

ВІДГУК

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

І ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

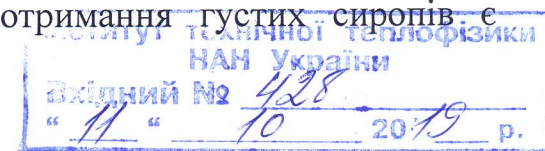
Актуальність теми.

Цукрова галузь найбільш енергоємна з підприємств харчової промисловості, а паливна складова в собівартості цукру досягає 30%. На таких підприємствах, в умовах значних цін на енергоносії, особливого значення набуває проблема глибокого використання вторинних енергоресурсів на технологічні потреби та збільшення ефективності енерготехнологічних схем. Потужні випарні установки цукрових заводів укомплектовані переважно випарними апаратами Роберта, які прості в експлуатації, але мають суттєвий недолік – значний час перебування розчину в апараті та наявність гідростатичної температурної депресії, яка особливо відчутна в області розрідження. Оскільки створення енергоефективних теплових схем з глибоким використанням ВЕР можливо лише за умови забезпечення підвищеної кратності випаровування на ВУ за рахунок зміщення паровідборів на хвостову частину ВУ, задовольнити умову підняття температури кипіння на випарних апаратах хвостової частини ВУ без погіршення якості сиропу від термічного розкладання можливо за умови застосування плівкових випарних апаратів.

Заміна випарних апаратів Роберта на плівкові потребує здійснення перевірочних розрахунків випарних установок для конкретизації їх температурного режиму і коректного вибору додаткового теплотехнологічного обладнання, що можливо за наявності адекватних розрахункових співвідношень з теплообміну під час концентрування сиропів в кип'ятильних каналах плівкових випарних апаратів.

Існуючі емпіричні співвідношення для розрахунку інтенсивності тепловіддачі до кільцевих низхідних потоків розчинів, які наведені в літературі, є переважно результатом узагальнення даних, отриманих на експериментальних стендах, що моделюють випарні апарати, тому рекомендовані співвідношення, внаслідок значних розбіжностей в геометрії експериментальних каналів та умов проведення експериментів дають результати, які в разі відрізняються між собою.

Існуючі теоретичні результати аналізу процесів теплоперенесення в плівках розчинів отримані переважно на основі спрощеної моделі з еквівалентною пласкою плівкою, яка не є адекватною, оскільки не враховує реальний режим руху низхідних плівок у довгих каналах. Тому розроблення науково обґрунтованих адекватних моделей теплообміну під час концентрування розчинів в тонких стікаючих по вертикальній поверхні плівках 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.



Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі теплоенергетики та холодильної техніки Національного університету харчових технологій. Тематика дисертаційної роботи відповідає науковому напрямку досліджень кафедри та виконувалась у відповідності з програмою досліджень Міністерства освіти і науки України за напрямом “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).

Мета і завдання дослідження.

Мета роботи – на основі комплексного теоретичного і експериментального досліджень теплогідродинамічних характеристик низхідних кільцевих паро-рідинних потоків розчинів під час пароутворення створити адекватні моделі процесів теплоперенесення, і на їх основі розробити науково обгрунтовану теоретичну базу аналізу теплоперенесення плівкових течій з розвинутою хвильовою структурою та інструментарій розрахунків процесів теплообміну в теплообмінних каналах плівкових випарних апаратів з різною геометрією труб в широкому діапазоні зміни режимних параметрів, концентрацій розчинів та витрат фаз.

Відповідно до поставленої мети досліджень сформульовані наступні основні завдання:

