

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Чалаєва Джамалутдіна Муршидовича «Розвиток теорії та практики сорбційних і парокомпресійних технологій трансформації теплоти», подану до захисту на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

Енергозбереження та раціональне використання теплової енергії є найважливішими завданнями сучасної енергетики. Зростаючі темпи споживання паливно-енергетичних ресурсів і подорожчання енергоносіїв гостро ставлять питання створення та вдосконалення технологій, що спрямовані на підвищення ефективності виробництва і споживання енергії, а також на впровадження енергозберігаючих процесів в енергетику та промисловість. Одним з перспективних напрямків вирішення проблеми зменшення витрат первинного палива та оптимізації енергетичного балансу технологічних процесів є залучення в енергетичний обіг теплоти вторинних енергетичних ресурсів. Ефективним методом утилізації теплоти, що непридатна для прямого використання, є трансформація її на необхідний споживачам вищий (для тепlopостачання) або нижчий (для холодопостачання) температурний рівень.

Найефективніше таке перетворення теплоти здійснюється за допомогою теплоспоживаючих сорбційних термотрансформаторів. Сорбційні термотрансформатори здатні працювати від практично будь-якого джерела низькопотенційної теплової енергії (відпрацьована пара, гаряча вода, вторинні теплові ресурси підприємств, димові гази, що відходять, сонячна, геотермальна енергія тощо).

Конструювання і вдосконалення сорбційних термотрансформаторів вимагає рішення цілого ряду наукових і технічних завдань. Це – вибір і дослідження теплофізичних властивостей робочих тіл, розроблення і аналіз термодинамічних циклів і конструкцій агрегатів, дослідження тепломасообмінних процесів в апаратах термотрансформатора та пошук шляхів їх інтенсифікації. Подальше вдосконалення агрегатів сорбційного типу пов'язано, в першу чергу, з інтенсифікацією процесів тепломасобміну в адсорбері та десорбері. Інший напрямок їх оптимізації – створення нових енергоефективних сорбційних матеріалів, динамічні властивості яких максимально пристосовані до умов робочого циклу.

Розвиток високоефективних енергозберігаючих технологій сорбційного перетворення теплоти і створення сорбційних термотрансформаторів нового покоління, здатних скласти конкуренцію традиційним парокомпресійним тепловим насосам, є актуальним науково-технічним завданням, що вимагає свого рішення.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконувалася у відповідності з науковою тематикою Інституту технічної теплофізики НАН України і безпосередньо пов'язана з



державними тематиками «Розробка промислових технологій на основі теплових насосів з метою енергозбереження» (№ ДР 0103U005686), «Дослідження та розробка енергозберігаючих теплонасосних систем децентралізованого теплохолодо-постачання для житлово-комунального господарства та промисловості з використанням низькопотенційних ВЕР» (№ ДР 0106U005331), «Дослідження тепломасопереносу в термохімічних і сорбційних процесах та створення теоретичних зasad для розробки теплових насосів і акумуляторів теплоти» (№ ДР 0107U002128),

цільовими програмами наукових досліджень НАН України «Розробка та створення енергозберігаючих сорбційних термотрансформаторів на базі нових композитних речовин, що працюють з використанням поновлюваних та вторинних джерел енергії» (№ ДР 0106U009785), «Подовження терміну експлуатації сушильного обладнання шляхом удосконалення теплогенеруючих систем» (№ ДР 0116U006295), «Подовження ресурсу роботи раніше пробурених законсервованих свердловин методами геотермальних технологій генерації теплової і електричної енергії» (№ ДР 0116U004293), «Розробка рекомендацій щодо розрахунків, проектуванню та застосуванню систем геотермального енергопостачання в комунальному господарстві і агропромисловому комплексі» (№ ДР 0117U002687),

конкурсними науковими проектами «Study of solar assisted cooling unit using new adsorbent materials» (INTAS, № 03-51-6260), «Дослідження і розробка ефективних методів використання «провальної» електроенергії для тепло- і холодопостачання споживачів в Росії і Україні із застосуванням термохімічних процесів» (№ ДР 0109U004981), «Исследование совместных процессов тепло- и массопереноса в многокомпонентных системах для разработки сорбционных преобразователей теплоты нового поколения» (№ ДР 0113U000647)

3. Наукова новизна роботи та важливість одержаних результатів.

