

## ВІДГУК

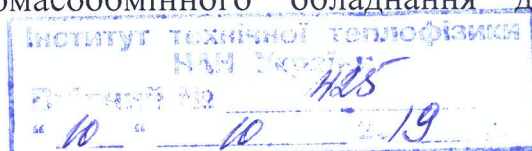
офіційного опонента, доктора технічних наук, старшого наукового співробітника, головного наукового співробітника Інституту технічної теплофізики НАН України Давиденка Бориса Вікторовича на дисертаційну роботу Петренка Валентина Петровича “Теплогідродинамічні процеси в низхідних кільцевих парорідинних потоках розчинів з розвинутою хвильовою структурою під час пароутворення”, що подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

### ***I. Актуальність теми дисертаційної роботи***

Важливою проблемою для підприємств цукрового виробництва є зменшення енерговитрат та підвищення енергетичної ефективності апаратів та пристроїв, що використовуються в технологічних процесах. Це безпосередньо стосується випарних апаратів, від раціональних режимів роботи яких залежать ефективність всього цукрового виробництва. Один зі шляхів збільшення цієї ефективності полягає в заміні традиційного обладнання на більш сучасне і досконале. Перспективними пристроями, що доцільно використовувати для випаровування вологи з сиропів, є плівкові випарні апарати. Їх характерна особливість полягає в тому, що напрямок руху плівки та парового ядра в цих апаратах збігається з напрямком сили тяжіння. В порівнянні з більш поширеними апаратами, в яких застосовується природна циркуляція, плівкові апарати дозволяють суттєво підвищувати при малих температурних напорах інтенсивність теплообміну в процесах концентрування густих високов'язких розчинів. Іншими їх перевагами є відсутність гідростатичної температурної депресії та зменшення терміну перебування сиропу в апараті для досягнення необхідних показників, що сприяє підвищенню якості цього продукту.

Способи інтенсифікації теплообміну у плівкових випарних апаратах, а також методи розрахунку їх теплотехнічних характеристик, мають ґрунтуватися на результатах поглиблених аналітичних та експериментальних досліджень гідродинамічних та теплообмінних процесів, що протікають в цих апаратах. Найчастіше для розрахунку теплотехнічних характеристик випарних плівкових апаратів застосовують відомі з літератури емпіричні співвідношення, які не завжди відповідають конструкціям та реальним умовам експлуатації конкретних апаратів. У зв'язку з цим важливу роль відіграє створення науково обґрунтованих надійних математичних моделей, які можуть застосовуватися для розробки відповідних розрахункових методів. Виходячи з цього, дисертаційну роботу, мета якої полягає у створенні теоретичних моделей теплообмінну плівкових течій з розвинутою хвильовою структурою та розробці на їх основі методів розрахунку процесів теплообміну в теплообмінних каналах плівкових випарних апаратів, слід вважати важливою і актуальною.

Про важливість та актуальність цієї дисертаційної роботи свідчить також її відповідність планам держбюджетної науково-дослідної тематики кафедри теплоенергетики та холодильної техніки Національного університету харчових технологій, а саме науковим дослідженням за темами “ Розроблення наукових основ створення високоефективного тепломасообмінного обладнання для





харчової промисловості ” (номер державної реєстрації № 0112U002987), та “ Математичне моделювання процесів теплообміну у кільцевих низхідних паро-рідинних потоках густих цукрових розчинів під час випаровування ” (номер державної реєстрації № 0118U007153).

## **II. Коротка характеристика змісту роботи**

Дисертація має структуру завершеної науково-дослідної роботи. Текст дисертації складається з анотації, вступу, семи розділів основних результатів, висновків, списку використаних літературних джерел з 203 найменувань та додатків, що містять інформацію про практичне використання результатів. Загальний обсяг дисертаційної роботи (разом з додатками) складає 357 сторінок машинописного тексту. Робота містить 105 рисунків та 12 таблиць.

**В анотації** стисло надано основні результати з математичного та фізичного моделювання теплогідродинамічних процесів, що протікають в низхідних кільцевих паро-рідинних потоках розчинів з розвинутою хвильовою структурою під час пароутворення. Наведено наукову новизну, практичне застосування одержаних результатів, список праць по темі дисертаційної роботи.

