

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

На правах рукопису

Кулінченко Віталій Романович



УДК 51.1.57.003:529:532.77:+
+536.24:541.182:621:664.1

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОМАСООБМІНУ В ВАКУУМ-
ВИПАРНИКАХ ТА КРИСТАЛІЗАЦІЙНИХ АПАРАТАХ

Спеціальність 05.18.12 – Процеси та апарати
харчових виробництв

А в т о р е ф е р а т
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

КИЇВ – 1995

Дисертація є рукопис.

Робота виконана в Українському Державному університеті харчових технологій.

Офіційні опоненти:

1. Д.т.н. Горох Віталій Назарович ,
2. Д.т.н., професор Півень Олександр Наумович ,
3. Д.т.н., професор Федоров Володимир Гаврилович.

Провідна організація:

Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ.

Захист відбудеться "27" вересня 1995 р.
о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради
з 01.15.04 в Українському Державному університеті харчових технологій за адресою: 252017, м. Київ, вул. Володимирська, 68, аудиторія А-311.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Українського Державного університету харчових технологій.

Автореферат розісланий "30" червня 1995 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук,
доцент

В.Л.Зав'ялов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Проведення активної енергозберігаючої політики є одним із головних напрямків науково-технічного прогресу в споживанні паливно-енергетичних ресурсів. Науково-технічне значення проблеми визначається доцільністю соціально-економічного змісту - зростаючими витратами видахнення, складування і збереження відходів, а також забрудненням навколишнього середовища. Тому впровадження нових енергозберігаючих технологій; удосконалення і модернізація існуючих технологічних процесів, використання більш ефективних енергоспоживаючих апаратів, підвищення ступеня використання вторинних енергоресурсів веде до комплексного розв'язку Енергетичної програми, носить міжгалузевий характер і являється актуальною проблемою.

Промисловий теплотехнологічний комплекс є одним із основних споживачів паливно-енергетичних ресурсів. Вакуум-апарати та кристалізатори найбільш енерговитратні ланки теплотехнологічних систем помірних температур, знайшли застосування в різних галузях промисловості для згущення і кристалізації при отриманні цільового чи кінцевого продукту. Ефективність процесів випарювання і кристалізації залежить від гармонічного поєднання трьох елементів єдиної взаємообумовленої системи: зовнішніх умов, які диктуються матеріально-технічною базою галузі апаратобудування; прийнятих технологій згущення і кристалізації з урахуванням змінних теплофізичних властивостей отримуваного продукту і конструктивних характеристик апарату; людського фактору, його кваліфікаційної грамотності і втомлюваності. В реалізації цієї триважної задачі полягає як актуальність, так і доцільність роботи.

Ступінь дослідженості. Вітчизняні і зарубіжні дослідники тепломасообміну та гідродинаміки при уварюванні утфелів, покладені в основу конструкцій вакуум-апаратів. Процеси, які відбуваються в поліфазній системі при наявності температурних, швидкісних і концентраційних полів, важко регулюються. Тому постає задача створення умов за яких швидкість випаровування відповідає найбільшій швидкості кристалізації. Це можна досягти інтенсифікуючи процес масообміну і оптимізуючи тепломасообмін шляхом гідродинамічного чи гідромеханічного підсилення циркуляції, веденням процесу в рухомому шарі, застосуванням ПАР і коливанням тиску. В літературі відсутні дані про комплексну реалізацію цих методів інтенсифікації. Рішати цю задачу необхідно шляхом розвитку методик сумісного роз

рахунок теплотехнологічних систем і процесів в окремо вжитому апараті чи комплексі. Це дозволить отримати істотний народногосподарський ефект і дасть можливість поєднати матеріальні і енергетичні зв'язки теплотехнологічних систем з теплофізичними і хімікомеханічними процесами в апараті.

Мета роботи. Дисертація ставить за мету виконати систематизацію і узагальнення розрахункових рішень і методик розрахунку теплових, гідравлічних, гідродинамічних і технологічних процесів окремих апаратів і теплотехнологічних систем. Основна мета – це досягнення того, щоб виконана робота стала частиною продуктивних сил, які поєднують в єдине ціле потрібну задачу: апаратобудівництво технологію отримання цільового продукту, людського фактору; спрямованих на інтенсифікацію і оптимізацію процесів при максимальній економії енерго-паливних ресурсів.

Методи та об'єкти досліджень. Вірогідність досліджень обумовлена коректністю постановки теоретичних задач, застосування для їх вирішення математично обґрунтованих методів, проведенням статистичної обробки великих масивів результатів досліджень, відтворенням виявлених закономірностей на всіх досліджених об'єктах, та в умовах промислових випробовувань. Теоретичні положення, розроблені фізичні та математичні моделі процесів підтверджені експериментальними дослідженнями, які виконувалися за допомогою швидкодіючої кінозйомки, різних електричних, хімічних та фізичних методів. Об'єктами досліджень були процеси теплообміну при нагріванні і кипінні уварних, бінарних та поліфазних рідин в великому об'ємі, кип'ятильних трубах та стікаючому шарі. Вивчалися шляхи інтенсифікації процесів теплообміну і оптимізації масообміну в вакуум випарниках та кристалізаторах із застосуванням ПАР, коливань тиску, механічного і гідродинамічного підсилення циркуляції.

Наукова новизна. Для досягнення мети вирішені такі задачі:

1. Розроблено науково-технічні рішення, які дозволяють зменшити відносний ріст кількісно споживаних ресурсів, що входять в господарський оборот, за рахунок підвищення їх якості, ефективності виробництва і споживання, скорочення фізичних витрат, збільшення виходу цільового продукту із одиниці сировини.
2. Визначені принципи створення апаратів з високими техніко-економічними показниками для інтенсифікації існуючих теплотехнологічних процесів за рахунок оптимізації робочих параметрів, при цьому: виконаний аналіз і узагальнений теоретичний і дослідний мате-

ріал з фізики кипіння рідин органічного і неорганічного походження з числами Прандтля до 7000 при тисках в апараті понад 6 кПа;

проведений сумісний системний аналіз локальних параметрів теплообміну і даних кінематографічної діагностики процесу випарювання рідин, виявлено межу між випаровуванням з вільної поверхні і областю бульбашкового кипіння;

запропоновано узагальнюючі і точні рівняння для визначення інтенсивності тепловіддачі за рекомендованими методиками розрахунку при вимушеній і природній конвекції киплячої рідини. Розроблені шляхи інтенсифікації процесу теплопередачі;

узагальнено теоретичні і дослідні дані по упарюванню і кристалізації з виділенням таких методів інтенсифікації, як: механічне перемішування; гідродинамічне підсилення циркуляції; проведення процесу в гравітаційно-стікаючому шарі; механічні, електричні, ультра-звукові і температурні коливання; застосування ПАР;

виконано техніко-економічний аналіз різних способів інтенсифікації енергоспоживачного обладнання заводів.

3. Розглянуто схеми отримання кінцевого продукту з урахуванням уніфікації і нормалізації з використанням узагальнюючих методів розрахунку вакуум-випарних систем і окремих апаратів.

4. Використовуючи досвід передових підприємств удосконалено теплотехнологічні схеми енергоспоживання з використанням низькопотенціальних і вторинних енергоресурсів.

5. Розроблено енергозберігаючі способи отримання кінцевого продукту, включаючи безперервні і сумісні процеси, спрямовані на подальшу інтенсифікацію виробництва:

елементи вакуум-кристалізаторів безперервної дії і способи управління ними;

шляхи збільшення видатності, підвищення надійності обладнання і якості продукції при мінімізації гідроопорів при утворенні парової фази в елементах шорсткості поверхні нагріву.

6. Реалізовано розроблені методи інтенсифікації і оптимізації енергосмисних технологічних ланок теплотехнологічних систем і комплексів помірних температур – вакуум-випарників і кристалізаційних апаратів переробної галузі з метою максимальної економії палива.

Практична цінність роботи. Виконані дослідження дали можливість розкрити природу процесу пароутворення з урахуванням умов виникнення парової фази, впливу поверхні на активізацію центрів пароутворення, градієнтів температури і теплофізичних параметрів. Отрима-

ні рівняння динаміки росту бульбашок при тисках понад 6 кПа для рідин з великими числами Прандтля, і для цих умов середньостатистичні значення відривних діаметрів, частоти генерації з урахуванням часу росту і чекання, а також швидкості пароутворення.

Фізичні явища дають підставу для отримання рівнянь інтенсивності теплообміну в великому об'ємі при нагріванні і кипінні, в вертикально-трубчатих випарних каналах, в шарі гравітаційно стікаючої рідини, обґрунтувати і опрацювати параметричний метод теплового розрахунку вакуум-апаратів. Аналіз рівнянь фізики кипіння і теплообміну дає можливість прогнозувати вплив температурних, механічних, електричних і ультразвукових коливань на інтенсифікацію процесу тепло-і масообміну, а також застосування ПАР і рекомендувати пристрої і апарати малоенергоємного методу гідродинамічної інтенсифікації процесу кристалізації в вакуум-кристалізаторах, з визначенням оптимальних умов проходження процесу.

Опубліковані роботи несуть практичну інформацію для підготовки і перепідготовки інженерно-технічних працівників, що мають справу з процесами згущення і кристалізації розчинів органічного і неорганічного походження, а також спеціалістів в галузі процесів і апаратів та промислової теплоенергетики.

Реалізація результатів роботи. Робота узагальнює теоретичні і прикладні дослідження, містить в собі концепцію інтенсифікації і оптимізації енергоємних теплотехнологічних систем помірних температур. Роботи, спрямовані на оптимізацію енерговитрат, впроваджені на Верхняцькому, Славському, Жабінківському, Зарожанському, Краснянському, Ходорівському, Шпанівському, Шрамковському та інших цукрових заводах. Отримані розрахункові співвідношення лягли в основу розроблених методик теплотехнологічних і гідродинамічних розрахунків вакуум-кристалізаторів. Результати досліджень використані при розробці пристроїв для модернізації існуючих і створення нових апаратів типу А2-ПВУ, які працюють на ряді заводів країни.

Порівняльні випробовування вакуум-апаратів, включаючи ВАБД з елементами підсилення циркуляції гідродинамічним способом і при уварюванні утфелів в стікаючому шарі, виконані на Сатанівському, Яготинському і Жабінківському цукрових заводах. Методи інтенсифікації, теоретичні питання і узагальнені залежності застосовуються при розробці проектно-конструкторської документації в НВО "Харчомаш", НВО "Цукор" та інших. Роботи виконувалися за комплексними науково-технічними програмами РН.Ц.005-"Цукор", РН.38.10-"Створи-

ти і освоїти в харчовій промисловості нові технологічні процеси і комплекси обладнання...", програмою досліджень Міністерства України "Теплофізичні проблеми створення високоефективних теплообмінних апаратів і підвищення їх надійності". Реальний економічний ефект від впровадження розробок становить 5298,3 тис.крб в цінах діючих до 1990 року, умовно річна економія від впровадження авторських свідоцтв - біля одного мільона карбованців.

Матеріали дисертації використовуються в навчальному процесі, подаються в монографіях В.І.Толубіньського, О.Р.Сапронова, Л.Д.Бобрівника, Ю.С.Розладіна, І.І.Саганя, В.М.Стабнікова і в дисертаційних роботах Ю.Г.Артюхова, В.М.Гуцалюка, Б.Г.Дідущко, Ю.М.Журбіцького, С.І.Потапенка, А.І.Українця, В.О.Штангесєва і інших. Робота узагальнює результати багаторічних досліджень, виконаних безпосередньо автором з участю на різних етапах В.Т.Гаряжі, Б.Г.Дідущко, В.І.Павелко.

Рівень реалізації впровадження наукових розробок підтверджується розробкою нових типів вакуум-апаратів з гідродинамічним, гідромеханічним підсиленням циркуляції і застосуванням ПАР та модернізацією існуючих пристроїв камерного і колекторного типу. Робота захищена 14 авторськими свідоцтвами на винаходи.

Апробація роботи. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися на II Міжнародному конгресі по хімії і технології цукру - Лодзь, 1973; на 7-му Міжнародному симпозіумі з промислової кристалізації-Варшава, 1978; на Національній науково-технічній конференції з міжнародною участю "Рациональне використання енергії і палива в харчовій промисловості"-Пловдив, 1984; на Всесоюзній конференції з теплообміну і гідравлічному опорі під час руху двофазного потоку в елементах енергетичних машин і апаратів- Ленінград, 1974; на Всесоюзній конференції "Перспективи промислової теплоенергетики"-Москва, 1977; на 2-й Всесоюзній конференції з масової кристалізації і кристалізаційним методам розділення сумішей-Єреван, 1980; на Галузевій конференції "Хід реалізації республіканської цільової комплексної науково-технічної програми "Цукор"-Київ, 1984; на Міжвузівській комісії УРСР з програми "Теплофізичні проблеми створення високоефективних теплообмінних апаратів і підвищення їх надійності"-Київ, 1984-88; на підсумкових конференціях КТХП, починаючи з 1971 р.; на Республіканській науково-технічній конференції "Розробка і впровадження високоефективних технологій, обладнання і нових видів харчових продуктів в харчову і перероб -

ні галузі АПК"-Київ, 1991; на Міжнародній науково-технічній конференції "Розробка та впровадження нових технологій і обладнання у харчову та переробні галузі АПК"-Київ, 1993; на наукових семінарах МТХП, МЕІ, ЛТХП, НВО "Харчомаш", НВО "Цукор" та інших.

Технічні розробки виставлялися на ВДНГ УРСР і СРСР і нагороджені дипломом, свідоцтвом та медалю виставки. Книга "Интенсификация процесса уваривания утфелей" на конкурсних засадах нагороджена дипломом Мінвузу УРСР та Українського республіканського комітету профспілки робітників освіти, вищої школи і наукових установ "За кращу наукову роботу"-Постанова № 442 від 08.12.1983 року.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 80 праць, в тому числі 3 монографії, 14 авторських свідоцтв і 20 рукописів.

Особистий внесок автора у розробку наукових результатів, що виносяться на захист полягає в тому, що всі теоретичні обґрунтування і дослідження виконані автором особисто. Результати досліджень, виконані в співавторстві, одержані за участю автора на всіх етапах роботи. Автору належать наукові ідеї та формулювання проблеми дослідження, формулювання та довід теоретичних положень, постановка задачі, інтерпретація результатів, розробка і впровадження нових типів вакуум-апаратів та модернізація існуючих.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, 9 розділів, загальних висновків з рекомендаціями промисловості, списку використаних літературних джерел і додатку. Обсяг роботи - 374 сторінки основного тексту, включаючи 117 рисунків і 29 таблиць. Список використаних літературних джерел - 294 назви, з яких 55 іноземні.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Об'єктами досліджень при нагріванні і кипінні є: вода, цукрові розчини, утфелі I-IV кристалізації і інші рідини органічного та неорганічного походження. Для утфелів теплофізичні властивості визначаються в ефективних величинах, а властивості розчинника і пари - за дійсними значеннями.

