

В І Д Г У К
офіційного опонента про дисертаційну роботу
Беляновської Олени Анатоліївни
за темою «РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ СТВОРЕННЯ
АДСОРБЦІЙНИХ ТЕПЛОТРАНСФОРМАТОРІВ ДЛЯ СИСТЕМ
ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ТА КОНДИЦІОНУВАННЯ», що подана на здобуття
наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 –
Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

Довгострокові ініціативи світової спільноти, спрямовані на пом'якшення ситуації, що виникає внаслідок викидів парникових газів, які призводять до глобального потепління (Монреальський і Кіотський протоколи, Паризька угода в рамках Рамкової конвенції ООН про зміну клімату), вимагають як більш активного використання відновлюваних джерел енергії, так і підвищення ефективності використання теплової енергії в промисловості, транспорті та домогосподарствах, зокрема, використання всіх доступних енергоресурсів. Трансформація теплової енергії 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. Найпростіші варіанти – ємнісне та фазово-перехідне акумулювання теплової енергії через їх простоту – забезпечують невелику густину запасання теплової енергії, яка сильно обмежена властивостями застосовуваних матеріалів. Найбільшу високу густину запасання енергії забезпечує термохімічний механізм, що базується на оборотній хімічній реакції. Але, незважаючи на високе поглинання та акумулювання теплової енергії, термохімічні матеріали вимагають не лише надзвичайно високої температури регенерації, але й і не демонструють стабільності своїх властивостей під час тривалого циклу. Перспективність адсорбційної трансформації теплової енергії пов'язана як з їх високою теплою адсорбції та стабільністю адсорбційних середовищ при тривалому і багаторазовому циклювання, так і з невеликою температурою регенерації. В той же час, останні досягнення в області адсорбційного перетворення теплової енергії не можна вважати цілком задовільними через незадовільні властивості використовуваних адсорбційних матеріалів, а саме, 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.

Тому тема дисертації Беляновської О.А. є актуальною. Вивчення рукопису та автореферату, а також враховуючи сучасні тенденції методів перетворення теплової енергії, дозволяють дійти висновку, що дисертаційна робота Беляновської О.А. присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми розвитку науково-практичних основ адсорбційної трансформації теплової енергії для систем теплопостачання, вентиляції та

кондиціонування на базі нових високоефективних адсорбційних матеріалів, підвищенню досконалості промислових технологічних процесів акумулювання та трансформації низькопотенційної теплової енергії

Аналіз науково-технічної, патентної літератури та сучасних уявлень про процеси адсорбційних трансформації та акумулювання низькопотенційної теплової енергії дозволили автору фахово визначити мету, основні наукові завдання, об'єкт і предмет дослідження, а також напрями та методи дослідної роботи. Поставлені в роботі завдання досліджень доведені до кінцевого логічного вирішення, а сама дисертація є завершеною науково-дослідною роботою та відповідає встановленим вимогам. Структура дисертації Беляновської О.А. складається зі вступу, семи основних розділів, висновків, списку використаних джерел (259 найменування на 29 сторінках), а також додатків. Загальний обсяг дисертації становить 409 сторінок друкованого тексту, містить 6 таблиць та 110 рисунків, 3 додатки на 50 сторінках.

Достовірність наукових положень та висновків дисертаційної роботи підтверджується даними апробації, упровадженнями у навчальний процес (2 акти впровадження) і виробництво (6 актів упровадження). Наукові положення, практичне значення та висновки дисертації логічно побудовані у контексті мети та поставлених завдань, теоретично обґрунтовані й патентно захищені (за результатами проведених досліджень оформлено 13 патентів України на корисну модель).

Про корисність, новизну результатів досліджень, їх практичну значимість та особистий внесок здобувача свідчать 83 друкованих праці: 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.

Опубліковані праці повністю відображають основний зміст дисертаційної роботи та переважний вклад дисертанта. Оцінка обґрунтованості наукових положень в дисертації, їх достовірності і новизни. Наукові положення, висновки, рекомендації, що сформульовані в дисертаційній роботі, теоретично обґрунтовані, а їх достовірність підтверджується результатами експериментальних, порівняльних досліджень, що мають теоретичне підґрунтя.