Запропонований універсальний методологічний підхід для здійснення пошуку та попереднього відбору перспективних робочих тіл для адсорбційних термотрансформаторів, який базується на принципі температурної інваріантності Поляні;

Обґрунтована і практично доведена можливість суттєвого розширення зони робочих концентрацій сольового адсорбенту в адсорбційному термодинамічному циклі при введенні солі в інертний пористий носій;

Вперше синтезований та досліджений в адсорбційному холодильному циклі сольовий адсорбент на базі сорбційної пари хлорид кальцію-метанол і спущеного перліту як носія, на підставі випробувань вивчені енергетичні показники дійсного адсорбційного циклу і розроблені принципи теплотехнічного розрахунку апаратів адсорбційних агрегатів на сольових сорбентах;

Вперше досліджений в натурних умовах сонячний адсорбційний холодильник на сорбційній парі хлорид кальцію-вода, на підставі узагальнення результатів випробувань розроблена методика розрахунку і проектування адсорберів, що працюють в умовах змінної температури гріючого джерела;

Вперше отримані аналітичні залежності, що дозволяють визначити температурні параметри теплонасосного циклу, при яких забезпечується

мінімізація енерговитрат на вилучення вологи з сушильного агента при конвективному сушінні з використанням конденсаційного теплового насоса.

4. Достовірність та обґрунтованість отриманих в роботі результатів та висновків підтверджується коректною постановкою завдань теоретичного та експериментального досліджень, підтвердженням адекватності математичної моделі з задовільним узгодженням розрахункових даних і даних отриманих під час експерименту, застосуванням сучасних методів експериментального дослідження, аналітичного та чисельного моделювання.

5. Практичне значення одержаних результатів.

Отримані теоретичні та експериментальні результати досліджень в напрямку розвитку сорбційних і парокомпресійних технологій трансформації теплоти для утилізації вторинних енергетичних ресурсів та відновлюваних джерел енергії дозволяють забезпечити скорочення споживання паливно-енергетичних ресурсів, що особливо важливо в умовах сучасного економічного розвитку та стану енергетики України.

Наведені в дисертаційній роботі акти впровадження свідчать про те, що результати використовувалися під час розроблення та створення адсорбційних термотрансформаторів та систем зневоднення і нагрівання повітря в промислових технологічних процесах. Впровадженняздійснювалося на вітчизняних та закордонних підприємствах.

6. Структура та обсяг роботи.

Дисертаційна робота має структуру завершеної науково-дослідної роботи. Текст складається із анотації, вступу, 6 розділів, висновків та додатків. Основні матеріали викладені на 317 сторінках друкованого тексту, які містять 119 рисунків і 17 таблиць. Перелік літератури включає 339 джерел.

В *анотації* стисло надано основні шляхи та результати розв'язання науково-прикладної проблеми розвитку науково-технічних основ сорбційних і парокомпресійних технологій трансформації теплоти. Наведено наукову новизну, практичне застосування одержаних наукових результатів, а також список наукових праць за темою дисертації. Анотація надана українською та англійською мовами.

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, мета та задачі, наведені наукова новизна та практична цінність отриманих результатів, особистий внесок здобувача, відомості про апробацію результатів дисертаційної роботи.

У першому розділі виконано аналіз сучасного стану технології сорбційного перетворення теплоти, що дозволило виявити резерви для підвищення енергетичної ефективності адсорбційного термодинамічного циклу шляхом застосування нових енергоємних сорбційних матеріалів та поліпшення вагових і габаритних показників адсорбційних агрегатів за рахунок інтенсифікації процесів тепломасопереносу в апаратах, а також оптимізації температурних параметрів циклів.