Дослідження механізму кипіння в великому об'ємі виконано в лабораторних умовах на дослідній установці обладнаній електричним підігрівачем з засобами КВПіА і швидкісною кінокамерою. Герметизований об'єм дозволяв виконувати дослідження при тисках 6...100 кПа, а нагрівач забезпечував зміну теплового потоку до 100 кВт/м².

Тепло-і масообмін в гравітаційно стікаючому шарі утфелю вивчався на напівпромисловій установці. Гріюча поверхня із аустенітної сталі змінювала кут нахилу в межах 0...30°. Модельні утфелі

готувалися в ємності з мішалкою і подавалися на площину афінаційним насосом, утфеля I-III кристалізації на різних стадіях уварювання із заводських апаратів спрямовувалися в ту ж ємність. Досліди дають можливість проаналізувати теплообмін і гідродинаміку в широкому спектрі зміни режимних і технологічних параметрів: концентрації CP_y - 75...93%, КР до 53%, товщині шару утфеля 0,01-0,1 м, тиску гріючої пари - 65...270 кПа, вторинної пари - 22...38 кПа.

Промислові випробовування конструкцій для підсилення циркуляції, одна - камерного типу, інша - колекторного, виконані на Ходорівському і Сатанівському цукрових заводах. Дослідження роботи і випробовування апарата А2-ПВУ-40 виконані на Слгавському заводі. Методики дослідження роботи і випробовувань розроблені та погоджені з галузевими інститутами цукрової промисловості та машинобудування.

АНАЛІЗ ТЕПЛОГІДРОДИНАМІЧНИХ ЯВИЩ ПРИ КИПІННІ РІДИН

Перетворення рідини в пару відбувається в формі випаровування з вільної поверхні та кипіння. Природна конвекція виникає в полі масових сил за рахунок різниці густин, обумовленої неоднорідністю температурного поля в рідині. В загальному випадку рівняння для тепловіддачі має вигляд:

$$Nu = CRa^n$$

Постійні цього рівняння залежать від Ra : так, для ламінарного руху - $Ra = 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^2$, $C=1,18$, $n=1/8$; для кучероподібного режиму - $Ra = 5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^7$, $C=0,54$, $n=1/4$; для вихрового режиму - $Ra = 2 \cdot 10^7 \dots 10^{13}$, $C=0,135$, $n=1/3$. При подальшому нагріванні рідина знаходиться в метастабільному стані і існує мінімальна гетерофазна флуктуація, яка веде до спонтанного зародкоутворення з критичним радіусом

$$R_{кр} = 2\sigma T_n / (r \rho'' \Delta T) \quad /1/$$

В реальних умовах перегрів рідини досягається за рахунок поверхні теплообміну, на якій розпочинається кипіння. Більш ймовірно допустити, що зародок утворюється в западині стінки. Характеристика активної западини є її розмір вихідних кромок, а необхідний перегрів можна визначити із /1/ за умов, що $R_{кр} = R_{ст}$, тоді

$$\Delta T = 2\sigma T_n / (r \rho'' R_{ст}) \quad /2/$$

Досягши критичного розміру при температурі T_n , бульбашка росте за рахунок того, що тиск пари в ній перевищує тиск в рідині. При цьому рівняння Релея в формі запису Плесета і Цвіка набуває вигляду:

$$R \ddot{R} + 1,5 \dot{R}^2 = 1/\rho' [p_n(T_n) - p_n(T_p) + \frac{2\sigma}{R_{кр}} (1 - \frac{R}{R_{кр}})], \quad /3/$$

де p_n - тиск на поверхні бульбашки.

Розв'язуючи /3/, з урахуванням теплового впливу стінки на тепловідвід до криволінійної поверхні бульбашки, отримано:

$$R = (\gamma \beta a + \sqrt{\gamma^2 \beta^2 a^2 + 2\beta \beta a}) \sqrt{a\tau}, \quad /4/$$

де β і γ - коефіцієнти, які відповідно рівні 6,0 і 0,3.

Теоретичне визначення відривних розмірів бульбашки в загальній формі викликає певні труднощі. Для бульбашки, яка росте в об'ємі і одночасно спливає рівняння балансу сил має вигляд

$$\frac{d}{dt}(mw) = g(\rho' - \rho'')V(t).$$

Вважаючи, що ріст відбувається за законом $R = \beta \tau^n$, де $n \approx 0,5$ і, враховуючи, що $\rho'' \ll \rho'$, а $W = ds/dt$ / s - координата центру тяжіння бульбашки / баланс сил набуває вигляду:

$$\frac{d}{dt}(\tau^{3n} \frac{ds}{dt}) = 2g\tau^{3n}$$

Рішення цього рівняння за початкових умов $R(0) = 0$ і $s(0) = 0$, буде $s(\tau) = g\tau^2/(3n+1)$.

Застосовуючи це співвідношення для росту бульбашки на поверхні теплообміну, отримано $R_b = 0,4g\tau_b^2$. Корекція коефіцієнта з 0,4 до 0,6 дає:

$$R_b = 1,35\beta^{4/3}g^{-1/3}, \quad \tau_b = 1,82\beta^{2/3}g^{-2/3}.$$

З цих рівнянь виходить, що відривний розмір в динамічному режимі відриву обумовлюється /через коефіцієнт β / перетривом рідини.

Частота відриву бульбашок $f = 1/(\tau_1 + \tau_2)$ в загальному випадку залежить від повного періоду $T = \tau_1 + \tau_2$, де τ_1 - час росту, τ_2 - час чекання. Останній визначається із прогріву напівобмеженого масиву рідини до заданих значень ΔT на його поверхні при $q = \text{const}$

$$\tau_2 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{\Delta T}{q} \right)^2 \lambda c \rho$$

і стосується центрів генерації з довільною геометрією западини.

Розглянуті питання фізики кипіння дають підставу проаналізувати вплив різних факторів на криву кипіння Нукіяма і тим самим на інтенсивність тепловіддачі. Зв'язок α з q і ΔT характеризується емпіричними формулами:

$$\alpha_e = Aq^{0,7}, \quad \alpha = B(\Delta T)^m, \quad m = 2 \dots 3.$$

Поверхневий натяг і кінематична в'язкість впливають на α завдяки зміни крайового кута θ . Якщо останній не змінюється, то α незначно залежить від температури. Під час кипіння α в значній мірі визначається зовнішнім тиском:

$$\alpha = Cp^n, \quad n = 0,15 \dots 0,4.$$

Що стосується впливу матеріалу стінки на α , то при кипінні звичайних рідин цим впливом можна нехтувати, що не допустимо в випадку кипіння криогенних рідин.

Основні числа подібності визначаються з диференціальних рівнянь: нерозривності, руху рідини, енергії і теплообміну на границі поверхня - рідина. Найбільш повна система отримана С.С.Кутателадзе

$$Nu = f(Pr, Ga, Pe, Fo, K, K_p, We, (\rho'/\rho)).$$

На підставі цієї залежності запропонована система В.І.Толубінського: $Nu = f(Pr, K_r)$,

яка дає розрахункову залежність:

$$Nu = 75 K_r^{0.7} Pr^{-0.2}.$$

Інша система запропонована Кічігіном-Тобілевичем

$$Nu = f(Re_s, K_p, Ga, \rho'/\rho),$$

яка приводить до залежності

$$Nu = C Re_s^{0.7} K_p^{0.7} Ga^{0.665} [\rho' / (\rho' - \rho'')]^{0.5}.$$

Подані узагальнення не можна вважати завершеними. Їх необхідно поліпшувати і розповсюджувати на зону доатмосферних тисків для рідин, які неохоплено дослідниками.

Для визначення α в умовах вимушеного руху киплячої рідини необхідно враховувати динамічну дію потоку на процес пароутворення, а також процеси термічної і механічної взаємодії між фазами на їх границі розділу. При розрахунках вакуум-апаратів доцільно користуватися формулою:

$$Nu_{\text{кнп}} / Nu_{\text{БК}} = 7.1 [\rho_r^{0.1} q_{\text{ЕК}} / (r \rho'' W_0)]^{0.5}, \quad /5/$$

в якій

$$Nu_{\text{БК}} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.37}.$$

Рівняння /5/ застосовується в випадку коли $[\rho_r^{0.1} q_{\text{ЕК}} / (r \rho'' W_0)] > 0.02$. Якщо ця величина має зворотний знак $\alpha = \alpha_{\text{БК}}$, який визначається з умов теплообміну під час руху рідини без зміни агрегатного стану з урахуванням режиму руху.

ДЕЯКІ СПОСОБИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСУ УВАРЮВАННЯ УТІЖЕЛІВ

Основною тепловіддачі при кипінні являється генерація парової фази. Зміна стадій пароутворення може привести до інтенсифікації процесу теплообміну в цілому. Тому знання фізичної суті діючих сил на парову бульбашку в період її росту і відриву дозволить цілеспрямовано управляти процесом інтенсифікації пароутворення. На бульбашку при її рості діють такі сили, які дають балансове рівняння:

$$F_A + F_p - F_i + F_d = F_g + F_w + F_{\text{ж}}.$$

Основні діючі сили - це F_A , F_B , F_M , F_I . При достатньо великих значеннях F_M і F_I на бульбашку діє змінна сила F_I , яка і визначає мить її відриву в верхній точці. При малих частотах коливань змінні сили малі і кипіння визначається силами F_A і F_B .

Крім механічних коливань інтенсифікувати процес теплообміну можна акустичними коливаннями, які активізують нові центри пароутворення і приносять до збільшення α в середньому в 1,5 раза в киплячих цукрових розчинах з $CP=0...60\%$ при швидкості течії $0,1...1,5$ м і частоті коливань $0,3...3,0$ кГц.

На характер кипіння помітно впливає електричне поле. При кипінні органічних рідин інтенсифікація супроводжується зміною гідродинамічних параметрів, відривного діаметра і частоти генерації бульбашок. За умов сталості теплового потоку із збільшенням напруженості електричного поля щільність центрів пароутворення зменшується аж до повного зникнення. Складові періоду росту бульбашки зазнають змін: збільшується час чекання, зменшується час росту, підвищується частота генерації, але швидкість пароутворення залишається практично сталою. Тому можна вважати, що інтенсифікація процесу обумовлюється електроконвекцією, яка турбулізує шар біля стінки.

Перераховані методи інтенсифікації доцільно використовувати при доатмосферних тисках. Внаслідок інтенсивного випаровування перегрітої рідини бульбашка росте зривоподібно і температура навколо неї різко падає. Це сильно проявляється при кипінні утфелів.

Під час кристалізації в вакуум-апаратах швидкість кристалізації відстає від інтенсивності теплообміну, тому при інтенсифікації тепло-і масообміну доцільно звертати увагу на масообмін, від якого залежить подальша можливість інтенсифікації теплообміну.

Механізм пароутворення в утфелях підпорядковується більш складним законам в порівнянні з унарними рідинами. При кипінні утфелів навколо бульбашки утворюється пограничний шар з підвищеною концентрацією CP , з якого в парову фазу переходить тільки розчин. В межах цього шару CP змінюється від максимуму біля поверхні розділу фаз до концентрації в масі утфелю CP_y . Градієнти хімічних потенціалів викликають зустрічні потоки компонентів розчину в напрямку нормалі до поверхні розділу фаз. В зв'язку з тим, що $CP_{max} > CP_y$, частки води рухаються до поверхні розділу фаз, а частки розчиненої речовини - в глибину розчину. Наявність концентраційного шару веде до перегріву утфелів на величину фізико-хімічної депресії.

Зменшити перегрів можна за допомогою ПАР. Застосування *Pen-Aid* зменшує в'язкість і поверхневий натяг до 60%, а α -МГЕ в кількості 100 мг на 1 кг утфелю зменшує час уварювання утфелю III кристалізації на 55%, а I – до 60%. Максимальна швидкість кристалізації досягається при застосуванні АМГСК-50 і АМГСК-100. Вплив синтетичних ПАР на розчини і утфелі веде до зміни їх реологічних властивостей і запобігає піноутворенню, сприяє виділенню розчиненого повітря. Останнє зменшує кількість центрів пароутворення. Цим, зменшуючи інтенсивність тепловіддачі, оптимізує тепло-і масообмін.

Інтенсифікувати процес можна поєднанням двох методів: гідродинамічного підсилення циркуляції з безпосереднім введенням ПАР в вакуум-апарат з вдуваною паром. Це дозволяє точно дозувати необхідну кількість ПАР і спрямовувати їх в кожну кип'ятильну трубу.

Масообмін в киплячих утфелях можна інтенсифікувати шляхом рекристалізації. На цей процес впливає швидкість циркуляції в апараті, яка веде до перегріву утфелю біля поверхні нагріву, висхідного його руху і охолодження біля вільної поверхні розділу. З зростанням висоти шару утфелю спостерігається зменшення кратності обміну і, як наслідок, частоти коливань температури, що веде до зменшення інтенсивності рекристалізації.

Колівання абсолютного тиску з $A=5$ кПа, $f=2$ год⁻¹ при температурі гріючої пари 115°C показали, що загальна тенденція процесу спрямована на зміну коефіцієнта нерівномірності кристалів і веде до його зменшення в кінці варки. Тобто, в процесі варки не утворюються вторинні центри кристалізації, що дозволяє позбавитися розкачок водою, чим зменшити витрати енергоресурсів. Аналітичні залежності, які описують процес рекристалізації за коливним механізмом, з використанням регресивного аналізу для визначення розміру кристалів і коефіцієнтів нерівномірності, подаються в вигляді параметричних рівнянь /В.О.Штангеева/

$$d_c = -1,255992 - 0,004056C_p + 0,018663C_k + 0,009021C_p^m - \\ - 0,007527C_k^m + 9,286100A + 0,016286f + 0,001944t/t_m, \\ K_n = -0,200655 + 0,001138C_p + 0,005164C_k + 0,005665C_p^m + \\ + 0,008053C_k^m - 0,809550A - 0,010007f + 0,003462t/t_m.$$

Оптимальні умови ведення процесу досягаються шляхом оптимізації цих виразів за умов, коли $d_c = \max$, а $K_n = \min$. При цьому розміри кристалів збільшуються на 20...25% з підвищенням концентрації міжкристалального розчину за рахунок уварювання утфелів до білків високої густини.

Іншим методом інтенсифікації процесу являється запрограмований за частотою дискретний ввід пари в кожну кип'ятильну трубу. Це прискорює циркуляцію без застосування механічних побудників. Принцип дії імпульсного прискорювача криється в наступному. В кип'ятильну трубу на початку економайзерної ділянки періодично подається пара, внаслідок чого рідина закипає раніше і починає рухатися в трубі з певним прискоренням. Після припинення вдуву пара процес повертається до початкового стану. Посадження рекристалізації з дискретним вводом енергії інтенсифікує не тільки масообмін, але і теплообмін.

