

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора Василенка Сергія Михайловича на дисертаційну роботу кандидата технічних наук, провідного наукового співробітника 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 зі спеціальності 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

В дисертаційній роботі розглядається питання розвитку теорії тепломасопереносу, фазових і структурних перетворень в пористих матеріалах різної конфігурації з одно- і багатокомпонентною рідинною фазою та створення адекватних математичних моделей і ефективних методів розрахунку динаміки процесів сорбції та десорбції в апаратах періодичної і безперервної дії. Математичне моделювання дозволяє досліджувати динаміку зміни основних параметрів пористої системи з урахуванням різних визначальних факторів і дає можливість оптимізувати відповідні технології за різними критеріями якості та автоматизувати управління технологічними процесами.

1. Актуальність теми

Тепломасообмінні процеси адсорбції і сушіння відбуваються в гетерогенних багатокомпонентних пористих системах і супроводжуються фазовими переходами і можливим деформуванням твердої фази. Ці процеси є складовою частиною багатьох виробничих технологій енергетичної, хімічної, будівельної, харчової та інших галузей промисловості. Рациональна організація адсорбції і сушіння впливає на енергоефективність виробництва та якість готової продукції і передбачає детальне вивчення закономірностей їх проходження.

Застосування експериментальних методів дає можливість достатньо точно дослідити лише кінетику зміни вологовмісту нерухомого пористого тіла, що зволожується або осушується. Вимірювання температури твердих пористих або колоїдних капілярно-пористих матеріалів спряжено зі значними технічними труднощами і не завжди приводить до отримання об'єктивних результатів. Залучення теоретичного аналізу, зокрема з використанням найбільш прийняттого і перспективного напрямку – математичного моделювання із залученням сучасних обчислювальних машин, дозволяє вирішувати складні задачі ефективно організації технологічних процесів з урахуванням впливових фізичних та геометричних факторів без проведення дорогих лабораторних і промислових експериментів.

Таким чином, тема дисертаційної роботи Сорокової Н.М., яка виконувалась в Інституті технічної теплофізики НАН України, є безумовно актуальною і перспективною. Дисертаційна робота є складовою частиною наукових досліджень, які знаходились у плані бюджетних фундаментальних



тематик: «Дослідження процесів тепломасообміну при зневодненні колоїдних капілярно-пористих матеріалів та створення енергоресурсозберігаючих екологічно безпечних технологій» № ДР 01020U002344; «Дослідження тепломасопереносу в термохімічних і сорбційних процесах та створення теоретичних засад для розробки теплових насосів та акумуляторів теплоти» № ДР 0107U002128; «Дослідження динаміки тепломасопереносу, фазових перетворень та усадки при зневодненні колоїдних капілярно-пористих матеріалів конденсаційним методом» № ДР 0112U001930, в яких автор була одним з відповідальних виконавців і що виконувались в Інституті технічної теплофізики НАН України.

2. Коротка характеристика змісту роботи

Структура та обсяг роботи

Дисертаційна робота включає вступ, шість розділів, загальні висновки, список використаних літературних джерел та 3 додатки. Загальний об'єм дисертації складає 320 сторінок, з них 290 сторінок основної текстової частини, 75 рисунків. Список літератури містить 171 найменування на 18 сторінках. В додатках подано перелік публікацій здобувача за темою дисертації, 2 акти впровадження результатів у виробництво та 5 у учбовий процес, і нагороди (Диплом Президії НАН України про присудження премії ім. В.І. Толубинського).

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, визначено її зв'язок з науковими програмами, планами і темами, сформульовано мету і задачі дослідження, розглянуто об'єкт, предмет та методи досліджень, визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено дані про апробацію результатів дисертаційної роботи. Представлено відомості про особистий внесок, публікації автора по темі дисертації, структуру та обсяг роботи.