**У вступі** обґрунтована актуальність роботи, мета та задачі, наведені наукова новизна та практична цінність отриманих результатів, особистий внесок здобувача, відомості про апробацію результатів дисертації, перелік опублікованих робіт по темі дисертації.

**У першому розділі** розглядаються гідродинамічні особливості течії плівки рідини по вертикальній поверхні та умови хвилеутворення на поверхні плівки при ламінарному та турбулентному русі. Наведено систему рівнянь переносу імпульсу та нерозривності в наближенні граничного шару, що характеризують динаміку течії плівки рідини в умовах впливу сил поверхневого натягу. Розглянуто умови, за яких рівняння динаміки має періодичне розв'язання. Розглядаються лінійні та нелінійні теорії розвитку хвиль на поверхні плівки. Проаналізовано наведені в літературі постановки задач, що описують гідродинаміку низхідних кільцевих водо-повітряних та паро-водяних потоків, методи розв'язання цих задач та їх результати. Описуються можливі форми та структура хвиль, що виникають на поверхні плівки в режимах її усталеного та неусталеного руху. Розглядаються двовимірні та тривимірні гідродинамічні моделі стікання плівки. Визначається вплив теплофізичних властивостей рідини на хвилеутворення на поверхні стікаючих плівок. Зазначено, що при наявності градієнта температури на поверхні плівки виникають термокапілярні напруження, які впливають на формування хвильової структури. Проаналізовано наведені в літературі дані експериментальних досліджень щодо хвилеутворення на поверхні стікаючих плівок, а також емпіричні залежності для товщини плівки та інших характеристик, що описують її хвильову структуру. Розглядаються питання щодо характеру міжфазної взаємодії стікаючої плівки з паровим ядром та впливу поверхневого напруження на хвильову структуру плівки. Виконано аналіз напівемпіричних моделей турбулентної в'язкості для течій з міжфазною поверхнею та результати експериментальних досліджень турбулентності в плівках.



*У другому розділі* проведено аналіз існуючих результатів дослідження процесів теплообміну в низхідних кільцевих потоках під час пароутворення. Наведені результати теоретичних досліджень процесів теплоперенесення в плівках на ділянках усталеного та неусталеного режимів руху при ламінарних та турбулентних режимах течії плівок. Представлено загальний вигляд та сформульовано граничні умови для рівняння енергії, що описує даний процес. Показано, що точні розв'язання рівняння енергії в разі неусталеного руху плівки на ділянці розвитку теплового граничного шару надані лише для ламінарного руху плівки з параболічним профілем швидкості. Для ділянки розвитку теплового граничного шару при турбулентній течії плівки точні розв'язання рівняння енергії відсутні. Існують лише наближені розв'язання, що отримані на основі інтегральних методів з використанням заданих узагальнених функцій температурного профілю.

В розділі наведено також відомі з літератури результати експериментальних досліджень процесів тепловіддачі до низхідних кільцевих потоків води та розчинів як в умовах випаровування з міжфазної поверхні, так і за наявності поверхневого кипіння. Наводяться одержані за результатами експериментальних досліджень емпіричні співвідношення для розрахунку теплообміну в плівках, що відносяться до ділянок розвитку теплового граничного шару та до ділянок розвинутого теплового граничного шару за умов пароутворення. Наведено також емпіричні співвідношення для розрахунків тепловіддачі до вільно стікаючих плівок в режимі випаровування з міжфазної поверхні та для випадку наявності супутнього парового потоку. Результати одержані на експериментальних установках, що моделюють умови концентрування розчинів у плівкових випарних апаратах. Розглядаються результати експериментальних досліджень, що описують кризові режими тепловіддачі, за яких спостерігається погіршення тепловіддачі до плівок.

На основі аналізу літературних джерел сформульовані задачі дослідження та вибрані шляхи їх вирішення.

*У третьому розділі* наведено конструктивну схему експериментальної установки, яка розроблена для дослідження впливу окремих факторів на процес теплообміну, що протікає в кип'ятильних каналах випарних апаратів. В установці передбачено автономне введення пари в експериментальний канал, що дає можливість моделювати низхідні кільцеві паро-рідинні потоки різних структурних форм. Передбачається також можливість зміни в широкому діапазоні концентрацій розчину модельної рідини, витрати розчину, витрати пари, розрідження в системі незалежно від температурного напору і теплового потоку.