- провести аналіз сучасного стану теорії гідродинаміки руху плівкових течій, а також процесів хвильоутворення на поверхні плівки;
- провести аналіз сучасного стану теорії теплоперенесення в плівках в низхідних паро-рідинних потоках під час пароутворення;
- виконати математичне моделювання процесів теплоперенесення в ламінарних та турбулентних плівках в режимах випаровування з міжфазної поверхні на основі існуючих, адаптованих до плівкових течій, моделей турбулентності;
- виконати математичне моделювання процесів теплообміну в низхідних кільцевих паро-рідинних потоках під час пароутворення в умовах періодичного збурення упорядкованої структури плівки великими низькочастотними хвилями;
- виконати математичне моделювання кризових режимів погіршення тепловіддачі при кипінні висококонцентрованих ламінарних плівок розчинів в умовах періодичного збурення плівки великими напливними хвилями;
- дослідити експериментально процеси тепловіддачі до низхідних паро-рідинних кільцевих потоків слабо- та висококонцентрованих розчинів під час пароутворення;
- дослідити експериментально гідродинамічний опір в кільцевих низхідних потоках слабо-та висококонцентрованих розчинів під час пароутворення;
- дослідити експериментально режими погіршеної тепловіддачі до кільцевих низхідних потоків висококонцентрованих цукрових розчинів під час пароутворення;

– базуючись на результатах теоретичного аналізу та результатах експериментального дослідження процесів теплообміну в низхідних паро-рідинних кільцевих двофазних потоках одержати узагальнюючі співвідношення для інженерних розрахунків інтенсивності тепловіддачі до киплячих, вертикально стікаючих плівок слабо- та висококонцентрованих сиропів в діапазоні змін витрат фаз, характерних для роботи випарних установок цукрового виробництва, а також інших випарних установок харчової галузі.

Об'єкт, предмет і методи дослідження.

Об'єкт досліджень – двофазні паро-рідинні низхідні кільцеві потоки розчинів з фазовими перетвореннями.

Предмет досліджень – теплообмін та гідродинаміка плівкових течій розчинів під час їх концентрування у вертикальних кип'ятильних каналах.

Методи дослідження – математичне моделювання та експериментальне дослідження.

Експериментальні дослідження теплогідродинамічних характеристик низхідних паро-рідинних потоків розчинів проведенні на спеціально створених експериментальних установках. Важливо, що для виділення впливу на тепловіддачу до плівок розчинів в режимах випаровування з міжфазної поверхні та кипіння окремих факторів, створена експериментальна установка з незалежним формуванням витрат фаз, теплового потоку, температурного напору, величини розрідження в окремих камерах.

Наукова новизна роботи та важливість одержаних результатів для науки і практики.

Нові наукові результати полягають в наступному:

1. Сформульована нова концепція механізму теплоперенесення до стікаючих плівок з розвинутою хвильовою структурою, як процесу циклічного збурення температурного поля великими хвилями з характерною частотою їх проходження та його стабілізації у міжхвильову паузу.
2. Запропоновано фізичну модель процесу тепловіддачі до стікаючих по вертикальній поверхні плівок з розвинутою хвильовою структурою, за якої степінь деформації температурного профілю визначається потужністю циклічного хвильового збурення, а стабілізації температурного та гідродинамічного полів в міжхвильову паузу – частотою проходження великих хвиль.
3. Реалізовано фізико-математичну модель процесів перенесення для плівкових ламінарних течій в'язких рідин з розвинутою хвильовою структурою, яка пов'язує хвильові характеристики плівкової течії з процесами теплообміну як за вільного стікання, так і за наявності супутнього парового потоку.
4. Запропоновано фізичну 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.

5. Реалізовано фізико-математичну модель процесів перенесення для плівкових турбулентних течій з розвинутою хвильовою структурою на основі запропонованої моделі турбулентності як за вільного стікання, так і за наявності супутнього парового потоку.
6. Встановлені закономірності гідравлічної взаємодії парового ядра з низхідною плівкою цукрових розчинів, одержано узагальнюючу форму коефіцієнта гідравлічного тертя кільцевих низхідних потоків в режимах слабкої та сильної взаємодії фаз.
7. Сформульовано концепцію 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, а у випадку висококонцентрованих розчинів – напливних хвиль.
8. Розроблені та реалізовані науково-методологічні засади експериментального дослідження інтенсивності тепловіддачі та гідравлічного опору в кільцевих низхідних двофазних потоках насичених цукрових розчинів, штучно сформованих автономним введенням компонентів фаз в кип'ятильний канал за довільної зміни температурного напору в режимах випаровування з міжфазної поверхні та поверхневого кипіння в області незначних тисків (до 0,8 бар) та розрідження до 0,84 бар.
9. Встановлено явище часткового пригнічення фізико-хімічної температурної депресії під час обтікання поверхні киплячої плівки цукрового розчину парою, температура якої відповідає тиску насичення над поверхнею плівки, пропорційно швидкості пари.
10. Запропонована нова кореляція для узагальнення експериментальних даних з тепловіддачі до кільцевих низхідних потоків під час пароутворення та отримано на її основі універсальне емпіричне співвідношення для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі до плівок розчинів в трубах випарних апаратів довільної довжини діаметрами від 20 до 34 мм як в режимі випаровування з міжфазної поверхні із супутнім паровим потоком, так і за умови бульбашкового кипіння розчинів концентрацією до 75%, включаючи область розрідження до 0,84 бар.
11. Набуло подальшого розвитку вирішення питання щодо параметру переходу від режиму випаровування з міжфазної поверхні плівки до кипіння в низхідних парорідинних потоках розчинів.