У першому розділі наведено результати аналізу літературних джерел, присвячених дослідженню процесів тепломасопереносу і фазових перетворень при адсорбції і сушінні капілярно-пористих матеріалів. Розглянуто основні фактори, що впливають на процеси переносу в пористих системах та способи їх визначення, серед яких структурні характеристики, механізми молекулярного переносу, рівноважні параметри стану, усадка колоїдних капілярно-пористих матеріалів, дисперсність систем. Проаналізовано принципи роботи та конструктивні особливості термічних трансформаторів та сушильних установок безперервної дії і визначено умови проходження в них тепло- і масообміну. Зазначено переваги і недоліки сучасних емпіричних та теоретичних методів дослідження тепломасопереносу і фазових перетворень в пористих матеріалах, існуючих математичних моделей динаміки сушіння і адсорбції в апаратах періодичної і безперервної дії.

За результатами проведеного аналізу літературних джерел автором зроблено висновок, що такі питання як розрахунок динаміки тепломасопереносу в дисперсних пористих системах, системах з

багатокомпонентною рідинною фазою або зі складною геометрією не були охоплені існуючою теорією сушіння і адсорбції. Відомі математичні моделі описання процесу безперервного сушіння базуються на наближених балансових методах моделювання кінетики зневоднення капілярно-пористих матеріалів, вимагають значного обсягу експериментальної інформації і мають невисоку точність.

Також здійснено постановку задач дослідження, які цілком відповідають за науковою і практичною цінністю вимогам до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

Другий розділ дисертаційної роботи присвячено розгляду активаційних механізмів переносу та фазових перетворень на зовнішніх і внутрішніх поверхнях пористих систем в процесах адсорбції і сушіння. Отримано вираз для визначення площі поверхні контакту рідкої і газової фаз в одиничному об'ємі пористого тіла як функції вологовмісту тіла та відносної вологості газу в порах. Досліджено вплив на інтенсивність переносних процесів сорбційних сил, що обумовлені формою зв'язку адсорбату з адсорбентом. Запропоновано алгоритм чисельного визначення ізотерми адсорбції при відомій для даного матеріалу інтегральній функції розподілу пір по розмірах, адекватність якого підтверджується узгодженням з експериментально отриманими ізотермами.

Побудовано математичні моделі дифузійного (молекулярного) та дифузійно-фільтраційного тепломасопереносу і фазових перетворень при адсорбції і сушінні в консолідованих капілярно-пористих матеріалах, що дозволяють простежити динаміку зміни температури та об'ємних концентрації кожного компонента зв'язаної речовини. Розроблено сіткові методи розрахунку, що базуються на трьохшаровій явній різницевої схемі для дифузійного механізму проходження процесів переносу та на явній трьохшаровій перерахунковій різницевої схемі для дифузійно-фільтраційного тепломасопереносу. Отримані умови стійкості різницевих схем, розроблених для рішення задач дифузійного і дифузійно-фільтраційного тепломасопереносу і фазових перетворень в процесах адсорбції і сушіння капілярно-пористих тіл.

Запропоновано метод визначення коефіцієнта дифузії зв'язаної речовини в пористих середовищах шляхом вирішування зворотної задачі дифузії, вихідною інформацією для якого є результати вимірювання лише ваги зразка. Метод забезпечує похибку, близьку до похибки вихідної інформації.

У **третьому розділі** побудовано дифузійну і дифузійно-фільтраційну математичні моделі динаміки тепломасопереносу та фазових перетворень при адсорбції і сушінні дисперсних пористих систем, в яких враховуються пористість гранул, що складають дисперсний шар, і порозність шару. Отримано формулу для об'ємної інтенсивності фазового переходу з врахуванням об'єму та площі зовнішньої поверхні гранул. Представлено вирази, що зв'язують шукані функції в дисперсному шарі і гранулах. Розроблено чисельні методи реалізації математичних моделей. Проведено чисельні експерименти та порівняння результатів розрахунку з експериментальними даними.

