10. – 4 с. *Дисертантом розроблено методику отримання композитного сорбенту та розроблено формулу корисної моделі.*

2. Патент 141142 України, МПК (2006) F24H 7/04 Адсорбційний акумулятор теплової енергії [Текст] / Сергієнко Я.О., Бесяновська О.А., Сухий К.М., Коломієць О.В., Суха І.В., Сухий М.К. (Україна); заявник і патентовласник Державний вищий навчальний заклад "Український державний хіміко-технологічний університет".– № у 201908840; заявл. 22.07.2019; опубл. 25.03.2020, Бюл. № 6. – 4 с. *Дисертантом запропоновано модернізація конструкції адсорбційного акумулятора теплової енергії та розроблена формула корисної моделі.*

3. Патент 141143 України, МПК (2006) F24F 7/00, F24F 6/00. Регенератор теплоти та вологи [Текст] / Литовченко Р.Д., Бесяновська О.А., Сухий К.М., Коломієць О.В., Суха І.В., Сухий М.К. (Україна); заявник і патентовласник Державний вищий навчальний заклад "Український державний хіміко-технологічний університет".– № у 201908841; заявл. 22.07.2019; опубл. 25.03.2020, Бюл. № 6. – 4 с. *Дисертантом розроблено конструкцію адсорбційного регенератора теплоти та вологи, оформлено заявку та розроблено формулу корисної моделі.*

4. Патент 141150 України, МПК (2006) F24F 7/00, F24F 6/00. Пристрій для підігріву припливного повітря [Текст] / Бесяновська О.А.,

Литовченко Р.Д., Сухий К.М., Коломієць О.В., Сухий М.П., Суха І.В., Сухий М.К. (Україна); заявник і патентовласник Державний вищий навчальний заклад “Український державний хіміко-технологічний університет”. – № u 201908869; заявл. 22.07.2019; опубл. 25.03.2020, Бюл. № 6. – 4 с. *Дисертантом розроблено конструкцію пристрою для підігріву припливного повітря, оформлено заявку та розроблено формулу корисної моделі.*

5. Пат 122446 Україна, МПК (2017.01) F24F 5/00, F24F 9/00. Пристрій для кондиціонування повітря / Бесяновська О. А., Коломієць О. В., Сухий К. М., Суха І. В. (Україна) ; заявник та патентовласник держ. вищ. навч. заклад „Укр. держ. хім.-технол. ун-т”. – № u 2017 07217; заявл. 10.07.17; опубл. 10.01.18, Бюл. № 1. – 5 с. *Дисертантом розроблено конструкцію пристрою для кондиціонування повітря, оформлено заявку та складено формулу корисної моделі.*

6. Пат. 122906 Україна, МПК (2017.01) F24J 2/00, F24J 2/02, F24J 2/04, F24J 2/05, F24J 2/16, F24J 2/46. Сонячний колектор / Сухий К. М., Бесяновська О. А., Сухий М. П., Литовченко Р. Д., Томило В. І. (Україна) ; заявник та патентовласник держ. вищ. навч. заклад „Укр. держ. хім.-технол. ун-т”. – № u 2017 09430; заявл. 26.09.17 ; опубл. 25.01.18, Бюл. № 2. – 5 с. *Дисертантом запропоновано конструкцію сонячного колектора, оформлено заявку та розроблено формулу корисної моделі.*

7. Пат 119167 Україна, МПК (2017.09) F24H 7/02. Акумулятор теплової енергії / Бесяновська О. А., Литовченко Р.Д., Сухий К. М., Суха І.В., Сухий М. П. (Україна) ; заявник та патентовласник держ. вищ. навч. заклад „Укр. держ. хім.-технол. ун-т”. – № u 2017 03884; заявл. 19.04.17 ; опубл. 11.09.17, Бюл. № 27. – 5 с. *Дисертантом запропонована конструкція акумулятора теплової енергії та розроблена формула корисної моделі.*