Практичну цінність роботи полягає в наступному:

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 парорідинних 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).

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.

Особистий внесок здобувача:

- сформульована та розвинута нова концепція механізму тепловіддачі до стікаючих плівок з розвинутою хвильовою структурою, як циклічного процесу збурення температурного та гідродинамічного полів під час проходження великих хвиль та їх стабілізації в період міжхвильової паузи.
- реалізована фізико-математична модель процесів перенесення для плівкових ламінарних та турбулентних течій в'язких рідин з розвинутою хвильовою структурою як за вільного стікання, так і за наявності супутнього парового потоку.
- сформульована та розвинута нова концепція механізму процесу кризового погіршення інтенсивності тепловіддачі до висококонцентрованих киплячих плівок розчинів;

Апробація роботи і достовірність результатів

Основні положення дисертаційної роботи доповідались на: Міжнародній науково-технічній конференції “Нові технології та технічні рішення в харчовій та переробній промисловості: сьогодні і перспективи”. Київ, НУХТ, 2005; Науково-технічній конференції “Проблеми енергозбереження в системах генерації та використання теплоти”, Київ, НУХТ, 2009; Міжнародній науково-технічній конференції цукровиків України “Цукробурякове виробництво в умовах реформування національної економіки”, Київ, НУХТ, 2012; Ethe Second North and East European Congress on Food «NEEFood-2013», Kyiv, NUFT, 2013.; VII Международной конференции “Проблемы промышленной теплоэнергетики”, Киев, ИТТФ НАН Украины, 2013; IX Международной конференции “Проблемы промышленной теплоэнергетики”, Киев, ИТТФ НАН Украины, 2015; Міжнародній науково-технічній конференції цукровиків України присвяченій пам'яті І.С.Гулого, Київ, НУХТ, 2015.; 8th Central European Congress on Food 2016 – Food Science for Well-being. Kyiv, NUFT, 2016; X Международной конференции “Проблемы промышленной теплоэнергетики”, Киев, ИТТФ НАН Украины, 2017; Міжнародній науково-технічній конференції “Перспективи розвитку цукрової промисловості України”, Київ, НУХТ, 2018. Міжнародній науково-технічній конференції “Перспективи розвитку цукрової промисловості України”, Київ, НУХТ, 2019. XI Міжнародної конференції “Проблеми теплофізики та теплоенергетики”, ІТТФ НАН України, 2019.

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.

Мова та стиль роботи. Дисертаційна робота та автореферат написані грамотно. Стиль і виклад послідовний, логічний та відповідає вимогам до друкованих праць. Текст роботи повністю відтворює результати наукових досліджень. При викладені тексту застосовується, в основному, сучасна наукова і лексична термінологія.

Публікації та автореферат.

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 наукових та науково-технічних конференцій.

Автореферат дисертації за змістом і викладом відповідає дисертаційній роботі.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із анотації, вступу, 7 розділів, висновків та додатків (аналіз ймовірних похибок вимірювань, прикладів розрахунку плівкових випарних апаратів за результатами досліджень, результати розрахунків розподілення теплових характеристик кільцевих низхідних потоків густих розчинів під час пароутворення, енергетична та економічна ефективність від впровадження плівкових випарних установок на цукрових заводах, акти впровадження результатів наукових досліджень). Основні матеріали викладені на 357 сторінках друкованого тексту, які містять 103 рисунки в основній частині та 10 рисунків в додатках, 2 фото і 12 таблиць в додатках. Перелік літератури включає 203 джерела.

