

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу **Беляновської Олени Анатоліївни** за темою: «РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ СТВОРЕННЯ АДСОРБЦІЙНИХ ТЕПЛОТРАНСФОРМАТОРІВ ДЛЯ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ТА КОНДИЦІОНУВАННЯ», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Дисертаційна робота Олени Беляновської присвячена розробці наукових основ створення систем адсорбційного акумулювання та трансформації теплоти на основі композитних адсорбентів. Основна досліджувана задача – підвищення ефективності використання низькопотенційної теплоти у системах теплопостачання, вентиляції та кондиціонування повітря шляхом застосування адсорбційних процесів із фазовими переходами.

Тематика дослідження має прикладне спрямування та стосується вирішення задач добового згладжування теплового навантаження, регенерації тепла з низьким температурним потенціалом і підвищення енергоефективності кліматичних систем. Окремо слід відзначити актуальність акумулюючих технологій у контексті використання відновлюваних джерел енергії, де асинхронність між генерацією та тепловим споживанням потребує ефективних рішень з тимчасового зберігання енергії у вигляді теплоти. Запропоновані технічні підходи орієнтовані на застосування в індивідуальних і малих централізованих системах.

Робота є завершеним самостійним дослідженням, що включає аналіз фізико-хімічних властивостей композитних сорбентів, моделювання параметрів термодинамічних циклів, експериментальні дослідження ефективності, а також розробку алгоритмів підбору матеріалів і конструктивних рішень для теплових модулів.

Практичне застосування підтверджується актами впровадження, наявністю патентів, дослідними зразками і включенням результатів у навчальний процес профільного закладу вищої освіти.

НАУКОВА НОВИЗНА

Наукову новизну дисертаційної роботи сформульовано у вигляді узагальнених результатів, що охоплюють теоретичні підходи, методики розрахунку та нові технічні рішення у сфері адсорбційного акумулювання теплоти. Зазначені положення відображають особистий внесок здобувачки у розвиток адсорбційних енерготехнологій:

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

Практична цінність отриманих результатів полягає в можливості їх застосування під час створення адсорбційних систем акумулювання теплоти, енергоефективних теплотехнічних пристроїв і регенераторів вологи. Запропоновані технічні рішення, а також розроблені матеріали, моделі й алгоритми підтверджені дослідною перевіркою, апробацією у навчальному процесі та захищені відповідними патентами:

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 акумулювання 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 теплопостачання, 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 теплоакумулюючого 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 насоса 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.

ОЦІНКА ЗМІСТУ ТА СТРУКТУРИ РОБОТИ

Дисертація структурована відповідно до цілей дослідження та охоплює всі необхідні аспекти: теоретичний аналіз, методичне обґрунтування, експериментальні дослідження та впровадження.

Робота складається зі вступу, семи розділів основного тексту, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 409 сторінок, включаючи 6 таблиць, 110 рисунків та 3 додатки на 50 сторінках. До бібліографічного списку включено 259 джерел, що свідчить про достатню глибину та повноту аналітичного огляду.

Зміст основних розділів відображає логіку розвитку теми:

- у першому розділі проведено огляд літератури щодо методів акумулювання теплоти;
- у другому – сформульовано принципи підбору робочих пар та визначено критерії ефективності;
- третій і четвертий розділи присвячені експлуатаційним характеристикам адсорбційних модулів, включно з регенераторами теплоти та вологи;
- у п'ятому та шостому розділах розглянуто параметри роботи холодильних установок і теплових насосів;
- сьомий розділ присвячено розробці методів синтезу та регулювання властивостей композитних адсорбентів.

Структура дисертації забезпечує послідовний розвиток теми – від постановки задачі до реалізації технічних рішень. Завдання дослідження викладено чітко, і в межах роботи забезпечено їх системне розкриття.

ОЦІНКА ДОСТОВІРНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ

Наукові результати дисертації базуються на поєднанні теоретичного аналізу, математичного моделювання та експериментальних досліджень. Теоретичні положення підтверджені чисельними розрахунками, які охоплюють теплові, масообмінні та ексергетичні характеристики запропонованих рішень.

У дисертації представлено алгоритми підбору робочих пар, методики розрахунку коефіцієнтів масопереносу, теплової потужності, коефіцієнтів корисної дії, що дозволяє оцінювати поведінку систем при різних режимах експлуатації. Експериментальні дослідження проведені на лабораторних зразках, з вимірюванням параметрів роботи акумулюючих пристроїв, адсорбційних насосів та регенераторів.

Результати експериментів і моделювання узгоджуються між собою за основними показниками. Отримані залежності мають теоретичне підґрунтя та відображають фізичну природу процесів. Частина технічних рішень підтверджена актами впровадження у виробництво, а також охороняється патентами.

