

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут Навчально-науковий інженерно-технічний інститут ім. акад.
І.С. Гулого
Кафедра теплоенергетики та холодильної техніки

«До захисту в ЕК»
Директор інституту
_____ Сергій БЛАЖЕНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

«__» __ грудня__ 2025 р.

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Валентин ПЕТРЕНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

«__» __ грудня__ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

зі спеціальності _____ 144 Теплоенергетика
(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми _____
Теплоенергетика та енергоефективні технології

на тему: Визначення теплотехнічних показників роботи вакуум-апаратів
періодичної дії з механічними циркуляторами в процесі уварювання утфелю І
кристалізації

Виконала: здобувач 2 курсу, групи ЗТЕ-2-7М

Фогель Тетяна Олексіївна
(прізвище, ім'я, по батькові повністю)

_____ (підпис)

Керівник – Масліков Михайло Олександрович
(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

_____ (підпис)

Рецензент – Валерій Мирончук
(ім'я та прізвище)

_____ (підпис)

Я, як здобувачка Національного університету харчових технологій, розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавала і не одержувала незарядженої допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідні джерела.

_____ Тетяна ФОГЕЛЬ
(підпис та прізвище здобувача)

Київ – 2025 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інженерно-технічний інститут ім. акад. І.С. Гулого
Кафедра теплоенергетики та холодильної техніки

Освітній ступінь магістр

Спеціальність 144 Теплоенергетика

(код і назва)

Освітньо-професійна програма Теплоенергетика та енергоефективні технології

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТЕХТ
проф. Валентин ПЕТРЕНКО
“ ” _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧКИ

Фогель Тетяни Олексіївни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Визначення теплотехнічних показників роботи вакуум-апаратів періодичної дії з механічними циркуляторами в процесі уварювання утфелю І кристалізації

керівник роботи: Масліков Михайло Олександрович, к.т.н., професор

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від 15.10.2025 № 845 кс

2. Строк подання здобувачем роботи 01.12.2025 року

3. Вихідні дані до роботи матеріали переддипломної практики

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналітичний огляд – технологічні, гідродинамічні та теплотехнічні особливості процесу варіння утфелю

2. Визначення теплотехнічних показників роботи вакуум-апарата періодичної дії з механічними циркуляторами для варіння утфелю І продукту

2.1. Вплив режиму роботи вакуум-апаратів І кристалізації на ефективність енергоспоживання цукрового виробництва

2.2. Визначення оптимальної тривалості варіння утфеля І кристалізації

2.3. Визначення теплотехнічних показників процесу під час варіння утфелю

Висновки

АНОТАЦІЯ

В магістерській кваліфікаційній роботі на тему «Визначення теплотехнічних показників роботи вакуум-апаратів періодичної дії з механічними циркуляторами в процесі уварювання утфелю I кристалізації» розглянуті питання ефективності роботи вакуум-апаратів періодичної дії з механічними циркуляторами. На базі існуючих моделей та експериментальних даних розроблена методика розрахунку та визначено витрати теплоти і пари, необхідної для проведення технологічного процесу уварювання утфелю першої кристалізації та інших теплотехнологічних параметрів.

Ключові слова: тепломасообмін; теплотехнологія; кристалізація; вакуум-апарат; утфель; цикл варіння; механічний циркулятор.

ABSTRACT

The master's thesis titled "Determination of Heat Engineering Performance Indicators of Batch-Type Vacuum Apparatuses with Mechanical Circulators during Boiling-Down of First-Crystallization Masecuite" examines the operational efficiency of batch-type vacuum apparatuses equipped with mechanical circulators. Based on existing models and experimental data, a calculation methodology was developed and the heat and steam consumption required for the technological process of boiling-down first-crystallization masecuite, as well as other heat-engineering parameters, were determined.