II АНАЛІЗ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Загальна характеристика роботи

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. Анотація надана українською та англійською мовами.

У вступі дано обґрунтування актуальності роботи, визначені мета та задачі дослідження, наукова новизна та практичне значення одержаних результатів, наведені відомості про публікації автора за темою дисертації. Обсяг та форма

вступу відповідають загальноприйнятим вимогам до докторських дисертації та достатні для ознайомлення з вихідними передумовами і змістом положень, що виносяться автором на захист.

У першому розділі автором подано аналітичний огляд літературних джерел з питань гідродинаміки плівкових течій на вертикальній поверхні, структури плівки, початку та розвитку поверхневих хвиль. Наведено результати теоретичних досліджень розвитку хвиль на основі лінійної та нелінійної теорій хвильоутворення як двовимірних, так і тривимірних хвиль на поверхні вертикально стікаючої плівки рідини.

Наведені результати аналітичного огляду літературних джерел з питань експериментальних досліджень гідродинаміки плівкових течій на стендах різної геометричної конфігурації, як в режимі вільного стікання, так і в умовах течії із супутнім газовим потоком. Показано, що основною структурною формою руху плівки в довгих каналах, починаючи з відстані 1,5 до 3 м від розподільчого пристрою, є рух із поверхневими великими низькочастотними хвилями, що рухаються, перекочуючись по поверхні залишкового шару у формі валів, між якими співіснують високочастотні капілярні поверхневі хвилі.

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

Наведено результати аналізу теоретичних моделей та експериментальних даних гідродинамічних параметрів плівки в неусталеному режимі руху по вертикальній поверхні.

Виконано аналітичний огляд літературних джерел з наявних моделей турбулентності у стікаючих плівках.

На основі аналізу літературних джерел виявлена найбільш вірогідна структурна форма руху плівки стосовно умов роботи випарних апаратів з довгими трубами, сформульовані завдання дослідження міжфазної взаємодії плівки з паровим ядром.

Зауваження до розділу:

1. Автор занадто багато уваги приділив аналізу теоретичних досліджень нелінійній теорії регулярного хвильового руху при гравітаційному стіканні плівки, які відносяться до режиму розвитку хвильової структури. В той час, як теоретичні дослідження руху великих хвиль в період розвиненої хвильової структури в розділі висвітлено поверхнево.

У другому розділі автором подано аналітичний огляд літературних джерел з питань тепловіддачі до стікаючих плівок води та розчинів. Наведено результати теоретичних досліджень температурного поля в плівках на ділянці розвитку теплового та гідродинамічного полів в неусталеному режимі руху як ламінарних, так і турбулентних плівок. Наведені результати експериментальних досліджень тепловіддачі до плівок на ділянці розвитку теплового та гідродинамічного полів.

Наведені результати теоретичних та експериментальних досліджень теплообміну на ділянці розвинутого теплового граничного шару насиченої до

температури кипіння рідини в режимі випаровування з міжфазної поверхні. Надані теоретичні моделі процесів тепловіддачі до насичених плівок з еквівалентною пласкою поверхнею, а також хвильовою поверхнею з використанням характерних для хвильового руху параметрів за різних моделей турбулентності.

Наведені результати експериментальних досліджень процесів тепловіддачі до гравітаційно-стікаючих плівок, а також до стікаючих плівок за наявності супутнього парового потоку під час поверхневого кипіння, отриманих на експериментальних стендах, що копіюють реальні випарні апарати випарних установок харчової промисловості.

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.

Зауваження до розділу:

1 В другому розділі в аналітичному огляді літературних джерел щодо процесів теплообміну в стікаючих плівках під час пароутворення автором не включено до розгляду потужний пласт робіт, присвячених теплообміну в плівках під час конденсації, які по-суті є подібними процесами. Було б доцільно виконати порівняльний аналіз теплогідродинамічних процесів під час випаровування та конденсації, що виглядало б як поглиблений аналіз теплогідродинамічних процесів в плівках.