В розділі наведено методика проведення експериментальних досліджень. Розглядаються методи визначення витрати рідини та пари, товщини плівки, тиску і температури гріючої пари, втрати тиску по довжині каналу, температури стінки та плівки рідини, температурного напору та теплового потоку. Розглядається порядок первинної обробки експериментальних даних.

*У четвертому розділі* проаналізовано результати розв'язання одновимірного рівняння теплопереносу для низхідних турбулентних потоків плівки. Розв'язання одержано за умов, що основний термічний опір зосереджено в неперервному



прошарку плівки. Великі поверхневі хвилі при цьому вважаються турбулізаторами основного неперервного прошарку. Функція, що описує турбулентну в'язкість, приймається у формі М.Д. Мілліонщикова. Ця функція містить параметр кореляції, що має забезпечувати відповідність розрахункових та експериментальних даних з теплообміну. За наведеним розв'язанням рівняння теплоперенесення визначається коефіцієнт тепловіддачі від стінки до міжфазної поверхні плівки.

Шляхом інтегрування рівняння збереження імпульсу з урахуванням виразу для турбулентної в'язкості одержано вираз для розподілу швидкості в ламінарному прошарку та турбулентній частині стікаючої плівки. Профілі швидкості визначаються як для випадку вільного стікання плівки по вертикальній поверхні, так за наявності міжфазної напруги. Визначається також середня швидкість рідини в залишковому шарі. Одержано також співвідношення для товщини неперервного шару. Для розрахунку товщини неперервного прошарку плівки залучаються експериментальні дані про частку рідини, що переміщується в пристінному прошарку. Інформація щодо форми, амплітуди та швидкості великих хвиль, які переміщуються по поверхні неперервного прошарку і переносять певну кількість рідини, отримується з експериментальних даних Чу та Даклера. На основі даних Чу та Даклера, що стосуються форми великих хвиль, їх фазової швидкості та частоти, проведено оцінку впливу хвильових характеристик плівки на перерозподіл потоків рідини між великими хвилями та залишковим шаром плівки. Розглядаються умови вільного стікання плівки та умови наявності супутнього газового потоку.

Наведено результати експериментального дослідження товщини неперервного прошарку плівки та співвідношення для його розрахунку. Це співвідношення може використовуватися для інженерних розрахунків як для вільного стікання, так і для течій зі супутнім паровим потоком для води та в'язких цукрових розчинів.

За результатом порівняння результатів розрахунку та експериментальних даних по теплопередачі встановлено, що модель теплообміну, що розглядається, лише якісно відображає процеси теплообміну для води та цукрових розчинів в плівці в режимі випаровування з міжфазної поверхні, що свідчить про її неадекватність. Проаналізовано причини невідповідності розрахункових та експериментальних даних та недоліки моделі, що розглядається. З цього робиться висновок про необхідність застосування більш досконалих моделей теплообміну плівкових течій.

Розглядаються результати досліджень гідравлічного опору кільцевих низхідних паро-рідинних потоків води та цукрових розчинів. Встановлено, що в залежності від співвідношення витрат фаз проявляються три характерні режими взаємодії пристінної плівки з газовим потоком. За результатом аналізу гідродинамічної взаємодії парового ядра з пристінною плівкою для паро-водяних та паро-сиропних потоків отримано співвідношення для визначення коефіцієнта гідравлічного тертя в низхідних паро-рідинних потоках води та цукрових розчинів в областях слабкої, та сильної взаємодії фаз в трубах діаметрами від 13 до 51 мм.



**П'ятий розділ** присвячено моделюванню гідродинамічних та теплообмінних процесів в стікаючих плівках з застосуванням запропонованої фізико-математичної моделі циклічного збурення плівки великими хвилями. За цією моделлю теплоперенесення розглядається як циклічний процес відновлення температурного поля після кожного проходження великої хвилі, яка внаслідок наявності центрального вихору транспортує перегріту рідину з пристінної області в зовнішню частину плівки. Дана модель використовується для дослідження перенесення теплоти в ламінарних плівках з розвинутою хвильовою структурою в умовах вільного стікання по вертикальній поверхні під час пароутворення. Для процесів перенесення теплоти в плівці на ділянці формування гідродинамічної структури після проходження великої хвилі в рівнянні енергії застосовується осереднена швидкість течії ламінарної плівки. За результатами його розв'язання визначається залежність довжини ділянки стабілізації від щільності зрошення. Після ділянки стабілізації розподіл швидкості в плівці приймається як параболічний, що враховується в рівнянні енергії. Для його розв'язання застосовується метод Тарга-Слезкіна. З одержаних розв'язків визначається густина теплового потоку на стінці при вільному стіканні плівки. Визначається інтенсивність тепловіддачі в режимі випаровування з міжфазної поверхні.