Keywords: heat and mass transfer; thermal technology; crystallization; vacuum apparatus; masecuite; boiling cycle; mechanical circulator.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	5
ВСТУП	7
1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	
1.1 Технологічні особливості процесу варіння утфелю	9
1.2 Гідродинаміка руху утфелю у вакуум-апаратах	11
1.3 Теплообмін при кипінні у вакуум-апаратах	18
1.4. Експериментальне дослідження теплотехнічних показників роботи вакуум-апарата періодичної дії з механічними циркуляторами 1 продукту.....	23
1.5. Методика розрахунку теплоенергоспоживання для варіння утфелю у продуктовому відділенні цукрового заводу.....	29
1.6. Висновки до розділу 1.....	31
2. ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ ВАКУУМ-АПАРАТА ПЕРІОДИЧНОЇ ДІЇ З МЕХАНІЧНИМИ ЦИРКУЛЯТОРАМИ ДЛЯ ВАРІННЯ УТФЕЛЮ 1 ПРОДУКТУ.....	
2.1. Вплив режиму роботи вакуум-апаратів I кристалізації на ефективність енергоспоживання цукрового виробництва.....	31
2.2. Вихідні дані для розрахунку оптимальної тривалості варіння утфеля I кристалізації та теплотехнічних показників процесу.....	32
2.3. Визначення оптимальної тривалості варіння утфеля I кристалізації.....	32
2.4. Визначення теплотехнічних показників процесу під час варіння утфелю...	34
ВИСНОВКИ	43
ЛІТЕРАТУРА.....	44

ВСТУП

Виділення цукру в кристалічну масу є ключовим етапом бурякоцукрового виробництва, що визначає вихід, якість та енергетичну ефективність продукту. Використання вакуум-апаратів для варіння дозволяє створювати оптимальні фізико-хімічні умови для кристалізації, зменшуючи термічне розкладання сахарози та підвищуючи чистоту кінцевого продукту. Інтенсивний тепло- та масообмін у вакуумному середовищі сприяє рівномірності росту кристалів, а конструкційні параметри апарата та режим його роботи безпосередньо впливають на розмір, структуру та однорідність кристалів. Ефективність кристалізації значною мірою визначає стабільність технологічного процесу, енергоспоживання та якість цукру.

Процес формування цукрових кристалів є вирішальним для визначення кінцевого виходу продукту, його чистоти та рівня енерговитрат у виробництві. Застосування вакуумної установки забезпечує сприятливі термодинамічні та хімічні умови, що зменшують втрати сахарози під час нагрівання та підвищують якість утфелю. Активний тепло- і масообмін у вакуумі забезпечує однорідний ріст кристалів, тоді як конструктивні особливості апарата і налаштування режиму визначають їхню величину, форму та структуру. Високий рівень організації кристалізації безпосередньо впливає на стабільність технологічної схеми та економічність споживання енергії. Для ефективного та швидкого прогнозування результатів роботи теплотехнологічних схем, автоматичного керування процесами доцільно використовувати їх математичні моделі.

Створення глобальної математичної моделі теплотехнічного комплексу цукрового виробництва базується на регіональних моделях його окремих елементів, зокрема, дифузійної установки, станції нагрівання соків, випарної установки, кристалізаційного відділення. Авторами вже проведено моделювання процесів тепло-масообміну в нахиленому шнековому дифузійному апараті [2].

Для перевірки адекватності математичної моделі кристалізаційного відділення наявних в літературі дослідних даних недостатньо через складність об'єкта таких досліджень, обумовлену специфікою тепломасообмінних процесів в

трьохфазних середовищах під час кристалізації, різноманітність конструктивних рішень апаратів та їх продуктивностей, що впливають на ці процеси.

У цукровій промисловості переважно використовуються вакуум-апарати періодичної дії з природною або примусовою циркуляцією сиропу. Кристалізаційне відділення заводу витрачає до 45% технологічної пари на уварювання та кристалізацію утфеля, при цьому нерівномірний розподіл пари у часі впливає на термодинамічну стабільність випарної установки та ефективність теплотехнологічної схеми в цілому. Оскільки найбільшими споживачами пари є апарати першої кристалізації, оптимізація її витрат є ключовим заходом підвищення енергоефективності виробництва та зниження питомих енергетичних витрат.

Метою даної роботи є визначення теплотехнічних показників роботи вакуум-апаратів періодичної дії з механічними циркуляторами в процесі варіння утфелю I кристалізації.

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Технологічні особливості процесу варіння утфелю

У загальних рисах процес періодичного варіння утфелю характеризується трьома основними періодами [7].

