

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Глоба Олександр Вікторович

УДК 536.242

**ТЕПЛОГІДРОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ У ПЛІВКОВИХ
ВИПАРНИХ АПАРАТАХ ЯБЛУЧНОГО СОКУ**

05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2011

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті харчових технологій Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Прядко Микола Олексійович
Національний університет харчових технологій,
завідувач кафедри теплоенергетики та холодильної
техніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Ткаченко Станіслав Йосипович
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри теплоенергетики

кандидат технічних наук, доцент
Ардашев Віктор Олексійович
Херсонський національний технічний університет,
доцент кафедри обладнання хімічних виробництв і
підприємств будівельних матеріалів

Захист дисертації відбудеться “___”_____ 2011 р. о _____ годині на засіданні спеціалізованої ради К26.058.05 при Національному університеті харчових технологій, 252033, Київ-33, Володимирська, 68 спеціалізованої ради НУХТ, ауд.311.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці університету за адресою: 252033, Київ-33, Володимирська, 68.

Автореферат розісланий “___”_____ 2011 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради К26.058.05

В.М. Філоненко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У зв'язу зі змінами в кон'юктурі яблучної продукції в Україні стало необхідним виробництво яблучного концентрату. Відповідно, стало актуальним питання виготовлення власних випарних установок яблучного соку з випарними апаратами плівкового типу.

Галузових нормалей чи інших нормативних документів для розроблення плівкових випарних апаратів не створено. Діючої інженерної методики розрахунків тепловіддачі при випаровуванні низхідних плівок фруктових соків і гідродинаміки в трубах теж немає. Існує немало даних і кореляційних залежностей для теплообміну і втрат тиску в низхідних двофазних потоках, але ця інформація розпорошена в обширній літературі чи знаходиться в малодоступних звітах фірм. Розробнику складно знайомитись з великим об'ємом інформації з різних джерел та зрівнювати дані і кореляційні залежності, що відрізняються властивостями рідини та умовами досліджень.

В процесі концентрування яблучного соку змінюються в широкому діапазоні його теплофізичні властивості, структура і режими плівкових течій, інтенсивність тепловіддачі. Дані про теплогідродинамічні процеси в випарних апаратах для концентрування фруктових соків обмежені, рекомендовані залежності для розрахунку тепловіддачі не охоплюють реальних режимних параметрів. Майже зовсім не досліджено зону високих концентрацій і тиску, нижчого ніж 0,3 бар (вакууму), які відповідають умовам роботи останніх корпусів випарних установок. Через їх обмеженість існуючі результати досліджень цієї зони практично не можна використати для розроблення випарних апаратів. Усе це та нагальна потреба розроблення і проектування промислової випарної установки яблучного соку зумовили необхідність проведення експериментальних досліджень.

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

Дисертаційна робота виконувалася відповідно до пріоритетного напрямку наукових робіт Національного університету харчових технологій (НУХТ), зокрема на 2006...2010рр. „Розроблення наукових основ теплообмінних та інших процесів харчових, мікробіологічних і формацевтичних виробництв, з метою створення нових високоефективних технологій та обладнання для харчових та переробних галузей АПК” (схвалено вченою радою НУХТ, протокол №7 від 35.03.2006р.), а також планів науково-дослідної роботи кафедри теплоенергетики та холодильної техніки НУХТ – „Інтенсифікація теплообмінних процесів з метою створення високоефективного обладнання харчових виробництв”. Виконана робота відповідає Закону України № 3623-3 від 11 липня 2001р. „Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки”.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є доповнення науково обгрунтованої бази створення випарних установок яблучного соку. Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язуються такі основні питання:

1. Аналіз опублікованих результатів досліджень теплогідродинамічних процесів при випаровуванні яблучного соку та інших в'язких рідин в пристінних плівках низхідних двофазних потоків, визначення основних принципів розроблення випарних апаратів і установок яблучного соку.

2. Експериментальні дослідження теплогідродинамічних процесів при випаровуванні з вільної поверхні і кипінні плівок яблучного соку у вертикальних трубах в умовах, характерних для роботи промислових випарних апаратів.

3 Одержання залежностей інтенсивності тепловіддачі і втрат тиску від геометричних і режимних параметрів та теплофізичних властивостей соку, визначення граничних та оптимальних теплогідродинамічних умов і режимів технологічного процесу концентрування соку.

4. Створення науково обгрунтованої методики теплогідродинамічного розрахунку плівкових випарних апаратів для концентрування яблучного соку.

Об'єктом дослідження є низхідні двофазні потоки стосовно умов роботи плівкових випарних апаратів для яблучного соку, а **предметом дослідження** – тепловіддача до низхідних плівок яблучного соку і втрати тиску вздовж парогенеруючої труби.

Методи дослідження. Особливості технологічного процесу концентрування, принципи конструювання випарних апаратів та стан науково-технічної бази для розроблення випарних установок яблучного соку виявлені в процесі аналізу науково-технічної літератури. Експериментальні дослідження теплогідродинамічних процесів виконані в діапазоні режимних параметрів, характерних для реальних умов концентрування яблучного соку. Дослідна установка – однотрубна модель промислового випарного апарату. Плівкові течії яблучного соку експериментально досліджені на вертикальній пластині при атмосферному тиску і температурі в приміщенні.

Наукова новизна. Відповідно до задач і результатів експериментального дослідження теплогідродинамічних процесів концентрування яблучного соку, що стікає у вигляді плівки по внутрішній поверхні вертикальної труби при супутньому потоці пари:

- вперше досліджено зону високих концентрацій соку, більше 60% і тиску вторинної пари, нижчого ніж 0,3 бар, отримані дискретно-локальні характеристики з інтенсивності тепловіддачі і втрат тиску по довжині парогенеруючої труби для всієї області роботи промислових випарних апаратів;

- визначено діапазон режимних параметрів, в яких реалізуються процеси теплоперенесення в плівках при концентруванні яблучного соку шляхом випаровування води з поверхні плівки, спільного впливу випаровування з поверхні плівки і кипіння соку як перехідний режим до режиму розвиненого кипіння плівки;

- одержані емпірична розрахункова залежність для визначення коефіцієнта тепловіддачі в зоні випаровування з вільної поверхні плівки та критеріальні залежності для визначення інтенсивності тепловіддачі для всіх режимів теплоперенесення;

- виведені розрахункові співвідношення для визначення коефіцієнта тертя на міжфазній поверхні в залежності від теплофізичних властивостей соку і пари, витратних і режимних параметрів парорідинного потоку;

- проведено дослідження гідродинамічних характеристик плівкових течій яблучного соку на вертикальній пластині і процесів пароутворення в пристінному тепловому шарі низхідних плівок яблучного соку, запропоновано фізичне обґрунтування механізму високоефективного теплоперенесення в зоні випаровування.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність роботи полягає в тому, що:

- визначені основні особливості і закономірності технологічного процесу концентрування яблучного соку та принципи моделювання випарних апаратів і випарних установок;

- результати експериментальних досліджень доповнюють і розширюють на всю область роботи науково обґрунтовану базу створення випарних установок яблучного соку;

- одержані узагальнюючі залежності та методики дозволяють визначати інтенсивність тепловіддачі та втрати тиску по довжині парогенеруючої труби у всьому широкому діапазоні змінень властивостей соку, витратних і режимних параметрів парорідинного потоку.

За результатами досліджень підготовлені „Технічне завдання на випарну установку”, технічні і робочі проекти на випарну установку і випарні апарати, робочі проекти на нестандартне обладнання, та „Програма і методика випробувань”.

На базі теоретичних і експериментальних досліджень створена промислова випарна установка яблучного соку, яка працює в схемі цеху виробництва яблучного концентрату на Чернівецькому ОЖК і за техніко-економічними показниками не поступається імпортним ВУ.

Особистий внесок здобувача. Усі результати, які складають основний зміст дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, внесок автора полягає в наступному: [1–2] – аналіз стану випарної техніки і досліджень теплогідродинамічних процесів стосовно умов роботи випарних апаратів яблучного соку, розробка експериментальної установки, проведення

експериментальних досліджень з метою одержання експериментальних даних, їх аналіз та апроксимація емпіричними залежностями для коефіцієнта тепловіддачі в зоні випаровування і коефіцієнта гідравлічного опору на міжфазній поверхні; [3] – аналіз теплогідродинамічних процесів в дослідній трубі, апроксимації дослідних даних в критеріальній формі, виведення залежностей і складання методики розрахунків, необхідних для створення випарних установок фруктових соків; [4] – проведення експериментальних досліджень, аналіз взаємозв'язків режиму руху плівок і процесів тепловіддачі при випаровуванні яблучного соку, що стікає по внутрішній поверхні вертикальної труби, а також фізичної сутності механізмів високоефективного теплоперенесення; [5] – аналіз процесів теплоперенесення в пристінному шарі низхідних плівок при випаровуванні під вакуумом яблучного соку, фізичне обґрунтування механізму високоефективного теплоперенесення в зоні випаровування яблучного соку.