АПРОБАЦІЯ І ПУБЛІКАЦІЇ

Основні результати дисертаційної роботи пройшли апробацію в науковому та прикладному середовищі. Здобувачка представила результати на конференціях, опублікувала їх у фахових виданнях, у тому числі міжнародного рівня, а також впровадила частину розробок у виробничу та освітню практику.

Загалом опубліковано 83 наукові праці, серед яких:

- 4 монографії, з яких одна видана у Європейському Союзі та одна – у США (індексується в базі Scopus),
- 2 розділи в колективних монографіях, опублікованих у країнах ЄС,
- 43 статті у фахових виданнях, включаючи 9 у базі Scopus і 1 у Web of Science,
- 6 статей у закордонних періодичних виданнях,
- 21 теза доповідей на міжнародних та національних конференціях.

Практична спрямованість підтверджується 13 патентами України на корисну

модель, отриманими за результатами проведених досліджень. Також оформлено 6 актів впровадження у виробничу практику та 2 акти впровадження у навчальний процес в дисциплінах «Теплотехнологічні процеси та установки» і «Методологія і організація наукової діяльності».

ЗАУВАЖЕННЯ

У процесі ознайомлення з дисертацією виникли окремі зауваження, що стосуються як методологічних аспектів, так і термінологічних рішень, застосованих у роботі:

1) Термінологічна нечіткість щодо поняття «теплотрансформатор»

У дисертації системи акумулювання теплоти на основі адсорбції позначено як «адсорбційні теплотрансформатори». Однак у міжнародній технічній та нормативній літературі (зокрема, документах IEA, Horizon Europe, ASHRAE) термін “heat transformer” використовується переважно для позначення абсорбційних схем з підвищенням температури теплоти, таких як absorption heat transformers (АHT). У таких системах теплота нижчої температури “перетворюється” на теплоту з вищим потенціалом, зазвичай для утилізації відпрацьованого тепла або промислових процесів.

На відміну від цього, у дисертаційній роботі розглянуто накопичення теплоти у сорбційних матеріалах з подальшим її вивільненням при потребі, тобто процес акумулювання, а не трансформації температурного рівня.

У цьому контексті, з метою узгодження з міжнародною термінологією та підвищення однозначності трактування, доцільно було б використовувати поняття «термохімічний акумулятор теплоти», «сорбційна теплова батарея» або «теплоакумуюча система на основі адсорбції». Це дозволило б точніше позиціонувати результати дослідження в межах сучасної енергетичної класифікації та полегшити їх впровадження у європейське нормативне поле.

2) Відсутність оцінки життєвого циклу (LCA)

Дисертація не містить аналізу екологічної ефективності запропонованих технічних рішень з урахуванням повного життєвого циклу (Life Cycle Assessment). Така оцінка є загальноприйнятим стандартом у сучасній практиці розробки енерготехнологій, особливо якщо йдеться про

впровадження на рівні комерційного, житлового або муніципального сектору.

У випадку адсорбційних систем, що використовують композитні матеріали, важливо враховувати не лише експлуатаційну ефективність, а й повний ресурсний слід – починаючи з енергозатрат на синтез сорбентів і виробництво колекторів, закінчуючи їх утилізацією та впливом на довкілля протягом усього терміну служби.

У подальших дослідженнях доцільно включати хоча б базовий LCA-аналіз, аби підвищити надійність оцінки довгострокової ефективності та екологічної доцільності запропонованих рішень.

3) Обмеження ексергетичного підходу без урахування динаміки системи

У дисертації активно використано ексергетичний аналіз для оцінки ефективності розроблених рішень. Цей підхід дійсно має методологічну цінність – передусім як засіб формалізованого філософського осмислення якості енергії та потенціалу її корисного використання. Водночас у практичних задачах, особливо у випадку низькопотенційних джерел теплоти, ексергетичний підхід без зв'язку з повним тепловим контуром і балансом речовин може створити ілюзію підвищеної ефективності, яка насправді не реалізується при інтеграції в конкретну енергосистему.

Доцільно рекомендувати в подальших дослідженнях доповнювати ексергетичні оцінки розрахунками енергетичних і масових балансів із урахуванням фазових переходів, режимної циклічності та температурно-вологісних характеристик середовища. Це дозволить отримати більш практично орієнтовану модель для проєктування і впровадження таких систем у реальних об'єктах.

4) Щільність укладки сорбенту в акумуляторі

У підрозділі 4.2 величина порозності шару абсорбенту прийнята як фіксована (0.259), що відповідає максимально щільному упакуванню монодисперсних сфер. У той же час на практиці формування шару з такою структурою є складним технологічним завданням, яке потребує спеціальних умов та контролю фракційного складу.