Перший період – згущення сиропу та ініціація кристалізації – передбачає випаровування частини води з початкового завантаження сиропу до стану перенасичення та внесення кристалізаційної пудри. Найважливішими факторами, що визначають подальший розвиток процесу, є величина перенасичення та обсяг початкового завантаження апарата. Для різних видів цукру коефіцієнт перенасичення коливається у межах 1,15–1,7; при цьому більш високі значення характерні для нижчих продуктів з підвищеним вмістом нецукрів. Перенасичення та обсяг початкового завантаження мають забезпечити достатню кількість кристалів для стабільного розвитку процесу, запобігаючи надмірному утворенню нових центрів кристалізації. Кількість введених кристалів визначає кінетику їх росту: менше завантаження сприяє формуванню крупних кристалів, більше – дрібних, із значно більшою сумарною поверхнею, що прискорює перетворення. Сучасні методи інтенсифікованого варіння спрямовані на отримання цукру дрібної фракції та оперативне регулювання росту кристалів, тому прагнуть до зменшення початкового об'єму сиропу, величина якого зазвичай становить понад третину загальної маси, що переробляється за цикл, і визначається конструкцією апарата.

Другий період – нарощування кристалів – починається через кілька хвилин після внесення кристалізаційної пудри, коли у апараті утворюється достатня кількість кристалів. У цей період підключають свіжий сироп у кількості, необхідній для росту існуючих кристалів, при цьому режим варіння підтримують таким чином, щоб запобігти утворенню нових кристалів. Для цього підтримують понижене перенасичення, яке стимулює зростання вже сформованих кристалів, а підкачка сиропу відбувається плавно, без різких коливань об'єму та фізичних властивостей утфелю. Великі або рідкі підкачки спричиняють нестабільність

режиму та випадання «борошна», що потребує додаткового розчинення і введення води, гальмуючи процес кристалізації. Підкачка сиропу зазвичай здійснюється з легким перегрівом (3–5 °С), щоб уникнути випадання кристалів у момент введення та забезпечити ефективне перемішування утфелю під час самовипаровування (закипання). Протягом цього періоду поступово зростає концентрація нецукрів у маточному розчині, тоді як сахароза для росту кристалів відбирається з міжкристального сиропу; в кінці стадії вводять патоку, яка збігається за якісними показниками з маточним розчином.

Третій період – відварювання – розпочинається після припинення підкачки сиропу та триває до максимального виснаження маточного розчину. У цей час підтримують підвищене перенасичення, що забезпечує завершення кристалізації та підвищення виходу цукру. Збільшення концентрації нецукрів у міжкристальному сиропі поступово підвищує розчинність сахарози, зменшуючи ризик утворення «борошна» та дозволяючи підтримувати стабільний темп росту кристалів. Раціональне ведення усіх трьох періодів визначає кінцеву якість утфелю, однорідність кристалів та ефективність використання енергії на технологічний процес.

Такі, без деталізації, основні технологічні особливості процесу, які можуть змінюватися від властивостей продукту і методів варіння. При будь-яких методах треба одержати утфель стандартної якості. Наприклад, за встановленими технологічними нормами якості 1 продукту [7] крупність цукру повинна відповідати 3000 шт. кристалів в одному грамі при рівномірності кристалів 80% і ваговому вмісті їх в утфелі 55%. При цьому міжкристальна патока повинна бути виснажена до доброякості Дб - 75-77%, а утфель, зварений до остаточної концентрації, близько 93%.

Автор [3] встановив, що у вакуум-апаратах безперервної дії технологічний процес відбувається за аналогічними принципами, що й у апаратах періодичної дії. Однак на відміну від періодичного варіння, де окремі стадії процесу змінюють одна одну в часі в межах одного об'єму апарата, у безперервних апаратах різні періоди варіння реалізуються одночасно в різних зонах об'єму, розташованих уздовж поверхні нагріву. Подача початкового сиропу, підкачка свіжого розчину

та відведення готового утфелю здійснюються безперервно, що забезпечує постійну роботу апарата та стабільність режимів кристалізації.

1.2. Гідродинаміка руху утфелю у вакуум-апаратах

1.3.1. Гідродинамічні характеристики циркуляційного контуру

Гідродинамічні властивості циркуляційних контурів випарних систем детально вивчені переважно на прикладі парогенераторів, тоді як для випарних апаратів дослідження мають дещо обмежений характер.

За даними авторів [4,5] процеси гідродинаміки у вакуум-апаратах підпорядковуються тим самим закономірностям, що й у класичних випарниках. Тому методичні підходи, розроблені для розрахунку циркуляційних контурів парогенераторів, із певними корективами можуть бути застосовані й при аналізі роботи вакуум-апаратів.