ТЕПЛООБМІН З УНАРНИМИ, БІНАРНИМИ І ПОЛІФАЗНИМИ РІДИНАМИ

Інтенсивність нагрівання рідин до температури кипіння визначається розмірами поверхні нагріву і залежить від гідродинамічних і теплофізичних умов, які супроводять процес. Узагальнення дослідних даних для визначення α в безрозмірній формі, запропоновані М.О. Міхєєвим, доповнені симплексом молекулярного переносу $K_{BK} = [\lambda_y \gamma_y / (\lambda_n \gamma_n)]_{BK}$ дозволяє розраховувати коефіцієнти тепловіддачі за умов нагрівання утфелів

$$Nu_{BK} = 8,9 \cdot 10^{-2} Re_{BK}^{0,53} K_{BK}^{0,65} (Pr_p / Pr_{ct})^{0,25}$$

В замкненому циркуляційному контурі природна конвекція визначається швидкістю циркуляції і теплофізичними властивостями рідини і охоплює економайзерну ділянку труби, включаючи зоку нерозвинутого бульбашкового кипіння. Визначення α в безрозмірній формі виконується за узагальненим рівнянням /5/, а α_{BK} за формулою:

$$Nu_{BK} = 0,15 Re^{0,33} Pr_y^{0,43} (Pr_p / Pr_{ct})^{0,25} Gr^{0,15}$$

Рівняння /5/ використовується при $q = 4,5 \dots 70 \text{ кВт/м}^2$, $W_0 = 0,01 \dots 0,6 \text{ м/с}$ для утфелів з вмістом СР=80...92% і Дб=93...99 од.

Коли вільна конвекція не забезпечує необхідну тепловіддачу від грійної поверхні, починається нерозвинене кипіння. В утфелях при тисках до 20 кПа діють окремі центри пароутворення. Парові бульбашки підіймаються одна за іншою при значних періодах чекання. Розміри їх більші, ніж для води і цукрових розчинів. При тисках, менших 20 кПа, відбувається нерегулярне утворення окремих бульбашок при сильній пульсації температури стінки.

Наявність перехідної зони дає підстави вважати, що значення теплового потоку, яке відповідає кінцю цього режиму, являється середнім q , починаючи з якого можливе розвинене кипіння. При цьому кожному тиску відповідає тепловий потік, з якого починається розвинене кипіння утфелів з різним вмістом кристалів.

Перехідний режим кипіння охоплює значну зону теплових потоків, особливо при низьких тисках, і являється небажаним. Тому на практиці цей режим необхідно уникати.

Процес кипіння розпочинається з виникнення парової фази. При цьому робота по створенню бульбашки становить

$$W = W_{об} + W_i + W_{\mu} + W_{вн} = W_{об} + W'_H,$$

де оборотна робота $W_{об}$ на утворення бульбашки критичного розміру витрачається на випаровування рідини, роботу проти сил поверхневого натягу і тиску рідини. Якщо вважати, що поверхневий натяг із зміною температури змінюється незначно, то

$$W_{об} = 4\pi R_{кр}^2 \sigma + 1,33\pi R_{кр}^3 (\rho_{ст} - \rho_n) \left(1 - \frac{\rho''}{\rho'}\right) + 1,33\pi R_{кр}^3 \rho'' r.$$

Необоротні витрати W'_H становлять другу частину імпульсу, який діє проти сил інерції, в'язкості і компенсує втрати теплоти на теплопровідність, і являє собою

$$W'_H = \left\{ [K_i / (C_{вт} \tau_{эф}^2)] + [K_{\mu} / (C_{вт} \tau_{эф})] \right\} \exp C_{вт},$$

де $\tau_{эф}$ — ефективний час охолодження бульбашки при її розширенні:

$$\tau_{эф} = (C_{т} R_{кр})^2 / (4\alpha), \quad (\rho'' / \rho')^{1/5} < C_{т} < 1;$$

$$K_i = 2,238 \cdot 10^{-3} R_{кр}^5 C_{р,\mu}, \quad K_{\mu} = 3,732 \cdot 10^{-2} R_{кр}^3 C_{р,\mu} \mu;$$

$$C_{вт} = 0,5(1-K) [\mu(1-K) + nK]^{0,5} \text{ де } K = K_i / (K_{\mu} \tau_{эф}).$$

Отримані залежності дають уявлення про можливість виникнення парової фази на гріючій поверхні, але не враховують природи шорсткості матеріалу стінки і не дають уявлення про сам центр пароутворення, який поглинає енергію в кількості 0,01...10000 пДж на утворення парової бульбашки.

Поверхня теплообміну складається із різного роду нерівностей. Можна вважати, що поверхня покрита розбіжними на зовню конічними западинами з кутом напіврозкриття $0 < \psi < 90^\circ$ з певною глибиною h , яка залежить від чистоти обробки. Активність западини характеризується її спроможністю затримувати газ, який віліграє роль зародка утворюваної парової фази.

Під час росту в конічній западині газонаповнена бульбашка деформується так, що її кут змочування θ , а значить і $\alpha = \pi/2 - \psi + \theta$, лишаються ustalеними. Мить втрати стійкості настає, коли на твірній вільної поверхні бульбашки з'являється точка перегину. При великих значеннях ψ , що підтверджується профілограмами, і малих θ отримуємо мале значення α . Величина $R_{зап} \approx R_{кр}$ в точці перегину при малих α визначається за формулою $R_{кр} = 0,306 \sin \alpha$. Так

як в критичній для стійкості ситуації точка перегину являється точкою контакту з твердою стінкою, то, приймаючи $R_{\text{зап}} = R_{\text{кр}}$, визначимо критичний радіус западини, як $R_{\text{зап}} = 0,306 \cos^2(\gamma - \theta)$. Безрозмірна глибина критичної западини визначається із виразу $H = R_{\text{зап}} \sin \gamma$ і тоді

$$H(\cos \theta + \sin \theta)/R_{\text{зап}} = 1,807 [R_{\text{зап}} (1 + H^2/R_{\text{зап}}^2)]^{0,5},$$

$$\text{чи } h(\cos \theta + \sin \theta)/r_{\text{зап}} = 1,807 [r_{\text{зап}} \sqrt{\Delta \rho g / \sigma} (1 + h^2/r_{\text{зап}}^2)]^{0,5}.$$

Ці співвідношення показують, що покращення чистоти обробки веде до зменшення активної западини і, як наслідок, до збільшення температурного напору початку закипання. Таким же чином впливає на $r_{\text{зап}}$ і зменшення θ і σ , чи збільшення g .

Аналіз кривих розподілу температури показує, що із збільшенням масового вмісту кристалів збільшується пристінний перегрітий шар, де спрацьовується майже весь температурний градієнт. Профіль температур в цьому шарі має дві ділянки: прямолінійну, де відбувається падіння температури понад 80%, і криволінійну. Екстраполювана товщина перегрітого шару залежить від q і CR_y і розраховується за формулою:

$$\delta = 0,377 CR_y - 0,2q - 7,8,$$

де δ , мм; CR_y , %; q , кВт/м².

Товщина лінійної частини температурного профіля визначається із:

$$(T - T_n)/(T_{\text{ср}} - T_n) = 1 - H/\delta, \quad 0 < H/\delta < 0,9;$$

а криволінійної за формулою

$$(T - T_n)/(T_{\text{ср}} - T_n) = 0,078 (H/\delta)^{-3,2}, \quad H/\delta > 0,9.$$

Градієнти температур викликають градієнти теплофізичних параметрів. Для ρ і λ ці явища не суттєві, так як названі величини в дослідях змінювалися в незначному діапазоні. Кінематичний коефіцієнт в'язкості в залежності від температури змінювався в значних межах, і його відхилення досягало 1100%. Розподіл концентрації CR_y і пересичення показує, що в перегрітому шарі утфель знаходиться в недосиченому стані, в той час як за його межами в стабільному і метастабільному стані. Таким чином біля поверхні нагріву процес кристалізації не можливий із-за перегріву утфелю і плавленням кристалів.

КИПІННЯ ГРУБОДИСПЕРСНИХ УТФЕЛІВ / механізм процесу /

Висока інтенсивність теплообміну при бульбашковому кипінні визначається турбулентністю пристінного шару, викликаний перемішу-

ванням рідини паровими бульбашками. Так як причиною турбулентності являються парові утворення, то необхідно мати дані про такі величини як D_B , R_B , τ_1 , f , а також механізм підводу теплоти до бульбашки та інше. Кіноплівки процесу кипіння показують, що механізм пароутворення при $p > 20$ кПа відрізняється від такого при $p < 20$ кПа значним збільшенням часу чекання τ_2 і загальним часом циклу $\tau = \tau_1 + \tau_2$, зменшенням швидкості генерації парової фази $D_B f$ і збільшенням швидкості росту парової бульбашки dR/dt .

Аналіз температурних полів і кіноплівок дозволили вибрати модель росту парової бульбашки, яка за весь період росту знаходиться в перегрітому шарі, а в випадку виходу за його межі бульбашка виштовхує перегрітий утфель. Таким чином границя розділу фаз буде весь час знаходитися в перегрітому утфелі. Запишемо рівняння теплового балансу для бульбашки під час її росту при $p > 20$ кПа:

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4,$$

де $Q_1 = 2\pi R \lambda \Delta T \cos(\theta/2) \ln(\delta/y_A)$ - кількість теплоти, що підводиться до елементу основи парової бульбашки;

$Q_2 = [3\pi/(\alpha\tau)]^{0.5} R^2 \lambda \Delta T \sin^2 \theta$ - кількість теплоти, що підводиться до остальної частини бульбашки перегрітим утфелем;

$Q_3 = r \rho'' R^2 (dR/dt) (1 + \cos \theta)^2 (2 - \cos \theta)$ - кількість теплоти, що сприймається паровою бульбашкою;

$Q_4 = \zeta_{\text{тер}} \pi \rho' \lambda \Delta T R^2 (dR/dt) (1 + \cos \theta) / \mu$ - кількість теплоти, що відходить ся границею фазового розділу масі утфелю.

Підставляючи значення цих величин в рівняння теплового балансу і позначаючи

$$\varphi = \zeta_{\text{тер}} / [(1 + \cos \theta) (2 - \cos \theta)], \quad \theta = 60 \dots 90^\circ, \quad \varphi = 0,002275 \dots 0,0128;$$

$$\beta = 2 \cos(\theta/2) \ln(\delta/y_A) / [(1 + \cos \theta)^2 (2 - \cos \theta)], \quad \theta = 60 \dots 90^\circ, \quad \beta = 7,07 \dots 11,3;$$

$$\gamma = \sqrt{3/\pi} \sin^2 \theta / [(1 + \cos \theta)^2 (2 - \cos \theta)], \quad \theta = 60 \dots 90^\circ, \quad \gamma = 0,22 \dots 0,49;$$

після перетворення і розв'язку за умов $R = K\sqrt{\tau} + C$ при $\tau = 0, R = 0$ $C = 0$, отримаємо:

$$R = \sqrt{\alpha\tau} \gamma \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\beta\alpha} + \frac{\varphi}{\beta\gamma} \right) \gamma} \right] / \left(\frac{1}{\beta\alpha} + \frac{\varphi}{\beta\gamma} \right) = \sqrt{\alpha\tau} \gamma \xi, \quad /6/$$

де $\chi = 2\beta/\gamma^2$.

При кипінні утфелів в зоні проявлення динамічних ефектів ($p < 20$ кПа), швидкість росту парової бульбашки визначається за безрозмірним рівнянням:

$$R^* = \frac{2}{3} [(\tau^* + 1)^{1.5} - (\tau^*)^{1.5} - 1],$$

де

$$R^* = AR/B^2, \quad \tau^* = A^2\tau/B^2, \quad A = \pi r \rho' \Delta T / (7\rho' T_s), \quad B = \sqrt{\alpha\gamma} \chi;$$

чи за емпіричною залежністю

$$R^* = 8,67(\tau^*)^{0,9}$$

Для можливості прогнозування процесу тепловіддачі при кипінні, крім динаміки росту бульбашок необхідно знати їх внутрішні приховані характеристики. Аналітичний розв'язок задачі про відривний радіус бульбашки шукаємо в вигляді

$$R_B = g\tau_r / (3\pi + 1),$$

де $n \approx 0,5$, при цьому

$$R_B = 0,4g\tau_r^2 \quad /7/$$

Визначаємо τ_r із рівняння /6/ і підставляємо в останню залежність, тоді:

$$R_B = 1,35(a^2/g)^{1/3}(\gamma E)^{4/3} \quad /8/$$

Область застосування цього рівняння, як і всіх подальших, розповсюджується на ту частину тисків, де можна знехтувати дією гідродинамічних лобових опорів на швидкість росту бульбашки і де ще діє інерційна схема відриву, і охоплює область для якої $Ja < 1000$, $Pr < 1000$.

Визначити час росту можна шляхом сумісного розв'язку рівнянь /6/ і /7/, внаслідок чого:

$$\tau_r = 1,84(a/g^2)(\gamma E)^{2/3} \quad /9/$$

Час чекання сильно залежить від тиску і з його зменшенням τ_2 збільшується. При доатмосферних тисках, де $\tau_2 > \tau_r$, для визначення частоти генерації парової фази необхідно мати дані про час чекання τ_2 , який визначити аналітичним шляхом практично неможливо. Але частота генерації парової фази знаходиться в певній залежності з відривним діаметром і може визначатися за емпіричним рівнянням:

$$f = 1,04 D_B^{-0,7} \quad /10/$$

Розв'язуючи сумісно рівняння /9/ і /10/ можна оцінити час чекання.

Числові значення $D_B f$ для довільних значень режимних параметрів процесу і відповідних їм теплофізичних властивостей можна отримати шляхом сумісного розв'язку рівнянь /8/ і /10/, звідки

$$D_B f = 1,125 a^{0,2} (\gamma E)^{0,4}$$

Порівняння дослідних даних з розрахованими за цією формулою показують, що дослідні точки відхиляються від розрахункових в середньому на 16%. Значна похибка спостерігається при тисках $p < 20$ кПа, де на процес пароутворення сильно впливають динамічні ефекти.

ТЕПЛОВІДДАЧА ДО РІДИН, РОЗЧИНІВ І ГРУБОДИСПЕРСНИХ СУСПЕНЗІЙ

При малих температурних напорах і відповідних теплових потоках коефіцієнти тепловіддачі невеликі і визначаються умовами віль-

ної конвекції. Так для метастабільних утфелів при $p = 6,05 \dots 12,4$ кПа і $q = 4 \dots 3$ кВт/м², відповідно, значення α досягають 300...310 Вт/(м²К). За зоною вільної конвекції починається нерозвинене бульбашкове кипіння. Тут α досягає 300...400 Вт/(м²К) при $p = 6,05 \dots 67,1$ кПа. В подальшому з підвищенням ΔT коефіцієнт α починає швидко збільшуватися. В цій області процес тепловіддачі в основ - ному визначається наявністю і рухом парових бульбашок.

