

ВІДЗИВ

офіційного опонента на дисертаційну роботу **Петренка Валентина Петровича** “**Теплогідродинамічні процеси в низхідних кільцевих паро-рідинних потоках розчинів з розвинутою хвильовою структурою під час пароутворення**”, подану до захисту на здобуття наукового ступеня доктора технічних, за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

1.Актуальність теми дисертаційної роботи.

Заміна випарних апаратів Роберта, якими укомплектовані випарні установки цукрових заводів, на плівкові є актуальним напрямком технічного переоснащення цукрової галузі в умовах значних цін на енергоносії та зростання вимог до якості продукції. Одна з найважливіших характеристик енергоефективності теплових схем – повнота використання вторинних енергоресурсів (ВЕР) на нагрівання продуктів виробництва. Реалізація можливості глибокого використання ВЕР полягає в підвищенні температури вторинної пари на випарних апаратах хвостової частини випарної установки без погіршення якості сиропів. Оскільки основними недоліками випарних апаратів Роберта є – значний час перебування розчину в апараті та наявність гідростатичної температурної депресії, яка особливо відчутна в області розрідження, реалізація принципу глибокого використання ВЕР в теплових схемах без плівкових випарних апаратів практично неможлива.

В разі концентрування випаровуванням фруктових соків, де вимоги до якості сиропів на порядок вищі ніж в цукровій галузі, випарні установки з плівковими випарними апаратами є основним технічним рішенням реалізації можливості отримання якісних фруктових концентратів при мінімальних затратах енергії на його отримання.

Заміна випарних апаратів Роберта на плівкові потребує здійснення перевірочних розрахунків випарних установок для конкретизації їх температурного режиму і коректного вибору додаткового теплотехнологічного обладнання. Емпіричні співвідношення для розрахунку інтенсивності тепловіддачі до стікаючих плівок розчинів у плівкових випарних апаратах, які наведені в літературі, є результатом узагальнення даних, отриманих на експериментальних установках, що моделюють випарні апарати, тому рекомендовані розрахункові співвідношення, внаслідок значних розбіжностей в геометрії експериментальних каналів та умов проведення експериментів, дають результати, які в разі відрізняються між собою. Особливо проблематичною, з точки зору отримання коректного результату щодо температурного режиму випарної установки в процесі перевірних розрахунків за існуючими в літературі співвідношеннями, є область розрідження під час концентрування густих сиропів.

Тому розроблення науково обґрунтованих адекватних моделей теплообміну в стікаючих по вертикальній поверхні плівках розчинів та отримання на їх основі, та даних експериментальних досліджень адекватних співвідношень для



розрахунків теплогідродинамічних параметрів низхідних кільцевих потоків розчинів в процесах концентрування соків та отримання густих сиропів є актуальною задачею.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась згідно плану держбюджетної науково-дослідної тематики кафедри теплоенергетики та холодильної техніки НУХТ "Розроблення наукових основ створення вискоефективного 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).

3. Наукова новизна роботи та важливість одержаних результатів

Нова концепція механізму теплоперенесення до стікаючих плівок розчинів з розвинутою хвильовою структурою, як процесів циклічного збурення температурного, швидкісного та концентраційного полів великими хвилями та їх стабілізації у міжхвильову паузу, є новим ефективним інструментом аналізу теплогідродинамічних процесів, що протікають в стікаючих плівках розчинів в довгих каналах під час пароутворення.

Відповідно до нової концепції запропонована та реалізована фізико-математична модель процесів теплоперенесення в стікаючих по вертикальній поверхні плівках розчинів з розвинутою хвильовою структурою, як для ламінарних, так і турбулентних течій в'язких рідин в режимах вільного стікання і за наявності супутнього парового потоку.

Запропонована фізична модель турбулентності в стікаючих плівках, циклічно збурених великими низькочастотними хвилями, в якій постульовано проникнення турбулентних пульсацій в пристінний ламінарний прошарок внаслідок дії потужного центрального вихора під час проходження великої хвилі, розширює наші уявлення про процеси турбулентного перенесення в плівках, циклічно збурених великими хвилями.