Розроблено ефективний чисельний метод канонічних елементів та алгоритм розрахунку динаміки неізотермічної сорбції та десорбції в пористих тілах складної конфігурації.

Четвертий розділ присвячено дослідженню на базі математичного моделювання динаміки сорбції та десорбції в твердих гранульованих адсорбентах в термічних трансформаторах.

Розроблено математичні моделі спряженої задачі теплопровідності та тепломасопереносу в системі «теплообмінна поверхня – адсорбент», що дозволяють розраховувати інтенсивність проходження процесів зволоження та регенерації сорбентів в залежності від швидкості прогрівання розвинутої поверхні теплообміну адсорберу термотрансформатору при різних умовах підведення та відведення теплоти. Розглянуто адсорбери прямокутної та циліндричної конфігурації з повздовжнім і поперековим об'ємним об'ємом.

Розроблено чисельні методи розрахунку та комп'ютерні програми розрахунку. Проведено чисельні експерименти, які показують можливості вибору фізичних характеристик та геометричних параметрів системи для оптимального проходження процесів зволоження та осушення сорбенту з точки зору енергоефективності роботи термотрансформатора та подовження терміну експлуатації сорбенту. Виконано порівняння результатів розрахунку з експериментальними даними.

У **п'ятому розділі** представлено теоретичні положення тепломасопереносу і фазових перетворень в пористих матеріалах з багатокомпонентною рідинною фазою. Отримано вираз для інтенсивності фазового переходу компоненту рідинної фази, формулу для рівноважного парціального тиску пари компонентів розчину, яка в граничних випадках переходить в емпіричні закони Рауля для ідеальних розчинів та Генрі для гранично розведених розчинів.

Розроблено математичні моделі та чисельні методи розрахунку динаміки дифузійно-фільтраційного тепломасопереносу і фазових перетворень при сушінні капілярно-пористих і колоїдних капілярно-пористих тіл з багатокомпонентною рідинною фазою, які дозволяють дослідити динаміку і кінетику зміни температури тіла та концентрацій кожного компонента рідкої, парової і газової фаз зв'язаної речовини. Проведено чисельні і фізичні експерименти сушіння капілярно-пористого шару, зволоженого водоспиртовим розчином у різному співвідношенні концентрацій компонентів.

У **шостому розділі** на базі рівняння переносу субстанції для середовищ, що деформуються, побудовані та обґрунтовані математичні моделі та розроблено чисельні методи розрахунку динаміки і кінетики тепломасопереносу, фазових перетворень та усадки при зневодненні капілярно-пористих і колоїдних капілярно-пористих матеріалів в конвективних сушильних установках безперервної дії, що дозволяють визначати поля температур, об'ємних концентрацій та парціальних тисків рідкої, парової і повітряної фаз в тілі та зміну в часі середніх значень цих параметрів в сушильному агенті в залежності від швидкості руху матеріалу та початкової

швидкості сушильного агента, геометричних параметрів вологого тіла та сушильної камери, а також інших фізичних параметрів.

Отримані вирази для визначення параметрів сушильного агента – тиску, температури, швидкості, об'ємних концентрацій пари і повітря в довільному перетині по довжині каналу, для чого використовувались балансові рівняння, рівняння нерозривності та стану для газової суміші.

Побудовано загальний алгоритм і створено програми розрахунку динаміки тепломасопереносу, фазових перетворень і усадки при безперервному сушінні капілярно-пористих і колоїдних капілярно-пористих матеріалів.

Розроблено чисельні методи розрахунку, що базуються на тришаровій явній різницевій схемі для дифузійного механізму переносу, та на тришаровій явній перерахунковій різницевій схемі для дифузійно-фільтраційного тепломасопереносу. При наявності усадки (для колоїдних капілярно-пористих матеріалів) залучається процедура розщеплення алгоритму по фізичних факторах. Досліджено апроксимацію і стійкість різницевих рівнянь.