Показана перспективність застосування як сорбційних матеріалів хемосорбентів, сорбційна дія яких заснована на ефекті оборотних термохімічних реакцій. Практичне застосування цих робочих речовин пов'язано з проблемою збереження стабільності гранульованої структури адсорбенту при багатократних циклах сорбції-десорбції. Дані проблема вирішується шляхом введення хемосорбенту в інертні пористі носії, який не перешкоджає процесу сорбції і утримує хемосорбент в гранулі носія. Впровадження нових сорбційних матеріалів в практику вимагає детального вивчення процесів тепломасопереносу в апаратах адсорбційних термотрансформаторів на таких робочих тілах.

У другому розділі запропонований універсальний методологічний підхід, який дозволяє здійснювати пошук і попередній відбір ефективних робочих тіл для адсорбційних термотрансформаторів на підставі обмеженого набору експериментальних даних. Для виконання розрахунку достатньо мати одну ізотерму сорбції для даного сорбенту. Такі дані для більшості сорбентів відомі і є в літературних джерелах. Із застосуванням цієї методики створена і систематизована база даних сорбційних матеріалів, перспективних для використання в адсорбційних термотрансформаторах.

У третьому розділі наведені результати систематизації даних з фазової рівноваги оборотних термохімічних реакцій «твірде тіло – газ». Розглянуто використання як сорбентів оксидів та солей лужних і лужноземельних металів. На підставі опрацювання літературних даних з рівноважного тиску пари води над кристалогідратами побудовані лінії рівноваги хімічних реакцій в діапазоні температур кипіння/конденсації холодаагенту (води) 0-50 °C.

За результатами розрахунків визначені хімічні сполуки з сильним, середнім і слабким зв'язком кристалізаційної води. Вибір конкретних робочих тіл для адсорбційного теплового насоса в кожному окремому випадку залежить від необхідного температурного рівня тепlopостачання і температурних параметрів наявних джерел високо- і низькопотенційної теплоти.

У четвертому розділі представлено результати дослідження робочих процесів в адсорбційних термотрансформаторах, що працюють на сольових сорбентах.

Наведено опис лабораторних прототипів адсорбційного теплового насосу та холодаакумулюючого термотрансформатора, викладено методику проведення експериментальних досліджень та порядок обробки дослідних даних. За результатами опрацювання дослідних даних розраховано показники дійсного термодинамічного циклу адсорбційного теплового насосу. Визначено характер впливу температурних параметрів адсорбційного циклу на коефіцієнт перетворення і питому енергоємність. Показана перспективність застосування адсорбційних термотрансформаторів на сольових сорбентах в системах акумулювання теплової енергії.

Проведено натурні випробування сонячного адсорбційного холодильника. Розроблено методологію раціонального проектування сонячного адсорбера з урахуванням кліматичних даних. Наведено результати дослідження впливу

завантаження адсорбера і орієнтації геліоприймача на величину добової холодопродуктивності холодильника.

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

Розглянуто схеми конвективного конденсаційного сушіння в замкненому контурі з повним та частковим проходженням циркулюючого сушильного агента через випарник теплового насоса. Визначена залежність енерговитрат на видалення вологи від параметрів осушуваного повітря.

На підставі виконаних досліджень запропонована номограма, що дозволяє визначити енергоефективні режими зневоднення теплоносія за допомогою теплового насоса.

За результатами розрахункових та експериментальних досліджень визначені оптимальні параметри процесу низькотемпературного сушіння.

У шостому розділі викладено результати досліджень з підвищення енергетичної ефективності систем тепlopостачання з використанням сорбційних і парокомпресійних теплових насосів та наведені дані щодо промислової апробації розроблених теплонасосних установок.