Встановлені закономірності гідравлічної взаємодії парового ядра з низхідною плівкою цукрових розчинів у формі залежності коефіцієнта гідравлічного тертя від витратних параметрів двофазового потоку, підтвердили існуючі закономірності щодо гідравлічного опору для адіабатних рідино-повітряних кільцевих низхідних потоків в режимах слабкої та сильної взаємодії фаз.

Сформульована нова концепція механізму процесу кризового погіршення інтенсивності тепловіддачі до висококонцентрованих киплячих плівок розчинів, як результат циклічного процесу накопичення надлишкової концентрації на міжфазній поверхні і, відповідно, циклічного зростання фізико-хімічної температурної депресії, та її циклічного вирівнювання під час проходження

великих хвиль, відображає реальний перебіг кризових процесів під час концентрування надгустих розчинів.

Автором розроблені та реалізовані науково-методологічні засади експериментального дослідження інтенсивності тепловіддачі та гідравлічного опору в кільцевих низхідних паро-рідинних потоках насичених цукрових розчинів, штучно сформованих автономним введенням компонентів фаз в кип'ятильний канал, що дозволило експериментально виділити вплив окремих факторів на теплогідродинамічні процеси, а не їх комплексів.

Встановлене явище часткового пригнічення фізико-хімічної температурної депресії під час обтікання поверхні киплячої плівки цукрового розчину паром, температура якої відповідає тиску насичення, дає пояснення неадекватності ряду рекомендованих до розрахунку інтенсивності тепловіддачі до плівок сиропів співвідношень.

Запропонована нова кореляція для узагальнення експериментальних даних з тепловіддачі до кільцевих низхідних потоків під час пароутворення, на основі якої отримано універсальне емпіричне співвідношення для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі до плівок розчинів в трубах, яке справедливо для всієї гами конструкцій плівкових випарних апаратів, що випускає промисловість, для всіх режимів теплообміну, що реалізуються в випарних апаратах випарних установках цукрової промисловості.

Набуло подальшого розвитку вирішення питання щодо параметру переходу від режиму випаровування з міжфазної поверхні плівки до кипіння в низхідних паро-рідинних потоках розчинів.

4. Достовірність та обґрунтованість отриманих в роботі результатів та висновків забезпечується коректністю, повнотою та адекватністю фізичних припущень в постановці задач, застосуванням сучасних методів математичного моделювання, сучасних методів експериментальних досліджень з використанням сучасних засобів вимірювального комплексу. Винесені на захист наукові положення базуються на сучасних теплофізичних уявленнях про механізм гідродинамічної кавітації та сучасних методів експериментальних досліджень.

5. Практичне значення одержаних результатів

Отримані теоретичні та експериментальні результати досліджень процесів перенесення теплоти та імпульсу в стікаючих плівках з розвинутою структурою великих хвиль є теоретичною базою аналізу теплогідродинамічних процесів в низхідних кільцевих паро-та газо-рідинних потоках, що протікають в теплотехнологічному обладнанні як підприємств харчової, так і хімічної та нафтопереробної галузей.

Отримане співвідношення для інженерних розрахунків інтенсивності тепловіддачі до плівок розчинів в трубах випарних апаратів є універсальним рівнянням, яке справедливе для всіх режимів руху низхідних кільцевих паро-рідинних потоків, що мають місце при концентруванні розчинів в трубах плівкових випарних апаратів як в режимі випаровування з міжфазної поверхні із

супутнім паровим потоком, так і в умовах бульбашкового кипіння під незначним тиском (до 0,8 бар) та розрідженням до 0,85 бар для розчинів концентрацією до 75% в трубах довільної довжини діаметрами від 20 до 34 мм в діапазоні зміни щільності зрошення $0,05 \dots 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$, швидкості пари до 45 м/с, теплового потоку до $60 \text{ кВт}/\text{м}^2$ (досліджений діапазон).

