

## ВІДГУК

офіційного опонента – доктора технічних наук, професора Корнієнка Ярослава Микитовича на дисертаційну роботу Сорокової Наталії Миколаївни «Математичне моделювання динаміки тепломасопереносу в процесах сорбції і сушіння в апаратах періодичної і безперервної дії», представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

### *Актуальність теми дисертаційної роботи*

Математичне моделювання складних явищ перенесення в дисперсних системах при наявності фазового переходу дозволить підвищити ефективність технологічних процесів та відповідного технологічного обладнання.

В першу чергу це стосується процесів адсорбції та сушіння при видаленні рідкої фази із змінним складом компонентів із системи зі складною геометрією.

Існуючі моделі сушіння не можуть бути використані для розрахунку таких процесів.

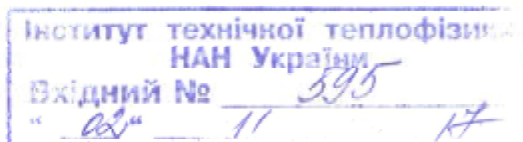
Тому застосування методів математичного моделювання для дослідження кінетичних закономірностей таких процесів дозволить науково обґрунтувати умови проведення та технологічні рішення для їх реалізації.

Отже, тема дисертаційної роботи Сорокової Н. М., яка пов'язана із розвитком теорії багатofакторних процесів тепло- масоперенесення при наявності фазових перетворень із застосуванням методів математичного моделювання для розроблення енергоефективного обладнання, є актуальною.

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

Дисертаційна робота є складовою частиною наукових досліджень, які знаходились у плані бюджетних тем № ДР 01020U002344 "Дослідження процесів тепломасообміну при зневодненні колоїдних капілярно-пористих матеріалів та створення енергоресурсозберігаючих екологічно безпечних технологій", № ДР 0107U002128 "Дослідження тепломасопереносу в термохімічних і сорбційних процесах та створення теоретичних засад для розробки теплових насосів та акумуляторів теплоти", № ДР 0112U001930 "Дослідження динаміки тепломасопереносу, фазових перетворень та усадки при зневодненні колоїдних капілярно-пористих матеріалів конденсаційним методом", в яких автор була одним з відповідальних виконавців і що виконувались в Інституті технічної теплофізики НАН України.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації підтверджується достатнім обсягом результатів досліджень, коректністю постановок математичних задач і припущень у фізичних



моделях, а також порівняльним аналізом теоретичних та експериментальних результатів.

В процесі детального аналізу дисертаційної роботи та автореферату не виявлено висновків та тверджень, що викликають сумніви.

### **Наукова новизна результатів досліджень**

Наукова новизна полягає у розвитку теорії тепло- масообміну при адсорбції і сушінні в консолідованих та диспергованих пористих структурах.

До найбільш суттєвих наукових результатів, одержаних в роботі, відносяться:

- аналітичні залежності для визначення базових параметрів в системі «адсорбент – шар рідини – газова фаза»;
- математична модель процесів перенесення при наявності фазового переходу в дисперсному шарі адсорбенту;
- математична модель тепло- масо переносу при сушінні пористих тіл, що містять багатокomпонентну рідину;
- розроблений новий конвективно-конденсаційний спосіб сушіння термолабільних матеріалів, що передбачає зміну у часі температури та вологовмісту сушильного агента і забезпечує отримання якісного висушеного продукту, при зниженні часу і витрат енергії на проведення процесу безперервного сушіння.

### **Практична цінність результатів дисертаційної роботи**

– Створені математичні моделі, числові методи розрахунку і програмне забезпечення можуть застосовуватись в науково-дослідних, освітніх і проектних установах для вивчення процесів тепломасопереносу і фазових перетворень в пористих системах різної структури з одно- і багатокomпонентною рідкою фазою, що мають місце в процесах сорбції і сушіння, які призначені для використання при проектуванні сушильного і адсорбційного обладнання.

– Запропоновані методи числового визначення ізотерми адсорбції та коефіцієнта стисненої дифузії в капілярно-пористих тілах.

– Розроблений конвективно-конденсаційний спосіб сушіння термолабільних матеріалів забезпечує мінімальний вологовміст та задану якість готового продукту при суттєвому зменшенні енерговитрат. Запропонована технологічна схема двохзонної прямої стрічкової сушильної установки з тепловим насосом дозволить реалізувати конвективно-конденсаційний спосіб сушіння термолабільних матеріалів, забезпечуючи економію енергії на 1 кг випареної вологи на 15 – 20 %.