Запропоновано конвективно-конденсаційний спосіб сушіння термолабільних матеріалів, що передбачає зміну у часі температури та вологовмісту сушильного агента і дозволяє забезпечити зниження часу і витрат енергії на проведення процесу та отримання якісного готового продукту. Реалізація способу передбачає наявність графіків зміни вологовмісту та температури сушильного агента, які визначаються за допомогою розроблених математичних моделей.

Розроблено технологічну схему двохзонної прямоочної стрічкової сушильної установки, що дозволить проводити сушіння конвективно-конденсаційним способом. В сушарці підігрівання сушильного агента здійснюється за допомогою калориферів і конденсатору теплового насоса, а осушення – за допомогою випарника теплового насоса.

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

3. Наукова новизна роботи полягає в наступних отриманих результатах

1. Вперше, виходячи з основних положень молекулярно-радіаційної теорії переносу, отримані формули: для 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.

2. Розроблено алгоритм чисельного визначення ізотерми адсорбції на базі формули Нікітенко М.І. для товщини шару конденсату та інтегральної функції V_r розподілу пір по розмірах.

3. Побудовано нові адекватні математичні моделі та розроблено ефективні сіткові методи розрахунку дифузійного та дифузійно-фільтраційного тепломасопереносу і фазових перетворень в капілярно-пористих тілах у процесах сорбції і десорбції, що дозволяють досліджувати динаміку зміни

температури тіла, об'ємних концентрацій та парціального тиску рідкої, парової та повітряної фаз, таких функцій як площа поверхні контакту адсорбату з газовим середовищем в порах тіла, товщина шару конденсату на поверхнях частково заповнених пір, адсорбційна вологість тіла, відносна вологість пари в порах тіла.

4. Розроблено новий спосіб визначення коефіцієнта дифузії зв'язаної речовини в капілярно-пористих матеріалах, що передбачає вимірювання маси зразка у часі, та на основі цих даних вирішення зворотної коефіцієнтної задачі дифузії методом дискретного суміщення Нікітенко М.І. Отримано патент України на винахід.

5. Вперше розроблені математична модель, чисельний метод і програма розрахунку тепломасопереносу та фазових перетворень в процесах сорбції і десорбції в дисперсному шарі, що враховує перенос зв'язаної речовини в порах гранул і в просторі між ними. Отримано формулу для об'ємної інтенсивності фазових перетворень, що відбуваються на внутрішніх і зовнішніх поверхнях гранул.

6. Розроблено метод канонічних елементів та алгоритм розрахунку динаміки неізотермічної сорбції та десорбції в тілах складної конфігурації. Чисельні експерименти свідчать про можливість застосування побудованого єдиного програмного комплексу для моделювання процесів тепло- і масопереносу в гетерогенних системах складної конфігурації з перемінними теплофізичними характеристиками при довільних початкових і граничних умовах.

7. Побудовані математичні моделі тепломасопереносу і фазових перетворень динаміки сорбції і десорбції в гранульованих сорбентах в адсорберах термотрансформаторів прямокутної та циліндричної конфігурації з повздовжнім і поперечним об'ємним теплообмінним поверхні. Розроблено чисельні методи розрахунку спряженої задачі теплопровідності в теплообмінній поверхні та тепломасообміну в гранульованому сорбенті.

8. Розроблено теоретичні основи, математичну модель і чисельний метод розрахунку тепломасопереносу і фазових перетворень при сушінні пористих тіл з багатокомпонентною рідинною фазою, що дозволяє визначати динаміку і кінетику зміни об'ємних концентрацій та парціального тиску кожного компонента рідкої, парової та газової фаз. Вперше отримано формулу для рівноважного парціального тиску пари компонентів рідинної суміші, з якої в граничних випадках випливають емпіричні закони Рауля та Генрі. Отримано вирази для інтенсивності випаровування і теплоти фазового переходу довільного компоненту суміші.

