

ВІДГУК

на дисертаційну роботу **Сорокової Наталії Миколаївни**
«Математичне моделювання динаміки тепломасопереносу в процесах сорбції і сушіння в апаратах періодичної і безперервної дії»,
 подану на здобуття наукового ступеня **доктора технічних наук**
 за спеціальністю 05.14.06 – **Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика**

Актуальність теми дисертації.

Процеси адсорбції і сушіння широко застосовуються в багатьох виробничих технологіях хімічної, нафтопереробної, харчової, енергетичної, будівельної та інших галузей промисловості. Однією з основних задач, що стоїть перед науковцями України це створення нових високоефективних процесів і вдосконалення вже діючих. В основі тепломасообмінних процесів лежать складні фізико хімічні явища. Вони змінні в часі і просторі. Такого роду процеси характеризуються складною взаємодією складових фаз і компонентів, в результаті чого вивчати їх з позиції класичних детермінованих законів переносу і зберігання в ряді випадків не вдається. Разом із цим, інтенсифікація цих процесів та їх оптимізація з точки зору енергетичних та сировинних ресурсів є неможливою без урахування таких факторів, як рівновага, кінетика, динаміка та фазові перетворення. Вплив цих факторів на тепломасоперенесення в багатофазних пористих системах ускладнює, а іноді робить і неможливим їх експериментальне дослідження. Застосування методів математичного моделювання дає змогу прогнозувати статичку, динаміку та кінетику тепло- і масоперенесення, фазові і структурні перетворення в капілярно-пористих і колоїдних капілярно-пористих матеріалах під час адсорбції і сушіння, та виявляти найбільш раціональні зовнішні параметри для здійснення цих процесів. Таким чином, обраний напрямок досліджень дисертаційної роботи є актуальним і перспективним.

Актуальність дисертаційної роботи підтверджується ще й тим, що вона виконана в Інституті технічної теплофізики згідно з планами держбюджетних НДР НАН України за період з 2004 по 2015 роки. Зокрема, "Дослідження процесів тепломасообміну при зневодненні колоїдних капілярно-пористих матеріалів та створення енергоресурсозберігаючих екологічно безпечних технологій" номер державної реєстрації 01020U002344, «Дослідження тепломасопереносу в термохімічних і сорбційних процесах та створення теоретичних засад для розробки теплових насосів та акумуляторів теплоти» номер державної реєстрації 0107U002128; «Дослідження динаміки тепломасопереносу, фазових перетворень та усадки при зневодненні колоїдних



капілярно-пористих матеріалів конденсаційним методом» номер державної реєстрації 0112U001930.

Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації базується на критичному аналізі вітчизняних та іноземних джерел літератури (171 найменування) за даною проблемою, гармонійній постановці мети і задач дослідження, використанні сучасних методів досліджень, критичному аналізі отриманих результатів, чіткому формулюванню отриманих висновків. Теоретичні та експериментальні дослідження виконані з використанням сучасного математичного апарату; комплексу сучасних теоретичних та фізичних методів, що ґрунтуються на фундаментальних законах теорії тепло- і масообміну, математичного моделювання та чисельного аналізу. Адекватність математичних моделей запропонованих автором підтверджено експериментально.

Наукова новизна отриманих результатів. У своїй роботі здобувач зосередився на подальшому розвитку теорії взаємозв'язаних процесів тепломасоперенесення, фазових і структурних перетворень в пористих системах під час адсорбції і сушіння в апаратах періодичної та безперервної дії для розв'язання практичних задач в області енерго- та ресурсозбереження. З нових, отриманих вперше результатів, на мою думку, заслуговують на найбільшу увагу наступні:

- отримані розрахункові залежності для визначення площі контакту рідини і газу в одиничному об'ємі пористого тіла; інтенсивності фазового переходу в системі «адсорбент - шар рідини - газова фаза», теплоти фазового переходу, рівноважного парціального тиску парової фази, адсорбційної вологості тіла, з урахуванням впливу адсорбційних сил;
- математичні моделі та сіткові методи для розрахунку дифузійного та дифузійно-фільтраційного тепломасоперенесення і фазових перетворень в капілярно-пористих тілах у процесах сорбції, десорбції та сушіння;
- метод визначення коефіцієнта дифузії зв'язаної речовини в капілярно-пористих матеріалах;
- метод канонічних елементів та алгоритм розрахунку динаміки неізотермічної сорбції та десорбції в тілах складної конфігурації;
- математична модель і чисельний метод розрахунку тепломасоперенесення і фазових перетворень під час сушіння пористих тіл з багатокомпонентною рідинною фазою.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані автором результати знайшли достатньо широке впровадження в декількох організаціях, з яких можна виділити: Консорціум «Інноваційно-технологічна група», ТОВ

«БМ-Інжиніринг» та використовуються у навчальному процесі, що підтверджується відповідними актами.