Апробація роботи. Основні результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на:

- 67-й Науковій конференції „Створення енергетичного обладнання, розроблення систем тепло- і електропостачання промислових підприємств” (Київ, 2001р.);

- Міжнародній науково-технічній конференції „Пріоритетні напрямки впровадження в харчову промисловість сучасних технологій, обладнання і нових видів продуктів оздоровчого та спеціального призначення” (м. Київ, 2001р.);

- Міжнародній науковій конференції молодих вчених, аспірантів і студентів „Сучасні методи створення нових технологій та обладнання в харчовій промисловості” (м. Київ, 2002р.);

- Міжнародній науково-технічній конференції „Розроблення та виробництво продуктів функціонального харчування, інноваційні технології та конструювання обладнання для перероблення сільгоспсировини...” (м. Київ, 2003р.).

- IX Міжнародній науково-технічній конференції Нові технології та технічні рішення в харчовій та переробній промисловості: сьогодення і перспективи“ (м. Київ, 2005);

- Науково-технічній конференції „Проблеми енергозбереження в системах генерації та використання теплоти (м. Київ, 2009).

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 5 статей у фахових наукових журналах та 3 тези доповідей.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел (143 найменувань), додатків. Основний зміст викладений на 129 сторінках друкованого тексту, містить 62 рисунки, 5 таблиць. Загальний обсяг дисертації – 218 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність роботи, сформульовані мета, наукова новизна і практична цінність отриманих результатів, наведені відомості про апробацію отриманих результатів.

В першому розділі проведено аналіз особливостей технологічного процесу і стану випарної техніки концентрування яблучного соку та науково-технічної бази для створення випарних апаратів і установок.

Найбільш придатними для концентрування яблучного соку є вакуум-випарні установки з апаратами плівкового типу. Завдяки малому часу перебування в них соку і відсутності гідростатичної депресії в концентраті зберігається харчова цінність натурального соку і є можливість створювати економічні багатоступеневі установки при обмежених наявних температурних перепадах.

Яблучний сік, втрачаючи воду в процесі концентрування, змінює в широкому діапазоні свої теплофізичні властивості. Наприклад, в 1,8 раза зменшується теплопровідність, на 2 порядки збільшується в'язкість. Відповідно змінюються структура і режими плівкових течій, знижується інтенсивність тепловіддачі. Сік $CP < 45\%$ називаємо рідким.

Дані про теплогідродинамічні процеси в апаратах фруктових соків обмежені, рекомендовані залежності для розрахунку тепловіддачі і втрат тиску не охоплюють реальних режимних параметрів. Усе це та нагальна потреба розроблення і проектування промислової випарної установки яблучного соку зумовили необхідність проведення експериментальних досліджень теплогідродинамічних процесів стосовно роботи випарних апаратів яблучного соку.

Другий розділ містить опис дослідної установки, методики проведення дослідів, обробки даних. Наведена оцінка точності експериментів.

Дослідна установка призначена для дослідження теплообміну і втрат тиску при випаровуванні з поверхні плівок і кипінні плівок яблучного соку, що стікають в довгих трубах при супутньому потоці вторинної пари.

Дослідна установка схематично показана на рис. 1. Принципово – це однотрубний випарний апарат з паровою грійною камерою, з системами забезпечення технологічного процесу, з засобами управління, контролю і фіксації робочих параметрів.

Дослідна труба 1 внутрішнім діаметром 32 мм включає шість дослідних ділянок довжиною по 600 мм і обігрівається сухою насиченою парою. Кожна ділянка обладнана чашечками 5 для збору конденсату, імпульсними трубками 6 і мідь-константовими терморпарами. Мірники конденсату зібрані всі в одній адіабатній посудині 21, підключеній до корпусу 2 по парі і по конденсату, а окремою трубою 22 –

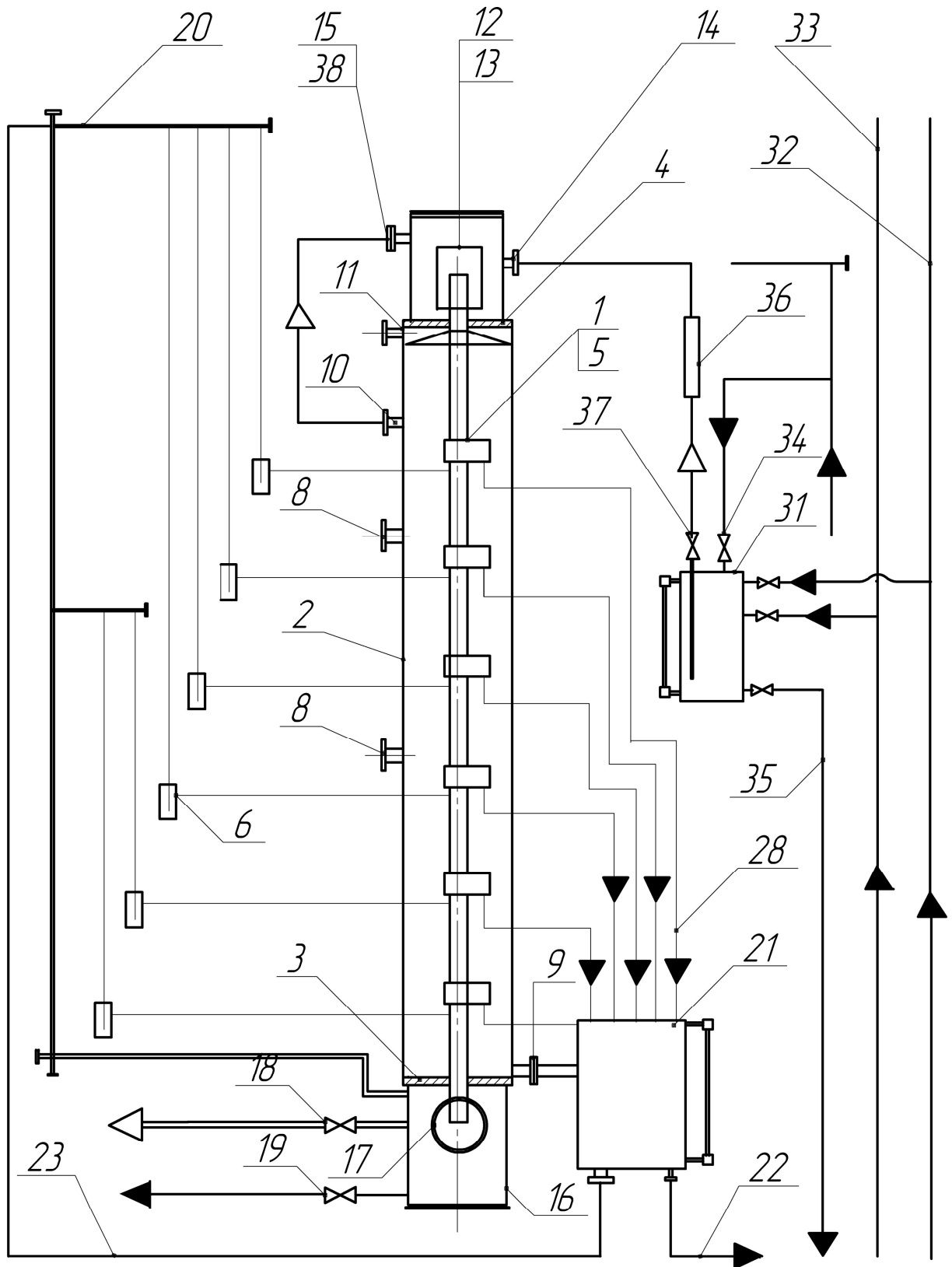


Рис. 1. Схема дослідної установки

до барометричного бака. Для розширення області досліджень передбачена лінія подачі пари в дослідну трубу з приладами контролю та регулювання її витрат 15 і 38.

При роботі дослідної установки в баку живлення 31 готується сік потрібної якості і через ротаметр 36 направляється в розподільчу камеру 12, в яку діафрагмою 38 дозується суха насичена пара. Сік піднімається по патрубку 13 і переливається в дослідну трубу 1. В розподільчій камері 12, на вході в трубу 1 і на ділянці гідродинамічної стабілізації встановлюється теплова рівновага і гідродинамічна взаємодія пари з соком.

Грійна пара конденсується на зовнішній поверхні труби 1. Конденсат по лініях 28 відводиться в мірники. Після визначення його кількості конденсат з мірників зливається в адіабатну посудину 21, яка постійно дренується в барометричний бак. З грійної камери по патрубку 9 в посудину 21 поступає конденсат, що утворюється на внутрішній поверхні корпусу 2 за рахунок теплових втрат в навколишнє середовище і пара з газами, що не конденсуються. Дренаж і продувка посудини 21 безперервно здійснюються в барометричний бак і в конденсатор.