Природна циркуляція утфелю в апараті забезпечується дією гравітаційних сил, що виникають унаслідок різниці густини середовища між опускними та підйомними каналами. Утворений таким чином циркуляційний напір повністю використовується для подолання гідравлічних опорів системи та прискорення руху уварюваної маси в підйомних трубах.

Реологічні характеристики утфелю суттєво впливають на гідродинамічну поведінку середовища у вакуум-апараті. Рух чистих цукрових розчинів підпорядковується закону Ньютона, згідно з яким їхня динамічна в'язкість залишається сталою незалежно від прикладеної напруги зсуву та тривалості дії деформації.

Виробничі цукрові розчини можуть містити до 50 % нецукристих домішок у складі сухих речовин. Залежно від якісного та кількісного складу цих компонентів, при однаковій концентрації сухих речовин спостерігається як підвищення, так і зниження динамічної в'язкості розчинів у міру зменшення їхньої чистоти. Такі системи характеризуються наявністю слабо виражених псевдопластичних властивостей.

Наявність кристалів сахарози істотно підвищує в'язкість утфелю, особливо при їхній концентрації понад 45 %, коли відбувається безпосередній контакт між кристалами, що унеможливорює їхній індивідуальний рух у міжкристальному

середовищі. Реологічна природа утфелів залишається дискусійним питанням, оскільки значення в'язкості зразків однакового складу можуть відрізнятись в десятки разів.

Зміна розміру кристалів сахарози в межах від 0,5 до 3 мм практично не впливає на відносну в'язкість системи ($\mu/\mu\text{м}$). Для утфелів, що містять кристали розміром 3–5 мм, спостерігається зниження відносної в'язкості на 7–10 % порівняно з іншими фракціями, проте така різниця є незначною і, як правило, не враховується в інженерних розрахунках.

Зміна температури не чинить суттєвого впливу на значення відносної в'язкості утфелю. Підвищення показника ($\mu/\mu\text{м}$) зі збільшенням температури спостерігається лише під час витікання утфелю через короткий патрубок. Імовірно, зростання відношення ($\mu/\mu\text{м}$) зумовлене не підвищенням власної в'язкості утфелю, а посиленням турбулентності потоку, спричиненої рухом кристалів сахарози при зниженні в'язкості маточного розчину.

Порівняння експериментальних даних [3] свідчить про наявність суттєвих відмінностей, зумовлених різною кінематикою руху утфелю під час досліджень. Для зіставлення було використано результати випробувань ультразвукового віскозиметра, розробленого для контролю в'язкості міжкристального розчину з метою оперативного регулювання процесу уварювання утфелю. Вимірювання в'язкості здійснювали за швидкістю затухання ультразвукових коливань плоскої пластини, яка здійснювала високочастотні подовжні коливання в утфелі. При концентрації кристалів $KP < 20\%$ прилад практично не реагував на наявність твердої фази. Використання такого типу віскозиметра дало найнижчі значення відносної в'язкості ($\mu/\mu\text{м}$), оскільки коливальна пластина взаємодіяла переважно з міжкристальним розчином і лише епізодично — з кристалами, через що вплив твердої фази на результати вимірювань був незначним.

Істотний вплив вмісту кристалів на відносну в'язкість утфелю відзначене при протіканні утфелю у вертикальних трубах. Напрямок руху кристалів і розчину тут збігається. Кристали цукру внаслідок більшої щільності мають деяку відносну швидкість у розчині і, турбулізуючи його, створюють ефект додаткової в'язкості утфелю.

Натомість найбільші значення відносної в'язкості (μ/μ_m) були зареєстровані в експериментах із ротаційними віскозиметрами, у зазорах яких кристали сахарози під дією рушійних, гравітаційних та відцентрових сил здійснюють складний просторовий рух із відносними швидкостями, що перевищують ті, які спостерігаються у вертикальних трубах. Це зумовлює підвищене розсіювання енергії потоку та, як наслідок, збільшення ефективної в'язкості утфелю.