Наведені акти впроваджень свідчать, що результати дисертаційної роботи використовуються як в проектних, так і в перевірочних розрахунках плівкових випарних апаратів з відтворення температурного режиму на випарних установках цукрових заводів, що необхідно для коректного підбору теплотехнологічного обладнання під час реконструкції заводів зі зростанням продуктивності.

Отримані теоретичні та експериментальні результати з кризових режимів погіршення тепловіддачі до густих висококонцентрованих (вище 75%) цукрових плівок розчинів дозволяють прогнозувати зазначені режими в плівкових випарних апаратах.

6. Структура та обсяг роботи

Дисертація має структуру завершеної науково-дослідної роботи. Текст дисертації складається анотації, вступу, 7 розділів, основних результатів, висновків, списку використаної літератури та додатків, які містять інформацію про практичне використання результатів. Загальний обсяг дисертаційної роботи складається з 357 сторінок основної текстової частини; 203 бібліографічних найменувань; 103 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.

У першому розділі виконано аналіз гідродинамічних процесів, що протікають в плівках під час течій по вертикальній поверхні, еволюції структурних форм, що виникають на поверхні плівки в процесі руху плівки. Особлива увага приділена процесам розвитку поверхневих хвиль від початку їх формування до настання режиму насиченої хвильової структури. Значної уваги приділено теоретичним дослідженням розвитку, на основі лінійної та нелінійної теорій хвильоутворення, двовимірних і тривимірних хвиль на поверхні вертикально стікаючої плівки рідини.

Виконано аналіз моделей турбулентності, що відображають специфічні умови її розвитку в обмеженому просторі плівки, а також наявні експериментальні дані з розвитку турбулентності в плівці в умовах стабілізованої течії плівки лише за

наявності капілярних хвиль на міжфазній поверхні.

Наведено результати експериментальних досліджень міжфазної взаємодії плівки з газовим та паровим потоком, а також краплинного масообміну між поверхнею плівки та ядром потоку.

На основі аналізу літературних джерел з гідродинаміки стікаючих плівок визначена структурна форма руху плівки, що відповідає умовам роботи випарних апаратів з довгими трубами.

В результаті проведеного аналізу сформульовані мета та задачі дослідження.

У другому розділі виконано аналіз процесів теплообміну в стікаючих плівках рідин під час пароутворення. Надані результати теоретичних досліджень розвитку теплового та гідродинамічного полів на ділянках неусталеного та усталеного режимів руху ламінарних та турбулентних плівок. Наведені результати експериментальних досліджень тепловіддачі до плівок на ділянці розвитку теплового та гідродинамічного полів, а також результати теоретичних та експериментальних досліджень теплообміну на ділянці розвинутого теплового граничного шару рідини в режимі випаровування з міжфазної поверхні плівки.

Наведені результати експериментальних досліджень процесів тепловіддачі до вільно стікаючих, та стікаючих за наявності супутнього парового ядра плівок рідин в умовах поверхневого кипіння, отриманих на експериментальних установках, що відтворюють реальні умови експлуатації плівкових випарних апаратів під час концентрування розчинів.

Виконано аналіз особливостей застосування наведених в літературі співвідношень для розрахунку інтенсивності тепловіддачі до киплячих розчинів в трубах плівкових випарних апаратів.

Розглянуті наведені в літературі результати досліджень кризових режимів тепловіддачі, мінімальної щільності зрошення, за якої мають місце режими погіршеної тепловіддачі до плівок.

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

У третьому розділі наведені конструктивні схеми експериментальних установок, методика проведення експериментальних досліджень та порядок первинної обробки дослідних даних.

Наведено опис елементів експериментальних установок. Слід зазначити, що важливим фактором, в основі якого спроектовано установку №2, є можливість автономного формування витрат фаз, теплового потоку, температурного напору, величини розрідження в окремих камерах установки, що дозволяє уникнути сумісного впливу на тепловіддачу ряду факторів, що пов'язані між собою, наприклад, теплового потоку та швидкості пари, як це має місце в установках, що моделюють реальні випарні апарати.