Для умов розвинутого бульбашкового кипіння при тисках менших за атмосферний вивчається теплообмін з дистильованою водою при $p = 6,3 \dots 100$ кПа, цукровими розчинами з вмістом $CP = 80\%$ при $p = 5,9 \dots 98$ кПа, стабільними утфелями при $p = 5,2 \dots 68,4$ кПа і метастабільними утфелями з $\Pi = 1,1$ при $p = 6,05 \dots 67,1$ кПа. Тепло - вий потік змінювався в межах до 100 кВт/м². Для всього дослідже - ного діапазону степінь впливу теплового потоку на інтенсивність тепловіддачі становить: для води - 0,7, цукрових розчинів - 0,6, а для утфелів з вмістом $KP = 10 \dots 50\%$, відповідно - 0,59...0,3.

Змінна степінь впливу q на α залежить від зміни кінематичної в'язкості в широких межах від $7 \cdot 10^{-7}$ для води, до $7,73 \cdot 10^{-4}$ м²/с для утфелів. При цьому степінь впливу ν на α для утфелів стано - вить -0,04...-4,8 при зміні q від 6 до 100 кВт/м². Таким чином, степінь впливу ν на α зменшується із збільшенням теплового пото - ку і температури грючої стінки. Варто сказати, що ця залежність не повністю коректна, тому що не враховує зміну інших теплофізич - них параметрів системи із зміною кінематичної в'язкості. Але в першому наближенні ця величина може бути певним підґрунтям для отримання безрозмірних формул по тепловіддачі до киплячих цукро - вих розчинів і утфелів.

Запропонуємо ряд безрозмірних рівнянь, які являються частин - ним випадком найбільш повної системи С.С.Кутателадзе. До таких мо - жна віднести системи чисел подібності і відповідні їм рівняння В.І.Толубінського і Кічігіна-Тобілевича. Зупинимось на цих систе - мах, тому що вони дають можливість узагальнення дослідних даних при кипінні рідин, розчинів і суспензій, які значно відрізняються своїми теплофізичними властивостями від води.

В дослідях з цукровими розчинами, для яких $Pr < 100$, отримана залежність

$$Nu = 54 Pr^{-0,3} K_T^{0,6},$$

яка для висококцентрованих розчинів і утфелів з числами $Pr = 275 \dots 3500$ набуває вигляду

$$Nu = 7500 Pr^{0.9} K_r^{0.5} Fo^{0.4}$$

В цьому рівнянні теплофізичні властивості відповідають температурі насичення з урахуванням фізико-хімічної і гідростатичної депресії. Внутрішні характеристики процесу визначаються за температурою стінки, тому що утворення, формування, ріст і відрив парових бульбашок з їх певною частотою генерації відбувається в зоні поверхні теплообміну.

Аналогічні розрахункові рівняння отримано в системі безрозмірних чисел подібності Кічігіна-Тобілевича:

$$Nu = f(Ga, K_p, Pe_s),$$

з якої після узагальнення слідує, що

$$Nu = 15,2 \cdot 10^{-4} Ga^{0.125} K_p^{0.7} Pe_s^{0.47}, \quad 100 > p > 20 \text{ кПа};$$

$$Nu = 28,6 \cdot 10^{-4} Ga^{0.125} K_p^{0.5} Pe_s^{0.55}, \quad p \leq 20 \text{ кПа}.$$

Подані рівняння дають можливість визначати α до киплячих в великому об'ємі висококонцентрованих розчинів і утфелів. При співставленні дослідних даних з α при кипінні в трубах можна зробити висновок, що $\alpha_{\text{тр}} = (0,7 \dots 0,9) \alpha_{\text{во}}$. Більш високі значення α при кипінні в великому об'ємі в порівнянні з трубами пояснюються значним зменшенням гідростатичної депресії, яка в існуючих апаратах досягає 45...50 кПа і відповідного цьому тиску перегріву рідини; деяким покращенням відводу пари від поверхні нагріву і збільшенням швидкості росту парових бульбашок при тонкому шарі рідини.

Отримані рівняння включають в себе значну кількість змінних параметрів, частина яких задається вихідними даними, а інша визначається з довідників. Так в загальному вигляді

$$\alpha_2 = f(Q, C_p, C_{p_m}, C_{k_m}, T_y, T_n, T_{ст}, \Delta\varphi, \Delta T, p, \lambda_m, \lambda_{ф}, \varphi, \rho_{кр}, \rho_{л}, \rho', r, F \dots),$$

чи

$$\alpha_2 = f'(q, T_y, \lambda_y, c_{p,y}, \lambda_y, b, r, \rho_y, \rho'', \rho \dots).$$

Аналіз дослідних даних і досвід уварювання утфелів показує, що ці залежності можна подати в вигляді формули

$$\alpha_2 = B q^n p^m f(Kp) f'(\Pi) = A B q^n,$$

в якій

$$n = -5,877 + 16,942(Cp_y/100) - 11,090(Cp_y/100)^2.$$

Математичні дослідження показали, що $A = f(Kp, \Pi, p, B) = f'(A', A'', B)$. В цій функціональній залежності

$$A' \propto p^{\frac{1}{3}} \{1,862 + 1,737[0,632 - Kp] \Pi^{0.2}\} - 5,252 \{[0,632 - Kp] \Pi^{0.2}\}^2,$$

$$A'' = \Pi(0,368 + Kp)^{2,282(1,368 + Kp)}, \quad B = 115,240.$$

Таким чином розрахункова формула для визначення α в скороченій формі запису має вигляд:

$$\alpha_2 = 115,240 A' A'' q^n$$

Ця формула вигідно відрізняється від подібних за призначенням, отриманих на підставі числа подібності, тим що включає в себе п'ять величин - $q, \text{CP}_y, \text{KP}, \text{П}, \text{р}$, які не потрібно визначати із довідників, так як вони входять в завдання на конструкторську розробку нових типів апаратів і модернізацію існуючих. Ця формула викликає похибки табличних даних теплофізичних величин і несе в собі широкий розрахунковий діапазон змін величин $q = 8 \dots 100 \text{ кВт/м}^2$, $\text{р} = 6,05 \dots 68,4 \text{ кПа}$, $\text{CP}_y = 75,8 \dots 91,8\%$, $50 > \text{KP} > 0$, $\text{П} > 1,0$ при достатній для інженерної практики точності.

ШЛЯХИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕПЛООБМІНУ

Шляхи інтенсифікації процесу можна розділити на три групи: за рахунок гріючої поверхні, за рахунок дії на киплячу рідину, за рахунок ініціюючої дії зовнішніх факторів.

Пористість поверхні збільшує кількість активно діючих центрів пароутворення. Збільшити пористість можна нанесенням капілярно-пористого покриття, яке приводить до зменшення температурного напору закипання, що суттєво для термолабільних рідин. Фізична суть полягає в тому, що при нагріванні рідини всередині пористого покриття утворюється пара, яка відводиться крізь одні пори, а крізь інші, під дією капілярних сил, підсмоктуються нові порції рідини. Так як порожнини пор перевищують розміри парових зародків, то випаровування в них буде відбуватися при значно менших перегрівках, ніж при випаровуванні в порожнину парової бульбашки.

Менш ефективним способом інтенсифікації теплообміну являється оребрення тепловіддаючої поверхні з боку киплячої рідини. Обмеження ребрами певних об'ємів рідини забезпечує більш рівномірний її перегрів і сприяє покращенню умов росту парових бульбашок. Інтенсивне пароутворення на оребрених поверхнях підсилює турбулентні збурення в тепловому пристінному шарі і збільшує долю конвективного теплообміну з поверхні.

В процесі теплопередачі, крім поверхні нагріву, приймає участь і теплосприймаюча рідина. Під час кипіння біля парової бульбашки створюється концентраційний пограничний шар, який приводить до підвищення температури перегріву на величину фізико-хімічної депресії. Зменшити температурний потенціал можна за допомогою ПАР, які адсорбуються на границі розділу фаз в вигляді мономолекулярного

шару, чим різко порушують молекулярну взаємодію спряжених між собою фаз. В залежності від цього змінюються швидкості обміну речовини в концентраційному шарі між фазами: швидкості пароутворення, розчинності та кристалізації суспензій. Поряд з цим поліпшується якість звареного цукру: зменшується барвність, покращується гранулометричний склад, підвищується вміст СР в утфелях при збереженні їх плинності і зменшується доброякісність витіку.

Крім названих шляхів інтенсифікації існують методи, які сприяють пароутворенню за допомогою зовнішніх подразників таких, як магнітні, електричні, гравітаційні поля чи вузькоспрямовані кванти високої енергії. Область радіоактивної чутливості рідин відповідає високим перегрівам і знаходиться біля лінії спонтанного закипання в природних умовах. Механізм ініціювання парових бульбашок залежить від концентрації дисоційованих іонів в рідині. Таким чином, завдяки термічній дисоціації в рідині виникають іонізовані частки, які відіграють роль газових молекул. Крім того, на границі стінка - рідина утворюється подвійний електричний шар. Напруженість електричного поля цього шару залежить від природи рідини і металу. Вплив цього поля, особливо коли на нього накладається інше поле, викликане зовнішніми побудниками, веде до збільшення константи дисоціації, а це в свою чергу викликає збільшення концентрації іонів в пристінному шарі, які утворюють активні центри пароутворення.

Окремо зупинимось на теплообміні в гравітаційно-стікаючому шарі. В цьому випадку на процес впливає кут нахилу поверхні з'язана з ним швидкість потоку. Ця швидкість турбулізує пристінний шар киплячої рідини, зносить бульбашки, які ще не досягли свого відривного розміру і цим інтенсифікує процес. Задачу про нахождение товщини гравітаційно-стікаючого шару утфелю розв'язано, виходячи із наближених рівнянь, отриманих на підставі уявної лінійної моделі в'язкої рідини. Тоді товщину шару можна визначити із рівняння

$$\delta_n = \delta_n^0 + \Delta y, \quad /II/$$

в якому Δy можна отримати із полінома

$$a_0 + a_1(\Delta y) + a_2(\Delta y)^2 + a_3(\Delta y)^3 + \dots + a_n(\Delta y)^n = 0, \quad /I2/$$

де $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ - коефіцієнти полінома відповідно рівні:

$$a_0 = 0,6 Q \sqrt{g l} - 0,575 (Q \sqrt{g_n^2 l / \delta}) - 0,33 i g b^2 \delta_n^3 l;$$

$$a_1 = -0,183 Q^2 + 0,2 (Q \sqrt{g l} / \delta_n) - 0,96 (Q \sqrt{g_n^2 l / \delta}) - 0,78 i g b^2 \delta_n^2 + 0,33 g b^2 \delta_n^3;$$

$$\alpha_2 = -0,061(q/\delta_n) - 0,2875(q\Delta t/\delta) - 0,5191\delta^2\delta_n + 0,789\delta^2\delta_n^2;$$

$$\alpha_3 = 0,0575(q\Delta t/\delta\delta_n) - 0,03319\delta^2 + 0,54\delta^2\delta_n.$$

Фізичний зміст задачі відповідає рішення /12/, при якому один із коренів менше нуля. Його значення підставляємо в залежність /11/ для кінцевого визначення товщини шару утфелю в потрібному перерізі за довжиною потоку.

Розрахункові значення для течії шару утфелю в прямокутному похилому каналі отримано усередненням гідродинамічних характеристик потоку для всього каналу. Середня швидкість течії шару утфелю зв'язана з об'ємними секундними витратами Q і середньою площею відношенням $W = Q/(dV)$, яке при $q = 5...45$ кВт/м² залежить від гідродинамічних умов, теплофізичних властивостей утфелю і кута нахилу каналу, тобто:

$$W = f(Re, K_F, \sin \beta), \quad K_F = \delta^3/(g\rho^3\nu^2).$$

В кінцевому вигляді ця функціональна залежність набуває вигляду:

$$W = 8,256 \cdot 10^{-4} (\delta^{1,62}/\nu^{0,79}) (\rho/g)^{0,62} g^{0,21} \sqrt{\sin \beta}.$$

Характер зміни коефіцієнтів тепловіддачі до гравітаційно-стікаючого шару утфелю різної доброякісності свідчить про те, що із збільшенням q коефіцієнт тепловіддачі зростає. Така ж картина спостерігається і при збільшенні питомих витрат утфелю, що викликає зміну гідродинамічних умов — швидкості руху утфелю, його товщини в шарі при сталому куті нахилу поверхні. Із збільшенням масового вмісту кристалів цукру в утфелі, і відповідно загальної його концентрації, інтенсивність теплообміну погіршується.

Порівнюючи значення α при кипінні утфелів в шарі, що рухається, в великому об'ємі і в трубі дає підставу судити, що α при кипінні в шарі значно вище, ніж в трубі і великому об'ємі. Особливо це проявляється при низьких теплових потоках, що важливо для уварювання термочутливих продуктів. Так, при кипінні утфелів з вмістом кристалів до 10% коефіцієнт α при $q = 10$ кВт/м² вище в порівнянні з кипінням в великому об'ємі на 45%, а з кипінням в замкненому циркуляційному контурі — на 90%.

Визначення інтенсивності тепловіддачі при кипінні в рухомому шарі утфелю при різних питомих витратах і кутах нахилу поверхні дають можливість отримати залежності α від швидкості течії і товщини рухомого шару. Ці залежності показують, що інтенсивність теплообміну збільшується із збільшенням швидкості течії. Підвищення швидкості руху при $\Delta T = \text{const}$ викликає зростання турбулентності

в пристінному шарі, де формується парова фаза. Із збільшенням ΔT при $W = const$ абсолютні значення α збільшуються, але градієнт зміни $d\alpha/d\delta$ зменшується. На цій підставі залежність $\alpha_2 = f(\delta)$ набуває більш похилого вигляду.

Виконані кінематографічні дослідження дозволили узагальнити дослідні дані в системі безрозмірних чисел подібності, запропонованій В.І.Толубінським, доповненій числом Ke , яке враховує вплив випусного руху на внутрішні характеристики процесу кипіння:

$$Nu = 69,28 Pr^{-0,3} K_r^{0,43} Re^{0,1}$$

Аналогічне узагальнення в системі Кічігіна-Тоділевича, доповненій $K_w = q/(c_p W)$, дає розрахункове рівняння

$$Nu = 3,76 a^{0,25} K_r^{0,7} K_w^{-0,2} Re^{0,6}$$

Виконані дослідження дали можливість отримати методику теплових розрахунків вакуум-випарників та кристалізаторів, які дають можливість виконувати проектні та перевірочні розрахунки окремих апаратів і станцій.