## Короткий аналіз змісту роботи

Дисертаційна робота складається із вступу, змістовної частини із шести розділів, загальних висновків, переліку використаних джерел та додатків. загальний об'єм дисертації складає 320 сторінок (290 сторінок основної текстової частини, 75 рисунків і 171 бібліографічних найменувань на 18 сторінках, а також 3 додатки: зі списком публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації, з актами впровадження результатів наукових досліджень та нагород).

*У вступі викладені:* обґрунтування актуальності вибраної теми, зв'язку її з науковими програмами, цілі та задачі дисертаційної роботи, визначається наукова новизна отриманих результатів, що виносяться на захист, практична цінність роботи. Наведено відомості про особистий внесок здобувача, відомості про публікації автора по темі дисертації та апробація результатів. Об'єм і форма вступу відповідають загальноприйнятим вимогам до докторської дисертації та достатні для попереднього ознайомлення з вихідними передумовами і змістом положень, що виносяться автором на захист.

*У першому розділі* представлено огляд сучасного стану проблеми, що розглядається, і на підставі цього виконано постановку задач дослідження.

Насамперед, автор розглядає основні фактори, що впливають на процеси переносу в консолідованих і диспергованих пористих системах при сушінні та адсорбції. Далі зроблено огляд сучасних емпіричних, емпірично-теоретичних та теоретичних методів дослідження адсорбції і сушіння в апаратах періодичної і безперервної дії, де доводяться переваги теоретичних методів, які є набагато економічнішими від експериментальних і дозволяють дослідити динаміку цих процесів. Проведено огляд існуючих математичних моделей динаміки адсорбції і сушіння, зазначено, що відомі математичні моделі описання процесу безперервного сушіння вимагають значного обсягу експериментальної інформації і їх точність є невисокою.

На основі аналізу літературних джерел автор робить висновок відносно доцільності проведення подальших досліджень на базі математичного моделювання процесів тепломасопереносу і фазових перетворень при адсорбції і сушінні в консолідованих і дисперсних пористих системах, в системах з багатокомпонентною рідиною фазою та зі складною геометрією. Дослідити динаміку і кінетику сушіння в апаратах безперервної дії.

Аналіз літературних джерел дозволив автору сформулювати конкретні наукові задачі, що необхідні для досягнення поставленої цілі дисертаційної роботи.

Надаючи оцінку сформульованим задачам з точки зору наукової і практичної цінності, слід підкреслити, що вони цілком відповідають вимогам до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

*У другому розділі* дисертаційної роботи сформульовано механізми масопереносу на зовнішніх і внутрішніх поверхнях в пористих системах в процесах адсорбції і сушіння, розглянуто вплив адсорбційних сил на протікання цих процесів. Побудовано дифузійну і дифузійно-фільтраційну математичні

моделі розрахунку динаміки тепломасопереносу і фазових перетворень при адсорбції і сушінні в капілярно-пористих матеріалах. Зазначені припущення, які прийняті при побудові математичних моделей, виводяться рівняння, які описують процеси переносу, визначаються параметри, що входять до рівнянь.

Відмінною рисою запропонованих в роботі математичних моделей є спосіб знаходження функції інтенсивності фазових перетворень як різниці потоків часток рідини, що досягли енергії активації та випарились, і потоку молекул пари, що конденсуються на поверхні рідкого шару, який вкриває зовнішні і внутрішні стінки пористого тіла. Для розрахунку інтенсивності фазових перетворень в об'ємі тіла знайдено вираз для площі поверхні контакту рідкої і газової фаз,

Математичні моделі дозволяють простежити динаміку молекулярного (дифузійна модель) та молекулярно-конвективного (дифузійно-фільтраційна модель) переносу в кожній зі зв'язаних речовин – рідини, парі й інертному газі за умови, що зміною структури і пористості матеріалу в процесі зволоження і сушіння можна зневажити.

Розроблено ефективні чисельні методи реалізації побудованих моделей. При дослідженні процесу сушіння капілярно-пористого тіла, коли основним механізмом переносу є дифузійний тепломасоперенос, розрахунковий метод базується на тришаровій явній різницевої схемі. Для дослідження інтенсивних процесів сушіння, коли поряд з дифузійним, помітну роль грає фільтраційний масоперенос, чисельний метод розрахунку базується на явній тришаровій перерахунковій різницевої схемі. Отримано умови стійкості розроблених різницевих схем. Проведені чисельні дослідження динаміки і кінетики процесів сорбції та десорбції в шарі силікагелю.

Запропоновано алгоритм чисельного визначення ізотерми адсорбції на базі інтегральної функції розподілу пір по розмірах. Він дозволяє визначати рівноважний вологовміст для будь-якого пористого матеріалу у всьому діапазоні значень відносної вологості навколишнього середовища. Результати чисельного моделювання добре узгоджуються з експериментальними даними.