Дисертант використав результати експериментальних досліджень теплогідродинамічних процесів, що отримані в МФТУ ім.Баумана, та Хьюстонському університеті, на що наведені відповідні посилання.

У *четвертому розділі* наведено результати теоретичного аналізу теплогідродинамічних процесів, що протікають в паро-рідинних потоках розчинів на основі моделі теплообміну з еквівалентною пласкою плівкою, за якої термічний опір тепловіддачі зосереджено в неперервному прошарку плівки, а поверхневі великі хвилі, що прокочуються по її поверхні, виконують роль турбулізаторів, або інтенсифікаторів теплообміну.

Виконано аналіз закономірностей перерозподілення рідини між неперервним шаром та великими хвилями і встановлено, що товщина неперервного шару плівки може бути розрахована з рівнянь руху за умови достатньої інформації щодо геометричних параметрів великих хвиль та їх фазової швидкості.

Наведено результати експериментального дослідження товщини неперервного прошарку плівки, виконаного електроконтактним методом, та інженерне співвідношення для його розрахунку (4.18), яке справедливе як для вільного стікання, так і для течій з міжфазною взаємодією для води та в'язких цукрових розчинів.

Отримано інженерне співвідношення для розрахунку коефіцієнта гідравлічного тертя в низхідних паро-рідинних потоках води та цукрових розчинів концентрацією до 72%, справедливе в областях слабкої, та сильної взаємодії фаз в трубах діаметрами від 13 до 51 мм.

В результаті аналізу автором встановлено, що модель теплообміну, за якої термічний опір тепловіддачі зосереджено в неперервному прошарку плівки, а поверхневі великі хвилі виконують роль турбулізаторів, лише якісно відображає процеси теплообміну для води та цукрових розчинів в плівці режимі випаровування з міжфазної поверхні.

Показано, що гідродинамічні та гідравлічні параметри плівкових течій можна успішно вирішувати в рамках моделі еквівалентної пласкої плівки, в той час як теплові параметри вимагають адекватних моделей, які б враховували періодичність процесів збурення плівки великими хвилями, як основного чинника інтенсифікації теплообміну в плівці режимі течії з розвинутою хвильовою структурою.

У *п'ятому розділі* наведено результати моделювання теплогідродинамічних процесів в плівках на основі запропонованої фізико-математичної моделі, яка може кваліфікуватися як новий концептуальний підхід до аналізу процесів перенесення в плівках з розвинутою хвильовою структурою, за якої перенесення теплоти та імпульсу в плівці розглядається як процес циклічного збурення температурного та гідродинамічного полів великими хвилями та їх стабілізації у міжхвильову паузу. Аналіз процесів теплоперенесення розглянуто окремо для ламінарних та турбулентних плівок з розвинутою хвильовою структурою за вільного стікання та течії із супутнім паровим потоком під час пароутворення.

Отримано наближені розв'язки диференціальних рівнянь збереження енергії для плівкових течій в рамках запропонованої фізико-математичної моделі для ламінарного та турбулентного режимів руху плівки. На основі теоретичних рішень та даних експериментальних досліджень процесів теплообміну в плівках під час

пароутворення отримано корелюючі параметри, які стали базою апроксимацій для інженерних розрахунків процесів теплообміну в плівкових випарних апаратах.

Виконано аналіз процесу теплоперенесення в плівці в турбулентному режимі руху на основі модифікованої, адаптованої до режиму руху плівки з циклічним порушенням гідродинамічної структури плівки великими хвилями моделі турбулентності, як модифікації моделі турбулентності М.Д.Міллійонщикова.

У шостому розділі наведено результати експериментальних досліджень процесів теплообміну в плівках в режимі випаровування з міжфазної поверхні та кипіння плівок води та цукрових розчинів концентрацією до 72 % в умовах низхідної конвекції. Виконано аналіз експериментальних даних по впливу щільності зрошення, швидкості парового ядра на процеси теплоперенесення в плівках, а також впливу параметрів бульбашкового кипіння на інтенсивність тепловіддачі в умовах низхідної конвекції.