В трубі 1 сік тече в плівці по її внутрішній поверхні, сприймає від неї тепло і випаровується чи кипить. Сокова пара і згущений сік поступають з труби 1 в сепаратор попередньої сепарації 16 і по патрубках 18 і 19 окремо відводяться в сепаратор останньої ступені промислової випарної установки.

В третьому розділі проведені аналіз та узагальнення результатів експериментальних досліджень тепловіддачі. Основний масив досліджень характеризується такими основними параметрами: тиск пари в сепараторі $P_0 = 0,09 \dots 0,6$ бар, масова частка сухих речовин у соку $CP = 12 \dots 70$ %, щільність зрошення $\Gamma_v = (8 \dots 60) \cdot 10^{-5}$ м²/с, тепловий потік $q = 5 \dots 40$ кВт/м², швидкість вторинної пари $W_0'' = 0 \dots 160$ м/с.

Аналіз розподілу по довжині труби експериментально визначених локальних теплогідродинамічних характеристик показав неоднозначний характер змінення взаємозв'язків між основними параметрами і впливу їх на інтенсивність тепловіддачі. В плівках води і рідкого соку домінують впливи гідродинамічних параметрів потоку і кожної з фаз. З підвищенням концентрації посилюється вплив теплофізичних властивостей соку, інтенсивність тепловіддачі та її чутливість до витратних параметрів фаз знижуються.

Аналіз дослідних даних показав їх задовільне якісне узгодження з відомими результатами, що відносяться до води і розчинів мінеральних та органічних речовин. З іншого боку, наші дослідні коефіцієнти тепловіддачі в низхідних плівках яблучного соку в більшості випадків кількісно не співпадають з результатами тих досліджень і не узагальнюються пропонованими їх авторами розрахунковими залежностями. Інтенсивність тепловіддачі суттєво вища, ніж результати розрахунків за відомими співвідношеннями для відповідних гідродинамічних режимів. Яблучний

сік підвищених і високих концентрацій відрізняється теплофізичними властивостями, інтенсивністю тепловіддачі і не має кореляцій з відомими даними. Дослідження в цій зоні вкрай обмежені. Поширення їх результатів на процеси концентрування яблучного соку не можливе. Ці факти ставлять перед необхідністю узагальнити дослідні дані розрахунковими залежностями для можливості використання за призначенням та пояснити причини розбіжностей.

Вплив теплового потоку. Залежність коефіцієнта тепловіддачі від теплового потоку $\alpha_2 = f(q)$ якісно узгоджується з даними інших авторів. На рис. 2 виділяються три характерні зони змінення α_2 : випаровування, перехідна і кипіння плівки. Зона незалежності α_2 від q обмежується температурним напором приблизно 5...6 °С. Коефіцієнт тепловіддачі зменшується з підвищенням концентрації соку і поглибленням вакууму. Відповідно зменшуються теплові потоки зони випаровування.

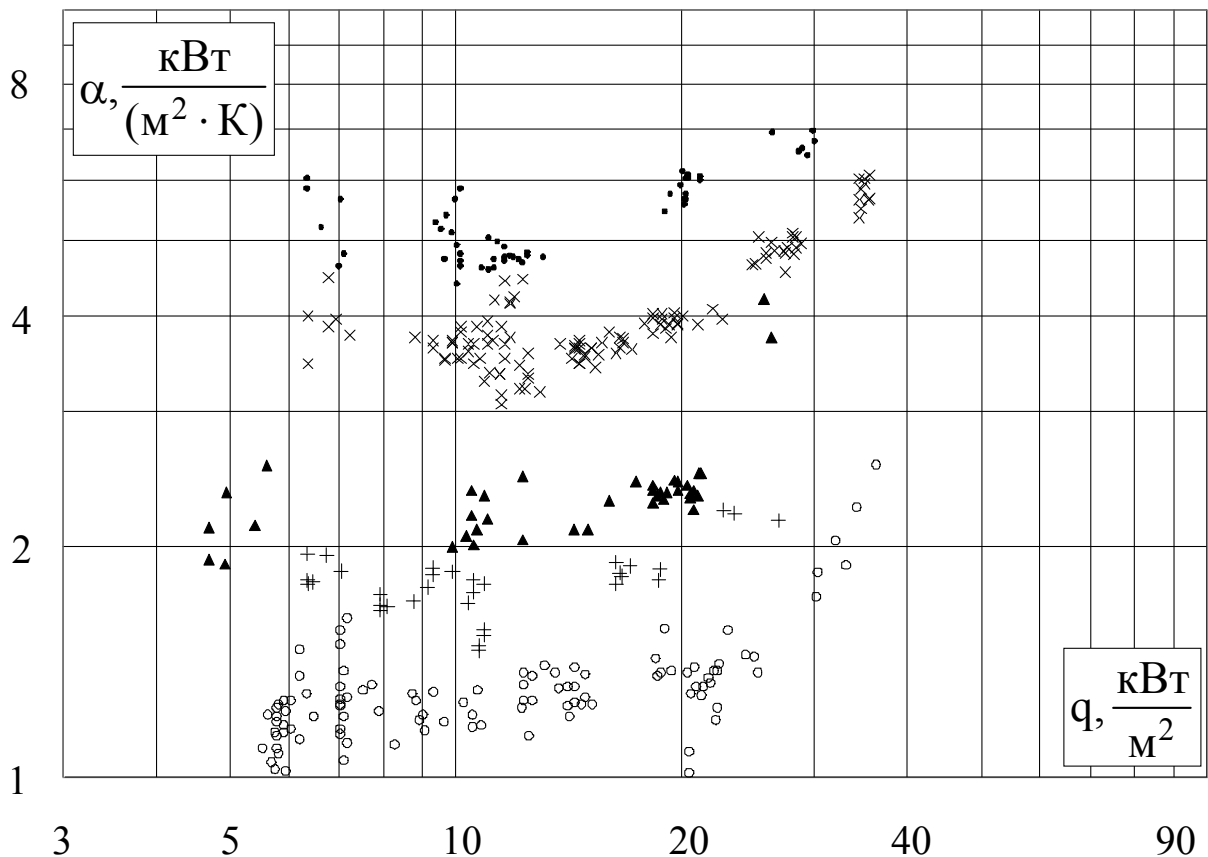


Рис. 2. Залежність $\alpha_2 = f(q)$: $\circ$ – $P_0 = 0,12$ бар, $CR = 70$ %; $P_0 = 0,3$ бар, CR , %: $\bullet$ – 15; $\times$ – 26; $\blacktriangle$ – 42; $+$ – 62

Три зони впливу швидкості пари W_0'' на коефіцієнт тепловіддачі α_2 виділяються дослідниками і підтвердились при концентруванні яблучного соку. В першій зоні α_2 не залежить від W_0'' і q , а тільки від витрат і теплофізичних властивостей рідини. За своїми особливостями і межами це

зона випаровування. Друга – перехідна зона. На тепlobмін тут впливають W_0'' і q , витрати і властивості рідини. В третій зоні тепловіддача визначалася властивостями рідини та швидкістю суміші пари з рідиною. Це дисперсно-кільцева чи дисперсна течія. До такого потоку ми лише іноді наближалися в серії попередніх дослідів. Вплив парового потоку на інтенсивність тепловіддачі зменшується з підвищенням концентрації соку, згалом не сильний і при числах Рейнольдса пари $Re_{\text{п}} < 10^4$ ним можна нехтувати.

Щільність зрошення. Збільшення щільності зрошення поверхні труби яблучним соком в дослідженому діапазоні викликає підвищення інтенсивності тепловіддачі (Рис. 3). Але при характерних для промислових випарних апаратів $\Gamma_v > 10 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ вплив цього параметра слабкий, а при числах Прандтля $Pr > 50$ його можна вважати несуттєвим. Якісно це узгоджується з відомими результатами досліджень різних рідин.