Крім випадку вільного стікання плівки розглядається також теплоперенесення в ламінарних плівках з розвинутою хвильовою структурою за умов наявності супутнього парового потоку. У цьому випадку в рівнянні енергії міститься функція розподілу швидкості в ламінарній плівці за умови дії на міжфазну поверхню дотичного напруження з боку зовнішнього парового потоку. З рівняння енергії визначається розподіл температури по товщині та довжині плівки. За результатами аналізу розв'язання цього рівняння визначено, що зі зростанням міжфазного дотичного напруження товщина плівки зменшується, а також, що вирівнювання температурного профілю при наявності міжфазного тертя відбувається швидше ніж при вільному стіканні плівки. Як і для випадку вільного стікання ламінарної плівки, для режиму стікання зі супутнім паровим потоком визначається тепловий потік на стінці та досліджується інтенсивність тепловіддачі в режимі випаровування з міжфазної поверхні.

В цьому розділі наводяться також результати моделювання температурного поля в плівках з розвинутою хвильовою структурою за умов турбулентної течії. Така течія виникає внаслідок зростання витрати рідини та при зменшенні її в'язкості. Для цього випадку приймається, що перед проходженням великої хвилі профіль швидкості відповідає закону  $(1/7)$ , а розподіл температури наближений до лінійного. Після проходження великої хвилі швидкість, як і у випадку ламінарної течії, вважається постійною величиною по всій товщині плівки. Для розрахункових досліджень застосовується спрощена модель турбулентності, подібна до моделі М.Д. Мілліонщикова. Ця модель передбачає проникнення турбулентних пульсацій до стінки. За результатами розв'язання рівняння енергії визначається розподіл температури по довжині та товщині плівки, а також тепловий потік на стінці за умов вільного стікання турбулентної плівки та при наявності супутнього парового потоку.



Отримані теоретичні результати та дані експериментальних досліджень процесів теплообміну в плівках під час пароутворення дозволили отримати параметри кореляції, які можуть використовуватися для інженерних розрахунків процесів теплообміну в плівкових випарних апаратах.

*У шостому розділі* наведено результати експериментальних досліджень процесів теплообміну в низхідних потоках плівок води та сиропу при наявності потоку пари. Розглядалися випадки режимних параметрів, за яких мало місце як випаровування з міжфазної поверхні, так і кипіння плівок води та цукрових сиропів.

За результатами експериментів визначено вплив витрат окремих фаз на процеси теплообміну в плівках, а також вплив тиску та ступені розрідження на інтенсивність конвекційної тепловіддачі. Визначено умови переходу до початку генерації парових бульбашок, та сформульовано параметр, що характеризує інтенсифікацію тепловіддачі до плівки під час їх утворення. Встановлені фактори, що впливають на інтенсивність тепловіддачі до низхідних паро-рідинних потоків розчинів під час пароутворення.

За результатами дослідження процесу концентрування цукрового розчину в стікаючій плівці встановлено, що при обтікання поверхні плівки потоком пари спостерігається ефект зниження температури плівки відносно температури кипіння, яка б мала місце під час кипіння розчину в нерухомій ємності. Цей ефект розглядається як часткове пригнічення фізико-хімічної температурної депресії потоком пари. Цим, зокрема, пояснюється розбіжності в результатах досліджень різних авторів щодо визначення інтенсивності тепловіддачі до стікаючих плівок розчинів під час пароутворення.

В результаті теоретичних та експериментальних досліджень теплоперенесення до низхідних кільцевих потоків розчинів під час пароутворення розроблено спосіб кореляції та узагальнення експериментальних даних. На цій основі складено апроксимаційне співвідношення, яке охоплює діапазон зміни витрат фаз, концентрацій та режимних параметрів, характерних для умов експлуатації випарних установок з концентрування цукрових та фруктових сиропів. Це співвідношення може бути рекомендоване для інженерних розрахунків.