9. Запропоновано підхід, побудовані та обґрунтовані математичні моделі, розроблено чисельні методи та програми розрахунку динаміки і кінетики тепломасопереносу, фазових перетворень та усадки при зневодненні капілярно-пористих і колоїдних капілярно-пористих матеріалів в конвективних сушильних установках безперервної дії, що дозволяють визначати поля температур, об'ємних концентрацій та парціальних тисків рідкої, парової і повітряної фаз в тілі, зміну в часі цих параметрів в сушильному агенті в

залежності від швидкості руху матеріалу, початкової швидкості сушильного агента, геометричних характеристик вологого тіла та сушильної камери, а також інших фізичних параметрів.

10. Отримано рівняння для визначення середніх значень тиску, температури, швидкості і об'ємних концентрацій пари і повітря в сушильному агенті в довільному перетині по довжині каналу, для чого використано балансові рівняння, рівняння нерозривності та стану для газової суміші.

11. Розроблено 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. Спосіб захищено патентом України на винахід.

12. Запропоновано технологічну схему двохзонної прямої стрічкової сушильної установки з тепловим насосом, що дозволить реалізувати конвективно-конденсаційний спосіб сушіння термолабільних матеріалів, в якій передбачається підігрівання сушильного агента за допомогою парових калориферів і часткового підігрівання та осушення за допомогою теплового насоса. Витрати енергії на 1 кг випареної вологи становлять 3200 кДж, що на 15 – 20 % менше, ніж в існуючих стрічкових сушильних установках без теплового насоса.

4. Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному

1. Створені при виконанні даної роботи математичні моделі, чисельні 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 конфігурації з одно- і багатоконпонентною рідинною фазою, що мають місце в процесах сорбції і сушіння, з метою прогнозування на стадії проектування сушильного і адсорбційного обладнання та вибору оптимальних конструкторських рішень, розробці раціональних режимів сушіння вологих матеріалів, насичення і регенерації сорбентів та автоматизації технологічних процесів.

2. Можливість чисельного визначення ізотерми адсорбції та коефіцієнта дифузії зв'язаної речовини в капілярно-пористих матеріалах можуть бути корисними при проведенні досліджень тепломасопереносу в пористих системах в різних галузях промисловості.

3. Конвективно-конденсаційний спосіб безперервного сушіння термолабільних матеріалів забезпечує досушку високовологісних матеріалів до низького кінцевого вологовмісту, зменшення витрат енергії та отримання якісного висушеного продукту. Визначені в ході досліджень рекомендації по оптимізації технологій безперервного сушіння можуть бути використані при автоматизації управління процесом сушіння, а 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 %.

4. Результати роботи впроваджено Консорціумом «Інноваційно-технологічна група», ТОВ «БМ-Інжиніринг», та використовуються у навчальному процесі, що підтверджується відповідними актами.

5. Достовірність отриманих результатів.

Забезпечується коректністю математичних постановок задач і фізичних припущень, а також порівняльним аналізом теоретичних і експериментальних результатів.

6. 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, 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. Вони доповідалися й обговорювалися більш ніж на 30 міжнародних форумах і конференціях.

Автореферат дисертації Сорокової Н.М. достатньо повно відображає зміст і суть результатів досліджень, викладених в дисертаційній роботі.

7. Оформлення дисертації

Дисертація є закінченою науковою працею, що виконана у вигляді підготовленого рукопису. Дисертація відповідає вимогам «Постанови КМ від 24.07.2013 № 567 пп. 9, 10, 12, 13» зі змінами згідно постанови КМ № 656 від 19.08.2015 р., які пред'являють до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. Робота написана грамотно і ясно, гарно оформлена, чітко структурована.

8. Зауваження по дисертації

Разом з тим, вважаю за необхідне зробити наступні зауваження за змістом роботи:

1. Безпосередньо розроблення математичних моделей та чисельних методів їх реалізації не є науковою новизною. Наукову новизну складають розроблення нових принципів їх формулювання та науково нові результати, отримані під час їх реалізації. Тому необхідно було більш коректно сформулювати окремі пункти наукової новизни.