Для розрахунків циркуляції утфелю у вакуум-апаратах у більшому ступені застосовні залежності, отримані при протіканні утфелю у трубах. Можна припустити, що протікання утфелю високої в'язкості при невеликих швидкостях, характерних для вакуум апаратів, відносяться до ламінарних режимів, для яких коефіцієнт тертя (втрати напору) по довжині труби визначається по рівнянню Пуазейля [4]:

$$\lambda_{mp} = 64 \cdot \text{Re} \quad (1.1)$$

При дослідженні втрат на тертя при протіканні кормової патоки в трубах отримані невеликі відхилення від рівняння Пуазейля, що знаходяться в межах погрешностей дослідів.

Втрати на тертя при протіканні утфелю можна визначати по рівнянню Букингама для структурованих систем. Це рівняння незначне відрізняється від рівняння (1.1), тому що граничні статичні напруги зрушення мають невеликі абсолютні значення. Отримані дані підтверджують справедливість рівняння (1.1) для визначення коефіцієнта тертя при протіканні утфелю у вертикальних трубах.

Авторами [4] також досліджені місцеві опори при вході утфелю в трубу і при виході з її. Дослідні дані узагальнюються рівняннями:

$$\begin{aligned} \xi_{ax} &= (500/\text{Re}) + 1.6 \\ \xi_{bx} &= (250/\text{Re}) + 1 \end{aligned} \quad (1.2)$$

Коефіцієнти тертя і місцевих опорів λ , ξ_{vx} і ξ_{vix} , залежать тільки від чисел Re потоків утфеля і не залежать від концентрації кристалів і вмісту сухих речовин в утфелі.

У дослідженому діапазоні зміни режимних параметрів ($\text{CP} = 79\text{-}86\%$, $\text{PK} = 10\text{-}54\%$, розмір кристалів $0,5\text{-}5$ мм, температура $28\text{—}50$ °С, швидкість протікання утфеля $0,05\text{—}1,3$ м/с) протікання утфелю у трубах має ламінарний характер. У той

же час при протікання утфелю через місцеві опори ламінарний характер спостерігається лише при $Re < 80$. При $Re > 80$ має місце перехідна область.

При малих значеннях Re вплив другого доданка рівнянь (1.2) мале в порівнянні з першим. У цій області протікання утфелю крізь місцевий опір є безвідривним, ламінарним, і опір обумовлюється дією сил в'язкого тертя.

Із збільшенням значень Re поряд із втратами на внутрішнє тертя виникають втрати напору, обумовлені відривом потоку й утворенням вихорів, тобто частковою турбулізацією потоку. Це так звана перехідна область опорів тертя. При досить великих значеннях чисел Re втрати на вихроутворення стають переважними, коефіцієнти опорів тертя практично не залежать від чисел Re . Це так звана квадратна (тому що втрати напору пропорційні квадрату швидкості потоку) чи автомодельна область опорів, характерна для турбулентних потоків. Другі доданки рівнянь (1.2) представляють значення місцевих опорів, перехідна область настає при $Re > 80$. тоді як для опорів тертя по довжині труби всі досвідчені дані до $Re=1800$ відносяться до області в'язкісного потоку. Виникнення турбулентності в місцевих опорах при більш низьких значеннях Re у порівнянні з потоком утфелю у стабілізованих ділянках трубопроводу можна пояснити турбулізуючим впливом кристалів цукру при переході через місцеві опори, що зв'язано з перебудовою поля швидкостей і утворенням вихорів.

1.3.2. Структура утфельних потоків у трубах

Форма потоку газо-утфельних потоків може бути бульбашковою, снарядною, поршньовою і кільцевою [4,5]. Протікання газо-утфельних потоків з чисто бульбашковою формою (рівномірно розподіленими дрібними пухирцями) не спостерігалися. У досвідах з цукровими розчинами й утфелями при $KP < 15\%$ при невеликих витратах повітря спостерігалися течії, у яких повітряні бульбашки різних розмірів нерівномірно рухалися по центрі труби. Це обумовлюється високою в'язкістю цукрових розчинів і утфелю.

Більш характерної для газо-утфельних потоків є снарядна форма з рівномірним рухом газових снарядів, що чергуються, займаючи майже весь перетин труби, і рідких перемичок.

Поршнева форма подібна зі снарядною, але відрізняється від неї тим, що довжина газових снарядів значно перевищує довжину рідких перемичок, що рухаються подібно поршню. На зайнятих газом ділянках труби спостерігалось стікання вниз шару утфеля, що потім підхоплювався утфельною перемичкою що підіймалася. Такий потік супроводжується великими коливаннями тиску в трубі і швидкостей течії потоку.