Запропоновані автором математичні моделі дають змогу прогнозувати перебіг процесів тепломасоперенесення і фазових перетворень в пористих системах різної конфігурації з одно- і багатоконпонентною рідинною фазою, що мають місце в процесах сорбції і сушінні під час проектування сушильного і адсорбційного обладнання та вибору оптимальних конструкторських рішень, розробці раціональних режимів сушіння вологих матеріалів, насичення і регенерації сорбентів та автоматизації технологічних процесів. На основі узагальнення отриманих в дисертаційній роботі результатів автором запропонований конвективно-конденсаційний спосіб безперервного сушіння термолабільних матеріалів, що забезпечує досушування високовологісних матеріалів до низького кінцевого вологовмісту, зменшення витрат енергії та отримання якісного висушеного продукту.

Повнота викладу наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих в дисертації в опублікованих працях. Дисертаційна робота складається з анотації, списку умовних позначень, вступу, шестирозділів змістовної частини, висновків, списку літературних джерел та додатків. Загальний об'єм дисертаційної роботи становить 320 сторінок з яких: 290 сторінок основної текстової частини, 75 рисунків, 171 бібліографічне найменування на 18 сторінках та 3 додатки на 12 сторінках. Додатки містять перелік публікацій здобувача за темою дисертації, акти впровадження отриманих результатів у виробництво та учбовий процес.

Оцінка змісту дисертаційної роботи. Оформлення дисертаційної роботи в цілому відповідає вимогам, які пред'являються до текстової документації. Дисертація оформлена акуратно, малюнки та формули створені за допомогою відповідних пакетних програмних продуктів. Матеріал дисертації викладено в послідовності, що відповідає поставленим задачам в роботі. Стиль викладення наукового матеріалу забезпечує його чітке розуміння.

Автореферат ідентичний за змістом з основними положеннями дисертації і достатньо повно відображає основні її наукові результати, що отримані здобувачем. Зміст дисертації, об'єкт і предмет дослідження відповідають паспорту спеціальності 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

У вступі обґрунтовується актуальність теми дисертації, зазначається зв'язок роботи з науковими програмами, визначається мета та задачі дослідження, об'єкт, предмет та методи досліджень, наукова новизна отриманих результатів та їх практичне значення. Обсяг і форма вступу

відповідають вимогам до докторських дисертацій та достатні для попереднього ознайомлення зі змістом положень, що виносяться здобувачем на захист.

У першому розділі автором проведено критичний аналіз сучасного стану досліджуваної проблеми, що стосується тепломасоперенесення, фазових перетворень, рівноваги, структурної зміни пористих матеріалів, методів дослідження процесів сорбції і сушіння в апаратах періодичної та безперервної дії та конструкцій відповідного адсорбційного та сушильного обладнання.

На основі проведеного критичного аналізу літературних джерел автором сформульовано мету дисертаційної роботи та задачі, які необхідні для вирішення поставленої мети. З точки зору наукової і практичної цінності вони цілком відповідають вимогам до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

Другий розділ дисертаційної роботи присвячено розробці дифузійної і дифузійно-фільтраційної математичних моделей та чисельних методів розрахунку тепломасоперенесення і фазових перетворень, що дозволяють досліджувати динаміку і кінетику процесів адсорбції і сушіння в консолідованих капілярно-пористих матеріалах. Сформульовано фізичну постановку задачі, припущення, що прийняті при побудові математичних моделей, виводяться рівняння переносу, визначаються параметри, що входять до рівнянь (коефіцієнти дифузії, парціальні тиски фаз зв'язаної речовини, капілярний тиск, швидкості фільтрації, теплота випаровування). Отримано формули для інтенсивності фазових перетворень в одиничному об'ємі пористого тіла, для питомої площі поверхні контакту рідкої і газової фаз в порах тіла. Функція площі поверхні контакту обумовлена вологісним станом матеріалу і враховується при визначенні об'ємної інтенсивності фазових перетворень. Розглянуто особливості взаємодії молекул адсорбату з адсорбентом і запропоновано механізм врахування впливу додаткових сорбційних сил на інтенсивність процесів переносу.

У третьому розділі розглянуто фізичні особливості переносу теплоти і маси зв'язаної речовини при адсорбції і сушінні в дисперсних пористих системах. Отримано формулу для об'ємної інтенсивності фазових перетворень, яка враховує фазові перетворення в порах і на поверхнях гранул, що складають дисперсний шар.

