

## ВІДГУК

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

### **Актуальність роботи.**

Переведення економіки країни на енергозберігаючий шлях розвитку, раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів та розширення масштабів використання відновлюваних джерел енергії (геотермальної і сонячної) є пріоритетним завданням довгострокової енергетичної політики України.

Одним з шляхів вирішення даних проблем є широкий розвиток геотермальної енергетики за рахунок одержання геотермальної енергії шляхом використання державного фонду раніше пробурених законсервованих свердловин. В Україні в промисловій розробці знаходиться більш ніж 250 дрібних нафтових і газових родовищ. Щорічно деяка кількість родовищ виводиться з експлуатації і свердловини консервуються. Вже на сьогодні парк доступних для освоєння в геотермії свердловин, через їх вивільнення від видобування вуглеводнів, достатній для промислового використання в геотермії. Переважна більшість з усіх свердловин має паспортну інформацію щодо геологічної будови родовищ, необхідно тільки проаналізувати паспортну інформацію усіх наявних свердловин і відібрати з них ті, які становлять інтерес для промислового видобування теплоносія і перетворення його потенціалу на промислову теплоту та на електричну енергію.

У сонячній енергетиці перспективним є розвиток напрямку, що пов'язаний із застосуванням тепловикористовуючих теплових насосів і холодильних установок сорбційного типу на твердих адсорбентах. Адсорбційні агрегати не містять рухомих частин і механізмів, прості в експлуатації та можуть працювати від найпростіших сонячних водонагрівачів.

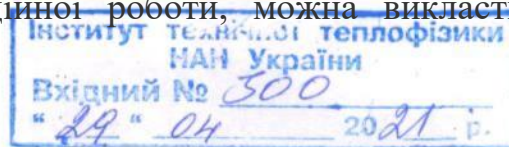
### **Ступінь обґрунтованості та вірогідність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.**

Наукові положення, висновки та рекомендації, які сформульовані в дисертаційній роботі Чалаєва Д.М., обґрунтовані та базуються на коректній постановці мети і завдань дослідження, використанні сучасних методів теоретичного та експериментального дослідження, зіставленні та аналізі наукових результатів і якісному формулюванні отриманих висновків. Якість результатів практичної частини дисертації підтверджена також широким впровадженням у виробництво.

Дисертація та автореферат цілком відповідають паспорту спеціальності 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

### **Основні положення наукової новизни отриманих результатів.**

У загальному вигляді ключові результати, які отримані вперше та розкривають наукову новизну дисертаційної роботи, можна викласти таким чином:



1. Для здійснення пошуку та попереднього відбору перспективних робочих тіл для адсорбційних термотрансформаторів запропоновано універсальний методологічний підхід, який базується на принципі температурної інваріантності Полянї.

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

3. Вперше синтезовано та досліджено в адсорбційному холодильному циклі сольовий адсорбент на базі сорбційної пари хлорид кальцію-метанол і спученого перліту як носія, на підставі випробувань вивчено енергетичні показники дійсного адсорбційного циклу і розроблено принципи теплотехнічного розрахунку апаратів адсорбційних агрегатів на сольових сорбентах.

4. Вперше досліджено в натурних умовах сонячний адсорбційний холодильник на сорбційній парі хлорид кальцію-вода, на підставі узагальнення результатів випробувань розроблено методику розрахунку і проектування адсорберів, що працюють в умовах змінної температури гріючого джерела.

5. Вперше отримано аналітичну залежність, що дозволяє визначити температурні параметри теплонасосного циклу, при яких забезпечується мінімізація енерговитрат на вилучення вологи з сушильного агента при конвективному сушінні з використанням конденсаційного теплового насоса.

#### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Результати дисертаційної роботи було використано в межах виконання наступних бюджетних тематик Інституту технічної теплофізики НАН України:

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

**Практичне значення отриманих результатів полягає в розробленні сукупності заходів, методів, способів, конструкційних та схемних рішень для**

вдосконалення технологій сорбційного перетворення теплоти та підвищення ефективності промислових технологічних процесів, які ґрунтуються на технологіях сорбційної та парокомпресійної трансформації теплоти. До найбільш вагомих можна віднести:

- Вперше розроблено методика пошуку і вибору адсорбентів, перспективних для застосування як робочих тіл сорбційних перетворювачів теплоти, яка дозволяє здійснювати пошук оптимальних адсорбентів на підставі обмеженого набору експериментальних даних, в тому числі за ізотермами адсорбції, що отримані при температурах, які відрізняються від реалізованих в адсорбційному циклі.
- Створено дослідно-промисловий зразок сонячного адсорбційного холодильника, який було випробувано на дослідному полігоні Міністерства енергетики України в м. Алушта.
- Розроблена та впроваджена теплонасосна система осушення повітря в лінії виробництва харчових порошоків з тропічних фруктів у В'єтнамі.
- Розроблена конструкція та виготовлений осушувач повітря для пристрою сушіння подрібнених відходів поліетилентерефталату на базі лінії ЛГТВ-100 для ВАТ «УкрНДПластмаш».
- Розроблена технічна документація, створено та змонтовано зразок модульно-блочної зерносушильної установки з універсальним теплогенератором теплонасосного типу на Державному підприємстві "Український державний центр по випробуванню та прогнозуванню техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва" (УкрЦВТ).
- Розроблена технологічна схема та проектно-кошторисна документація на теплонасосну установку гарячого водопостачання потужністю 1,5 МВт в м. Краматорську Донецької області. У відповідності до розробленої технічної документації створена теплонасосна установка гарячого водопостачання, яка забезпечує отримання розрахункової кількості гарячої води.

**Достовірність результатів дисертаційної роботи підтверджується** використанням науково-обґрунтованих методик аналітичних та експериментальних досліджень, коректною постановкою завдань, адекватністю математичної моделі з експериментальними даними, відтворюваністю результатів експериментальних досліджень, використанням сучасних програмних середовищ, а також використанням отриманих результатів у промисловості.

**Повнота викладу основних наукових положень дисертації в опублікованих працях.** Зміст дисертації відображено у 65 наукових працях, 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.

**Апробація результатів дисертації.** Результати та основні положення роботи доповідалися та обговорювалися на таких заходах: V, VI, VII, VIII, IX, X та XI Міжнародних конференціях «Проблеми промислової теплотехніки», м. Київ, 2007, 2009, 2011, 2013, 2015, 2017 рр.; III Міжнародній конференції «Нетрадиційна енергетика в XXI веку», АР Крим, м. Судак, 2002 р.; VI, IX, X, XI, XIX та XX Міжнародних конференціях «Відновлювана енергетика XXI століття», АР Крим, 2005, 2008, 2009, 2010 рр., м. Київ, 2018, 2019 рр.; 1-й, 2-й,

3-й, 4-й та 7-й Міжнародних науково-практичних конференціях «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)», м. Москва, 2002, 2005, 2008, 2011, 2020 pp.; V та XIV Мінських міжнародних форумах з тепломасообміну, м. Мінськ, 2004, 2012 pp.; V Minsk International Seminar “Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators”, Minsk, Belarus, 2003; 1-му, 2-му та 4-му Міжнародних конгресах «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування», м. Львів, 2009, 2012, 2016 pp.; XI, XIV, XV Міжнародних конференціях «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв» м. Одеса, 2006, 2012, 2014 pp.; Міжнародних науково-практичних школах-семінарах «Підвищення енергетичної ефективності харчових і хімічних виробництв», м. Одеса, 2007, 2009, 2010 pp.; I та VI Міжнародних науково-практичних конференціях «Інноваційні енерготехнології», м. Одеса, 2011, 2017 pp.; Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми розвитку систем енергетики і автоматики в АПК», м. Київ, 2012 р.; 1-й та 2-й Міжнародних науково-практичних конференціях «Chemical Technology and Engineering (Хімічна технологія та інженерія)», м. Львів, 2017, 2019 pp.

**Ідентичність змісту автореферату і основних положень дисертації** підтверджується повною мірою, автореферат містить тільки ті положення, які є у тексті рукопису дисертації.

### **Структура та зміст роботи.**

Дисертація є завершеною науковою працею і складається з анотації, вступу, 6 розділів, висновків та додатків, списку використаної літератури на 339 джерел. Загальний обсяг роботи становить 317 сторінок основного тексту, 119 рисунків, 17 таблиць та 12 додатків.

**У вступі** дано обґрунтування актуальності роботи, визначені мета та завдання дослідження, наукова новизна та практичне значення одержаних результатів, наведені відомості про публікації автора за темою дисертації.