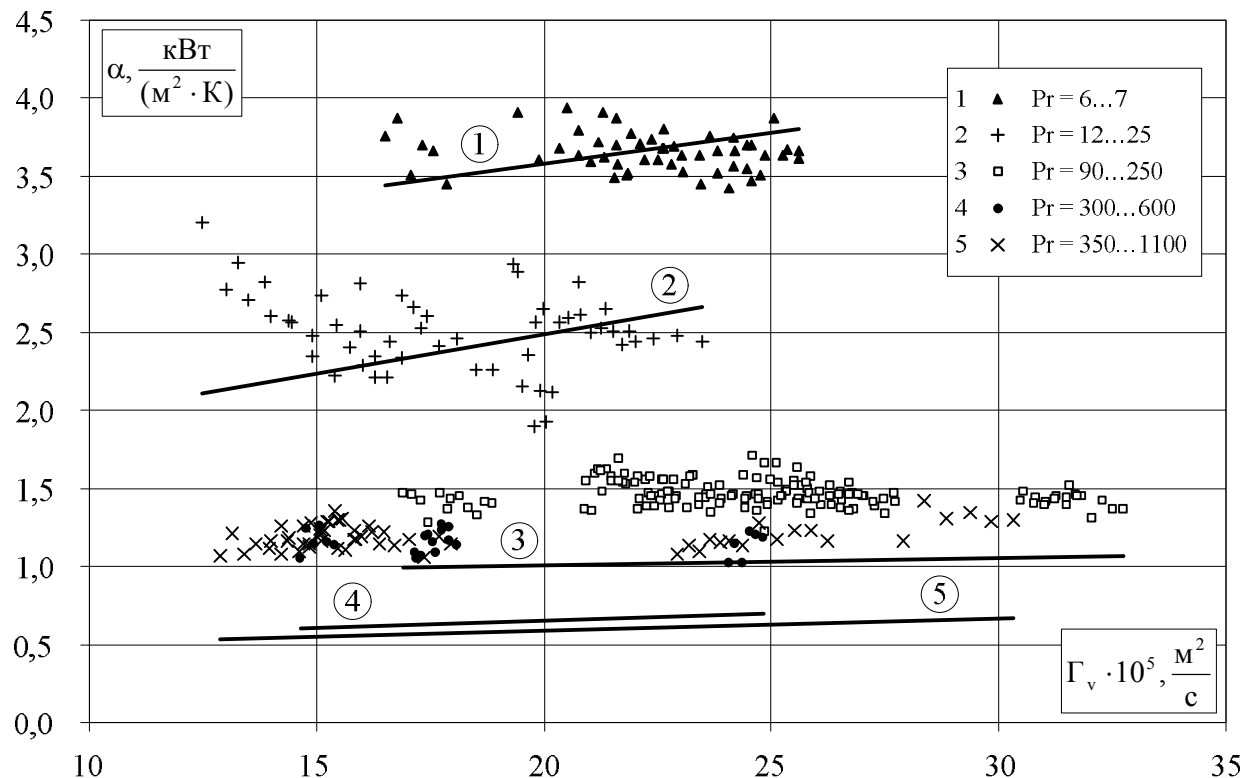


Рис. 3. Тепловіддача при випаровуванні яблучного соку. Лінії 1...5 – за співвідношеннями [116].

В зоні випаровування з вільної поверхні плівки яблучного соку, де q і W_0'' не впливають, а Γ_v має слабкий вплив на інтенсивність тепловіддачі, при нешироких інтервалах змінення Γ_v , характерних для промислових випарних установок, коефіцієнт тепловіддачі зводиться до функції $\alpha_2 = f(CP; P_0)$. На графіках (рис. 4), побудованих за нашими експериментальними даними при випаровуванні без кипіння плівки

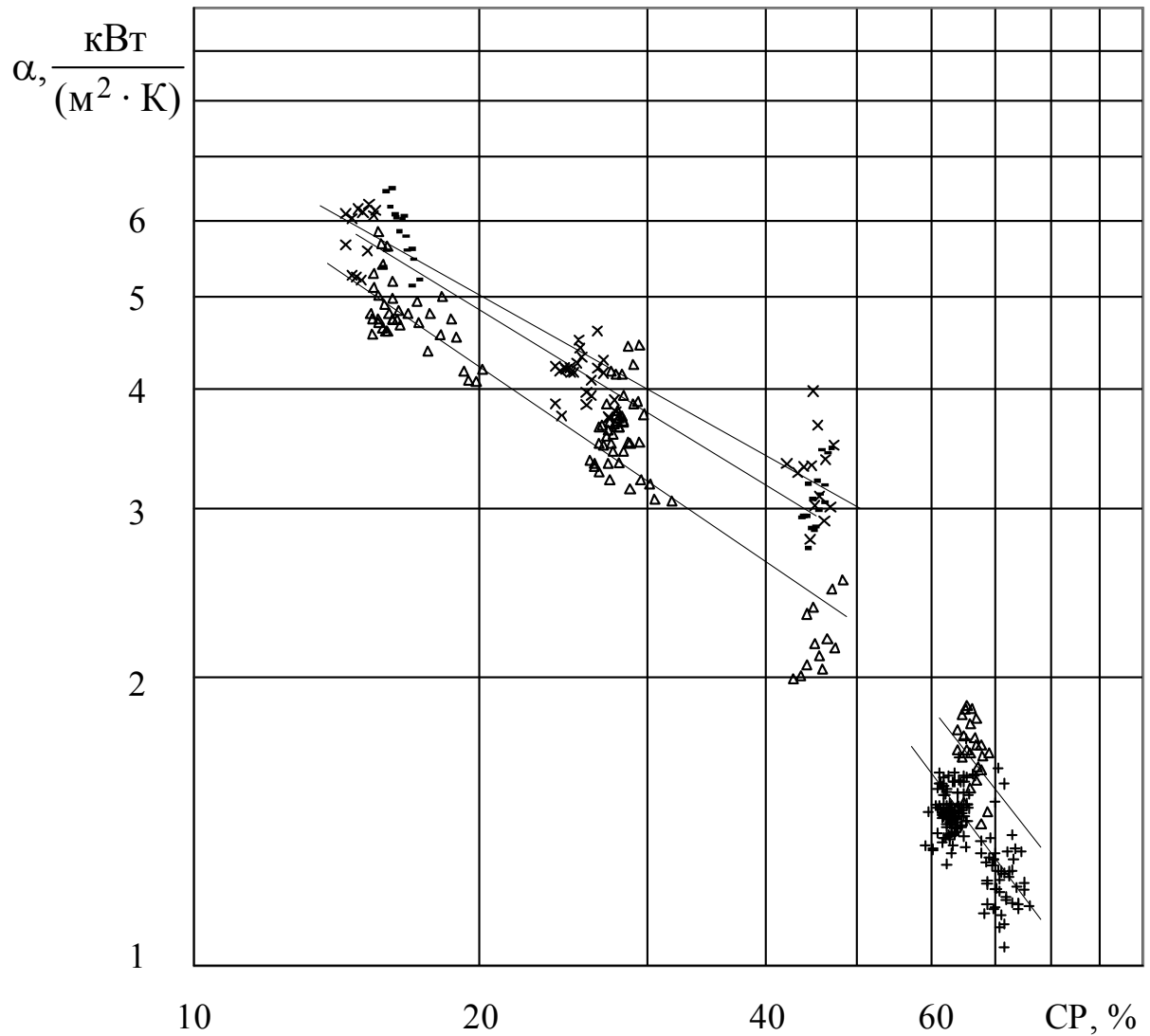


Рис. 4. Теплообмін в зоні випаровування. $q = 10 \text{ кВт/м}^2$; P_0 , бар:
 $+$ – 0,12; $\triangle$ – 0,30; $\blacksquare$ – 0,45; $\times$ – 0,60

виділяються дві зони пропорційної залежності $\alpha_2 = f(CP)$ і перехідна зона між ними. За результатами аналізу дослідні дані апроксимовані емпіричною формулою

$$\alpha_2 = A(CP)^n. \quad (1)$$

Показники степенів n і коефіцієнти A наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Значення дослідних A і n

P_0 , бар	A_1	n_1	A_2	n_2
0,12	-	-	780	-1,34
0,30	1520	-0,62	960	-1,34
0,45	1880	-0,56	-	-
0,60	2077	-0,53	-	-

Перехідну зону розраховують методом інтерполяції з пропорційних

зон. Точність наведеної формули достатня для проектних розрахунків випарних апаратів при теплових потоках до 25 кВт/м^2 . Вона дозволяє визначати коефіцієнти тепловіддачі безпосередньо за параметрами, які входять до вихідних даних на розробку випарних апаратів і установок.

В зоні випаровування теплоперенесення від нагрівної поверхні через шар рідини до зовнішньої поверхні плівки здійснюється за рахунок теплопровідності і однофазної конвекції, які залежать від властивостей соку. Виразником ТФВ є критерій Прандтля, а співучасть кожного з згаданих механізмів в загальному теплопереносенні враховується критерієм Пекле.

Результати досліджень випаровування з поверхні плівки представляються критеріальною залежністю для критерія Нусельта

$$Nu = \frac{\alpha_2 \cdot \bar{\delta}}{\lambda} = A \cdot Pe^n \cdot Pr^m, \quad (2)$$

де $Pe = \frac{\delta \cdot \omega}{a} = \frac{\Gamma_v}{a}$ і $Pr = \frac{\nu}{a}$ – критерії Пекле і Прандтля; A – дослідний коефіцієнт; δ – товщина плівки; a , λ і ν – теплофізичні константи яблучного соку; α_2 – коефіцієнт тепловіддачі.