Розроблено метод визначення коефіцієнта дифузії зв'язаної речовини в пористих середовищах, який на відміну від існуючих методів не потребує вимірювання локальних концентрацій рідини в пористому тілі, усуває обмеження на форму тіла і забезпечує погрішність, близьку до погрішності вихідної інформації.

*Третій розділ* присвячено розробці теоретичних положень тепломасопереносу і фазових перетворень в дисперсних пористих системах. Сформульовано фізичну, дифузійну і дифузійно-фільтраційну математичні моделі та чисельні методи їх розрахунку. Побудовано програму розрахунку та проведено чисельні експерименти. Результати чисельного моделювання зміни середнього вологовмісту в шарі гранульованого адсорбенту (цеоліту) в процесах адсорбції і десорбції і їх порівняння з відомими експериментальними даними свідчить про адекватність математичних моделей і ефективності методів розрахунку. Слід зазначити, що визначення температури твердого гранульованого адсорбенту шляхом експериментальних досліджень не представляється можливим, хоча ця

характеристика є визначальною з точки зору інтенсифікації процесів і збереження властивостей адсорбентів.

Розроблено метод канонічних елементів для розрахунку динаміки неізотермічної сорбції та сушіння в пористих тілах складної конфігурації. Метод базується на апроксимації вихідного диференційного рівняння балансом рівнянням для елемента канонічної форми, що будується на нерівномірній різницевій сітці. Перевагами цього методу по відношенню до існуючих є відносна простота, точність розрахунків, можливість автоматизованої побудови регуляризованих сіток.

У *четвертому розділі* показана можливість практичного застосування розроблених математичних моделей динаміки адсорбції і десорбції. Проведено дослідження проходження цих процесів в термічних трансформаторах.

Математичне моделювання динаміки зволоження та осушення твердих сорбентів, що розміщуються в адсорбері з розвиненою поверхнею теплообміну пов'язано з рішенням сполученої задачі теплопровідності для металеві оребреної поверхні і тепломасопереносу для дисперсного шару. Побудовані математичні моделі тепломасопереносу і фазових перетворень при зволоженні і регенерації гранульованих сорбентів в адсорберах прямокутної та циліндричної конфігурації з повздовжнім і поперечним оребренням поверхні теплообміну. Розроблено чисельні методи розрахунку та програми розрахунку спряженої задачі теплопровідності і тепломасопереносу. Проведено чисельне дослідження впливу способу підведення теплоти, температури, геометричних параметрів шару і теплообмінної поверхні та ряду інших параметрів на інтенсивність зволоження і осушення сорбентів. Результати розрахунків добре узгоджуються з експериментальними даними.

*П'ятий розділ* присвячено розвитку теорії сушіння пористих матеріалів з багатокомпонентною рідинною фазою.

Отримано вирази для інтенсивності випаровування і теплоти фазового переходу компонентів рідини, та формула для рівноважного парціального тиску пари компонентів рідинної суміші, з якої випливають емпіричні закони Рауля для ідеальних розчинів та Генрі для гранично розбавлених розчинів.

Розроблені математична модель та чисельний метод розрахунку динаміки тепломасопереносу і фазових перетворень при сушінні капілярно-пористих тіл з багатокомпонентною рідинною фазою. Результати порівняння проведених автором чисельних і фізичних експериментів свідчать про адекватність математичної моделі.

У *шостому розділі* обґрунтовані і вперше побудовані математичні моделі тепло- і масопереносу, фазових перетворень і деформування при зневодненні капілярно-пористих і колоїдних капілярно-пористих матеріалів в сушильних установках безперервної дії. Для цього застосовувалось рівняння переносу субстанції для середовищ, що деформуються. Отримані рівняння для визначення середніх значень тиску, температури, швидкості і об'ємних концентрацій пари і повітря в сушильному агенті в деякому перетині по довжині каналу, для чого використано балансові рівняння, рівняння нерозривності та стану для газової

фазових середовищ. Проблеми теплової та масової передачі, Київ 2007, 2009, 2011, 2013.

суміші. Представлено алгоритм і створено програми розрахунку динаміки тепломасопереносу, фазових перетворень і усадки при безперервному сушінні. Чисельний метод розрахунку дифузійної математичної моделі колоїдного капілярно-пористого тіла базується на тришаровій явній різницевої схемі і процедурі розщеплення алгоритму по фізичних факторах. Досліджено апроксимацію і стійкість систем різницевих рівнянь.