Визначено умови переходу до початку генерації парових бульбашок, та сформульовано параметр, що характеризує інтенсифікацію тепловіддачі до плівки під час їх утворення. Встановлені фактори інтенсифікації тепловіддачі в низхідних паро-рідинних потоках розчинів під час пароутворення – дія парового ядра на пристінну плівку, вплив бульбашкового кипіння, та встановлені кількісні характеристики дії впливових факторів на інтенсивність тепловіддачі. Отримані характеристики коректні у всьому діапазоні зміни витратних та режимних параметрів, що характерні для умов роботи випарних апаратів багатокорпусної випарної установки цукрового заводу, включаючи область розрідження до 0,84 бар, а також випарних установок для концентрування фруктових соків.

Встановлене явище часткового пригнічення фізико-хімічної температурної депресії під час обтікання поверхні плівки розчину парою, температура якої відповідає тиску насичення над поверхню плівки, пояснює значну розбіжність у результатах висвітлення різними авторами залежності інтенсивності тепловіддачі до киплячих плівок розчинів в каналах різної довжини, де швидкість пари змінюється вздовж каналу в широкому діапазоні.

Результати математичного моделювання, теоретичного аналізу процесів теплоперенесення до низхідних кільцевих потоків розчинів під час пароутворення лягли в основу розроблення кореляцій та узагальнення на їх основі комплексу експериментальних даних, отриманих як на установках зі штучним формуванням двофазового потоку, так і на установках, що моделюють реальні умови концентрування сиропів в трубах випарних апаратів. Для інженерних розрахунків інтенсивності тепловіддачі до кільцевих низхідних потоків розчинів рекомендовано апроксимаційне співвідношення (6.13), яке повністю охоплює діапазон зміни витрат фаз, концентрацій та режимних параметрів, характерних для умов експлуатації випарних установок з концентрування цукрових та фруктових сиропів.

У сьомому розділі виконано аналіз процесів кризового погіршеного теплообміну під час концентрування густих розчинів. Наведено розв'язки диференціального рівняння дифузії за умови наростання міжфазної концентрації

та падіння теплового потоку внаслідок зростання фізико-хімічної депресії, що має місце в області кризового режиму теплообміну. Розроблена адекватна математична модель кризового погіршення тепловіддачі по густих розчинів під час паротворення, яка базується на циклічності порушення поверхневого прошарку плівки з підвищеною концентрацією розчину хвильовими напливами.

Встановлено, що основною причиною падіння теплового потоку по довжині випаровувального каналу в разі концентрування густих плівок є перевищення величини фізико-хімічної температурної депресії на міжфазній границі 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 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.

7. Повнота викладення наукових положень, висновків, рекомендацій.

Основний зміст роботи викладений в 27 публікаціях, в т.ч. 9 статей у наукових фахових виданнях, 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.

Основні положення дисертаційної роботи багаторазово доповідались на міжнародних наукових та науково-технічних галузевих конференціях.

8. Достовірність та обґрунтованість.

Достовірність отриманих наукових положень підтверджується застосуванням сучасних методів проведення експериментальних досліджень, засобів вимірювань, методів математичного моделювання та підтверджується відповідністю розрахунків за розробленими моделями результатам експериментальних досліджень та промислових випробувань плівкових випарних апаратів.

9. Відповідність дисертації встановленим вимогам.

Дисертаційна робота відповідає вимогам МОН України стосовно наявності результатів проведених досліджень та отриманих науково обґрунтованих рішень. Автореферат та основні положення дисертації ідентичні за змістом.

10. Оформлення дисертації.

Дисертація акуратно оформлена згідно вимогам МОН України; в роботі наведена достатня кількість ілюстративного матеріалу.

11. Зауваження по роботі.

1. В оглядовому розділі №1 надано результати аналізу процесу хвильоутворення в рамках лінійної теорії регулярного хвильового руху, яка є загальновідомою і не потребує додаткового обговорення.