За результатами аналізу дослідних даних визначені показники степенів m і n (рис. 5 і 6), залежність (2) конкретизована до вигляду

$$Nu = 2,6 \cdot 10^{-2} \cdot Pe^{0,67} \cdot Pr^{1,60 \cdot 10^{-4} (Pr-200) - 0,21}. \quad (3)$$

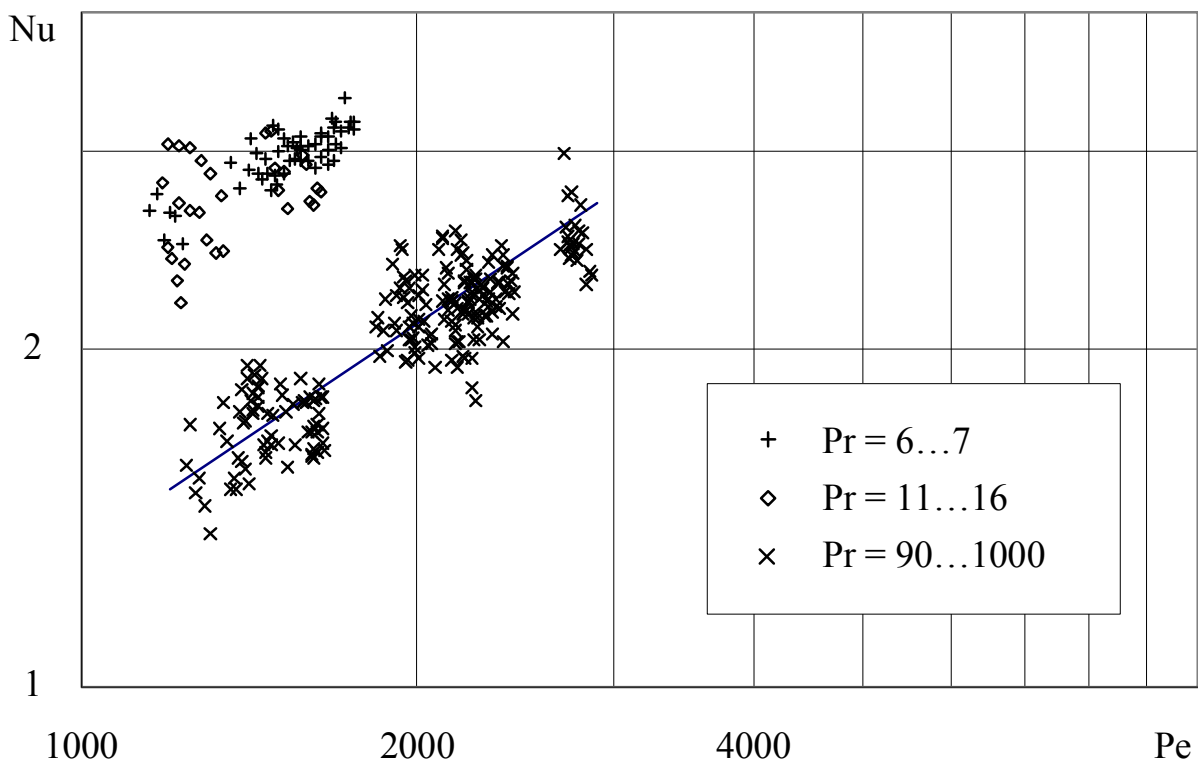


Рис. 5. Тепловіддача в зоні випаровування.

Залежність (3) придатна для розрахунку теплообміну в коротко- і довготрубних випарних апаратах при абсолютному тиску вищому 0,01 МПа, щільності теплових потоків до 15...25 кВт/м², в діапазоні концентрацій соку 10...70%. Похибка визначення α_2 не перевищує 8,8 %.

Теплоперенесення при кипінні пов'язане з утворенням і рухом парових бульбашок. За характерний лінійний розмір при кипінні, у тому числі й плівки, приймається діаметр середньостатистичної парової бульбашки на момент відриву. Дослідні дані узагальнюються за допомогою специфічних критеріїв в системі Кичігіна М.О.-Тобілевича Н.Ю. В результаті аналізу дослідних даних рівняння для розрахунку теплообміну при кипінні плівок яблучного соку, що гравітаційно стікають в коротких трубах, набуло вигляду

$$Nu = 5,6 \cdot 10^{-4} \cdot Re_k^{0,63} \cdot Ga^{0,1} \cdot K_p^{0,71}, \quad (4)$$

де $Nu = \frac{\alpha_2 \cdot L}{\lambda}$ – критерій кипіння Нусельта; $Re_k = \frac{q \cdot L}{\rho'' \cdot r \cdot a}$ – критерій Пекле

кипіння; $Ga = \frac{g \cdot L^3}{\nu^2}$ – критерій Галілея; $K_p = \frac{p \cdot L}{\sigma}$ – критерій тиску.

$L = \sqrt{\frac{\sigma}{g \cdot (\rho' - \rho'')}}$ – лінійний розмір при кипінні; p – тиск пари; ρ' і ρ'' –

густина соку і пари; σ – коефіцієнт поверхневого натягу соку; r – теплота пароутворення, g – прискорення земного тяжіння.

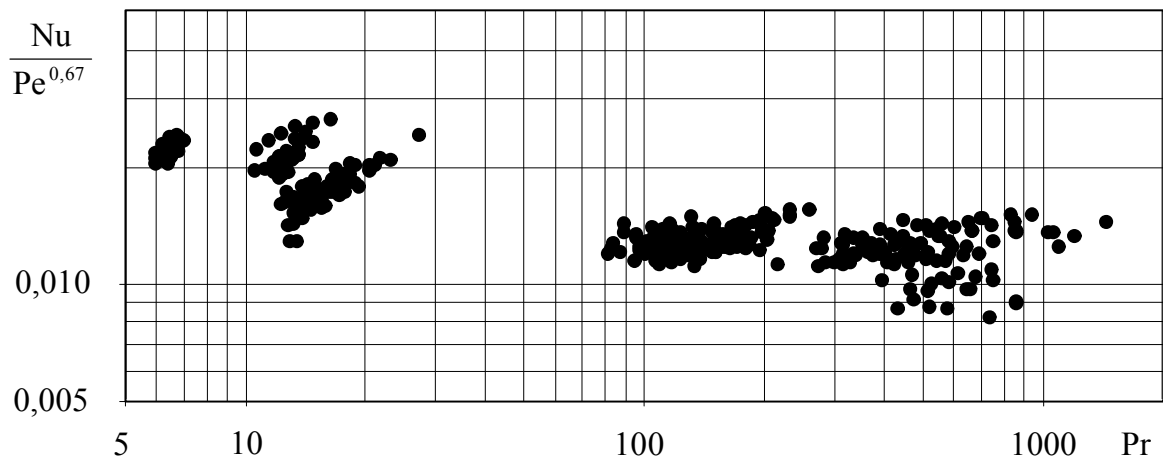


Рис. 6. Залежність $\frac{Nu}{Re^{0,67}} = f(Pr)$.

В довгих трубах ВА рівні теплового потоку, спроможні забезпечити кипіння плівки, зумовлюють на значній частині труби швидкості вторинної пари, здатні суттєво впливати на процес теплообміну і його інтенсивність. В умовах роботи під вакуумом більш представницьким параметром, ніж швидкість, є критерій Рейнольдса пари

$$Re_n = \frac{W_0'' \cdot d}{v_n},$$

де d і v_n – діаметр труби і кінематична вязкість пари.

Згідно з графіком рис. 7 крива апроксимації дослідних даних лінеаризується прямими з кутовими показниками $j = 0$ і $j = 0,12$. Рівняння для узагальнення одержаних нами експериментальних даних з тепловіддачі при кипінні плівок яблучного соку, що гравітаційно стікають в дослідній трубці при дії парового потоку, має вид:

$$Nu = 1,9 \cdot 10^{-4} \cdot Re_k^{0,63} \cdot Ga^{0,1} \cdot K_p^{0,7} \cdot Re_n^{0,12}. \quad (5)$$

Задовільна апроксимація дослідних даних залежностями (4) і (5) спостерігається відповідно в зоні низьких і високих швидкостей пари. Межеве значення числа Рейнольдса $Re_n \approx 6000$. Розбіжності розрахованих по (5) і дослідних даних рідко досягають 13%, тобто не виходять за межі точності експерименту.