ГІДРОМЕХАНІЧНИЙ МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ УВАРЮВАННЯ УТФЕЛІВ

Інтенсифікація і оптимізація технологічних процесів за допомогою механічних циркуляторів досягається за рахунок підвищення швидкості руху і зменшення градієнтів теплофізичних величин і температур в робочому середовищі. За рахунок механічного перемішування підвищується інтенсивність тепло-і масообміну. Це відбувається внаслідок підвищення швидкості утфелю біля поверхні нагріву внаслідок чого кристали підтримуються в зваженому, суспендованому стані. Підвищення однорідності складу утфелю дозволяє вести процес при більш високих значеннях пересичення розчину і цим підвищувати швидкість кристалізації.

Підвищення швидкості циркуляції викликається несприятливими гідродинамічними умовами, особливо на кінцевих стадіях уварювання утфелів, які приводять до збільшення в'язкості, гідравлічних опорів всіх ланок циркуляційного контуру, дійсної швидкості руху пари, зменшення рушійної сили тиску і дійсного паровмісту. Одночасно із збільшенням в'язкості і підвищенням п'єзометричного рівня h_p підвищується термічний опір, збільшується імовірність недогріву утфелю на вході в кип'ятильну трубу, що тягне за собою зростання економизерної ділянки і зменшенню циркуляційного тиску.

Збільшити природну циркуляцію можна шляхом установки в центральну опускную трубу механічного циркулятора, який подібно насосу нагнітає утфіль під нижню трубку решітку. Для покращення циркуля-

ції можна ставити на циркуляційній трубі відбивник, щоб спрямувати висхідний потік вгору і не дати йому можливості змішуватися з холодним утфелем, який опускається вниз.

Всі типи відомих механічних мішалок можна розділити на два класа: аксиальнопотічні і радіальнопотічні. До перших відносяться всі мішалки, у яких кут між лопатою і віссю вала менше 90° , наприклад: пропелерні, турбінні, похилолопатеві, шнекові. До радіальнопотічних відносяться мішалки, лопаті яких паралельні осі вала, наприклад: турбінні з прямими, вигнутими і спіральними лопатями, прямолопатеві, рамні, якірні. Порівняльні випробовування різних типів мішалок показали, що в камерах з трубчатою поверхнею нагріву різниця між ними незначна, а для кільцевої поверхні нагріву, яка має незначний гідравлічний опір, найкращі показники отримані на аксиальнопотічній мішалці із зменшеною маточиною і 4-ма лопатями з проєкціями в вигляді сектора з центральним кутом 60° . Із зменшенням площі маточини зменшується тертя її з розчином і збільшується площа проходу потоку крізь мішалку. Розміри маточини не повинні бути більшими, ніж це диктується умовами механічної міцності.

Доцільно використовувати конструкції вакуум-апаратів з одною центральною циркуляційною трубою, в якій можна ставити декілька аксиальнопотічних циркуляторів. В одній із конструкцій циркулятор має чотири мішалки, які стоять на одному валу на різних рівнях, з направляючими перегородками, що стоять під мішалками. Вакуум-апарат працює задовільно при частоті обертання мішалок до 50 хв^{-1} , при цьому час уварювання зменшується майже в два рази.

В іншій конструкції вакуум-апарата використана пропелерна мішалка внизу опускної труби. Привід дозволяє змінювати частоту обертання в межах $40 \dots 120 \text{ хв}^{-1}$ при потужності $5, 7 \dots 24, 5 \text{ кВт}$. Під час випробовування і експлуатації апарата коефіцієнти теплопередачі збільшуються на 25% при уварюванні утфелів і кристалізації і на 50% - для останньої кристалізації.

Під час випробовування апаратів з циркуляторами виявлено суттєве підвищення температури утфелю над гріючою камерою. Це свідчить про те, що частина утфелю не досягає вільної поверхні, а із кип'ятильних труб безпосередньо потрапляє в опускну трубу. З метою зменшення перегріву над циркуляційною трубою встановлено воронкоподібну поверхню, яка спрямовує горячий утфіль на периферію апарата і запобігає змішуванню цього утфелю з більш холодним, який іде в циркуляційну трубу.

Подальше підвищення ефективності роботи апаратів пов'язане з установкою механічних циркуляторів з автоматизованою системою уварювання. При цьому тиск гріючої пари зменшується від 300 до 170 кПа, а вихід білого цукру збільшується на 6...10%. Такі апарати конструктивно відрізняються тим, що мають двоххильне конічне дно. Конус, спрямований вершиною вгору, в центрі дна, покращує гідродинамічну характеристику апарата з циркулятором, так як спрямовує потоки утфелю від мішалки на периферію. При цьому циркулятор необхідно устатковувати не дуже близько від дна, щоб не збільшувати гідравлічні опори потоку утфелю, який циркулює в апараті. Важливе значення має діаметр опускної труби, який становить 40% від діаметра апарата.

Найбільш суттєво в процесі варки змінюється ефективна в'язкість утфелю, яка для чистих розчинів змінюється від 0,1 на початку уварювання, до 5 мПа·с в кінці. При низькій доброякісності продуктів в'язкість досягає 100 мПа·с. Аналіз дослідних даних показує, що внаслідок різних в'язкостей значення витрат потоку циркуляції при уварюванні утфелів початкового набору в три рази більше, ніж при рівні повної варки. При цьому кращі результати для утфелів високої в'язкості показали мішалки осової течії, які виступають із опускної труби на 33...66% від висоти лопатей.

Досліджені швидкості циркуляції в опускному каналі і над гріючою камерою в двох моделях апаратів з кільцевою поверхнею нагріву і з трубчатою гріючою камерою при частоті обертання 92 хв⁻¹ мішалки осової течії за умов уварювання утфелю і кристалізації показали, що на швидкість вимушеної циркуляції впливає конструкція гріючої камери. Так, трубчаті поверхні нагріву мають більший гідравлічний опір. В апаратах з кільцевою гріючою камерою спостерігається значна нерівномірність вимушеної циркуляції. Більша частина під'ємної течії обмежена двома, трьома під'ємними циркуляційними просторами. В самому дальшому від середини кільцевого просторі швидкість в 2,5 рази більша, ніж в найближчому. Підвищений опір трубчатої поверхні сприяє вирівнюванню швидкостей циркуляції, але для створення необхідних швидкостей необхідні більші витрати енергії. Єдиної думки з питань про необхідну на кожній стадії варки швидкості циркуляції і потужності циркулятора не існує. Вважають, що потужність повинна змінюватися на протязі варки, досягаючи максимуму в критичні 5...10 хв після зародження кристалів і зменшуватися в процесі нарощування кристалів, досягаючи мінімуму під час відварювання.

Дослідження споживаної потужності мішалками, виконані на зменшених моделях апаратів, показали, що об'ємні витрати уварюваного утфелю в апаратах з кільцевою і трубчастою грійними камерами різні. Якщо розглядати ефективність мішалки, як відношення об'ємних витрат утфелю до витрат потужності, то для апарата з трубчастою поверхнею при частоті обертання 80 і 100 хв^{-1} ефективність мішалки змінюється незначно із зміною кількості лопатей і частоти обертання. В апараті з кільцевою грійною камерою при частоті обертання 69 і 92 хв^{-1} оптимальною являється мішалка осевої течії з 4-ма лопатями із співвідношенням діаметрів мішалки і опускної труби 0,94. Із збільшенням цього співвідношення збільшується в'язкісне тертя в зазорі, що веде до збільшення споживаної мішалкою потужності. При зменшенні цього відношення збільшується зворотне ковзання і зменшуються витрати утфелю, який циркулює.

При випробовуванні вакуум-апарата ВВВ-60 виявлено, що потужність під час уварювання утфелів І кристалізації за 0,9 цикла уварювання складала 10 кВт. В кінці уварювання, коли вміст СР досягав 92%, споживана потужність збільшувалася до 30 кВт. Тобто при найбільшій частоті обертів мішалки навантаження було меншим номінального і переключення на більш низьку частоту обертання не відбувалося. При уварюванні утфелів ІІ кристалізації за перші 0,6 цикла споживана потужність не перевищувала 20 кВт, а з підвищенням СР до 92% навантаження збільшувалося до 45 кВт і відбувалося автоматичне зменшення частоти обертання циркулятора до 43 хв^{-1} , при якій потужність в кінці уварювання становить 26 кВт.

Вимушена циркуляція прискорює уварювання утфелю І кристалізації до 20%, ІІ - до 30% і ІІІ - до 50%. При цьому зменшується вміст конгломератів в товарному цукрі, що веде до збільшення товарної маси. Кристали включають в себе меншу кількість нерозчинних домішок до 50% і мають більш високу термостабільність.

Уварювання утфелів з вимушеною циркуляцією має переваги в тому, що зменшується чи відпадає повністю необхідність водних підкачок. Апаратник має можливість регулювати інтенсивність випаровування за допомогою тиску грійної пари без зменшення швидкості циркуляції. На цій підставі йому необхідно використовувати меншу кількість води чи соку для підтримування при уварюванні рівноваги між швидкістю випаровування і кристалізації. При автоматизованому управлінні процесом можна обійтися без підкачок води і вести уварювання за енергозберігаючими принципами. Крім того, в зв'язку з інтен-

нсіїфікацією тепловіддачі при використанні механічних циркулято-
рів виникає можливість застосування для нагрівання вакуум-апара-
тів парів більш низького потенціалу з температурою біля 100°C . Це
дає можливість впровадження більш прогресивних теплових схем з
повним і ефективним використанням вторинних енергоресурсів і зме-
ншити витрати пари на технологічні потреби на 6...9%.

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ УВАРЮВАННЯ УТФЕЛІВ ГІДРОДИНАМІЧНИМ СПОСОБОМ

Для визначення шляхів інтенсифікації необхідно з'ясувати ме-
ханізм процесу тепло-і масообміну в кип'ятильній трубі і його фі-
зичну суть. Під час теплообміну з утфелем, що рухається в трубі, іс-
нує три зони: економайзерна, нерозвиненого і розвиненого бульбашко-
вого кипіння. Межі цих зон залежать від початкового недогріву і
механізму течії - наявності флуктуаційних місць температури і те-
плофізичних параметрів, профілів швидкостей, від гідрометричного
напору і визначається нестабільністю динамічних процесів і циркуляції
утфельної маси.

Розглянемо зміну температури ідеалізованої елементарної маси
утфеля при її русі в апараті. Охолоджена частка із зрослою густо-
ною із положення на вільній поверхні під дією гравітаційних сил
опускається крізь опускную трубу вниз апарата, звідки потрапляє в
кип'ятильні труби, де внаслідок теплообміну температура частки
збільшується до температури кипіння, яка становить $T_k = T_n + \Sigma \Delta = T_n +$
 $+ \Delta_{\text{гр}} + \Delta_{\text{гд}}$. В залежності від висоти шару навареного утфеля точка
закипання зміщується вздовж кип'ятильної труби з можливим виносом
зони розвиненого кипіння за межі грійної камери. В цьому випадку
механізм кипіння пояснюється тим, що утфіль тут знаходиться в пере-
грітому стані, а тепловіддаюча поверхня генерує в утфіль достатню
кількість дрібних бульбашок, які, дякуючи надлишку теплової енергії
в утфелі, продовжують рости, підіймаючись вгору. При подальшому русі
утфеля вгору в певному місці він губить надлишкову енергію, яка
викликає пароутворення. Парові бульбашки продовжують спливати, збі-
льшуючись в об'ємі за рахунок зменшення гідростатичного тиску. Ко-
нденсація пари всередині бульбашки не відбувається, так як пара
знаходиться в перегрітому стані на величину $\Delta_{\text{гр}} + \Delta_{\text{гд}}$, де $\Delta_{\text{гд}} \rightarrow 0$
при спливанні бульбашки. Після досягнення бульбашкою вільної по-
верхні, вона руйнується, а пари, що знаходяться в ній, охолоджуються
до температури насичення T_n , яка відповідає тиску в апараті.

Зміна локальних значень величин, які характеризують гідродина-
міку і теплообмін в апараті, відбувається не тільки за висотою

апарата, але і в горизонтальній площині в межах гріючої камери. Локальні миттєві значення температури утфелю в горизонтальній площині говорять про те, що кип'ятильні труби працюють в різних умовах і економайзерна ділянка для кожної труби своя і визначається температурою перегріву утфелю і гідродинамічною ситуацією в цьому місці. Наявність теплової і гідродинамічної нерівномірності в системі теплообмінних труб викликає пульсацію утфеля і звужує межі стійкості потоку, і являється функцією режимних і конструктивних параметрів апарата. Умови, які викликають пульсацію в системі, виникають внаслідок розходження витрат на вході в трубу і виході із неї. Виявлено, що виникненню міжтрубних пульсацій сприяють такі фактори: зменшення витрат, збільшення теплового навантаження, зменшення тиску, підвищення опору ділянки генерації пари.

Виконаний аналіз дозволяє визначити шляхи інтенсифікації процесу, які зводяться до упорядкування і підсилення циркуляції в апараті методом гідродинамічного підсилення циркуляції шляхом вдування в кожну кип'ятильну трубу пари чи газу. Визначимо необхідну оптимальну кількість вдуваного агента, вважаючи що він витікає в кип'ятильну трубу крізь збіжний насадок з початковим тиском p_1 і кінцевим p_2 /висоту змінного гідродинамічного стовпа не враховуємо/. Дослідження показали, що існує співвідношення $\beta = p_2/p_1$, при якому витрати максимальні. Це пояснюється тим, що розмір вихідного отвору може пропускати певну кількість вдуваного агента. Тому при деякому тиску p_2 установлюється максимальна пропускна спроможність отвору, яка для характерних значень показника адиабати k і співвідношення β , поданих в таблиці, дає можливість визначити максимальну швидкість і витрати за формулами:

А г е н т	k	β
Газ	1,410	0,528
Насичена пара	1,135	0,577
Перегріта пара	1,300	0,545

$$\begin{aligned} \text{при } p_2/p_1 < \beta, W_{\max} &= [2gk\rho_1 v_1 / (k+1)]^{0,5}, \\ G_{\max} &= [2gk\rho_1 / [(k+1)v_1] (2/(k+1))]^{0,5}, \\ \text{при } p_2/p_1 > \beta, W &= [2gk\rho_1 v_1 / (k-1) (1 - (p_2/p_1)^{1/k})]^{0,5}, \\ G &= f [2gk\rho_1 / [(k-1)v_1] \{ (p_2/p_1)^{2/k} - (p_2/p_1)^{(k+1)/k} \}]^{0,5}, \end{aligned}$$

де v - питомий об'єм, f - площа

вихідного живого перерізу отвору.