Тема дисертаційної роботи Беляновської О.А. пов'язана з пріоритетними напрямами розвитку науки і техніки України згідно з п. 3 «Енергетика та енергоефективність» і п. 4 «Раціональне природокористування» статті 3 Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» (зі змінами від 26.11.2015 р. (редакція від

16.01.2016 р.), а також знаходиться у контексті положень Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність».

Поставлені завдання у контексті сформульованої мети досягнуто та доведено до логічного завершення, що дозволило автору одержати дев'ять наукових результатів, що характеризують їх новизну. Авторкою задекларовано й трактуються наукові положення у такий спосіб:

1. Вперше проведено системний аналіз основних факторів, які впливають на ефективність використання адсорбційних трансформаторів теплової енергії на основі нових композитних сорбентів типу «силікагель – кристалогідрат». До уваги взято властивості джерел теплової енергії, характеристики обладнання, а також цілі акумулювання і трансформації, включно з опаленням, гарячим водопостачанням, вентиляцією та кондиціонуванням повітря. На основі аналізу розроблено технології отримання адсорбентів із густиною запасання енергії 2,0-4,0 МДж/кг, які працюють через сорбцію, фазові переходи та теплоперенос.

2. Порівняно ефективність експлуатації адсорбційних теплотрансформаторів при паровому та ультразвуковому зволоженні повітряних потоків. Ультразвукове зволоження виявилось перспективним, оскільки зменшує витрати на зволоження більш як удвічі порівняно з паровим методом.

3. Вперше отримано залежності температурних параметрів термодинамічних циклів енергетичних трансформацій із застосуванням композитних сорбентів типу «силікагель – кристалогідрат», що дозволяє мінімізувати енерговитрати за допомогою 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. Визначено фактори, що впливають на ефективність роботи адсорбційних регенераторів теплоти та вологи, зокрема тепловий та вологісний коефіцієнти. Встановлено основні вимоги до параметрів їхньої 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. Проведено 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. Виявлено фактори, що впливають на ефективність адсорбційного теплового насоса. Показано 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 перетворення теплової енергії майже в 2 рази в порівнянні з паровим зволоженням.

9. Отримала подальший розвиток технологія отримання композитних адсорбентів золь-гель методом зазнала. Вперше запропоновано методи регулювання розміру частинок композитного адсорбенту під час синтезу.

Практичне значення результатів теоретичних і експериментальних досліджень полягає у задекларованих 8 положеннях:

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 конструкцію адсорбційного теплоакumuлюючого 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 значимість роботи підтверджена 13 патентами на корисну модель та 6 актами впровадження.

В першому розділі проведено ґрунтовний аналіз літературних даних щодо процесів адсорбційних трансформації, поглинання та акумулювання перетворювання низько-потенційної теплової енергії та показано їх переваги перед ємнісними та фазово-перехідними теплоакumuлюючими 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: адсорбційних акумуляторів теплової енергії, холодильних машин та кондиціонерів. Обґрунтовано основні критерії підбору робочих пар.

Третій розділ присвячено конструктивним та експлуатаційним характеристикам адсорбційних теплотрансформаторів. Розглянуто експлуатаційні характеристики теплоакумуляуючого пристрою закритого та відкритого типів. Визначено основні статті витрат на експлуатацію теплоакумуляуючого пристрою. Визначено основні фактори, які впливають на ефективність роботи адсорбційного теплоакумуляуючого модуля: конструкція приладу, швидкість потоку повітря, температура та вологість потоку припливного повітря, та встановлено параметри процесів експлуатації, які відповідають максимальним значенням коефіцієнтів корисної дії та дозволяє подавати потік теплого повітря до вентилязованих приміщень відповідно до санітарних правил та норм. Обґрунтовано основні заходи, які дозволяють підвищити енергоефективність роботи пристрою.

В четвертому розділі проаналізовано процеси адсорбційної регенерації теплоти та вологи в системах вентиляції та кондиціонування. Обґрунтовано використання температурного коефіцієнта корисної дії, часу досягнення максимальної адсорбції та споживаної потужності вентилятора в якості вирішальних параметрів для оптимізації експлуатаційних характеристик адсорбційного регенератора теплоти та вологи. Визначено умови за яких спостерігається максимальні коефіцієнти регенерації теплоти та вологи.

П'ятий розділ присвячено аналізу процесів експлуатації адсорбційних кондиціонерів та холодильних установок.