Розроблено дифузійну і дифузійно-фільтраційну математичні моделі тепломасопереносу і фазових перетворень при зволоженні та осушенні дисперсних пористих систем. Одержано вирази, що зв'язують шукані функції об'ємної концентрації компонентів в дисперсному шарі і пористих гранулах. Розроблено чисельні методи розрахунку. Проведено чисельні експерименти та співставлення результатів розрахунку з експериментальними даними.

Для дослідження динаміки тепло- і масоперенесення в тілах складної конфігурації з криволінійними межами запропоновано чисельний метод канонічних елементів, згідно якого вихідне диференціальне рівняння переносу апроксимується балансовим рівнянням для елемента канонічної форми.

Четвертий розділ представляє практичне застосування розробленої теорії динаміки сорбції та десорбції в дисперсних пористих системах і присвячений дослідженню проходження цих процесів в адсорберах термічних трансформаторів. Для цього побудовано математичні моделі спряженої задачі теплоперенесення в теплообмінній поверхні адсорбера та тепломасоперенесення і фазових перетворень в адсорбенті. Показано, що на базі математичного моделювання визначається інтенсивність проходження процесів зволоження та регенерації сорбентів в залежності від умов підведення теплової енергії до теплообмінної поверхні, фізичних і геометричних характеристик цієї поверхні, характеристик адсорбенту та параметрів адсорбтиву. Розглянуто адсорбери прямокутної та циліндричної конфігурації з повздовжнім і поперековим об'ємним теплообміном поверхні теплообміну.

Розроблено чисельні методи розрахунку, проведено чисельні експерименти та порівняння результатів з експериментальними даними.

У п'ятому розділі сформульовано теоретичні положення тепломасопереносу і фазових перетворень в пористих матеріалах з багатокомпонентною рідинною фазою. Отримано вираз для інтенсивності фазового перетворення летючого компоненту розчину, формулу для рівноважного парціального тиску пари компоненту реального рідкого розчину, яка для ідеальних розчинів переходить в емпіричний закон Рауля, а для гранично розведених розчинів в закон Генрі. Побудовано математичні моделі дифузійно-фільтраційного тепломасоперенесення, фазових перетворень і сідання під час сушіння капілярно-пористих і колоїдних капілярно-пористих тіл з багатокомпонентною рідинною фазою. Проведено чисельні експерименти сушіння капілярно-пористого шару, зволоженого розчином води та етилового спирту при різних концентраціях компонентів.

У шостому розділі проведено математичне моделювання динаміки тепло- і масоперенесення, фазових перетворень і деформування під час зневоднення капілярно-пористих і колоїдних капілярно-пористих тіл в сушильних установках безперервної дії. Отримано диференціальне рівняння переносу субстанції для деформованих систем. На його основі побудовані математичні моделі динаміки дифузійного і дифузійно-фільтраційного сушіння капілярно-пористих і колоїдних капілярно-пористих матеріалів в конвективних сушильних установках безперервної дії. Їх рішення дозволяє визначати поля температур, об'ємних концентрацій та парціальних тисків рідкої, парогазової

фаз в матеріалі та зміну по довжині каналу середніх значень температури, тиску, вологовмісту та швидкості сушильного агента. При отриманні виразів для визначення тиску, температури, швидкості, об'ємних концентрацій пари повітря в сушильному агенті у довільному перетині по довжині каналу залучались балансові рівняння, рівняння нерозривності та стану для газової суміші. На основі аналізу результатів чисельних експериментів розроблено конвективно-конденсаційний спосіб сушіння термолабільних матеріалів, що передбачає додаткову примусову зміну у часі температури та вологовмісту сушильного агента, що інтенсифікує процес сушіння і дозволяє забезпечити зниження витрат енергії на його проведення, досягнути низького рівноважного вологовмісту, забезпечити не перевищення температури матеріалу вище за гранично допустиму та отримати продукт високої якості. Розроблено технологічну схему двохзонної прямотечійної стрічкової сушильної установки з тепловим насосом, яка дозволить організувати сушіння конвективно-конденсаційним способом.

У висновках викладено основні результати дисертаційної роботи.

У додатках наведені акти впровадження результатів дисертаційної роботи у виробництво та список публікацій здобувача за темою дисертації.

Зв'язок докторської дисертації з кандидатською. Положення та висновки, захищені здобувачем у кандидатській дисертації, в тексті докторської дисертації не виявлені.

Повнота викладення наукових положень та висновків

Основні положення і результати дисертаційної роботи викладені у 54 друкованих працях, з яких 1 монографія, 26 статей у наукових фахових виданнях серед яких 5 статей у виданні, що входить до наукометричної бази Scopus та 3 статті у виданнях, що входять до наукової бази РИНЦ, 3 патенти на винахід, 24 тези та доповіді на наукових конференціях. Результати доповідалися й обговорювалися на багатьох міжнародних науково-практичних форумах і конференціях.