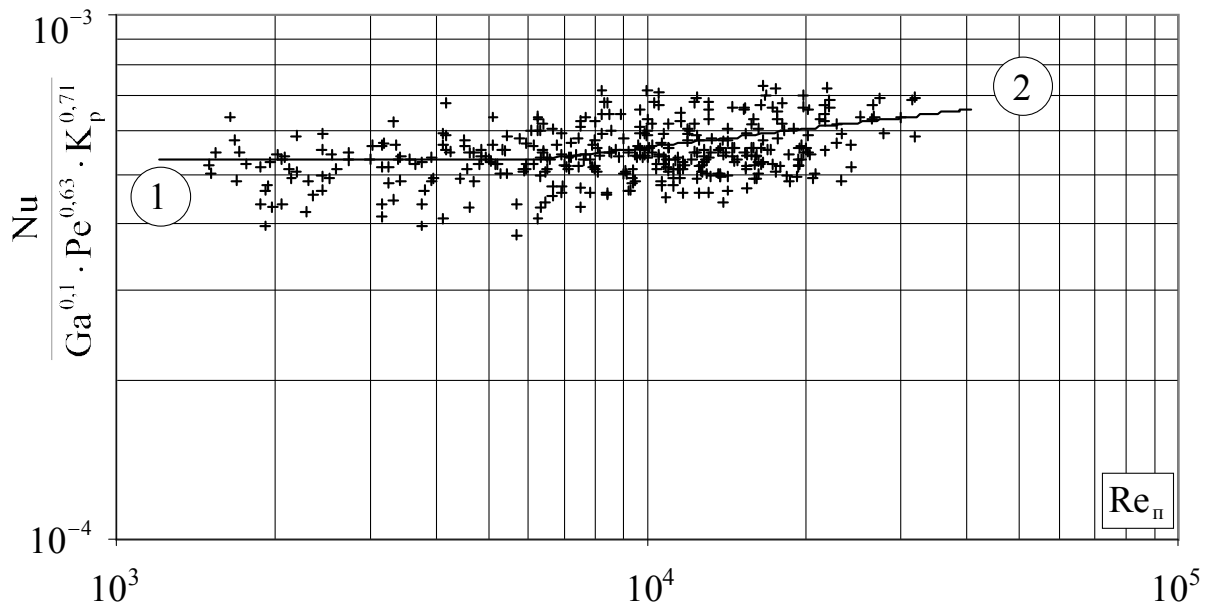


Рис. 7. Залежність $\frac{Nu}{Ga^{0,1} \cdot Re_k^{0,63} \cdot K_p^{0,71}} = f(Re_n)$.

Результати аналізу показали, що в плівкових випарних апаратах яблучного соку з корисною різницею температур в плівці не більшою 6...8 К інтенсивність тепловіддачі можна розраховувати за формулою для зони випаровування (3). При більших температурних напорах, що відповідають перехідній зоні, коефіцієнти тепловіддачі слід розраховувати паралельно за формулами (3) і (4) чи (5) та приймати більше значення. Початком зони кипіння формально можна вважати межу, за якою результати розрахунків по (4) стають систематично вищими, ніж в зоні випаровування.

Побудовані за такими принципами розрахункові методики придатні

для проектних та інших інженерних розрахунків випарних апаратів яблучного соку для вакуумвипарних установок і охоплюють усі можливі в виробничих умовах температурні режими.

В четвертому розділі приведені результати досліджень гідродинамічних характеристик низхідних двофазних потоків і аналіз теплогідродинамічних процесів в дослідній трубці. В основному – це кільцеві потоки. Гідродинаміка течій, тепло- і масообмін визначаються в них товщиною плівки. Для визначення в першому наближенні середніх швидкості й товщини плівки яблучного соку при її вільному стіканні ми скористались залежностями, рекомендованими для бурякового соку:

$$\omega = 0,46 \Gamma_{\text{вх}}^{0,45} \cdot \mu^{-0,1}; \quad (6)$$

$$\delta = \Gamma_v / \omega = 2,17 \Gamma_v^{0,55} \cdot \rho^{-0,35} \cdot \nu^{0,1}, \quad (7)$$

де ρ , μ і ν – густина, динамічна і кінематична в'язкість соку.

Для товщини плівки в апаратах з низхідним супутнім рухом фаз при атмосферному тиску рекомендована залежність Л.Я. Живайкіна

$$\delta_w = [1 - 0,22(W_0'' - 4)]\delta.$$

Зведена до умов наших досліджень з урахуванням діапазону швидкості пари, для якого вона одержана, ця залежність має вигляд:

$$\delta_w = [1 - 0,022 \cdot (1,7\rho_n W_0'' - 6)] \cdot \delta, \quad (8)$$

де δ – товщина плівки при вільному стіканні рідини, коли швидкість руху пари $W_0'' < 6$ м/с; δ_w – товщина плівки в умовах впливу парового потоку. Формула (8) дійсна при $1,7\rho_n W_0'' > 6$.

Дослідні втрати тиску тертя вздовж труби узгоджуються із загальним уявленням про гідродинаміку у дослідній трубці. Аналізуючи дослідні дані, на базі модифікованого рівняння Уоліса для коефіцієнта опору тертя

$$f = f_c \left[1 + 24 \left(\frac{\rho_p}{\rho_n} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{\delta}{d} \right],$$

враховуючи, що коефіцієнти опору сухого тертя в трубах випарних апаратів яблучного соку визначаються, як правило, за формулою Блазіуса $f_c = 0,316 \cdot \text{Re}^{-0,25}$, ми вивели співвідношення

$$f = \frac{0,73 \ln(CP)}{\text{Re}_n^{0,25}} \left[1 + 24 \left(\frac{\rho_p}{\rho_n} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{\delta}{d} \right], \quad (9)$$

де ρ_p і ρ_n – густина рідини і пари; d – діаметр труби.

За межею швидкості пари, з якої вона починає впливати на товщину плівки, ця розрахункова залежність для коефіцієнта втрат тиску набуває вигляду

$$f = \frac{0,73 \ln(CP)}{Re_{\pi}^{0,25}} \left[1 + 24 \left(\frac{\rho_p}{\rho_{\pi}} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{\delta_w}{d} \right]. \quad (10)$$

Формули (9) і (10) задовільно узагальнюють дослідні дані (рис. 8) і дають змогу розраховувати коефіцієнти втрат тиску в усьому діапазоні роботи промислових випарних апаратів фруктових соків як з короткими, так і з довгими трубами.

Щоб пояснити особливості теплогідродинамічних процесів, які зумовлюють високоефективний механізм теплоперенесення, проведено дослідження плівкових течій яблучного соку на вертикальній пластині. При невеликих щільностях зрошення плівки води і яблучного соку низької концентрації за своїми властивостями задовільно узгоджуються з ламінарно-хвильовими. Плівкам яблучного соку підвищеної концентрації властиві велика товщина (0,6...0,8 мм і більше), мала швидкість руху, режим течії з чергуванням залишкової і товстої плівки. Плівки концентрованого яблучного соку скочуються у вигляді відносно товстих і швидкоплинних пластів рідини. Пласти спливають циклічно, не хаотично. В них переноситься більша частина витрат рідини. Між пластами плівка тонка, її поверхня рівна, або хвиляста.

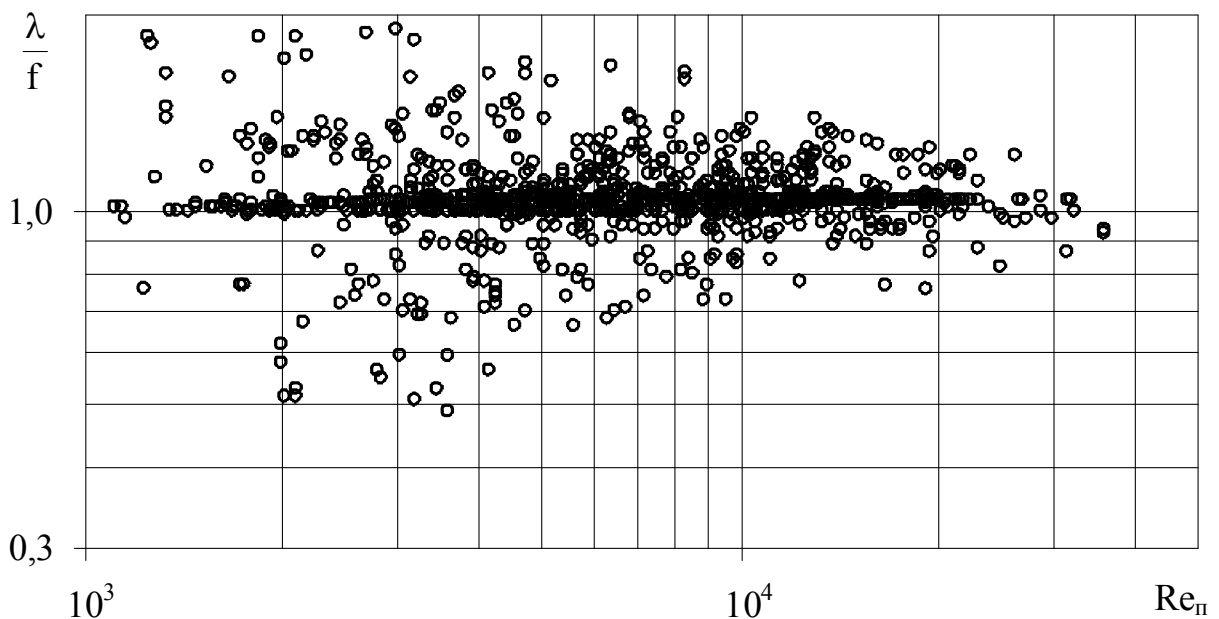


Рис. 8. Відношення дослідних і розрахункових коефіцієнтів тертя

Режим плівкових течій густого яблучного соку визначити складно. Поверхня плівки навіть віддалено не нагадує ламінарно-хвильової течії рідкого соку. В той же час не проявляються турбулентні динамізм і хаос. Фізична модель і структура плівок змінюються разом з концентрацією соку. Середня товщина такої плівки не є тим вичерпним параметром, який