8. Пат. 107051 Україна, МПК (2016.01) F35B 27/00 Транспортний рефрижиратор [Текст] / К. М. Сухий, М. П. Сухий, О. А. Бесяновська, О. В. Коломієць, А. В. Гаврилко (Україна); заявник та патентовласник ДВНЗ „Укр. держ. хім.-техн. ун-т”. – № u 2015 08069; заявл. 13.08.2015; опубл. 25.05.2016, Бюл. № 10. – 4 с. *Дисертантом запропоновано схема транспортного адсорбційного транспортного рефрижератора та розроблено формулу корисної моделі.*

9. Пат. 80698 U. С 09 К 5/00. Теплоакумулюючий матеріал / Сухий К.М., Сухий М.П., Бесяновська О.А., Коломієць О.В., Козлов Я.М., Аміруллоєв Р.С. – № u201214079.. Заявл. 10.12.12 Опубл. 10.06.2013. Бюл. № 11. – 5 с. *Дисертант запропонував методику отримання теплоакумулюючого матеріалу та розробив формулу корисної моделі.*

10. Пат. 81607 U. С 09 К 5/00. Композиційний теплоакумулюючий матеріал / Сухий К.М., Сухий М.П., Бесяновська О.А., Коломієць О.В., Козлов Я.М., Аміруллоєв Р.С. – № u201214046. Заявл. 10.12.12. Опубл. 10.07.2013. Бюл. № 13. – 5 с. *Дисертант запропонував методику отримання композиційного теплоакумулюючого матеріалу та розробив формулу корисної моделі.*

11. Пат. 91481. F25B 30/00. Адсорбційний тепловий насос / Сухий К.М., Сухий М.П., Беляновська О.А., Коломієць О.В., Козлов Я.М. Заявл. 30.12.2013. Опубл. 10.07.2014, Бюл. № 13. – 6 с. *Дисертантом розроблено конструкцію теплового насоса та складено формулу корисної моделі.*

12. Пат. 86227 U. F 25 B 17/00. Адсорбційний холодильник / Сухий К.М., Сухий М.П., Беляновська О.А., Коломієць О.В., Козлов Я.М., Аміруллоєв Р.С. – № u201305136. Заявл. 22.04.13. Опубл. 25.12.13. Бюл. № 24. – 5 с. *Дисертант розробив конструкцію адсорбційного холодильника та розробив формулу корисної моделі.*

13. Пат. 83436 U. F 27 H 7/00. Тепловий акумулятор / Сухий К.М., Сухий М.П., Беляновська О.А., Коломієць О.В., Козлов Я.М., Аміруллоєв Р.С. – № u201303474.. Заявл. 21.03.13. Опубл. 10.09.13. Бюл. № 17. – 5 с. *Дисертант розробив конструкцію теплового акумулятора та розробив формулу корисної моделі.*

АНОТАЦІЯ

Беляновська О.А. Розвиток наукових основ створення адсорбційних теплотрансформаторів для систем теплопостачання та кондиціонування – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика» (144 – Теплоенергетика). – Український державний університет науки і технологій, Дніпро, 2025.

Дисертація спрямована на вирішення важливої науково-технічної проблеми розвитку наукових основ створення адсорбційних теплотрансформаторів для підігріву теплоносія – води або припливного повітря – в системах теплопостачання та вентиляції або кондиціонування повітря в житлових або складських приміщеннях.

На основі типових вимог до експлуатації та аналізу властивостей робочих пар «адсорбент – адсорбат» розроблені основні критерії та алгоритм підбору адсорбента та робочої рідини для теплотрансформаторів для систем теплопостачання вентиляції та кондиціонування. Базуючись на аналізі термічних мас теплотрансформаторів відкритого та закритого типів, показано, що ключовими критеріями підбору адсорбента є температура регенерації та адсорбційна ємність, тобто гранична адсорбція. Обґрунтовано вибір води, як основної робочої речовини.

Проаналізовано основні фактори, які впливають на термічні маси теплотрансформаторів відкритого та закритого типів. Підтверджено переваги композитів типу «силікагель – кристалогідрат». Зокрема, підтверджено перспективність використання адсорбенту «силікагель 20% – натрій сульфат 80%».