Оптимальні значення витрат вдуваної пари, отримані за розрахунками, становлять 112 кг/год, в той час як при випробовуваннях апарата А2-ПВУ-40 вони становили 120...150 кг/год. Але таких розбіжностей слід було чекати, так як при розрахунках не враховується

гідростатичний стовп навареного утфелю і процес вважається адіабатним, а не політропним.

Пристрої для гідродинамічної інтенсифікації процесу тепло-і масообміну в апаратах розрізняються за способами підводу, розподілу і змішування вдувасмої пари чи газу. Найбільш прості пристрої являють собою кільцеві трубчаті розподільвачі з радіусом, рівним половині радіуса апарата. Ставляться вони між дном і грійною камерою апарата і мають отвори для барботажа, чи патрубки для струминного підводу пари в уварюваний продукт.

Виконані досліді на однотрубному випарнику з вдувом повітря всередину кип'ятильної труби при упарюванні цукрових розчинів підтвердили можливість інтенсифікації тепло-і масообміну на 15...20% при вдуванні повітря до 4% від витрат грійної пари. При подальшому збільшенні витрат повітря інтенсивність тепловіддачі не збільшується, а навіть зменшується. При витратах повітря понад 15% спостерігається пульсаційний гідродинамічний режим в кип'ятильній трубі, який не стабілізується в часі. Це явище викликає дисперсно-кільцеву форму течії уварюваної суміші.

Спосіб гідродинамічної інтенсифікації уварювання утфелів шляхом вдування газу чи пари всередину кожної кип'ятильної труби криється в наступному:

- вдування здійснюється струменями з швидкістю, яка дозволяє диспергувати агент, добре змішувати його з утфелем, і якщо не виключити, то винести дисперсно-кільцеву зону течії до виходу із труб;
- витрати агента підтримувати на оптимальному рівні на кожній стадії уварювання;
- в розподільчій камері підтримувати тиск більшим, ніж в апараті, щоб коливання тиску в трубах не впливало на рівномірність розподілу вдуваного агента;
- розподільчий пристрій виконується таким чином, щоб не створювати додаткових гідравлічних опорів утфелю при його циркуляції, а також щоб не утворювалося застійних, мертвих зон;
- напрямок струменів вдуваного агента здійснюється таким чином, щоб їх інжектуюча дія створювала найбільший рушійний напір.

Для здійснення цього способу розроблено дві конструкції пристроїв з розподільчою камерою і розподільчим колектором /рис. 1 і 2/. Для підтримання в розподільчій камері чи колекторі значно більшого тиску, ніж в апараті, недостатньо використовувати агент відповідного тиску. Для цього також необхідно, щоб сумарна площа перері-

зі всіх отворів для вдування була значно меншою площі перерізу каналів, якими агент підводиться до

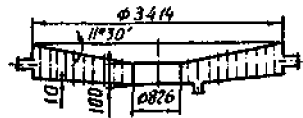
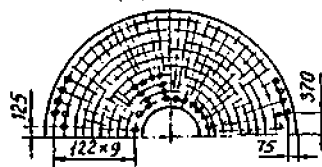


Рис.1. Пристрій камерного типу.



них. Тобто, щоб гідравлічний опір отворів для вдування був більшим за опір підвідного тракту. Таке виконання пристроїв дозволяє використовувати потенціальну енергію тиску вдуваного агента на утворення додаткового рушійного

напору. Корисний перепад тиску не тратиться на подолання опору по

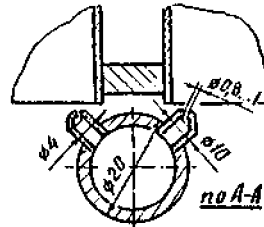
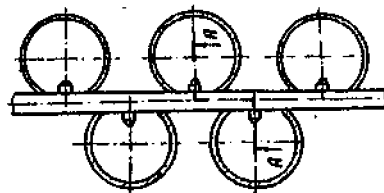


Рис.2. Пристрій колекторного типу.

тракту подачі, а перетворюється в кінетичну енергію струменя, що передається масі утфелю. Ці особливості розробленого способу підвищують ефективність роботи вакуум-апаратів.

Гідродинамічний спосіб підсилення циркуляції не накладає спеціальних обмежень на конструкцію апаратів, подібно механічному. Пристрій для вдування можна ставити в апаратах з зовнішнім кільцевим циркуляційним контуром, чи з двома - центральним і зовнішнім каналами, що характерно для сучасних апаратів. Вакуум-апарати А2-ПВУ-40 були обладнані камерними пристроями і випробовувалися на Славському, Ходорівському і Сатанівському цукрових заводах. Існуючий двокамерний апарат, обладнаний колекторним пристроєм, випробовувався на Славському заводі. Випробовування цих апаратів дали позитивні результати, а самі апарати прийняті міжвідомчою комісією.

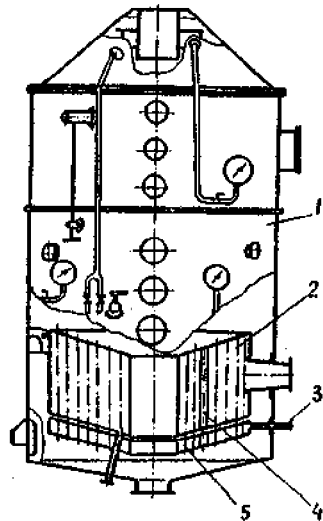
Випробовування апаратів показали, що під час уварювання утфелів і кристалізації в апараті з колекторним пристроєм покращуються якісні показники цукру: зменшується барвність на 1,5 од., золь -

ність більш ніж в 2 рази, збільшується вихід на 1,5...2%. При цьому активний час уварювання зменшується на 8,8%, а питома продуктивність апарата збільшується на 12%. Такі ж результати отримані і при уварюванні утфелів на апараті А2-ПВУ-40.

Результати промислових випробовувань вакуум-апаратів з колекторним пристроєм при уварюванні утфелів II і III кристалізації бурякового виробництва і IV кристалізації при переробці тростинного цукру-сирцю показали, що при здуванні пари час уварювання зменшується для II кристалізації до 25%, для III - до 40%, для IV - до 30%, а інтенсивність тепло-і масообміну збільшується до 80%. При цьому розміри кристалів збільшуються на 15...20%, а лінійна швидкість їх росту на 30...60%. Вміст кристалів в утфелях вищий на 1,5...2%, що дозволяє збільшити вихід цукру із тих же продуктів і зменшити вихід патоки.

Аналогічні випробовування апаратів А2-ПВУ-40 і А4-ПВА-40 з камерним пристроєм підсилення циркуляції при уварюванні утфелів II і III кристалізації бурячного виробництва показали надійну роботу апаратів. При цьому активний час уварювання зменшується до 30%, а доброякісність мікрystalного розчину до 8 од.

Рис.3. Вакуум-апарат з камерним пристроєм: 1-корпус, 2-грійна камера, 3-підвід здувальної пари, 4-кип'ятильна труба, 5-камера здувальної пари.



Наслідки виконаних досліджень підтвердили доцільність створення апарата з підсиленням гідродинамічним способом циркуляції і лягли в основу розроблених сумісно з УкрНДІпродмаш і Смілянським машинобудівним заводом конструкцій вакуум-апаратів А2-ПВУ-40, 60, 80. Схема одного з них подана на рис.3. Апарати такого типу працюють на Єлчавському, Ходорівському і Сатанівському цукрових заводах.

Крім того, розроблена конст -

рукція пристрою колекторного типу успішно працює на Єлгавському і Мабінківському цукрових заводах. Пристрої підсилення циркуляції гідродинамічним способом знайшли застосування в автоматизованому колонному вакуум-апараті безперервної дії, який розроблено в КТІХП сумісно з УкрНДІпродмаш та ІТТФ АН України /креслення УкрНДІпродмаш ЗР2ІМ-00,000.СБ/ і випробовуваного на Яготинському цукровому заводі.

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ РІЗНИХ СПОСОБІВ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ

Доцільність розробки і впровадження нових конструкцій вакуум-апаратів визначається на підставі економічного аналізу, який дає можливість отримати економічний ефект за річним обсягом випуску товарного цукру. Річний економічний ефект на розрахунковий рік виробництва цукру, тобто на кінець періоду цукроваріння, розраховується на єдиному методологічному підході з використанням вихідних даних, поданих в таблиці /вартісні характеристики подаються в умовних одиницях/.

Показники	База ВАЦ	Аналог і спосіб інтенсифікац.			
		ВАН, циркул.	А2-ПВУ здув	колиб. тиску	ПАР
Цукор отриманий в апараті, т/рік		10000			
Питомі капіталовкладення, крб/т	0,1	0,108	0,103	0,105	0,104
Технічна продуктивність, т/добу	300	350,0	350,0	350,0	350,0
Термін роботи нової техніки, рік	4	5	5	4	4
Експлуатаційні видатки, крб/рік	100	116,66	116,66	116,66	116,66
Слутні капіталовкладення, крб	0,02	0,023	0,023	0,023	0,023
Собівартість цукру, крб/т	10	9,8	9,9	9,95	9,7
Річний економ. ефект, крб/рік	-	82780	223390	133670	236180
Термін окупності, рік	-	0,675	1,24	2,66	0,42

Виконаний аналіз показує, що необхідно враховувати якомога більше факторів, які впливають на вибір методів інтенсифікації процесу тепло-і масообміну під час уварювання утфелів. Безумовно самими ефективними являються ті способи, які не вимагають переобладнання, модернізації чи створення окремих нових вузлів чи конструкцій вакуум-апаратів. Але при розробці ТЕО на нове будівництво чи повну реконструкцію існуючого заводу з метою вибору конструкції вакуум-апаратів періодичної дії необхідно одночасно з аналізом технологічних, режимних, гідродинамічних і конструктивних параметр -

рів виконувати і економічний аналіз, щоб визначити основні показники ефективності: зменшення собівартості цукру, скорочення питомих капітальних видатків на одиницю випуску продукції, підвищення коефіцієнта ефективності і скорочення терміну окупності, видатків на виконання міроприємств по створенню і впровадженню нових апаратів.

При впровадженні нових вакуум-апаратів необхідно звертати увагу і на інші показники ефективності міроприємств, які доповнюють основні. До числа таких показників можна віднести збільшення випуску цукру з одиниці сировини, зменшення трудоемності, підвищення довговічності апаратів і якості товарного цукру, покращення умов праці, зменшення питомих витрат матеріалів, сировини, палива, енергії.

Таким чином, тільки комплексний підхід до вибору перспективної конструкції вакуум-апарата дозволить визначити її доцільність як в технологічному, так і в економічному плані.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Теоретичні, експериментальні і промислові дослідження і випробовування процесів тепло-і масообміну, гідродинаміки при кипінні води, цукрових розчинів, утфелів і інших рідин органічного і неорганічного походження в великому об'ємі, кип'ятильній трубі і на похилій площині дозволили виявити закономірності теплогідродинамічних процесів в залежності від режимних факторів, характеристик двофазних потоків, фізичних властивостей досліджуваних рідин і отримати узагальнюючі залежності, які охоплюють діапазон режимних параметрів, характерних для роботи промислових вакуум-апаратів цукрового виробництва, випарників і кристалізаторів, які використовуються в інших галузях промисловості. На підставі вивчення механізму пароутворення при кипінні високов'язких цукрових розчинів і утфелів, а також результатів промислових досліджень отримано параметричне рівняння для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі при кипінні утфелів і створені методики розрахунку вакуум-апаратів різних конструкцій, включаючи елементи ВАБД, створені і випробовувані апарати з підсиленою циркуляцією Ж4-ПВА і А2-ПВУ, які впроваджені в виробництво і працюють на цукрових заводах України, Латвії, Білорусії; запропоновані шляхи інтенсифікації і оптимізації процесів тепло-і масообміну при згущенні і кристалізації утфелів, які забезпечують реалізацію найбільш економічно доцільних схем енерговикористання.

На підставі результатів досліджень зроблені наступні висновки:

1. Вивчений механізм пароутворення і фільтрації розчинного газу порами на поверхні теплообміну дозволяє прогнозувати і відшукувати оптимальні варіанти інтенсифікації процесу теплообміну за допомогою зовнішніх подразників - електромагнітних і ультразвукових полів /АС 799779, І248628/.

2. Аналіз наявного концентраційного шару на границі парова бульбашка - утфелі дає підстави для використання поверхнево-активних речовин, як прискорювачів тепло-і масообмінного процесу при уварюванні утфелів і згущенні розчинів /АС 878798, 823428/.

3. Розрахунки процесу теплообміну при кипінні рідин в великому об'ємі, трубах і в гравітаційно стікаючому шарі доцільно виконувати по отриманим узагальнюючим і рекомендованим рівнянням, використовуючи опрацьовані розрахункові методики. Для теплообміну при кипінні утфелів слід використовувати параметричне рівняння /АС 883174, 795009, 760520/.

4. Плоскі похилі поверхні теплообміну можна використовувати для інтенсифікації теплообміну при згущенні цукрових розчинів до заведення кристалів, як окремі елементи апаратів періодичної, так і безперервної дії. Їх застосування підвищує інтенсивність тепловіддачі до 50%, значно зменшує товщину пристінного перегрітого шару і зводить практично до нуля гідростатичну депресію /АС 415020, 765361, І017361/.

5. Товщину шара утфеля, який гравітаційно стікає вздовж похилої площини, можна визначати за допомогою аналітичного рішення наближених рівнянь, отриманих з використанням моделі лінійно-в'язкої рідини /утфелі розглядається як гомогенна суспензія з ефективними параметрами/ /АС 784064/.

6. Підсилення циркуляції за допомогою механічних циркуляторів вимагає додаткових витрат електричної енергії, але процес кристалізації поліпшується /АС 790405/. Дослідження показали, що:

- продуктивність апарата збільшується до 29,8%,
- витрати гарячої пари зменшуються до 11%,
- гранулометричний склад цукру погіршується - фракція біля 1 мм зменшується до 29,6%, а фракція до 0,25 мм збільшується на 7,4%.

7. Подальше удосконалення теплоенерговикористання в цукровій промисловості на стадії кристалізації можливе на базі вакуум-апаратів з підсиленою циркуляцією гідродинамічним способом, як найбільш енергозберігаючим методом інтенсифікації і оптимізації теплотехнологічних процесів /АС 469475, 520623, 765361, 823428/. Промис-

лові випробовування показали, що:

- продуктивність апарата збільшується до 40%,
- коефіцієнт тепловіддачі збільшується до 200%,
- витрати пари на вдування можна значно зменшити, використовуючи пари відтяжок із випарної станції і грійчих камер вакуум-апаратів,
- наростання барвності зменшується до 25%,
- швидкість росту кристалів збільшується до 200%,
- час центрифугування скорочується до 35%,
- ступінь нерівномірності кристалів зменшується до 30% при незначному збільшенні середнього розміру,
- спосіб легко регулюється, простий в управлінні.