У третьому розділі наведені описи експериментальних установок, методика проведення експериментальних досліджень, первинна обробка дослідних даних. Для виділення впливу на тепловіддачу до плівок розчинів в режимах випаровування з міжфазної поверхні та кипіння окремих факторів, створена експериментальна установка з незалежним формуванням витрат фаз, теплового потоку, температурного напору, величини розрідження в окремих камерах, що має вагоме значення у виявленні впливу на теплообмін швидкості та теплового потоку, які взаємопов'язані між собою і проявляються сумісно на експериментальних установках, що моделюють випарні апарати.

Дисертант коректно використовує результати експериментальних досліджень теплогідродинамічних процесів, що отримані в провідних світових лабораторіях та університетах – МФТУ ім.Баумана, Хьюстонському університеті.

Зауваження до розділу:

1. Було б не зайвим детальніше зупинитись на конструктивних елементах для вимірювань температур, витрат фаз, теплового потоку, товщини неперервного шару плівки.

У четвертому розділі наведено результати аналізу теплогідродинамічних параметрів низхідних кільцевих потоків води та цукрових розчинів на основі моделі теплообміну з еквівалентною пласкою плівкою, за якої термічний опір

тепловіддачі зосереджено в неперервному залишковому прошарку, а поверхневі великі хвилі виконують роль турбулізаторів. В результаті аналізу автором встановлено, що дана модель лише якісно відображає процеси теплообміну для води та цукрових розчинів в плівці режимі випаровування з міжфазної поверхні. Обґрунтовується необхідність застосування більш адекватних моделей, які б враховували циклічність процесів збурення плівки великими хвилями, як основного чинника інтенсифікації теплообміну в плівці режимі течії з розвинутою хвильовою структурою.

Автором виконано аналіз закономірностей перерозподілу рідини між неперервним шаром та великими хвилями і встановлено, що товщина неперервного шару плівки може бути розрахована з рівнянь руху за умови наявної інформації щодо геометрії великих хвиль та їх фазової швидкості.

Автором отримано інженерне співвідношення для розрахунку товщини неперервного прошарку плівки (4.18), яке справедливе як для вільного стікання, так і для течій з міжфазною взаємодією, як результат узагальнення даних водоповітряних та водо-парових потоків в трубах діаметрами 20 та 30 мм та парорідинних потоків цукрових розчинів концентрацією до 70%.

Автором отримано інженерне співвідношення для розрахунку коефіцієнта гідравлічного тертя в низхідних паро-рідинних потоках води та цукрових розчинів концентрацією до 72% справедливе для областей як слабкої, так і сильної взаємодії фаз в трубах діаметрами від 13 до 51 мм, як для води, так і густих сиропів в області зміни витрат та концентрацій сиропів, характерних для роботи випарних апаратів цукрової промисловості.

Вцілому в розділі автором 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.

Зауваження до розділу:

1. Аналіз теплогідродинамічних процесів в рамках моделі еквівалентної пласкої плівки виконано з використанням лише співвідношення М.Д.Міллійонщикова для функції розподілу турбулентної в'язкості в перетині плівки. Результатом стало твердження, що модель теплообміну з еквівалентною пласкою плівкою, за якої термічний опір тепловіддачі зосереджено в неперервному залишковому прошарку, а поверхневі великі хвилі виконують роль турбулізаторів. Було б доцільно виконати подібний аналіз із використанням інших співвідношень для коефіцієнтів турбулентної в'язкості, наприклад, співвідношень Ламурелле-Сандаля для зовнішнього шару плівки, або співвідношення С.М Василенка, в якому функціонально відображається процес пригнічення турбулентності як в пристінному, так і в зовнішньому прошарках плівки.
2. На с. 155-156 невдалий вираз: «...тому отримані вище результати не можуть вважатися достовірними, а слугують лише для оціночних розрахунків параметрів рідини між великими хвилями та залишковим шаром».

У *п'ятому розділі* виконано моделювання процесів перенесення теплоти в ламінарних та турбулентних плівках з розвинутою хвильовою структурою за вільного стікання та течії зі супутнім паровим потоком під час пароутворення на основі запропонованої фізико-математичної моделі, як процесу циклічного збурення температурного та гідродинамічного полів великими хвилями та їх стабілізації у міжхвильову паузу. Запропонована модель теплообміну по-суті відображає новий концептуальний підхід до моделювання теплогідродинамічних процесів в плівках з розвинутою структурою великих низькочастотних хвиль, як адекватної форми руху плівки в теплообмінних каналах значної довжини.