*У сьомому розділі* проведено аналіз особливостей процесу теплообміну при кризовому зростанні концентрації густих сиропів в каналах плівкових випарних апаратів. За результатами розв'язання диференціального рівняння, що описує дифузію розчиненого компонента з міжфазної поверхні в глибину плівки в процесах випаровування розчинника з міжфазної поверхні, отримано аналітичні вирази для розподілу концентрації в плівках.

Визначено, що зростання концентрації розчину на поверхні плівки призводить до зниження теплового потоку внаслідок посилення фізико-хімічної температурної депресії, що передбачається в граничних умовах для диференціального рівняння дифузії розчиненого компонента. Для описання явища кризового погіршення тепловіддачі до густих розчинів під час пароутворення розроблено адекватну математичну модель. Модель базується на циклічному



руйнуванні хвильовими напливами поверхневого прошарку плівки з підвищеною концентрацією розчину.

Визначено причину зниження величини теплового потоку по довжині каналу, в якому відбувається випаровування з поверхні густих плівок в процесі концентрування розчину. Вона полягає у перевищенні величини фізико-хімічної температурної депресії на поверхні плівки над середньою, внаслідок нерівномірності розподілу концентрації сухих речовин. В меншій степені на інтенсивність теплообміну впливає також потовщення плівки та зменшення теплопровідності густого розчину зі зростанням його концентрації.

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

У *додатках* представлені:

- ймовірні похибки основних і допоміжних величин;
- приклади розрахунку плівкових випарних апаратів по осередненим параметрам;
- вплив рециркуляції сиропів на теплові робочі характеристики плівкових випарних апаратів;
- розрахунок енергетичної та економічної ефективності від заміни випарних апаратів Роберта на плівкові на випарній установці цукрового заводу;
- акти впровадження матеріалів дисертаційної роботи.

### **III. Наукова новизна роботи полягає в тому, що в ній**

- розроблено новий підхід до обґрунтування механізму перенесення теплоти через плівки рідини, що стікають по вертикальній поверхні та мають розвинуту хвильову структуру. Даний механізм передбачає періодичні збурення температурного поля плівки під дією великих хвиль на поверхні плівки та наступну стабілізацію температурного поля в період між проходженнями хвиль;

- побудовано наближену фізичну модель формування температурного поля та перенесення теплоти через плівку, що стікає по вертикальній поверхні і має розвинуту хвильову структуру. Згідно цієї моделі функція розподілу температури по товщині плівки найсуттєвіше змінюється в залежності від потужності циклічного хвильового збурення течії. Водночас період стабілізації температурного поля визначається періодичністю проходження великих хвиль;

- за запропонованою фізико-математичною моделлю проведено аналітичні дослідження та одержано нові наукові результати стосовно характеристик ламінарних течій та теплоперенесення у плівках в'язких рідин з розвинутою хвильовою структурою як при вільному стіканні плівок, так і в умовах супутнього парового потоку;

- для плівок, що періодично збурюються великими низькочастотними хвилями запропоновано модель турбулентності. За цією моделлю турбулізація плівкової течії пов'язана з проникненням пульсацій від центрального вихра великої хвилі, що утворюється на поверхні плівки в її пристінний ламінарний прошарок;

- з застосуванням моделі турбулентності для течії плівки рідини з розвинутою хвильовою структурою визначено характеристики процесу



теплоперенесення для випадків вільного стікання плівки та при її взаємодії з супутнім паровим потоком;

- одержані нові наукові дані стосовно гідродинамічної взаємодії стікаючої плівки цукрових розчинів з потоком пари. Побудовані розрахункові залежності для визначення коефіцієнта гідравлічного тертя при взаємодії плівки з паровою фазою;

- визначено причини та механізм погіршення інтенсивності тепловіддачі до плівок висококонцентрованих киплячих розчинів. Даний ефект пов'язаний з періодичним зростанням концентрації розчину на поверхні плівки та її вирівнюванням при проходженні великих хвиль.