Викладено новий конвективно-конденсаційний спосіб сушіння термолабільних матеріалів, що передбачає зміну у часі температури та вологовмісту сушильного агента і забезпечує отримання якісного висушеного продукту, при зниженні часу і витрат енергії на проведення процесу. Для його реалізації запропоновано технологічну схему двохзонної прямої стрічкової сушильної установки.

У висновках наводиться перелік основних наукових і практичних результатів, одержаних у дисертаційній роботі.

В цілому дисертаційна робота справляє позитивне враження своєю завершеністю, структурою та логічною послідовністю викладеного матеріалу.

Результати роботи у вигляді рекомендацій по вибору режимних параметрів роботи при проектуванні адсорбційного та сушильного обладнання впроваджено Консорціумом «Інноваційно-технологічна група», ТОВ «БМ-Інжиніринг», та використовуються у навчальному процесі базових технічних університетів України, що підтверджується відповідними актами.

### **Повнота викладення результатів дисертації в опублікованих роботах**

Основні результати дисертаційної роботи викладені у 54 друкованих працях, з яких 1 монографія, 26 статей у наукових фахових виданнях, з яких 5 статей у іноземному виданні, що входить до наукометричної бази Скопус, 3 статті у виданнях, що входять до наукової бази РИНЦ, 3 патенти на винахід, 24 тези та доповіді на наукових конференціях.

**В цілому оформлена дисертація** відповідає вимогам ДСТУ 3008-95 "Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення" та вимогам ВАКу України, висвітленими в Бюлетені ВАКу України за №2, 2000р та у Бюлетні ВАК за №9-10 2011 року.

Експериментальні результати підтверджені даними теоретичних розрахунків. В цілому сукупність отриманих результатів є незаперечною та добре узгоджується із сучасним теоретичним рівнем уявлень щодо процесів перенесення в дисперсних системах.

### **Апробація результатів дисертації.**

Основні положення і результати роботи доповідалися й обговорювалися на Міжнародних науково-практичних конференціях «Сучасні енергозберігаючі теплові технології», Москва 2005, 2008, 2011, 2014, на VI і XIV Мінських міжнародних форумах по тепло- і масообміну, Мінськ 2008, 2012, на IX –XIII Міжнародних наукових конференціях «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв», Одеса 2006 – 2010, на V–VIII Міжнародних конференціях Проблемипромислової теплотехніки», Київ 2007, 2009, 2011, 2013,

2015, на Міжнародному науково-технічному семінарі «Актуальні проблеми сушки і термовологісної обробки матеріалів», Вороніж 2010, на I та II Міжнародних конгресах «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування», Львів 2009, 2012, 2016, на I–V Міжнародних науково-практичних конференціях «Іноваційні енерготехнології», Одеса 2011–2015, на Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми розвитку систем енергетики і автоматики в АПК», Київ 2010, 2012, 2015, на III міжнародній науково-технічній конференції «Нестационарні, енерго- і ресурсозберігаючі процеси і обладнання в хімічній, нано- і біотехнології», Москва 2013, веб-конференція (WEBINAR) «Международные Лыковские научные чтения, посвященные 105-летию академика А.В. Лыкова», Москва 2015, XI міжнародна науково-практична конференція «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання», Київ 2016, Міжнародна наукова конференція «Хімічна технологія та інженерія», Львів 2017.

### **Оцінка ідентичності змісту автореферату й основних положень дисертації**

Зміст та структура автореферату ідентично відображують викладені у дисертації етапи проведення досліджень, основні наукові результати та висновки.

### **Зауваження та побажання до дисертаційної роботи:**

1. На практиці в розрахунках адсорберів з нерухомим адсорбентом широко застосовується модель адсорбційної хвилі і рівняння М.О. Шилова для визначення часу відпрацювання адсорбційної ємності сорбенту. Доцільно було б оцінити, як збігаються результати розрахунку динаміки адсорбції по запропонованим математичним моделям з теорією М.О. Шилова.
2. В роботі недостатньо обґрунтовано використання потенціалу взаємодії частинок Сазерленда при оцінці ступеня впливу додаткових адсорбційних сил на динаміку тепломасообміну в адсорбентах.
3. У зв'язку з розробкою способу сушіння термолабільних матеріалів недостатньо чітко сформульовано критерій оптимізації технології, що відповідає запропонованому способу. Вважається, що основним критерієм оптимізації технологічних процесів є економічний фактор. Однак в роботі цей фактор, як критерій оптимізації процесу сушіння за пропонованим способом, в явному вигляді не розглядається.
4. У представленому в дисертації способі сушіння термолабільних матеріалів підведення теплоти до пористого тіла від сушильного агенту регулюється зміною температури, але не враховується швидкість теплоносія. Аналіз впливу цього фактору у роботі відсутній.