Автором отримано розв'язки диференціальних рівнянь збереження енергії для плівкових течій в рамках запропонованої фізико-математичної моделі процесу циклічного збурення температурного та гідродинамічного полів великими хвилями та їх стабілізації у міжхвильову паузу як для ламінарних так і турбулентних течій.

На основі теоретичних рішень та даних експериментальних досліджень процесів теплообміну в плівках під час пароутворення автором отримані корелюючі параметри, які замикають фізико-математичну модель процесу теплоперенесення в плівці: ξ_0 – характеризує глибину проникнення вихора великої хвилі вглибину плівки для ламінарних течій, ε_m – пов'язує турбулентність з витратними та режимними параметрами паро-рідинного низхідного кільцевого потоку.

Вцілому висвітлені в розділі матеріали розширюють наші уявлення про теплогідродинамічні процеси в стікаючих плівках розчинів з розвинутою хвильовою структурою під час пароутворення, а запропонована фізико-математична модель видається новим інструментарієм для аналізу процесів перенесення в плівках за наявності великих хвиль.

Зауваження до розділу:

1. Для скорочення теоретичних викладок можна було б вивести лише рівняння для температурного профілю в плівці зі супутнім паровим потоком (5.83), а за вільного стікання навести розв'язок як частинний випадок (5.46), коли відсутня міжфазна дотична напруга.
2. У співвідношеннях для осередненого в міжхвильову паузу теплового потоку (5.52) та коефіцієнта тепловіддачі (5.53) входить товщина плівки без посилянь на вираз, за яким вона розраховується.
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, що не відображено в результатах дисертаційної роботи.

У *шостому розділі* наведено результати експериментальних досліджень процесів теплообміну в плівках в режимі випаровування з міжфазної поверхні.

Автором виконано аналіз впливу ряду факторів – щільності зрошення, швидкості парового ядра, перегріву стінки відносно мінімального температурного напору, за якого починається бульбашкове кипіння, геометрії каналу на інтенсивність тепловіддачі до плівок води і густих розчинів на основі даних експериментальних досліджень. Важливим з точки зору практичного застосування отриманих, на основі узагальнення експериментальних досліджень, апроксимаційних співвідношень є те, що експериментами охоплена область розрідження до 0,84 бар, що відповідає реальним умовам експлуатації випарних установок як цукрової галузі, так і установок для концентрування фруктових та овочевих соків.

Автором експериментально встановлено явище часткового пригнічення фізико-хімічної температурної депресії під час обтікання поверхні плівки розчину парою, температура якої відповідає тиску насичення над поверхню плівки. Зазначений фактор 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. У випадку кипіння в плівці чистої рідини зазначений фактор відсутній.

Отримані інженерні співвідношення з інтенсивності тепловіддачі та гідравлічного опору та співвідношення для розрахунку додаткового температурного напору внаслідок пригнічення фізико-хімічної температурної депресії паровим потоком, дозволяють відтворити реальне розподілення теплового потоку по довжині труби з низхідним кільцевим потоком розчинів, що відповідає експериментальним даними як автора, так і даним інших дослідників.

Зуваження до розділу:

1. Бажано було б надати більш ґрунтовне пояснення фізичної суті процесу часткового пригнічення фізико-хімічної температурної депресії під час обдування плівки киплячого розчину потоком пари.
2. На с.249 наводиться «кінцевий вид інженерного рівняння для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі до стікаючих плівок розчинів в трубах випарних апаратів під час пароутворення» (6.13). Але не описані межі застосування рівняння (6.13) ні в тексті, ні у висновках до розділу, ні у загальних висновках.
3. Крім даних по теплогідродинамічним параметрам плівкової течії в довгих каналах плівкових випарних апаратів під час концентрування цукрових сиропів та яблучного соку, в яких автор відтворює розподілення теплового потоку по довжині труби, в літературі наявні і дані з концентрування томатних та цитрусових соків, а також молока. Було б доцільним виконати порівняння розрахункового та експериментального розподілення теплового потоку по довжині і для згаданих рідин, що підкреслило б універсальність отриманого рівняння (6.13)