8.Інтенсифікувати і оптимізувати процес тепло-і масообміну можна комбінованим шляхом, використовуючи одночасно в певному сполученні такі способи як: коливання тиску, вдування пари в кип'ятильні труби і введення ПАР.Такий самий спосіб можна рекомендувати для ВАБД /АС 765361/.

9.На підставі виконаних досліджень розроблена і впроваджена конструкція вакуум-апарата А2-ПВУ з гідродинамічним підсиленням циркуляції з поверхнею вдування пари камерного типу.

10.Запропановані шляхи поліпшення теплоенерговикористання в цукровій промисловості з використанням низькопотенціальної пари для уварювання утфелів з одночасним використанням пари газових відтяжок на інтенсифікацію і оптимізацію процесу тепло-і масообміну.

11.Із запропанованих науково-технічних розробок впроваджено в виробництво наступне:

- двокамерний вакуум-апарат з колекторним пристроєм підсилення циркуляції /Сягава, Латвія/,
- однокамерні вакуум-апарати з колекторним пристроєм підсилення циркуляції /Жабінка, Білорусія/,
- однокамерний двосхильний апарат Ж4-ПВА з камерним пристроєм підсилення циркуляції /Ходорів, Україна/,
- однокамерний двосхильний апарат А2-ПВУ з камерним пристроєм підсилення циркуляції /Сатанів, Україна; Сягава, Латвія/,
- елемент вакуум-апарата з плоскою похилою теплообмінною поверхнею /Жабінка, Білорусія/,
- виконані порівняльні випробовування трьох конструкцій вакуум-апаратів безперервної дії з елементами підсилення циркуляції

механічним і гідродинамічним способами /Яготин, Україна/.

-раціональні схеми теплоенергоспоживання впроваджено на Верхньочеському, Славському, Хабінківському, Зарожанському, Краснянському, Ходорівському, Шпанивському, Шрамківському та інших цукрових заводах.

Результати досліджень використовуються в учбовому процесі з орієнтацією на застосування ЕОМ при підготовці інженерів різних спеціальностей.

Загальний економічний ефект від впровадження в виробництво результатів науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт становить 5298,3 тисяч карбованців в грошах і цінах діючих починаючи з 1961 року.

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

A - амплітуда коливань, м; B - газова стала, Дж/(моль·К); C - стала, D - діаметр, м; F - сила, Н; G - масові витрати, кг/с; Q - кількість теплоти, Вт; R - радіус, м; S - площа поверхні, м²; T - температура, К; V - об'єм, м³; W - швидкість, м/с; робота, Дж; α - температуропровідність, м²/с; c - теплоємність, Дж/(кг·К); d - діаметр, лінійний розмір, м; f - частота генерації парової фазки, с⁻¹; h - гідростатичний напір, м; m - маса, кг; k - кількість молекул; n - ступінь, p - тиск, Па; q - тепловий потік, Вт/м²; r - теплота пароутворення, кДж/кг; x, y, z - осі координат, Дб - доброякісність, од., Кк - масовий вміст кристалів, %; П - пересичення, од.; СР - вміст сухих речовин, %; Цк - вміст цукру, %; Δ - різниця величин, температурна депресія, К; θ - крайовий кут змочування, град.; α - коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); β - коефіцієнт, витратний об'ємний паровміст, γ - коефіцієнт, δ - товщина шару, м; ζ - коефіцієнт місцевого опору; λ - коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); μ - динамічна в'язкість, Па·с; ν - кінематична в'язкість, м²/с; ρ - густина, кг/м³; σ - поверхневий натяг, Н/м; τ - час, с; φ - дійсний паровміст двофазного потоку.

Числа подібності: $Ga = g l^3 / \nu^2$ - Галілея, $Gr = g l^3 \rho \Delta T / \nu^2$ - Грасгофа, $Ju = c_p \Delta T \rho / (r \rho^*)$ - Якоба, $Kp = p l / \sigma$ - тиску, $Nu = \alpha l / \lambda$ - Ну - селта, $Pr = q l / (r \rho^* a)$ - Пекле випаровування, $Pt = \nu / a$ - Прандтля, $Ra = Gr Pr$ - Релан, $Re = W l / \nu$ - Рейнольдса.

Індекси: бк - без кипіння, н - відливний розмір, випаровування, вк - вільна конвекція, во - великий об'єм, ек - економайзерна ділянка, зап - за-падина, кип - кипіння, кр - критичне значення, м - міжкристальний розчин, н, н' - стан насичення, п - пара, пов - поверхня, с - середнє значення, ст - біля стінки, тер - тертя, тр - труба, у - утисль, ф - рідка фаза, * - безрозмірна величина; I, 2 - стосується часу росту і часу чекання парової бульбашки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ ВИСЛАДЕНО В СЛІДУЮЧИХ ПУБЛІКАЦІЯХ:

1. Артюхов Ю.Г., Гаряжа В.Т., Кулинченко В.Р. Классифицирующий кристаллизатор. - Авторское свид-во 469475, Бюл. 17.
2. Гаряжа В.Т., Артюхов Ю.Г., Лидушко Б.Г., Кулинченко В.Р. Интенсификация теплообмена и гидродинамики в промышленных вакуум-аппаратах. - 7-й симпозиум по промышленной кристаллизации. Варшава, 1978, док. Р. 30. - с. 121-122 /англ. язык/.
3. Гаряжа В.Т., Артюхов Ю.Г., Кулинченко В.Р. и др. Вакуум-аппарат непрерывного действия. - Авторское свид-во 415020, Бюл. 6.
4. Гаряжа В.Т., Артюхов Ю.Г., Кулинченко В.Р. Вакуум-испаритель с усиленной циркуляцией. - Хим. и нефт. машиностроение, 1976, №4, с. 3.
5. Гаряжа В.Т., Артюхов Ю.Г., Кулинченко В.Р. и др. Гидродинамика барботажного воздухо-утфельного слоя в трубе. - Рефер. информ. о законченных НИР. Пищ. пром-сть. К.: Вища школа, 1978, №13. - с. 10-11.
6. Гаряжа В.Т., Артюхов Ю.Г., Кулинченко В.Р. и др. Интенсификация массообмена в вакуум-аппаратах. - 7-й симпозиум по промышленной кристаллизации. Варшава, 1978, док. Р. 31. - с. 123-124 /англ. язык/.
7. Гаряжа В.Т., Артюхов Ю.Г., Кулинченко В.Р. и др. Интенсификация процесса кристаллизации в утфельных вакуум-аппаратах. - 2-я Всесоюзная конференция по массовой кристаллизации и кристаллизационным методам разделения смесей. Ереван, 1980. - с. 114-116.
8. Гаряжа В.Т., Артюхов Ю.Г., Кулинченко В.Р. и др. Испытание вакуум-аппарата с гидродинамическим усилением циркуляции. - Сах. пром-сть, 1975, №6. - с. 15-20.
9. Гаряжа В.Т., Артюхов Ю.Г., Кулинченко В.Р. и др. Исследование вакуум-воздушной системы Ходоровского сахарного и рафинадного завода с целью улучшения ее работы. - Отчет. К.: КТИП, 1969. - 87с.
10. Гаряжа В.Т., Артюхов Ю.Г., Кулинченко В.Р. и др. Исследование интенсификации процесса массообмена в вакуум-кристаллизаторах. - 15-й Международный конгресс по технологии сахара, Вена, 1975. - с. 5-43 /англ. язык/.
11. Гаряжа В.Т., Артюхов Ю.Г., Кулинченко В.Р. и др. Разработка, испытание и внедрение вакуум-аппарата с усиленной циркуляцией. - Отчет. К.: КТИП, 1974. - 210с.
12. Гаряжа В.Т., Артюхов Ю.Г., Кулинченко В.Р. Разработка рациональной схемы Елгавского сахаро-рафинадного завода с целью снижения расхода топлива. - Отчет. К.: КТИП, 1969. - 96с.
13. Гаряжа В.Т., Артюхов Ю.Г., Кулинченко В.Р. и др. Усовершенствование конструкции вакуум-аппарата с целью интенсификации рабо-

чих процессов.-Отчет.К.:КТИП, 1975.-480с.

14.Гаряжа В.Т.,Артюхов Ю.Г.,Кулинченко В.Р. и др. Формы течения воздушно-утфельных смесей.-Рефер.информ.о законченных НИР.Пищ.пром-сть.К.:Вища школа, 1978, №4.-с.10-11.

15.Гаряжа В.Т.,Артюхов Ю.Г.,Павелко В.И.,Кулинченко В.Р. Гидродинамика и теплообмен в вакуум-кристаллизаторе сахарозы.-2-я Международная конференция по химии и технологии сахара.Лодзь, 1973 с.32 /польск.язык/.

16.Гаряжа В.Т.,Артюхов Ю.Г.,Павелко В.И.,Кулинченко В.Р. Гидродинамика и теплообмен в вакуум-аппаратах сахарной промышленности.-2-я Международная конференция по химии и технологии сахара. Доклад.-Лодзь, 1973.-24с.

17.Гаряжа В.Т.,Артюхов Ю.Г.,Павелко В.И.,Кулинченко В.Р. и др. Гидродинамика и теплообмен в вакуум-испарителях при кипении высоковязких растворов и суспензий.-5-я Всесоюзная конференция по теплообмену и гидравлическому сопротивлению при движении двухфазного потока в элементах энергетических машин и аппаратов.Л.:1974.-с.72-75.

18.Гаряжа В.Т.,Артюхов Ю.Г.,Павелко В.И.,Кулинченко В.Р. Гидродинамика и теплообмен в вакуум-аппаратах.-Проблемные сельскохозяйственные тетради, 1977, №187.-с.359-373 /польск.язык/.

19.Гаряжа В.Т.,Артюхов Ю.Г.,Павелко В.И.,Кулинченко В.Р. и др. Интенсификация процесса уваривания утфелей в вакуум-аппаратах.-Сах.пром-сть, 1975, №1.-с.14-17.

20.Гаряжа В.Т.,Артюхов Ю.Г.,Павелко В.И.,Кулинченко В.Р. Интенсификация рабочих процессов в вакуум-аппаратах сахарного производства.-Рефер.информ.о законченных НИР.Пищ.пром-сть.К.:Вища школа, 1975, №10.-с.3.

21.Гаряжа В.Т.,Артюхов Ю.Г.,Павелко В.И.,Кулинченко В.Р. Исследование конструктивных характеристик и режимов работы вакуум-аппаратов на теплофизические процессы с целью установления оптимальных конструктивных размеров.-Отчет.К.:КТИП, 1967.-180с.

22.Гаряжа В.Т.,Артюхов Ю.Г.,Сторчевс А.П.,Кулинченко В.Р. Выпарной аппарат.-Авторское свидетельство 56003, Вил.21.

23.Гаряжа В.Т.,Лидумко В.Г.,Кулинченко В.Р. и др. Исследование процессов теплообмена при уваривании утфелей в вакуум-аппаратах с усиленно циркулирующей жидкостью и разработка элементов вакуум-аппарата непрерывного действия.-Отчет.К.:КТИП, 1973.-79с.; 1974.-121с.

24. Горяжа В.Т., Дидушко Б.Г., Кулинченко В.Р. Теплообмен при кипении утфелей на наклонной поверхности нагрева.-Рефер.информ. о законченных НИР.Пищ.пром-сть.К.:Вища школа, 1975, №10.-с.3-4.
25. Горяжа В.Т., Кулинченко В.Р. Интенсивность теплообмена при свободной конвекции /без изменения агрегатного состояния/.-Рефер.информ.о законченных НИР.Пищ.пром-сть.К.:Вища школа, 1974, №9.-с.12-13.
26. Горяжа В.Т., Кулинченко В.Р. Исследование вакуум-воздушной системы Елгавского сахарного завода с целью улучшения ее работы.-Отчет.К.:КТИПП, 1972.-103с.
27. Горяжа В.Т., Кулинченко В.Р. Исследование и расчет теплового хозяйства Тальновского сахарного завода и разработка оптимальной схемы отвода конденсата из вакуум-аппаратов.-Отчет.К.:КТИПП, 1969.-135с.
28. Горяжа В.Т., Кулинченко В.Р. Исследование механизма теплообмена при кипении воды и сахарных растворов.Сб.:Теплофизика и теплотехника, 1973, №24.-с.132-135.
29. Горяжа В.Т., Кулинченко В.Р. Исследование работы тепловой схемы Краснянского сахарного завода и разработка оптимальной схемы.-Отчет.К.:КТИПП, 1974.-119с.
30. Горяжа В.Т., Кулинченко В.Р. Исследование работы Шпановского сахарного завода и разработка оптимального варианта схемы.-Отчет.К.:КТИПП, 1974.-102с.
31. Горяжа В.Т., Кулинченко В.Р. Механизм теплообмена при кипении сахарных растворов.-Тезисы докладов 37-й научной конференции КТИПП, 1971.-с.153.
32. Горяжа В.Т., Кулинченко В.Р. Обобщение опытных данных по теплоотдаче при кипении сахарных утфелей в большом объеме.-Изв. вузов.Пищ.технология, 1974, №2.-с.142-145.
33. Горяжа В.Т., Кулинченко В.Р. Разработка тепловой схемы Зарожанского сахарного завода.-Отчет.К.:КТИПП, 1970.-102с.
34. Горяжа В.Т., Кулинченко В.Р. Теплообмен при кипении высоковязких растворов в большом объеме в условиях естественной конвекции.-Тезисы докладов 38-й научной конференции КТИПП, 1972.-с.122.
35. Горяжа В.Т., Кулинченко В.Р. Теплообмен при развитом пузырьковом кипении утфелей в большом объеме.-Рефер.информ.о законченных НИР.Пищ.пром-сть.К.:Вища школа, 1974, №9.-с.12.
36. Горяжа В.Т., Кулинченко В.Р. и др. Вакуум-аппарат А2-ПВУ-40.-Сак.пром-сть, 1977, №12.-с.27-30.

37.Гаряжа В.Т.,Кулинченко В.Р. и др. Вакуум-аппарат с усиленной циркуляцией А2-ПВУ.К.:Телепресреклама,1981,-4с.

38.Гаряжа В.Т.,Кулинченко В.Р. и др. Интенсификация процессов тепло-и массообмена в утфельных вакуум-аппаратах гидродинамическим способом.-Отчет.К.:КТИП,1975.-180с.

39.Гаряжа В.Т.,Кулинченко В.Р.,Артюхов Ю.Г.,Дидушко Б.Г. Интенсификация уваривания утфелей.-М.:Легк.и пищ.пром-сть,1981.-152с.

40.Гаряжа В.Т.,Кулинченко В.Р. и др. Интенсификация уваривания утфелей гидродинамическим способом.-Рефер.информ.о законченных НИР.Пищ.пром-сть.К.:Выща школа,1978,№ 14.-с.4.