**У першому розділі** вивчено сучасний стан технології сорбційного перетворення теплоти, проведений аналіз термодинамічних циклів і температурних меж застосування сорбційних термотрансформаторів, зіставлені фізико-хімічні та термодинамічні характеристики робочих речовин, визначені шляхи вдосконалення перетворювачів теплоти адсорбційного типу.

Відзначено, що у традиційних адсорбційних термотрансформаторах як робочі тіла застосовуються адсорбенти, дія яких заснована на ефекті фізичної адсорбції (цеоліти, силікагелі, активовані вугілля). Широкому використанню цього обладнання перешкоджає низька енергетична ефективність адсорбційних агрегатів через малу сорбційну ємність даних адсорбційних матеріалів (менше 10 % за масою) і, як наслідок, великої матеріалоємності та теплової інерційності адсорбера. Поліпшення енергетичних показників адсорбційних агрегатів може бути досягнуто шляхом створення нових адсорбційних матеріалів з великою вологоємністю.

**В другому розділі** на базі принципу температурної інваріантності Поляні розроблено методику пошуку та попереднього відбору адсорбентів, придатних для застосування як робочих тіл адсорбційних холодильних установок. Методика

дозволяє вибрати оптимальні сорбенти на підставі обмеженого набору експериментальних даних, у тому числі з ізотерм адсорбції, що одержані при температурах, які відрізняються від температур, при яких здійснюється певний адсорбційний цикл. Використовуючи запропонований підхід, можна обрати перспективні адсорбенти для інших адсорбційних теплових пристроїв – теплових насосів, систем глибокого охолодження тощо.

В *третьому розділі* показано, що перспективним напрямком вирішення проблеми невисокої енергоємності традиційних адсорбційних матеріалів є застосування як адсорбентів солей лужних і лужноземельних металів, які працюють з використанням оборотних термохімічних реакцій і утворюють з парою холодоагенту тверді хімічні сполуки типу кристалогідратів. Наведено термохімічні реакції утворення/розкладання кристалогідратів, які можуть бути використані як робочі тіла адсорбційних термотрансформаторів і побудовано лінії рівноваги хімічних реакцій. Вивчено можливість використання в конденсаторі і випарнику кристалогідратів зі слабким зв'язком кристалізаційної води, тиск пари над якими близький до тиску пари над чистою водою. Заміна процесу конденсації процесом сорбції сприяє зростанню теплового ефекту і підвищенню коефіцієнта перетворення адсорбційного циклу.

В *четвертому розділі* викладена методика теплотехнічного розрахунку апаратів адсорбційної холодильної установки, яка працює з використанням теплоти сонячного випромінювання, а також наведені результати натурних випробувань експериментальних зразків адсорбційних термотрансформаторів з використанням нових робочих тіл. Розроблений і досліджений новий сорбційний матеріал для адсорбційних холодильних установок, який дозволяє виробляти холод з температурою мінус 25 °С. Досягнуте високе значення енергоємності досліджених сольових сорбентів (в 3-4 рази більше в порівнянні з теплоакумулюючими матеріалами з фазовим переходом) показало перспективність застосування адсорбційних термотрансформаторів на нових сорбційних матеріалах в системах акумулювання теплової енергії, що працюють з використанням так званої «провальної» електроенергії. З урахуванням цінового коефіцієнта 0,5 на нічний тариф на електроенергію і коефіцієнта перетворення адсорбційного термотрансформатора 1,5, визначено, що ефективний коефіцієнт перетворення досягає 3.

В *п'ятому розділі* розглянуто різні технологічні схеми підключення теплового насоса до камерної конвективної сушарки і досліджено процеси зневоднювання сушильного агента за допомогою конденсаційного теплового насоса. Досліджено залежність енерговитрат на вилучення вологи від тепловологісного стану сушильного агента. Для визначення раціональних режимів роботи теплового насоса, при яких забезпечуються мінімальні витрати енергії на весь процес сушіння, проведено дослідження кінетики сушіння термолабільного матеріалу при різних вологовмістах сушильного агента. За результатами досліджень оптимізовано режими роботи теплового насоса і розроблено спосіб теплонасосного конвективного сушіння з перемінним режимом роботи теплонасосного агрегату.

В *шостому розділі* викладені результати досліджень з підвищення енергетичної ефективності систем тепlopостачання з використанням сорбційних і

парокомпресійних теплових насосів та наведені дані щодо промислової апробації розроблених теплонасосних установок.