- з метою визначення закономірностей гідродинаміки та теплопереносу в кільцевих низхідних двофазних потоках насичених цукрових розчинів розроблено методологію експериментальних досліджень тепловіддачі та гідравлічного опору. За цією методологією досліджено режими випаровування з міжфазної поверхні та режими поверхневого кипіння;

- в процесах концентрування цукрового розчину в стікаючій плівці встановлено явище зниження температури плівки відносно температури кипіння, яка б мала місце під час кипіння розчину в нерухомій ємності, в разі обтікання поверхні плівки потоком пари. Встановлений фактор автор формально ідентифікував, як процес часткового пригнічення фізико-хімічної температурної депресії потоком пари, що має фізичний сенс. Зазначений фактор пояснює наявність значної кількості рівнянь з розрахунку інтенсивності тепловіддачі до стікаючих плівок розчинів під час пароутворення, які дають результати, що суттєво відрізняються між собою, оскільки даний фактор не враховувався.

- на основі нового підходу до узагальнення результатів експериментальних досліджень процесів випаровування з поверхонь плівкових низхідних потоків отримано універсальне емпіричне співвідношення для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі до плівок розчинів в трубах випарних апаратів при випаровуванні з їх поверхні як за наявності супутнього парового потоку, так і в умовах бульбашкового кипіння розчинів.

- для низхідних паро-рідинних потоків розчинів уточнено параметр, за яким визначається перехід від режиму випаровування з міжфазної поверхні плівки до режиму кипіння.

#### ***IV. Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що***

- запропоновані в дисертаційній роботі математичні моделі гідродинаміки та теплообміну в стікаючих плівках з розвинутою структурою великих хвиль, а також наведені в роботі дані експериментальних досліджень, можуть використовуватися для аналізу протікання цих процесів у технологічному обладнанні на підприємствах цукрового виробництва, а також на інших підприємствах, виробництво на яких пов'язано з теплообміном у плівкових течіях та випаровуванням з їх поверхонь;

- одержане в роботі універсальне співвідношення для визначення інтенсивності тепловіддачі до плівок розчинів в трубах випарних апаратів може бути рекомендовано для інженерних розрахунків при проектуванні, або



вдосконаленні обладнання для концентрування розчинів. Це співвідношення справедливе для широкого діапазону зміни витрат фаз, концентрацій та інших режимних параметрів, що характерні для умов експлуатації випарних установок з концентрування цукрових та фруктових сиропів.

- результати досліджень кризових режимів тепловіддачі до плівок висококонцентрованих цукрових розчинів дозволяють передбачати їх виникнення, визначати оптимальне співвідношення експлуатаційних режимних параметрів в плівкових випарних апаратах та розробити заходи для запобігання цих режимів.

Про практичну цінність роботи свідчать також результати її впровадження на підприємствах: ТОВ фірма "ТМА", ТОВ ВГ "Техінсервіс" та ПРАТ "АК САТЕР", про що в роботі містяться відповідні акти.

#### ***V. Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів.***

Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів та висновків підтверджується коректною постановкою задач аналітичних досліджень та адекватністю застосованих фізичних припущень, застосуванням сучасних методів математичного моделювання, використанням надійної виміральної техніки для експериментальних досліджень і коректних методів математичної обробки експериментальних даних. Достовірність результатів аналітичних досліджень підтверджується також їх задовільним узгодженням з результатами експериментів.

#### ***VI. Повнота викладення наукових положень та висновків.***

Основні положення дисертаційної роботи та висновки викладені в 27 друкованих наукових працях. З них 9 статей опубліковано у фахових наукових журналах, 8 статей - у виданнях іноземних держав, які включені до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, РИНЦ, Web of Science, 3 – у виданнях України, які включені до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus, 7 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Автореферат дисертаційної роботи Петренка В. П. достатньо повно відображає зміст і суть результатів досліджень, викладених в дисертації.

#### ***VII. Відповідність дисертаційної роботи встановленим вимогам***

Дисертаційна робота відповідає вимогам МОН України стосовно наявності результатів проведених досліджень та отриманих науково-обґрунтованих рішень.

#### ***VIII. Оформлення дисертації***

Дисертація є закінченою науковою роботою, що виконана у вигляді підготовленого рукопису. Дисертаційна робота написана з використанням сучасної наукової термінології. Стиль викладення наукового матеріалу забезпечує його чітке та однозначне розуміння. Дисертація оформлена згідно прийнятих вимог до оформлення.



## **ІХ. Зауваження до дисертації**

1. В першому розділі аналіз гідродинамічних параметрів плівкових течій виконано переважно для водо-повітряних низхідних кільцевих потоків, в той час як для паро-рідинних течій розглядається лише обмежена кількість робіт.