Встановлено основні фактори, які впливають на холодильний коефіцієнт циклу: склад адсорбенту (вміст солі), а також різниця між температурами адсорбенту після адсорбції та температурою регенерації. Показано підвищення холодильного коефіцієнту циклу при зростанні вмісту натрій сульфату в композиті. Підтверджено кореляцію холодильного коефіцієнта установки та режиму регенерації адсорбенту.

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

Показано, що вплив витрати та абсолютної вологості повітря на коефіцієнт перетворення теплової енергії адсорбційного теплового насосу практично ідентичний коефіцієнту корисної дії адсорбційного теплового

акумулятора. Встановлено, що 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.

В сьомому розділі запропоновано метод темплатного синтезу композитних матеріалів шляхом гідролізу силікатного прекурсору – тетраетоксисилану, який проводиться згідно модифікованого методу Штобера в спиртово-аміачному середовищі з наступним мольним співвідношенням компонентів: $1\text{TEOS}:0,3\text{X}:11\text{NH}_3:144\text{H}_2\text{O}:58\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, де X – темплатний агент. Показано вплив вмісту темплатного агенту на структурні параметри отриманих композитів.

У той же час під час вивчення дисертації й автореферату у опонента виникли наступні **дискусійні запитання та рекомендації**:

- в розділі 1 наряду з інформацією про адсорбційні акумулятори теплової енергії наведено характеристики і термохімічних пристроїв, слід пояснити, чому це так?;
- Розділ 2 виконано досить сумбурно, дуже багато посилань на літературні джерела, але ж це є розділ, в якому визначаються основні напрямки дослідження, доцільно було б його значно скоротити, або перенести частину інформації в додатки, щоб не обтяжувати текст дисертаційної роботи;
- Математичні моделі, наведені в розділі 3 наведені подібно «чорному ящику», робиться припущення, що поверхня всіх гранул адсорбенту є рівнодоступною для парів води, не враховано вплив пористості матеріалу на динаміку процесу адсорбції;
- В якості одного з методів підвищення ефективності адсорбційного теплового акумулятора та теплового насоса пропонується ультразвукове зволоження потоку повітря, але при цьому не приділяється уваги можливості бактеріального забруднення шару адсорбенту та утворення плісняви. Необхідно приділити більш уваги цьому питанню;
- Тема дисертації передбачає розробку пристроїв для систем теплопостачання та кондиціонування, але насправді проводиться аналіз роботи лише адсорбційних модулів. Було б доцільно показати, яким чином впливає саме адсорбційний модуль на ефективність роботи власне самої системи;
- аналіз ефективності роботи пристроїв виконується за припущення стабільності властивостей адсорбенту протягом всього періоду експлуатації, було б доцільно підтвердити це результатами експериментальних досліджень;
- при оцінці експлуатаційних характеристик адсорбційного теплового насоса одним зі складових корисної теплоти є теплота конденсації

робочої речовини (адсорбату), а саме, води, було б доцільно оцінити її температуру;

- при розгляді роботи адсорбційних пристроїв відкритого типу не приділено уваги руйнуванню гранул адсорбентів протягом експлуатації, що призводить до потрапляння нанопилу до приміщень та не запропоновані методи рішення цієї проблеми.

Однак, виявлені невідповідності не знижують науково-практичної цінності дисертаційної роботи. Наукова новизна, практичне значення результатів та їх апробація аргументовані, кількість публікацій цілком достатня.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Беляновської Олени Анатоліївни за темою «Розвиток наукових основ створення адсорбційних теплотрансформаторів для систем теплопостачання та кондиціонування» є цілісною завершеною працею, яка вирішує важливу науково-прикладну проблему – розвитку науково-практичних основ адсорбційної трансформації теплової енергії для систем теплопостачання, вентиляції та кондиціонування на базі нових вискоефективних адсорбційних матеріалів, підвищенню досконалості промислових технологічних процесів акумулювання та трансформації низькопотенційної теплової енергії.

Дисертаційна робота має наукове та практичне значення і за ступенем обґрунтування викладених науково-теоретичних і науково-практичних положень, достовірністю та новизною наукових результатів, обробки та аналізу їх результатів повністю відповідає вимогам до докторських дисертацій згідно п. 7 та 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук».