2. Оскільки всі моделі процесів перенесення є напівемпіричними, доцільно було б обґрунтувати достовірність крайових умов, що використані під час їх замикання, а також достовірність результатів їх реалізації шляхом порівняння з результатами експериментального дослідження при відповідних умовах.

3. Доцільно було б обґрунтувати нехтування фільтраційним перенесенням, коли це має місце.

4. Формулювання «товщина шару конденсату, у якому протікає випаровування» некоректне. Випаровування відбувається з поверхні.

5. Припущення про рівність товщини конденсату на поверхні пор та на поверхні гранул як одна з основних умов потребує додаткового обґрунтування.

6. Не варто було б диференціальні рівняння теорії перенесення називати «системою рівнянь тепло- і масопереносу в рамках феноменологічної теорії термодинаміки необоротних процесів». При бажанні достатньо використати термін «рівняння Онзагера».

7. Незрозуміле формулювання «інтенсивність фазових перетворень». Якщо це інтенсивність перенесення при фазових перетвореннях, то слід саме на цьому акцентувати увагу.

8. В розділі 3, та й в інших розділах, при порівнянні результатів розрахунку за пропонованою моделлю та результатами експериментальних досліджень, слід більш коректно наводити умови порівняння.

9. З розділу 4 незрозуміло, як розв'язувалася складна спряжена задача теплоперенесення «теплоносій - ребрена поверхня - багатофазна структура всередині адсорбера», особливо при складній конфігурації периметра поверхні адсорбера.

10. При використанні емпіричних рівнянь тепловіддачі для замикання моделей слід враховувати, що для більшості складних геометричних конфігурацій поверхні теплообміну ці рівняння є вкрай наближеними, а для багатьох випадків відсутні.

11. При складному математичному моделюванні, можливо, було б доцільно спростити внутрішню задачу тепломасообміну в пористих тілах, зосередившись на розв'язанні спряженої задачі.

12. При апробації результатів моделі в розділі 6 обрана достатньо проста схема сушарки з елементарними геометричними та граничними умовами. Доцільно було перевірити адекватність моделі на більш складному об'єкті, наприклад, з насипним матеріалом.

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

9. Висновок по роботі

Дисертаційна робота Сорокової Наталії Миколаївни «Математичне моделювання динаміки тепломасопереносу в процесах сорбції і сушіння в апаратах періодичної і безперервної дії» являє собою актуальне закінчене наукове дослідження, що містить нові вагомні наукові результати в області теорії тепломасопереносу і фазових перетворень в пористих системах. Автором запропоновано, на базі створених математичних моделей і чисельних методів розрахунку, рішення ряду науково-практичних задач, які є суттєвими для створення та автоматизації виробничих технологій, що включають процеси адсорбції і сушіння, для розробки нового або модернізації існуючого сушильного та адсорбційного обладнання. Теоретичні положення можуть вважатись фундаментальними, а математичні моделі універсальними і можуть застосовуватись для рішення аналогічних задач, а саме: розрахунок динаміки і

консолідованих або диспергованих пористих систем різної конфігурації з одно- або багатокomпонентною рідинною фазою в апаратах періодичної або безперервної дії.

На підставі сказаного, вважаю, що дисертаційна робота «Математичне моделювання динаміки тепломасопереносу в процесах сорбції і сушіння в апаратах періодичної і безперервної дії» повністю відповідає вимогам п.п. 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року № 567 (зі змінами, затвердженими постановою Кабінету Міністрів України від 19 серпня 2015 року № 656), 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 теплоенергетики
та холодильної техніки
Національного університету харчових
технологій МОН України,
доктор технічних наук, професор



С.М.Василенко

Підпис проф. Василенка С.М. засвідчую

 