2. За результатом наближеного розв'язку рівняння збереження енергії для ламінарної плівки з розвинутою структурою великих хвиль (5.28), єдиним параметром, який ставить у відповідність результати розрахунку інтенсивності тепловіддачі за співвідношенням (5.53) експериментальним даним, є величина ξ_0 , яка визначає глибину “провалу” температурного профілю під час проходження великої хвилі. Зазначений висновок отримано відповідно до спрощення, що фазова швидкість великих хвиль у 2 рази перевищує середню швидкість плівки і в цьому разі довжина перебігу плівки між двома хвилями дорівнює довжині великих хвиль. Але реально фазова швидкість не є постійною величиною, а змінюється відповідно до щільності зрошення та діаметра каналу. Було б доцільно вдосконалити надану модель, надавши фазову швидкість великих хвиль функцією від щільності зрошення, а не постійною величиною.

3. Процеси перенесення в плівці розглядаються в рамках моделі циклічного збурення температурного поля великими хвилями. Оскільки процес відновлення теплогідродинамічних параметрів у міжхвильову паузу нестационарний, а інтенсивність турбулентних вихорів максимальна під час проходження великої хвилі, турбулентна в'язкість повинна бути функцією не тільки поперечної, а і повздовжньої координати.

4. В турбулентних потоках, на відміну від ламінарних, “просідання” температурного профілю під час проходження вихора великої хвилі обмежено кривою, за якої температурний градієнт на міжфазній поверхні дорівнює “0”, тобто кривою, що відповідає координаті ξ_m . Для ламінарних потоків допускалось, що під час проходження вихора великої хвилі “просідання” температурного профілю здійснюється і за межі температурної кривої з нульовим градієнтом вглибину плівки. Не зрозуміло, чому на турбулентні потоки накладено таке обмеження.

5. Якщо має місце пригнічення фізико-хімічної температурної депресії потоком пари під час концентрування цукрових розчинів, виникає питання про коректність

порівнянь даних з інтенсивності тепловіддачі до киплячих плівок розчинів, наданих іншими авторами, які не враховували даний фактор.

6. За результатами аналізу (7 розділ) під час концентрування має місце зміна в'язкості рідини вздовж поверхні теплообміну, що викликає потовщення плівки і зростання амплітуди хвиль. В той же час, перерозподіл концентрації і, зумовлене цим, зростання в'язкості у напрямку міжфазної поверхні, викликає зменшення товщини плівки та амплітуди хвиль. Виникає питання щодо адекватності запропонованої моделі в разі неврахування зазначених факторів.

7. В хвильовій теорії важливим чинником є капілярні сили. В альтернативних моделях «криз теплообміну» під час пароутворення в плівках саме вони відіграють ключову роль, в той час як в результатах аналізу в даній роботі поверхневий натяг не відіграє суттєвої ролі в кризових процесах.

8. В роботі було б не зайвим виконати моделювання теплогідродинамічних процесів в плівках в прикладному пакеті ANSYS з використанням $k-\epsilon$ та $k-\omega$ моделей турбулентності.

9. В наведеній «фізико-математичній моделі» лівова частка приділена її математичній реалізації. В той же час недостатньо уваги приділено фізичному обґрунтуванню розробленої моделі та фізичному аналізу її результатів.

10. В роботі зустрічаються граматичні помилки.

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

10. Висновки.

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.

Практичне значення полягає в наданні універсальних інженерних співвідношень для розрахунку теплогідродинамічних параметрів – гідравлічного опору, інтенсивності тепловіддачі до низхідних кільцевих потоків як слабо- так і висококонцентрованих розчинів під час пароутворення, які справедливі в усьому діапазоні зміни режимних та витратних параметрів, що реалізуються в плівкових випарних апаратах випарних установок цукрової галузі.

Сформульовані в роботі наукові положення, висновки і рекомендації характеризуються високим ступенем обґрунтованості, а їхня 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 парорідинних 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 заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Офіційний опонент,
професор кафедри теоретичної та промислової
теплотехніки Національного технічного університету України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”
МОН України,
доктор технічних наук, професор



М. К. Безродний

Вчений секретар

КПІ ім. Ігоря Сікорського




А.А.Мельниченко