повністю характеризує її структуру чи визначає топографічні параметри поверхні, але залишається визначальним для коефіцієнтів тепловіддачі і втрат тиску.

Дослідна товщина плівок рідкого яблучного соку задовільно узгоджуються з даними розрахунку за формулою (7). В зоні густого соку дані розходяться і при концентрації $CP=70\%$ різниця між ними досягає майже 20%. Результати досліджень товщини плівок яблучного соку на вертикальній пластині апроксимуються подібною до (7) залежністю

$$\delta = 3,32 \Gamma_v^{0,55} \cdot \rho^{-0,3} \cdot \nu^{0,16}. \quad (11)$$

Плівки яблучного соку, особливо густого, відрізняються суттєвими особливостями течії, які позитивно впливають на масообмін. Але високоефективний механізм теплоперенесення в зоні випаровування густого соку можна лише частково пояснити гідродинамічними особливостями руху плівок.

В п'ятому розділі на базі опублікованих результатів великого числа досліджень проаналізовані процеси теплоперенесення в пристінному шарі плівок яблучного соку. Результати аналізу показують, що в зоні випаровування з вільної поверхні низхідних плівок яблучного соку безпосередньо на нагрівній поверхні існують поряд і перебувають в розвитку елементарні дільниці однофазної метастабільної конвекції і пароутворення. При сталому навантаженні їх співвідношення залишається приблизно сталим. Рідина, яка безпосередньо прилягає до нагрівної поверхні, істотно перегріта порівняно з вільною поверхнею плівки та знаходиться в метастабільному стані. Теплоперенесення відбувається в режимі метастабільної конвекції, а в перегрітому пристінному тепловому шарі складаються умови для пароутворення. В мікрозаглибинах нагрівної поверхні зароджується парова фаза і ростуть парові поверхневі бульбашки. Під поверхневою бульбашкою існує мікросхар перегрітої рідини товщиною в кілька мікрон. Він випаровується в об'єм бульбашки по площі її основи, а по площі куполу відбувається конденсація пари. Поверхневі парові бульбашки, як теплові насоси, перекачують теплоту через ламінарний тепловий шар високого термічного опору, сприяють підвищенню тепловіддачі. Змінення в широкому діапазоні властивостей яблучного соку при підвищенні концентрації вносить суттєві особливості в кінетику пароутворення. Наприклад, тривалість росту парової бульбашки певного розміру в середовищі яблучного соку під вакуумом τ , віднесена до тривалості росту бульбашок такого ж розміру у воді під атмосферним тиском τ_0 збільшується (рис. 9) на два порядки. Відповідно збільшується товщина мікросхари під паровою бульбашкою за залежністю Купера і Ллойда $\delta_0 = \sqrt{\nu \cdot \tau}$. За оцінкою інших параметрів на якісному рівні в умовах досліджень під вакуумом парові бульбашки великі і поодинокі, великі товщина мікросхари і основа бульбашки на першому етапі росту,

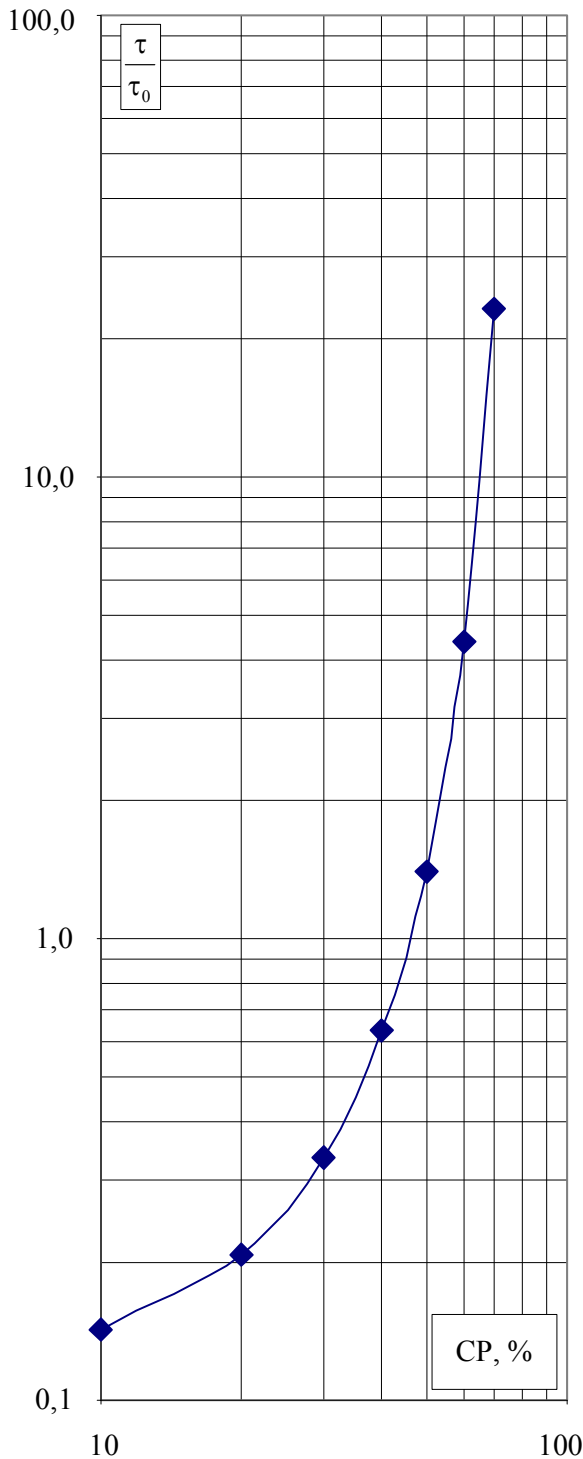


Рис. 9. Відносна тривалість росту поверхневої бульбашки

метастабільності. Нестационарність локальних процесів забезпечує інтенсивне теплоперенесення, але не знаходить відображення у відомих розрахункових залежностях для коефіцієнта тепловіддачі.

високі загальний рівень температури нагрівної поверхні, загальний і локальний рівні перегріву рідини в тепловому шарі та рівні її метастабільності.

Процеси в тепловому шарі розвиваються за принципом суперпозиції актів автохвильових перебудов локального режиму, що одночасно протікають, але знаходяться в різних часових фазах. Якоюсь мірою діє стадійна схема передачі теплоти від нагрівної поверхні. Чергуються в часі і просторі стадії кондуктивного підігрівання мікр шару рідини до стану метастабільності і наступного пароутворення, що визначається дослідниками як руйнування метастабільної конвекції. Високий рівень в'язкості фаз і великі питомі об'єми пари створюють умови для своєрідного випаровувально-конденсаційного механізму винесення маси і теплоти із пристінного теплового шару та виродження парових бульбашок в довгоживучі пори. Діють також, пов'язані з пароутворенням і ростом парових бульбашок, мікроциркуляційні механізми теплоперенесення. Локальні процеси протікають суттєво нестационарно і локальний режим теплопередачі перебуває в стані постійних змін стадій розпаду і відновлення

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Проведено дослідження ТГД-процесів при випаровуванні і кипінні яблучного соку, що стікає в плівці по внутрішній поверхні вертикальної труби при супутному потоці пари. Вперше досліджено зону високих концентрацій соку і тиску вторинної пари, нижчого 0,3 бар.

2. Яблучний сік, втрачаючи воду в процесі концентрування, в широкому діапазоні змінює свої властивості, що зумовлює суттєві особливості структури і режимів плівкових течій, механізмів та інтенсивності тепловіддачі.