Кільцева форма газо-утфельних потоків спостерігається тільки при невеликих витратах утфелю і великих газозмістних потоків. При цьому в центрі труби рухається суцільний потік повітря з окремими частками утфелю, а по стінках піднімається хвилеподібно шар утфелю.

Область існування окремих форм потоку газо-утфельних сумішей визначається витратним газозмістом β і швидкостями W_{cm} потоку, а також змістом сухих речовин і кристалів в утфелі. З підвищенням концентрації i , отже, в'язкості рідкого компонента потоку границі між окремими формами потоків зміщалися у бік менших значень β і W_{cm} , що описується ростом опору пересуванню перемичок утфелю і, отже, ростом відносної довжини газових снарядів.

Характерними для промислових вакуум-апаратів є снарядна і поршнева форми течії паро-утфельних потоків у кип'ятильних трубах. Реальний газозміст і швидкість руху фаз є найважливішими гідродинамічними характеристиками кип'ятильних труб, тому що безпосередньо впливають на рушійний напір природної циркуляції утфелю.

Реальні газозмісти (ϕ , а також швидкості руху газу (пари) W'' чи рідини W у великому ступені залежать від форми потоків. Під дією сил Архімеда газ (пара) у кип'ятильних трубах рухається швидше, ніж утфель. Відносна швидкість газу ($W_r = W'' - W$) тим вище, чим більше розділені фази в потоці суміші. Найменшу W_r мають дрібні одиничні пухирці газу, зі збільшенням їхніх розмірів W_p зростає. Якщо пухирці газу рухаються друг за другом, їхні відносні швидкості зростають. Підвищуються W_r при переході форм потоку від бульбашковою до снарядної, поршневої і кільцевої.

Широко досліджені реальний газовміст паро- і газоводяних потоків, отримані залежності для визначення цих параметрів у парових котлах і випарниках. Менш досліджені реальні потоки газовмісту з рідинами, що значно відрізняються від води своїми фізичними властивостями.

У ненапірних барботажних чи застійних режимах газо-утфельних сумішей, характерних для умов роботи кип'ятильних труб, близьких до припинення циркуляції, з підвищенням в'язкості рідкого компонента μ' істинні швидкості газу W'' зменшуються. Це говорить про те, що, з одного боку, ріст опору руху рідкого компонента зі збільшенням в'язкості μ' сприяє підвищенню відносної W_r і істинної W'' швидкостей газу, з іншого боку - при цьому зростає також опір на міжфазній поверхні, що обумовлює зниження реальної швидкості газових утворень.

Дослідження [4,5,7] показують, що зміни швидкостей W_o , розміру кристалів в утфелі, тиску в діапазоні, характерному для роботи вакуум-апаратів, не роблять помітного впливу на характеристики газо-утфельних потоків. Для узагальнення експериментальних даних була використана залежність

$$W''/W_{cm} = \beta/\varphi = C_p + (V_d/W_{cm}) \quad (1.3)$$

у якій швидкість газу W'' представлена в порівнянні зі швидкістю W_{cm} , що мав би газ при гомогенному руху суміші. Розходження між ними виражено параметром розподілу C_p , що відбиває нерівномірність поля швидкостей і газовмісту, і дрейфовою швидкістю V_d , з яким окремі газові утворення під дією архімедових сил випереджають середню швидкість руху навколишньої їхньої суміші.

Отримані експериментальні дані оброблені в координатах $W''=f(W_{cm})$. На ділянках $W_{cm} < 12$ ці залежності усереднені лінійними функціями і знайдений параметр C_p по нахилу прямих до осі W_{cm} , а параметр V_d — по відрізьку, відсікаємого прямими на осі W'' . У дослідах більш точно визначення параметра V_d вироблялося за результатами дослідження барботажних режимів.

В області $\mu' < 0,018$ Па·с параметри V_d і C_p не залежать від μ' . При більш високій в'язкості рідкого компонента спостерігалось зниження параметра V_d і ріст коефіцієнта C_p практично по лінійній залежності в логарифмічних

координатах. Помітно також деяке збільшення, параметра V_d і зниження коефіцієнта C_p зі збільшенням діаметра труби.