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

Запропоновано здійснювати вилучення геотермальної енергії шляхом використання стовбура свердловини як ґрунтового теплообмінника, через який по замкненому контуру циркулює проміжний теплоносіє. Розроблено інженерну методичку розрахунку теплопередачі в свердловині і за результатами аналітичного дослідження свердловинного теплообмінника визначені оптимальні режими його експлуатації при роботі в складі системи теплопостачання з різними типами теплових насосів. Розроблено та розраховано технологічну схему підвищення температурного потенціалу теплоносія з застосуванням теплового насоса адсорбційного типу. Показано, що за допомогою підвищувального адсорбційного теплового насоса на нових сольових адсорбентах температура теплоносія після свердловинного теплообмінника може бути збільшена до рівня достатнього для вироблення електричної енергії за допомогою ORC-установок.

У *висновках* викладені найважливіші наукові й прикладні результати отримані автором дисертаційного дослідження. Зроблені здобувачем висновки в основному відтворюють найбільш важливі наукові результати проведених досліджень і підтверджують їхню новизну.

В *додатках* наведені дані з реєстру свердловин нафтових і газових родовищ України з підвищеними значеннями пластових температур та надані акти впровадження матеріалів дисертаційної роботи.

Разом з тим до дисертаційної роботи Чалаєва Д.М. є наступні зауваження:

1. Використані в розрахунках сонячного геліоприймача величини теплових втрат (підрозділ 4.2.1) не відповідають сучасним вимогам до даного типу обладнання.

2. В підрозділі 4.2.1 дисертації наведений розрахунок оптимального кута нахилу сонячного адсорбера і маси сорбенту в ньому за даними з інтенсивності сонячного випромінювання в умовах півдня України. Проте з роботи не зрозуміло на скільки ці параметри будуть різнитися для інших географічних районів.

3. В розділі 5 не наведені дані з питомої витрати енергії на кг випаровуваної з матеріалу вологи, за якими можливо оцінити енергоефективність теплонасосної сушарки.

4. Було б доцільно навести в авторефераті експериментальні дані, на базі яких оптимізовано параметри функціонування теплонасосної сушарки на всіх стадіях процесу сушіння.

5. З точки зору використання геотермальної теплоти за допомогою адсорбційного теплового насоса було б доречно представити техніко-економічні розрахунки даної системи з визначенням її терміну окупності.

Проте висловлені зауваження не торкаються суті дисертаційного дослідження, вони носять рекомендаційний характер, можуть стати предметом

для наукової дискусії і не применшують цінності основних наукових положень, висновків і рекомендацій, які виносяться на захист, і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертації, та можуть бути враховані у подальшій науковій діяльності автора.

**Характеристика змісту та рукопису дисертації.** Дисертаційна робота Чалаєва Д.М. є логічним, добре структурованим науковим твором з послідовним викладенням матеріалу. Оформлення дисертації відповідає вимогам, які ставляться до подібних наукових праць. Усі позиції списку використаних літературних джерел мають відповідні посилання у тексті рукопису. Запозичень з робіт інших авторів без відповідних посилань на ці наукові праці у тексті рукопису не виявлено. Аналіз змісту дисертації Чалаєва Д.М. дає можливість оцінити її як закінчену наукову роботу, яка містить нові науково-обґрунтовані результати.

### **Висновок.**

Дисертаційна робота Чалаєва Джамалутдіна Муршидовича «Розвиток теорії та практики сорбційних і парокомпресійних технологій трансформації теплоти» є завершеною науково-дослідною роботою, яка вирішує важливу науково-прикладну проблему, яка полягає у вдосконаленні технології сорбційного перетворення теплоти та у підвищенні ефективності промислових технологічних процесів, які ґрунтуються на технологіях сорбційної та парокомпресійної трансформації теплоти.

Робота містить нові вагомі наукові результати для теплоенергетичної галузі України, відповідає паспорту спеціальності 05.14.06 – «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика».

За актуальністю, новизною, глибиною досліджень, достовірністю та практичною цінністю, об'ємом та змістом дисертаційна робота повністю відповідає вимогам пунктів 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету міністрів України від 24.07.2013 р. №567 (зі змінами), які висуваються до кваліфікаційних наукових праць на здобуття наукового ступеня доктора наук, а її автор, Чалаєв Джамалутдін Муршидович, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика».

Офіційний опонент,  
член-кореспондент НАН України,  
доктор технічних наук, професор,  
заступник директора з наукової роботи  
Інституту відновлюваної енергетики  
НАН України



В.Ф. Резцов