На основі аналізу процесів експлуатації адсорбційних теплотрансформаторів відкритого та закритого типу для систем теплопостачання розроблені алгоритми розрахунку конструкційних та експлуатаційних параметрів адсорбційних перетворювачів теплової енергії,

які дозволяють дати інтегральну оцінку ефективності роботи пристрою в умовах типової системи теплопостачання, вентиляції або кондиціонування. Вони включають обчислення коефіцієнта масопередачі, адсорбції, корисної теплоти адсорбції, теплової потужності для нагрівання адсорбенту, корпусу пристрою, води в зволожувачі, випаровування води, нагрівання адсорбованої води, десорбції та коефіцієнтів корисної дії. Запропоновані алгоритми мають задовільну узгодженість результатів розрахунків та експериментальних даних та дозволяють встановити оптимальний тепловий режим роботи адсорбційних перетворювачів теплової енергії в умовах типових систем теплопостачання, вентиляції та кондиціонування.

Проаналізована структура витрат на експлуатацію адсорбційного трансформатора теплової енергії в системах теплопостачання. Встановлено, що близько 90 % теплових витрат відповідає випаровуванню та десорбції. Показано, що ключовим заходом підвищення ефективності теплотрансформаторів відкритого або закритого типів є нетермічні заходи зі створення пароповітряної суміші, зокрема, ультразвукове зволоження потоку повітря, яке поступає до шару адсорбента.

Проаналізовано тепловий режим експлуатації адсорбційного теплоакumuлюючого пристрою відкритого типу. Встановлено найбільш ефективні параметри експлуатації адсорбційного теплоакumuлятора для підігріву припливного повітря, які відповідають санітарним нормам.

Проведено ексергетичний аналіз експлуатації теплоакumuлюючого пристрою відкритого типу. Підтверджено, що максимальні значення ексергетичного ККД та термічного ККД відповідають ідентичним параметрам експлуатації: початкові температури та абсолютна вологість початкового повітряного потоку повинні підтримуватися на рівні 20 – 30°C і 0,03 – 0,04 кг/м³.

На основі аналізу експлуатації лабораторного прототипу адсорбційного регенератора теплоти та вологи запропонована процедура розрахунку його основних експлуатаційних характеристик. Показана адекватність результатів розрахунку та експериментальних даних. Проаналізовано режим експлуатації адсорбційного регенератора теплоти та вологи. Показано основні фактори, які впливають на ефективність даного пристрою. Показано, що як ключеві параметри для оптимізації експлуатаційних характеристик адсорбційного регенератора теплоти та вологи доцільно розглядати температурний коефіцієнт корисної дії, час досягнення максимальної адсорбції та споживану потужність вентилятора.

Розроблені конструкції адсорбційних трансформаторів теплової енергії – адсорбційних регенераторів теплоти та вологи, а також адсорбційного теплоакumuлюючого пристрою відкритого типу для підігріву припливного повітря. Запропоновано математичну модель та процедури розрахунку основних проектних характеристик та теплових режимів роботи адсорбційних теплоакumuлюючих пристроїв відкритого типу та адсорбційного регенератора в умовах традиційних систем теплопостачання та/або вентиляції систем житлових або складських приміщень.

Розглянуто основні принципи експлуатації адсорбційних холодильних пристроїв в умовах типових систем кондиціонування. Встановлені

оптимальні умови експлуатації. Розроблені заходи, які дозволяють частково утилізувати теплоту адсорбції – використати для підігріву теплоносія, який можна використати як для підігріву адсорбента до температури початку адсорбції, так і в системі гарячого водопостачання.

Ключові слова: трансформація теплової енергії, адсорбційний теплотрасформатор, теплоакумуючих пристрій, адсорбційний регенератор теплоти та вологи, композитний адсорбент «пориста матриця – сіль».

ABSTRACT

Belyanovskaya E.A. Development of the scientific basis for the creation of adsorption heat transformers for heat supply and air conditioning systems - Qualification scientific work with manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.14.06 "Technical thermal physics and industrial thermal power engineering". – Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, 2025.

The dissertation is aimed at solving an important scientific and technical problem of the development of the scientific foundations of the creation of adsorption heat transformers for heating the heat carrier - water or supply air - in systems of heat supply and ventilation or air conditioning in residential or warehouse premises.