Запропоновано технологічну схему теплонасосної системи вилучення низькопотенційної теплоти ґрунту з використанням вироблених глибинних нафтогазовидобувних свердловин. Розроблена інженерна методика розрахунку теплової потужності геотермального джерела теплоти.

Розроблено схему збільшення температури геотермального джерела за допомогою підвищувального адсорбційного теплового насосу на сольовому сорбенті.

Отримані в роботі результати експериментальних і аналітичних досліджень були використані при розробленні, створенні та впровадженні установок конвективного теплонасосного сушіння та систем теплонасосного тепlopостачання, що підтверджено актами введення в експлуатацію.

У висновках викладено основні результати дисертаційної роботи.

У додатках наведені:

- реєстр свердловин наftових і газових родовищ України з підвищеними значеннями пластових температур;
- акти впровадження матеріалів дисертаційної роботи.

7. Повнота викладення наукових положень, висновків, рекомендацій.

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

8. Відповідність дисертаційної роботи встановленим вимогам.

Дисертаційна робота відповідає вимогам МОН України стосовно наявності результатів проведених досліджень та отриманих науково-обґрунтованих рішень. Автореферат та основні положення дисертації ідентичні за змістом.

9. Оформлення дисертаційної роботи

Дисертація акуратно оформлена згідно вимогам МОН України. В роботі наведена достатня кількість ілюстративного матеріалу.

10. Зауваження по роботі.

1. У розділі 1 більше уваги сконцентровано на огляді літературних джерел щодо дослідження адсорбційних холодильних установок, які працюють від сонячної енергії, і мало уваги приділено огляду адсорбційних теплонасосних систем.

2. У розділі 3 наведена інформація щодо аміакатів (сполук солей з аміаком), яка в подальшому в роботі не використовується.

3. У розділі 5 розглянутий тепловий насос на холодаагенті R22, використання якого в ряді країн заборонено.

4. У розділі 5 не розглянуті і відповідно немає посилань на літературні джерела, в яких вивчались параметри ряду більш енергоефективних схем конвективних теплонасосних сушарок, зокрема, схем з повною рециркуляцією сушильного агента, схем з байпасуванням теплового насоса і ін.

5. На рис. 5.10, де наведено процес теплонасосного сушіння в h-d діаграмі вологого повітря, вісь ординат позначена не як ентальпія, а як температура в °C.

6. У розділі 6 доцільно було б порівняти результати розрахунку за запропонованою методикою теплового розрахунку свердловинного теплообмінника з відомими рішеннями.

7. В тексті дисертації зустрічаються невдалі терміни, наприклад, «тепло» замість «теплота», а також кальки перекладу виразів з російської мови.

11. Висновки

Дисертаційна робота Чалаєва Д.М. є завершеним науковим дослідженням, в якому отримані нові науково-обґрунтовані результати, що вирішують важливу науково-технічну проблему.

Сформульовані в роботі наукові положення, висновки і рекомендації характеризуються високим ступенем обґрунтованості, а їхня вірогідність і новизна не викликають сумнівів.

Зміст автореферату повністю відповідає тексту дисертації, а основні наукові положення, що містяться в них, ідентичні.

За напрямком обраних і вирішених питань дисертаційна робота відповідає спеціальності 05.14.06 – «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика» та профілю спеціалізованої ради Д26.224.01.

На підставі вищевикладеного вважаю, що дисертаційна робота Чалаєва Джамалутдіна Муршидовича «Розвиток теорії та практики сорбційних і парокомпресійних технологій трансформації теплоти» відповідає паспорту

спеціальності та вимогам до докторських дисертацій, а саме пунктам 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів» затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 (зі змінами), а її автор заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Офіційний опонент,
професор кафедри теоретичної і
промислової теплотехніки Національного
технічного університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського» МОН України,
доктор технічних наук, професор

М.К. Безродний

Підпис проф. Безродного М.К. засвідчує:
Вчений секретар КПІ ім. Ігоря Сікорського



В.В. Холявко