Більше того, у реальних системах часто застосовують полідисперсні сорбенти, що дозволяє досягати ще більш щільного пакування за рахунок заповнення міжзернових проміжків дрібними фракціями. Це відкриває

можливість для керування порозністю шару як інженерним параметром, що впливає на баланс між питомою масою сорбенту, гідравлічним опором та ефективністю тепломасообміну.

Тому рекомендується розглядати порозність як змінну величину, що оптимізується залежно від конкретних вимог до роботи апарату, з урахуванням технології формування шару.

5) Порівняння теплових систем без урахування інтеграції джерела та акумулятора

У таблиці 3.1 представлено порівняльний аналіз енергоспоживання та капітальних витрат для різних джерел теплоти та теплових акумуляторів. Водночас теплові акумулятори розглядаються як окремі автономні системи без інтеграції з джерелом теплоти. У практиці теплопостачання ключове значення має сумісність та ефективність акумулятора у складі конкретної системи генерації тепла.

Відсутність повного енергетичного та економічного балансу по ланцюгу “джерело → акумулятор → споживач” обмежує достовірність порівняння і не дозволяє оцінити реальну ефективність застосування акумуляторів у конкретних конфігураціях системи.

6) Врахування гідравлічного опору в реальних умовах експлуатації

У дисертації значна увага приділена моделюванню тепломасообміну в шарі сорбенту, однак у меншій мірі розглянуто обмеження, пов’язані з реалізацією повітропровідної частини системи.

Зокрема, для практичного використання адсорбційних модулів важливо враховувати гідравлічний опір шару, можливості вентиляторного обладнання, рівень шуму, а також енергетичну доцільність забезпечення відповідного повітряного потоку.

Доцільно рекомендувати у подальших дослідженнях доповнювати аналіз тепломасообмінних характеристик техніко-економічною оцінкою параметрів подачі повітря з урахуванням технічних та конструктивних обмежень реальних вентиляційних систем.

7) Аерозольна стабільність сорбенту і санітарна безпека системи

У дисертації зазначено, що кристалогідрати солей, зокрема натрій сульфат,

є стабільними в діапазоні температур 30-120 °С. Проте термічна стабільність матеріалу не гарантує його аерозольної безпеки під час багаторазових циклів зволоження і дегідратації. У таких умовах можливе мікро- і макроушкодження структури, що призводить до вивільнення дрібнодисперсних частинок у повітряний потік.

Рекомендується у подальших розробках приділяти більше уваги санітарній безпеці таких систем, включаючи питання фізико-механічної деградації сорбенту, наявності пилозахисних рішень або необхідності розділення повітряного контуру з робочим середовищем сорбенту.

8) Молекулярна чистота повітря та вторинні викиди при роботі сорбенту

У представлених рішеннях повітря контактує безпосередньо з активним шаром сорбенту, після чого подається в приміщення без додаткового очищення. Навіть за умови відсутності аерозольного пилу, це не виключає впливу сорбенту на хімічний склад повітря на молекулярному рівні.

Зокрема, можливе виділення летких органічних сполук, залишків реагентів синтезу або продуктів часткової деградації солей, особливо при підвищених температурах або багаторазовому циклюванні. Також потенційно змінюється кислотно-лужна реакція повітряного потоку, що може впливати на мікроклімат приміщень та стан дихальних шляхів користувачів.

У побутових та офісних застосуваннях такий ризик потребує додаткової уваги. Доцільно рекомендувати врахування молекулярної чистоти повітря як окремого критерію при оцінці безпеки та ефективності систем, а також розглядати необхідність фільтрації або сорбційного доочищення повітря після контакту з основним адсорбентом.

Зазначені зауваження мають дискусійний характер, однак не знижують наукової новизни, достовірності чи практичної цінності результатів, представлених у дисертаційній роботі. Вони мають конструктивне спрямування і можуть бути враховані авторкою у подальших дослідженнях та вдосконаленні розроблених технічних рішень.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Беляновської Олени Анатоліївни на тему «Розвиток наукових основ створення адсорбційних теплотрансформаторів для систем тепlopостачання та кондиціонування» є завершеним науковим дослідженням, яке присвячене актуальній технічній проблемі – підвищенню ефективності використання низькопотенційної теплоти шляхом застосування сорбційних процесів з фазовими переходами.

Робота має як наукову, так і прикладну цінність, базується на поєднанні теоретичного аналізу, чисельного моделювання та експериментального підтвердження, її результати апробовано та опубліковано у належному обсязі.

Дисертація за рівнем актуальності, обґрунтованості, повноти викладення матеріалу та практичного значення отриманих результатів відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, визначеним пунктами 7 та 9 Порядку присудження наукових ступенів (постанова Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, зі змінами).

Беляновська О. А. заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Офіційний опонент

Старший науковий співробітник лабораторії теплотехніки та енергозберігаючих технологій Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, доктор технічних наук, професор



Сергій ФЕДОРОВ