On the basis of typical requirements for operation and analysis of the properties of "adsorbent - adsorbate" working pairs, the main criteria and algorithm for selecting an adsorbent and working fluid for heat transformers for heat supply, ventilation and air conditioning systems have been developed. Based on the analysis of the thermal masses of heat transformers of open and closed types, it is shown that the key criteria for adsorbent selection are regeneration temperature and adsorption capacity, i.e. limit adsorption. The choice of water as the main working substance is justified.

The main factors affecting the thermal mass of heat transformers of open and closed types are analyzed. The advantages of composites of the "silica gel - crystal hydrate" type have been confirmed. In particular, the promising use of the adsorbent "silica gel 20% - sodium sulfate 80%" has been confirmed.

Based on the analysis of the operation processes of open and closed adsorption heat transformers for heat supply systems, algorithms have been developed for calculating design and operational parameters of adsorption heat energy converters, which allow to give an integral assessment of the efficiency of the device in the conditions of a typical heat supply, ventilation or air conditioning system. These include the calculation of the mass transfer coefficient, adsorption, useful heat of adsorption, thermal power for heating the adsorbent, device body, water in the humidifier, water evaporation, heating of the adsorbed water, desorption, and efficiency coefficients. The proposed algorithms have a satisfactory consistency of calculation results and experimental data and allow to establish the optimal thermal mode of operation of adsorption heat energy converters in the conditions of typical heat supply, ventilation and air conditioning systems.

The cost structure for the operation of the heat energy adsorption transformer in heat supply systems is analyzed. It was established that about 90% of heat consumption corresponds to evaporation and desorption. It is shown that the key measure for increasing the efficiency of heat transformers of open or closed types is non-thermal measures to create a steam-air mixture, in particular, ultrasonic humidification of the air flow that enters the adsorbent layer.

The thermal mode of operation of an open-type adsorption heat-accumulating device is analyzed. The most effective operating parameters of the adsorption heat accumulator for heating supply air, which meet sanitary standards, have been established.

An exergy analysis of the operation of an open-type heat storage device was carried out. It has been confirmed that the maximum values of exergetic efficiency and thermal efficiency correspond to identical operating parameters: the initial temperatures and absolute humidity of the initial air flow should be maintained at 20 - 30°C and 0.03 - 0.04 kg/m³.

Based on the analysis of the operation of the laboratory prototype of the heat and moisture adsorption regenerator, a procedure for calculating its main operational characteristics is proposed. Adequacy of calculation results and experimental data is shown. The mode of operation of the heat and moisture adsorption regenerator is analyzed. The main factors affecting the efficiency of this device are shown. It is shown that as key parameters for optimizing the operational characteristics of the heat and moisture adsorption regenerator, it is advisable to consider the temperature coefficient of useful action, the time to reach maximum adsorption, and the fan power consumption.

Designs of adsorption heat energy transformers - adsorption heat and moisture regenerators, as well as an open-type adsorption heat storage device for heating supply air - have been developed. A mathematical model and procedures for calculating the main design characteristics and thermal modes of operation of open-type adsorption heat-accumulating devices and adsorption regenerator in the conditions of traditional heat supply and/or ventilation systems of residential or warehouse premises are proposed.

The main principles of operation of adsorption refrigerating devices in the conditions of typical air conditioning systems are considered. Optimal operating conditions are established. Measures have been developed that allow partial utilization of the heat of adsorption - to use heat for heating, which can be used both for heating the adsorbent to the temperature of the start of adsorption, and in the hot water supply system.

Key words: thermal energy transformation, adsorption heat transformer, heat storage device, heat and moisture adsorption regenerator, composite adsorbent "porous matrix - salt".

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. 2,03. Обл.-вид. арк. 2,11.
Тираж 100 прим. Зам. № 1

Видавець: Український державний університет науки і технологій
вул. Лазаряна, 2, ауд. 2216, м. Дніпро, 49010.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022.

Адреса дільниці оперативної поліграфії:
ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет»
просп. Науки, 8, м. Дніпро, 49005.