41.Гаряжа В.Т.,Кулинченко В.Р. и др. Поле температур при кипении утфелей.-Изв.вузов.Пищ.технология,1976,№ 4.-с.130-133.

42.Гаряжа В.Т.,Кулинченко В.Р.,Дидушко Б.Г. Исследование теплообмена при кипении кристаллизующихся растворов и суспензий в условиях естественной циркуляции и организованного движения.-Всероссийская научная конференция.Перспективы промышленной теплоэнергетики.М.:МЭИ,1977.-с.114.

43.Гаряжа В.Т.,Кулинченко В.Р.,Дидушко Б.Г. Исследование работы тепловой схемы Лабинковского сахарного завода и разработка ее оптимального варианта.-Отчет.К.:КТИП,1968.-98с.

44.Гаряжа В.Т.,Кулинченко В.Р.,Еременко В.Г. Исследование и разработка оптимальной тепловой схемы Верхняцкого сахарного завода в связи с реконструкцией ТЭЦ.-Отчет.К.:КТИП,1969.-140с.

45.Гаряжа В.Т.,Кулинченко В.Р.,Карпенко А.В. и др. Выпарной аппарат.-Авторское свид-во 1248628,Бил.29,1986.

46.Гаряжа В.Т.,Кулинченко В.Р.,Павелко В.И. Исследование работы тепловой схемы Слуцкого сахаро-рафинадного завода и разработка оптимальной схемы.-Отчет.К.:КТИП,1970.-89с.

47.Гаряжа В.Т.,Кулинченко В.Р.,Павелко В.И. Исследование,расчет и разработка рациональной схемы теплового хозяйства Городейского сахарного завода с целью снижения расхода топлива и улучшения технико-экономических показателей.-Отчет.К.:КТИП,1966.-125с.

48.Гаряжа В.Т.,Кулинченко В.Р.,Степах И.И. и др. Временное методическое пособие по расчету экономической эффективности научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.-К.:КТИП,1970.-119с.

49.Гаряжа В.Т.,Павелко В.И.,Артюхов Ю.Г.,Кулинченко В.Р. Исследование процессов в утфельных вакуум-аппаратах периодического

действия Ходоровского сахарного завода.-Отчет.К.:КТИПП, 1972.- 128 с.

50.Гаряжа В.Т., Лавелко В.И., Кулинченко В.Р. Исследование работы тепловой схемы Шрамковского сахарного завода и разработка оптимального варианта схемы.-Отчет.К.:КТИПП, 1971.-76с.

51.Гулый И.С., Гаряжа В.Т., Штангеев В.О., Кулинченко В.Р. Способ управления процессом непрерывной кристаллизации сахарных растворов.-Авторское свид-во 878798, Бюл.41.

52.Гуцалюк В.М., Казимиров Р.К., Кулинченко В.Р. Мембранный аппарат.-Авторское свид-во 1017361, Бюл.18, 1983.

53.Гуцалюк В.М., Кулинченко В.Р., Нудьга М.Н. и др. Способ получения молокосвертывающего ферментного препарата руссулин.-Авторское свид-во 883174, Бюл.43, 1981.

54.Гуцалюк В.М., Руденко В.И., Кулинченко В.Р. Мембранный аппарат.-Авторское свид-во 784064, Бюл.40.

55.Гуцалюк В.М., Руденко В.И., Кулинченко В.Р. Мембранный аппарат с трубчатыми фильтрующими элементами.-Авторское свид-во 799779, Бюл.4, 1981.

56.Гуцалюк В.М., Руденко В.И., Кулинченко В.Р. Способ разделения растворов с помощью полупроницаемой мембраны.-Авторское свид-во 790405.

57.Демчук Г.С., Иванов В.С., Кулинченко В.Р. и др. Способ получения солодово-белкового экстракта.-Авторское свид-во 795009.

58.Дидушко Б.Г., Гаряжа В.Т., Артюхов Ю.Г., Кулинченко В.Р. Зависимость коэффициента теплоотдачи от расходных параметров при кипении уфелей, стекающих по плоской поверхности нагрева.-Рефер.информ.о законченных НИР.Пищ.пром-сть.К.:Вища школа, 1977, № 12.-с. 16-17.

59.Дидушко Б.Г., Гаряжа В.Т., Кулинченко В.Р. Влияние удельного теплового потока на интенсивность теплообмена при кипении гравитационно стекающего слоя уфеля.-Рефер.информ.о законченных НИР.Пищ.пром-сть.К.:Вища школа, 1978, № 13.-с.11-12.

60.Колтунов В.А., Кулинченко В.Р. и др. Методические рекомендации по разработке и освоению научно обоснованных систем ведения сельского хозяйства в колхозах и совхозах Украинской ССР.-К.: Урожай, 1989.-120с.

61.Круглов Н.А., Кулинченко В.Р., Каталевский Е.Е. и др. Способ получения кормового витамина В.-Авторское свид-во 760520.

62.Кулинченко В.Р. Выбор параметров уравнения теплоотдачи при

кипении утфелей.-Тезисы докладов республиканской научно-технической конференции.Разработка высокоэффективных ресурсосберегающих технологий,оборудования и новых видов пищевых продуктов в пищевую и перерабатывающие отрасли АПК.К.:РАПОУкввузполиграф, 1991.-с.36.

63.Кулинченко В.Р. Вынужденная конвекция при ламинарном течении среды.К.:1984.-62с.-Деп. в УкрНИИТИ, № 238Ук-Д84.

64.Кулинченко В.Р. Вынужденная конвекция при турбулентном течении среды.К.:1984.-45с.-Деп. в УкрНИИТИ, № 1966Ук-84.

65.Кулінченко В.Р. Гідродинаміка.К.:НМК ВО, 1992.-272с.

66.Кулинченко В.Р. Исследование теплообмена при кипении сахарных растворов и утфелей в условиях естественной конвекции.-Авторефер.дис.канд.наук.К.:КИИП, 1974.-24с.

67.Кулинченко В.Р. Исследование теплообмена при кипении сахарных растворов и утфелей в условиях естественной конвекции.-Диссерт...канд.техн.наук.К.:КИИП, 1974.-170с.

68.Кулінченко В.Р. Коефіцієнти параметричних рівнянь для тепловіддачі до утфелів.-Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції.Розробка та впровадження нових технологій і обладнання у харчову та переробні галузі АПК.К.:ВІПОЛ, 1993.-с.576.

69.Кулинченко В.Р. Параметрическое уравнение для определения коэффициентов теплоотдачи к кипящим в большом объеме утфелям.-Тезисы докладов республиканской научно-технической конференции.Разработка высокоэффективных ресурсосберегающих технологий,оборудования и новых видов пищевых продуктов в пищевую и перерабатывающие отрасли АПК.К.:РАПОУкввузполиграф, 1991.-с.12.

70.Кулинченко В.Р. Справочник по тепловым расчетам.-К.:Техника, 1990.-168с.

71.Кулінченко В.Р. Фізичний зміст параметричного рівняння тепловіддачі до утфелів.-Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції.Розробка та впровадження нових технологій і обладнання у харчову та переробні галузі АПК.К.:ВІПОЛ, 1993.-с.570.

72.Кулинченко В.Р., Андрушак А.А. Теплофизические параметры кипящих утфелей.-Изв.вуз.Инж.технологии, 1993, № 6.-с. 88-92.

73.Кулінченко В.Р.,Гаряжа В.Т. Експериментальне дослідження пароутворення в киплячих цукрових розчинах і утфеліях.-Від.Харчова промисловість, 1973, № 16.-с.143-148.

74.Кулинченко В.Р.,Гаряжа В.Т. Теплообмен при кипении утфе -

лей в большом объеме.—Тезисы докладов 39-й научной конференции КТИП, 1973.—с.84-85.

75.Кулинченко В.Р.,Гаряжа В.Т.,Артюхов Ю.Г. Интенсивность теплоотдачи при кипении утфелей.—Изв.вузов.Пищ.технология, 1977, № 4, с.153-156.

76.Кулинченко В.Р.,Гаряжа В.Т.,Дидушко Б.Г. Исследование теплообмена при кипении термолабильных суспензий.—Инж.физич.журнал, 1983, 45, № 1.—с.96-99.

77.Кулинченко В.Р.,Гаряжа В.Т.,Кулинченко Е.В. и др. Механизм действия поверхностно-активных веществ при уваривании утфелей.—Пищ.пром-сть, 1984, № 3 /121/.—с.33-35.

78.Кулинченко В.Р.,Мартынов Л.И.,Сигал М.Н. Разработать рациональную технологию выпечки батонов и пшеничного подового хлеба на печах РЗ-ХПУ-25.—Отчет.К.:КТИП, 1987.—129с.

79.Кулинченко В.Р.,Гулый И.С.,Гаряжа В.Т. и др. Способ кристаллизации сахаросодержащего раствора.—Авторское свид-во 823428, Бюл.15.

80.Попов В.Д.,Гулый И.С.,...,Кулинченко В.Р. и др. Вакуум-аппарат непрерывного действия для кристаллизации веществ.—Авторское свид-во 765361, Бюл.35.

АННОТАЦИЯ РАБОТЫ

Кулинченко В.Р. Интенсификация процессов тепло-массообмена в вакуум-испарителях и кристаллизационных аппаратах

Изучены физические основы кипения высоковязких сахарных растворов и утфелей, возникновения паровой фазы и динамики роста пузырьков на твердой поверхности с учетом ее свойств. Определены внутренние характеристики пузырькового кипения. Получены обобщенные зависимости для определения интенсивности теплообмена при нагревании и кипении унарных, бинарных и полифазных жидкостей в большом объеме, трубе и наклонной поверхности. Исследованы пути интенсификации технологических процессов при сгущении и кристаллизации сахарных растворов и утфелей, используя механическое и гидродинамическое усиление циркуляции, ведения процесса в гравитационно стекающем слое, применения поверхностно-активных веществ. Решены задачи практического применения разных способов интенсификации процессов тепло-и массообмена в промышленных вакуум-испарителях и кристаллизаторах. Разработан и внедрен в промышленность вакуум-аппарат А2-ПВУ с гидродинамическим усилением циркуляции.

Ключевые слова: теплообмен, массообмен, утфель, интенсификация.

SUMMARY

Kulinchenko V. R. Intensification processes heatmass transfer in vacuum evaporators and crystallization pans

Were studied physical bases of highviscose sugar liquors and massecuites boiling, emergence of vapor phase and dynamics of bubble's increase on a solid surface in accordance to its characteristics. Were defined generalized dependences to determinate the intensity of heat transfer in the process of heating and boiling of single-, two- and policomponent liquids in big volumes, pipes and on the inclined plans. Were investigated directions of intensification of technological processes while thickening and crystallizing of sugar liquors and massecuites, using mechanical and hydrodynamical intensification of circulation, conducting of the process in gravitation flowing down layer, application of surface-active substances. Were solved the problems of intensification of heat and mass transfer processes in industrial vacuum evaporators and crystallization pans. Developed and applied in industry vacuum apparatus A₂-PNU with hydrodynamic circulation intensification.

Key words: heat transfer, mass exchange, massecuite, intensification.

СУПРОВІДНА ІНФОРМАЦІЯ ДО ПУБЛІКАЦІЇ

В. Р. Кулінченко. Інтенсифікація процесів тепломасообмену у вакуум-випарниках і кристалізаційних апаратах. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. Спеціальність 05.18.12 – процеси та апарати харчових виробництв. К.: УДУХТ, 1995. – 44 с.

Вивчені фізичні основи кипіння високов'язких цукрових розчинів і утфелів, виникнення парової фази і динаміки зростання бульбашок на твердій поверхні з урахуванням її властивостей. Визначені внутрішні характеристики бульбашкового кипіння. Отримані узагальнені залежності для визначення інтенсивності теплообміну при нагріванні і кипінні унарних, бінарних і полифазних рідин у великому об'ємі, трубі і похилій поверхні. Досліджені шляхи інтенсифікації технологічних процесів при згущуванні і кристалізації цукрових розчинів і утфелів, використовуючи механічне і гідродинамічне посилення циркуляції, ведення процесу в гравітаційно стікаючому шарі, застосування поверхнево-активних речовин. Вирішені завдання практичного застосування різних способів інтенсифікації процесів тепло-и масообміну в промислових вакуум-испарителях і кристалізаторах. Розроблений і упроваджений в промисловість вакуум-апарат А2-ПВУ з гідродинамічним посиленням циркуляції.

Ключові слова: теплообмін, маcсообмен, утфель, інтенсифікація.

В. Р. Кулинченко. Интенсификация процессов тепломассообмена у вакуум-испарителях и кристаллизационных аппаратах. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Специальность 05.18.12 – процессы и аппараты пищевых производств. К.: УГУПТ, 1995. – 44 с.

Изучены физические основы кипения высоковязких сахарных растворов и утфелей, возникновения паровой фазы и динамики роста пузырьков на твердой поверхности с учетом ее

свойств. Определены внутренние характеристики пузырькового кипения. Получены обобщенные зависимости для определения интенсивности теплообмена при нагревании и кипении унарных, бинарных и полифазных жидкостей в большом объеме, трубе и наклонной поверхности. Исследованы пути интенсификации технологических процессов при сгущении и кристаллизации сахарных растворов и утфелей, используя механическое и гидродинамическое усиление циркуляции, ведения процесса в гравитационно стекающем слое, применения поверхностно-активных веществ. Решены задачи практического применения разных способов интенсификации процессов тепло- и массообмена в промышленных вакуум-испарителях и кристаллизаторах. Разработан и внедрен в промышленность вакуум-аппарат А2-ПВУ с гидродинамическим усилением циркуляции.

Ключевые слова: теплообмен, массообмен, утфель, интенсификация.

V.R. Kulichenko. Intensification of processes of heat transfer at vacuum-pans and crystallization vehicles. Abstract of thesis of dissertation on the competition of graduate degree of doctor of engineering's sciences. Specialty 05.18.12 are processes and vehicles of food productions. K.: UGUFT, 1995. – 44 p.

Were studied physical bases of hygroscopic sugar liquors and mass fractions boiling, emergence of vapor phase and dynamics of bubble's increase on a solid surface in accordance to its characteristics. Were defined generalized dependence to determine the intensity of heat transfer in the process of heating and boiling of single-, two- and polycomponent liquids in big volume, pipes and on the inclined planes. Were intensification directions of intensification of technological processes while thickening and crystallizing of sugar liquors and mass fractions, using mechanical and hydrodynamical investigation of circulation, conducting of the process in gravitation flowing down layer, application of surface active

substances. Were solved the problems of intensification of heat- and mass transfer processes in industrial vacuum evaporators and crystallization pans. Developed and applied in industry vacuum panr A2-PVU with hydrodynamic circulation intensification.

Keywords: heat exchange, mass exchange, massecuite, intensification