У сьомому розділі автор ґрунтовно зупинився на процесах кризового погіршеного теплообміну під час концентрування густих розчинів. Показано, що механізм кризового погіршення тепловіддачі для густих сиропів кардинально відрізняються від кризи тепловіддачі до плівок води. Автором розроблена фізико-математична модель кризового погіршення тепловіддачі по густих розчинів під час паротворення з врахуванням циклічного порушення поверхневого прошарку

плівки з підвищеною концентрацією розчину хвильовими напливами. Показано, що основним чинником падіння теплового потоку по довжині труби зі стікаючою по стінкам плівкою густого розчину є зростання фізико-хімічної температурної депресії, що відповідає концентрації сиропу на міжфазній поверхні, яка циклічно наростає в рамках міжхвильової паузи, та вирівнюється до середнього значення в процесі циклічного перемішування плівки хвильовим напливом.

Зауваження до розділу:

1. Точний розв'язок рівняння дифузії (7.2) виконано для режиму руху плівки, де швидкість рідини надана рівномірно розподіленою, в той час як за ламінарного режиму швидкість має параболічний профіль. Постає питання, наскільки коректний отриманий розв'язок і чи не варто було б виконати наближений розв'язок рівняння дифузії, але за параболічного профілю швидкості.
2. Отриманий розв'язок з погіршення інтенсивності тепловіддачі до густих плівок відноситься до режиму випаровування з міжфазної поверхні плівки. Було б доцільним виконати аналіз кризового погіршення тепловіддачі до густих плівок і під час режиму поверхневого кипіння.

У висновках по роботі викладено отримані автором наукові та прикладні результати, перспективи їх використання.

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.

ІІІ ЗАГАЛЬНІ ЗАУВАЖЕННЯ І ПОБАЖАННЯ

1. Розділи 1 та 2, що присвячені аналізу літературних джерел з проблематики гідродинаміки та теплообміну в кільцевих низхідних потоках рідин, дещо перевантажені надлишковою інформацією, що не стосується власне руху плівки в режимі розвинутої хвильової структури.
2. Дисертантом занадто деталізовано процес отримання розв'язків диференціальних рівнянь.
3. На наш погляд, в дисертації недостатня увага приділена поясненню фізичної суті процесів, а також методам отримання деяких величин, наприклад, функції максимуму турбулентності всередині плівки.
4. Наукова новизна одержаних результатів. Пункт 6 (с. 38)-це скоріше анотація зробленої роботи ніж формулювання наукової новизни.

5. Мають місце друкарські помилки. Наприклад, на с. 315,323- Вт/м²·К, на с. 232-рівнянянь.

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

IV ВИСНОВКИ ОПОНЕНТА

Дисертаційна робота В.П.Петренка є завершеним науковим дослідженням.

Сформульовані в роботі наукові положення, висновки і рекомендації достатньо обґрунтовані, а їх достовірність та новизна не викликають сумніву.

Оформлення, стиль викладення матеріалу дисертаційної роботи доступний для сприйняття і відповідає сучасним вимогам до наукових публікацій.

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

Основні наукові положення, висновки та рекомендації роботи адекватно відображені в публікаціях автора у науково-технічних виданнях, визнаних державною атестаційною комісією Міністерства освіти і науки України. Матеріали дисертації були у достатній мірі представлені на конференціях державного та міжнародного рівня.

За напрямом обраних і вирішених питань дисертаційна робота відповідає спеціальності 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

На підставі вище наведеного вважаю, що дисертаційна робота В.П.Петренка відповідає вимогам п. 9, 11 «Порядку присудження наукових ступенів» затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 (зі змінами, затвердженими постановою Кабінету Міністрів України від 19 серпня 2015 р. № 656) до докторських дисертацій, а її автор заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за фахом 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Офіційний опонент,
завідувач кафедри теплоенергетики
Вінницького національного технічного університету,
доктор технічних наук, професор



С.І. Ткаченко

С.І. Ткаченко