Щодо автореферату та дисертаційної роботи є наступні зауваження:

1. В роботі приймається ряд припущень, зокрема, що капіляри заповнені рідиною, є циліндричними і спрямовані вздовж напрямку потоків зв'язаної речовини. Однак в реальному твердому тілі капіляри є криволінійними, мають різну довжину і розташовані довільно в просторі. Внаслідок цього умови випаровування рідини або адсорбції в шарі полідисперсного гранульованого матеріалу є неоднаковими. Окрім цього частина капілярів може бути взаємно екранованими повністю або частково. Виникає питання яким чином досягнуто такої високої точності теоретичних моделей від 0,5 до 10%.

2. У роботі зустрічаються однакові умовні позначення різних фізичних величин, зокрема ϕ – відносна вологість і ϕ – кут між ребрами у циліндричному адсорбері, λ – коефіцієнт теплопровідності і λ – параметр, що визначається із залежностей (2.129), (2.130).
3. В дисертаційній роботі не наводиться інформація про гранулометричний склад адсорбентів, для яких наведені розрахункові залежності і з якими проводили експериментальні дослідження, тому не зрозуміло чи запропоновані розрахункові залежності можна використовувати, наприклад, для активованого вугілля різних марок, подрібненого або гранульованого.
4. Автор досліджує процеси сорбції і сушіння багатьох дисперсних (гранульованих) матеріалів, силікатної цегли прямокутної форми та буряку, які суттєво відрізняються між собою фізико-хімічними властивостями. Окрім цього, автор обирає товщину матеріалу для різних досліджень 2, 3, 5, 10, 15 і 20 мм. Як абсортив в роботі використовують воду, н-гептан та водноспиртовий розчин. Не зрозуміло, на основі яких міркувань автор обирає об'єкти досліджень та товщини шару матеріалу.
5. В роботі доцільно було б зазначити, чи можна результати отримані для вибраних пористих матеріалів поширювати на інші вологі матеріали.
6. Методика зволоження силікатної цегли товщиною 12 мм (стор. 155) викликає сумнів щодо рівномірного розподілу вологи по товщині цеглини. З верхньої та бокових граней волога буде випаровуватися, а крупні капіляри можуть лише частково бути заповнені рідиною. Поверхня, яка контактує з водою буде зволожена повністю, окрім цього на нижній грані буде знаходитися вільна (поверхнева) волога.
7. З роботи не зрозуміло, які пакети прикладних комп'ютерних програм використовувались під час чисельної реалізації представлених математичних моделей.
8. Автор стверджує (стор. 167), що визначення температури шару дисперсного матеріалу під час адсорбції «спряжено з істотними труднощами», однак, яким чином побудовані графічні залежності рис. 3.3, 3.7 та 3.8 та з якою точністю зроблені ці заміри в роботі нічого не сказано.
9. Деякі функції, що виражені рівняннями та системами рівнянь, доцільно було б для практичних розрахунків представити графічно у вигляді номограм.

Зроблені зауваження не зменшують цінності основних наукових положень, висновків і рекомендацій, що виносяться на захист, і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок. Аналізуючи позитивний науковий доробок автора і вище відзначені зауваження вважаю за необхідне зробити наступний висновок: дисертаційна робота Сорокової Наталії Миколаївни «Математичне моделювання динаміки тепломасоперенесення в процесах сорбції і сушіння в апаратах періодичної і безперервної дії» є завершеною науковою працею, в якій одержано результати, які в сукупності вирішують важливу науково-практичну проблему та містить нові вагомні наукові результати в області теорії тепломасоперенесення і фазових перетворень в пористих системах. Створені математичні моделі і методи розрахунку є універсальними і дають змогу вирішувати актуальні науково-практичні задачі для розроблення та автоматизації виробничих процесів, які включають процеси адсорбції і сушіння, під час проектування сушильного та адсорбційного обладнання. За актуальністю, новизною, глибиною наукових досліджень, достовірністю та практичною цінністю, об'ємом та змістом дисертаційна робота відповідає вимогам пп. 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року № 567, а її автор, Сорокова Н.М. заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06. – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Офіційний опонент

завідувач кафедри хімічної інженерії

Національного університету "Львівська політехніка"

д.т.н., професор

 В.М. Атаманюк

Підпис професора Атаманюка В.М.

ЗАСВІДЧУЮ:

Вчений секретар Національного університету

"Львівська політехніка"



Р.Б. Брилинський