3. Плівки яблучного соку при $CP < 40\%$ з достатнім наближенням можна віднести до ламінарно-хвильових. При $CP > 40\%$ плівки відрізняються товщиною, особливостями структури і режимів руху.

4. Встановлено межі між характерними зонами тепловіддачі до плівок яблучного соку: випаровування, перехідна і розвиненого кипіння.

5. За результатами досліджень виведені залежності для товщини низхідних плівок яблучного соку і коефіцієнта опору тертя на міжфазній поверхні від витратних і теплофізичних параметрів фаз потоку.

6. Одержана емпірична залежність для коефіцієнта тепловіддачі в зоні випаровування від концентрації соку і тиску сокової пари.

7. У всьому полі досліджень результати узагальнені в критеріальній формі. Виведені залежності адекватно описують теплообмін і придатні для проектних та інших інженерних розрахунків випарних апаратів і процесів вакуум-випарних установок яблучного соку з усіма можливими на практиці температурними режимами.

8. Інтенсивність тепловіддачі знижується з підвищенням концентрації яблучного соку, але значно перевищує результати розрахунку за відомими співвідношеннями для відповідних гідродинамічних режимів.

9. Запропоновано фізичне обґрунтування механізму високоефективного теплоперенесення в зоні випаровування густого яблучного соку, в основу якого покладено структурні і гідродинамічні особливості руху плівок, наявність і особливості фазового переходу в пристінному шарі рідини.

10. Створені розрахункові методики для проектних розрахунків випарних апаратів яблучного соку і схем вакуум-випарних установок з усіма можливими в практиці температурними режимами, розроблена проектна документація на випарну установку. Установка введена в промислову експлуатацію на Чернівецькому ОЖК.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Глоба О.В. Тепловіддача при випаровуванні плівок яблучного соку / О.В. Глоба, М.О. Прядко, В.З. Глоба, А.В. Форсюк // Наукові праці

Українського державного університету харчових технологій. – 2003. -№14. – С. 29 – 31.

2. Глоба О.В. Втрати тиску в процесі випаровування плівок яблучного соку / О.В. Глоба, М.О. Прядко, В.З. Глоба, А.В. Форсюк // Наукові праці Національного університету харчових технологій. – 2004. - №15. – С. 75 – 77.

3. Глоба О.В. Тепловіддача в процесах концентрування низхідних плівок яблучного соку в вертикальних трубах / О.В. Глоба, М.О. Прядко, В.З. Глоба, А.В. Форсюк // Наукові праці Національного університету харчових технологій. – 2005. - №16. – С. 131 – 137.

4. Глоба О.В. Теплоперенесення в плівках яблучного соку / О.В. Глоба, М.О. Прядко, В.З. Глоба, А.В. Форсюк // Харчова промисловість. – 2005. -№4. – С. 102 – 105.

5. Глоба О.В. Теплообмін в плівках яблучного соку / О.В. Глоба, М.О. Прядко, В.З. Глоба, А.В. Форсюк // Наукові праці Національного університету харчових технологій. – 2009. - №29. – С. 60 – 63.

6. Глоба О.В. Розроблення і впровадження випарної установки яблучного соку / О.В. Глоба // Наукові праці Українського державного університету харчових технологій. – 2001.- №10, ч.3. – с.26.

7. Глоба О.В. Реконструкція випарної установки яблучного соку / О.В. Глоба, А.В. Форсюк // Харчова промисловість, Додаток до журналу №3, Київ, 2004, с. 151 – 152.

8. Глоба О.В. Випарний апарат для упарювання яблучного соку / О.В.Глоба, А.В. Форсюк // 67-а Наукова конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, 24 – 25 червня 2001р.: Програма і матеріали, ч.2. - Київ, 2001, с.87.

АНОТАЦІЇ

Глоба О.В. Теплогідродинамічні процеси у плівкових випарних апаратах яблучного соку. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступення кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. – Національний університет харчових технологій, Київ – 2011.

Дисертація присвячена дослідженню теплогідродинамічних процесів при концентруванні яблучного соку методом випаровування з нього води. Отримані результати вирішують важливу проблему створення випарних установок фруктових соків. Проведені аналіз стану випарної техніки і досліджень тепловіддачі до плівок рідини в низхідних двофазних потоках, експериментальні дослідження тепловіддачі і втрат тиску при випаровуванні з вільної поверхні і кипінні низхідних плівок яблучного соку у вертикальних трубах, та плівкових течій яблучного соку на

вертикальній пластині. Одержані залежності інтенсивності тепловіддачі і втрат тиску від геометричних і режимних параметрів та теплофізичних властивостей соку в широкому діапазоні змінення витратних і режимних параметрів парорідинного потоку. Запропоновано фізичне обґрунтування механізму високоефективного теплоперенесення в зоні випаровування. За результатами досліджень розроблена випарна установка яблучного соку для Чернівецького ОЖК. Установка успішно пройшла випробування і працює в технологічній схемі цеху виробництва яблучного концентрату.

Ключові слова: яблучний сік, концентрування, плівкова течія, втрати тиску, випаровування, кипіння, теплоперенесення.

Глоба А.В. Теплогидродинамические процессы в плёночных выпарных аппаратах яблочного сока. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06 – техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. – Национальный университет пищевых технологий, Киев – 2011.

В связи с изменением рыночной конъюнктуры стало актуальным производство яблочного концентрата, изготовление плёночных выпарных аппаратов и установок яблочного сока. Нормативных документов для разработки плёночных выпарных аппаратов нет. Данные о процессах в выпарных аппаратах для концентрирования фруктовых соков ограничены, рекомендованные зависимости для расчёта теплообмена не охватывают реальных режимных параметров. Почти совсем не исследована зона высоких концентраций сока и давлений, меньших 0,3 бар, то есть условия работы последнего корпуса. С целью дополнения научно-технической базы для разработки выпарных установок проведены экспериментальные исследования теплогидродинамических процессов при испарении со свободной поверхности и кипении плёнок яблочного сока в вертикальных трубах в условиях, характерных для работы промышленных выпарных аппаратов, а также плёночных течений яблочного сока на вертикальной пластине.

Полученные экспериментальные данные качественно согласуются с опубликованными результатами исследований воды и не сильно вязких растворов, но коэффициенты теплоотдачи к нисходящим плёнкам яблочного сока в большинстве случаев отличаются количественно. Они существенно выше расчётных и не обобщаются известными расчётными соотношениями.

Выведенные уравнения адекватно описывают теплоотдачу и пригодны для проектных и других инженерных расчётов выпарных аппаратов и процессов вакуум-выпарных установок яблочного сока со всеми возможными на практике температурными режимами.

Результаты экспериментальных исследований плёночных течений яблочного сока на вертикальной пластине показали существенные особенности их структуры и режимов движения, которые интенсифицируют теплообмен. Однако, по нашим оценкам этого недостаточно для объяснения высоких опытных коэффициентов теплоотдачи.

На базе результатов опубликованных исследований выполнен анализ теплопереноса в пристенном тепловом слое нисходящих плёнок яблочного сока. Предложено физическое обоснование высокоэффективного механизма теплопереноса в зоне испарения, в основу которого положены структурные и гидродинамические особенности движения плёнок, наличие и особенности фазового перехода в пристенном слое жидкости.

Результаты исследований дополняют научно-техническую базу создания выпарных установок яблочного сока. Разработана и введена в промышленную эксплуатацию выпарная установка на Черновицком МЖК.

Ключевые слова: яблочный сок, концентрирование, плёночное течение, потери давления, испарение, кипение, теплоперенос.

O.V. Globa. Heat hydrodynamic processes in pellicle evaporating apparatus of apple juice. – Manuscript.

Thesis for obtaining PhD scientific degree in engineering on the specialty 05.14.06 – industrial heat and power engineering. National University of Food Technologies, the city of Kyiv, 2011.

PhD deals with the heat of hydrodynamic processes in apple juice concentration in pellicle evaporating apparatus.

The results, which we receive, solve the important problem of the evaporating plant fruit juices creation. The analysis of evaporating heat transfer technology and research to the pellicles of liquid from descending two-phase flows, experimental investigation of heat transfer and pressure losses during evaporation from the free surface and descending pellicle boiling apple juice in a vertical pipe and pellicle flows of apple juice on a vertical plate. As a result, we've got the dependence of intensity of heat and pressure losses on the geometrical and regime parameters and thermophysical properties of the juice in a wide range of consumables and regime changes steam parameters of liquid flow. The physical basis of the mechanism of high-performance heat transfer in the evaporation zone was offered. Using the research results the evaporating unit of apple juice for Chernivtsi oil and fat factory was developed. Installation successfully tested and is working in the technological scheme of plant production of apple concentrate.

Key words: apple juice, concentration, pellicle flow, pressure loss, evaporation, boiling, heat transfer.