Методами теорії подоби для потоків з $\mu' > 0,018$ Па·с отримана узагальнююча залежність

$$W'''/W_{cp} = \beta / \varphi = 1.12[\text{Re}_{cm}/We_{cm}^2 Fr_{cm}^2]^{1/7} + 3.24/\text{Re}_{cm}^{0.1} \quad (1.4)$$

яку можна також представити в іншому виді:

$$W'''/W_{cp} = \beta / \varphi = 1.12[\text{Re}_{cm}/We_{cm}^2 Fr_{cm}^2]^{1/7} + 3.24/\text{Re}_{cm}^{0.1} \quad (1.5)$$

Гідравлічні опори при руху повітря-уфельних потоків у трубах є головними складовими загального опору циркуляційного контуру. Вони містять у собі втрати тиску на тертя суміші по довжині труби $\Delta p_{дтр}$ на прискорення руху суміші $\Delta p_{ру}$ і на розширення при виході суміші з труби $\Delta p_{рвх}$.

Дані про втрати тиску на тертя $\Delta p_{дтр}$ повітря-уфельних потоків у вертикальних трубах у залежності від змісту рідини в суміші $(1-\varphi)$ і від втрат на тертя $\Delta p_{0тр}$ при протіканні одного лише рідкого компонента зі швидкістю циркуляції W_0 узагальнюються наступною залежністю:

$$\Delta p_{дтр}^d / \Delta p_{0тр}^0 = 1/(1-\varphi) \quad (1.6)$$

Аналогічна залежність отримана також для паро-водяних потоків при аналітичному рішенні моделі з турбулентним рухом рідини в кільцевому шарі. Однак залежність (1.6) узагальнює дані, стосовні також до бульбашкової і снарядної форми потоку.

Зміна тиску і швидкості рідкого компонента не впливає на залежність (1.6), тобто воно в однаковому ступені впливає на $\Delta p_{дтр}$ і $\Delta p_{0тр}$. Розкид дослідних даних, досить значний. Це обумовлюється пульсуючим характером руху повітря-уфельних потоків, що спричиняє погрішності вимірів.

Втрати напору на прискорення потоку газо-рідинних сумішей визначаються їхньою масовою швидкістю і зміною наявного газомісту уздовж потоку. Аналітично отримана залежність для визначення $\Delta p_{ру}$, що для випадку, коли щільність рідкої фази ρ' значно вище щільності газу ρ'' , що характерно для роботи вакуум-апаратів, можна представити у виді

$$\Delta p_{ру} = W^2 20\rho'(\varphi^2 - \varphi_1)/[(1-\varphi_1)\cdot(1-\varphi_2)] \quad (1.7)$$

де індекси 1 і 2 характеризують початковий і кінцевий перетини ділянки, що розраховується.

Дослідження втрат тиску на виході повітря-утфельних сумішей із труб у виді залежності відносини коефіцієнтів місцевого опору від відношення видаткових швидкостей газу W''_0 і утфелю W'_0 дозволили одержати залежність

$$\xi_{\text{двих}} / \xi_{0\text{вих}} = 1 + 0,53 (W''_0 / W'_0)^{0,42} \quad (1.8)$$

Зміна фізичних властивостей і швидкості рідкого компонента не позначається на отриманій залежності, імовірно, тому, що в однаковому ступені впливає на $\xi_{\text{двих}}$ і $\xi_{0\text{вих}}$.

1.2. Теплообмін при кипінні у вакуум-апаратах

Висока інтенсивність теплообміну при розвиненому бульбашковому кипінні утфеля визначається турбулентністю пристінного шару, викликаною перетворенням на поверхні тепловіддачі внаслідок інтенсивного перемішування утфеля паровими пухирцями що утворюються [4.5]. Причиною турбулентності і більш високої інтенсивності теплообміну є парові бульбашки, отже, необхідно мати дані про просторово-тимчасові характеристики росту парового пухирця.

Значна товщина пристінного перегрітого шару й аналіз кінематографічних досліджень дозволили прийняти наступну модель росту індивідуальної парової бульбашки, що представлена як усічена сфера. Кут сполучення сфери з поверхнею нагрівання (крайовий кут θ) у процесі росту бульбашки залишається практично постійним. Підведення тепла в бульбашку здійснюється через клинчастий шар перегрітого утфелю в основі Q_1 і через шар перегрітого утфелю, що покриває поверхню бульбашки Q_2 . Тепло в процесі росту бульбашки витрачається на ізобаричний ріст усіченої сфери Q_3 і на дисипацію, що являє собою механічну енергію Q_4 , перетворену в теплову внаслідок тертя поверхні поділу фаз з утфелем.