2. Теоретичний аналіз гідродинамічних та теплообмінних процесів в стікаючих плівках виконано з застосуванням точних аналітичних методів розв'язання диференціальних рівнянь переносу імпульсу та енергії. Для точного розв'язання цих рівнянь необхідні були певні спрощення у постановках задач. Доцільно було б для деяких з них застосувати чисельні методи, які мають більш широкі можливості для розв'язання складних задач гідродинаміки та теплопереносу.

3. З матеріалів дисертації не зрозуміло, яким чином зростання потужності хвильового збурення зі збільшенням щільності зрошення відображається на інтенсифікації тепловіддачі відповідно до запропонованої моделі циклічного збурення температурного поля великими хвилями.

4. Більшість задач розглядаються в стаціонарній постановці, хоча процеси циклічного збурення температурного поля великими хвилями – нестационарні. Тому застосування стаціонарних моделей для таких процесів вимагає більш глибокого обґрунтування.

5. Доцільно було б більш обґрунтовано підходити до фізичної інтерпретації розроблених моделей. Наприклад, вираз «відібрана хвильовим вихором теплота транспортується до зовнішнього шару хвилі» не зовсім зрозумілий, адже процес перенесення енергії є неперервним та визначається лише конфігурацією полів температури і швидкості за визначених фізичних характеристик.

6. В п'ятому розділі вказано, що турбулентна в'язкість має максимальне значення в момент проходження вихору великої хвилі над плівкою і далі затухає по довжині плівки до приходу наступного валу великої хвилі. Тобто, залежність для турбулентної в'язкості повинна бути функцією як поперечної, так і поздовжньої координати, в той час, як залежність (5.97) є функцією лише поперечної координати. Виникає питання, як таке спрощення відображається на степені видозмінення температурного поля.

7. В наявних роботах з досліджень кризи теплообміну під час охолодження теплонапруженої поверхні теплообміну плівками важливу роль відіграє ефект Марангоні. За результатами досліджень, що наведені в даній роботі, не зрозуміло, яку роль відіграє ефект Марангоні в процесах погіршення тепловіддачі під час концентрування розчинів, що мають велику в'язкість.

8. При побудові розподілення теплового потоку по висоті каналу (рис.6.13), автором не вказано, яким чином перераховувались параметри теплообміну з наведених експериментальних даних інших авторів, які не враховували пригнічення фізико-хімічної температурної депресії паровим потоком.

9. В роботі зустрічаються стилістичні неточності.

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



## ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Петренка В.П. є завершеним науковим дослідженням, в якому отримані нові науково обґрунтовані результати, що розширюють сучасні уявлення про теплогідродинамічні процеси, що протікають в низхідних кільцевих потоках розчинів під час їх концентрування.

Наукове значення роботи полягає в розробці теоретичної бази для аналізу процесів перенесення теплоти та імпульсу в стікаючих плівках з розвинутою структурою великих хвиль, що базується на новій науковій концепції аналізу теплогідродинамічних процесів в низхідних кільцевих паро-рідинних потоках. Практичне значення роботи полягає в тому, що в ній запропоновані співвідношення для інженерного розрахунку інтенсивності тепловіддачі до низхідних кільцевих потоків сиропів під час пароутворення. Ці співвідношення можуть застосовуватися в широкому діапазоні зміни режимних параметрів, що реалізуються в плівкових випарних апаратах випарних установок цукрової галузі.

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

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

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

На підставі вищевикладеного вважаю, що дисертаційна робота Петренка Валентина Петровича "Теплогідродинамічні процеси в низхідних кільцевих паро-рідинних потоках розчинів з розвинутою хвильовою структурою під час пароутворення" 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 24.07.2013 р. №567 (зі змінами, затвердженими постановою Кабінету Міністрів України від 19.08. 2015 р.), а її автор, Петренко Валентин Петрович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Офіційний опонент,  
доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник,  
головний науковий співробітник  
Інституту технічної теплофізики НАН України

Б.В.Давиденко

Підпис доктора технічних наук Давиденка Б.В. засвідчую:  
Вчений секретар  
Інституту технічної теплофізики НАН України  
кандидат технічних наук



Р.В.Сергієнко