Таким чином, загальний баланс тепла зростаючої бульбашки можна представити рівнянням

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 \quad (1.9)$$

$$\text{де} \quad Q_1 - 2\pi R \lambda \cos \theta / 2 \ln(\delta/y_A) \quad (1.10)$$

Множник $\ln(\delta/y_A)$ через істотне розходження в порядках величин, дуже малочутливий до зміни самих величин і може вважатися з відомим наближенням постійним ($\ln(\delta/y_A) = 13,8 - 16,1$). Для умов $0 < \theta < 90$ $\cos \theta / 2 = 1 - 0,707$.

Кількість тепла, відданого в бульбашку утфелем, що покриває іншу частину бульбашки, можна представити рівнянням

$$Q_2 = \sqrt{3\pi / \alpha \tau} R^2 \lambda \Delta t \sin^2 \theta \quad (1.11)$$

Тепло, сприйняте бульбашкою у процесі ізобаричного росту,

$$Q_3 = \pi r'' R^2 (dR/d\tau) (1 + \cos \theta)^2 (2 - \cos \theta) \quad (1.12)$$

Тепло, що втрачається в навколишнє середовище за рахунок дисипації енергії,

$$Q_4 = \xi_{mp} (\pi / g) (\rho' \lambda \Delta t \frac{dR}{d\tau} R^2 / \mu) (1 + \cos \theta) \quad (1.13)$$

Підставивши значення $Q_1 - Q_4$ у вираження (1.9), розділивши отримане рівняння на $\pi r'' (1 + \cos \theta)^2 (2 - \cos \theta) R^2$ і ввівши наступні позначення:

$$\begin{aligned} \varphi &= \xi_{mp} / [g(1 + \cos \theta)(2 - \cos \theta)] \\ \beta &= 2 \cos \theta / 2 \ln(\delta/y_A) / [(1 + \cos \theta)(2 - \cos \theta)] \\ \gamma &= \sqrt{3 / \pi \cdot \sin^2 \theta / [(1 + \cos \theta)^2 (2 - \cos \theta)]} \end{aligned} \quad (1.14)$$

одержимо

$$dR/d\tau + \varphi (\lambda \rho' \Delta t / \mu r'') (dR/d\tau) - \beta (\lambda \Delta t / r'') (1/R) - \gamma (\lambda \Delta t / r'' \alpha \tau) = 0 \quad (1.15)$$

Величини геометричних факторів φ , β , γ , що входять у рівняння динаміки росту парової бульбашки, можна оцінити наступними величинами:

$$\varphi = 0,002275 - 0,0128 \text{ при } \theta = 60-90^\circ$$

$$\beta = 7,07 - 11,3 \quad \gg \theta = 60-90^\circ$$

$$\gamma = 0,22 - 0,49 \quad \gg \theta = 60-90^\circ$$

Вирішуючи рівняння (1.15), одержимо значення поточного радіуса парової бульбашки в залежності від часу

$$R = \sqrt{\alpha \tau \gamma} [1 + \sqrt{1 / Ja + \varphi / Pr} 2\beta / \gamma^2] (1 / Ja + \varphi / Pr)^{-1} = \sqrt{\alpha \tau \gamma} \Xi \quad (1.16)$$

Рівняння (3.16) враховує тільки енергетичний баланс для бульбашки і не бере до уваги сили поверхневого натягу σ і інерційні сили, а також опір фазового переходу. Якщо σ незначно впливає на ріст парової бульбашки, то опір фазового

переходу й особливо інерційні сили можуть обмежити застосування рівняння (1.16) в області особливо низьких тисків (великих чисел Якоба).

Експериментальна перевірка теоретичного співвідношення (1.16), представлена у формі

$$R(\alpha\tau)^{-0.5} = f(\text{Ja})_{\text{Pr}=\text{var}} \quad (1.17)$$

при $\text{Ja} = 10 - 1000$, $\text{Pr} = 1 - 800$, $\phi = 0,0025$, $\beta = 8$ і $\gamma = 0,35$, дає гарне узгодження теоретичних і дослідних даних.

Для прогнозування інтенсивності теплообміну при бульбашковому кипінні високов'язких цукрових розчинів і утфелю поряд з динамікою росту парової фази необхідно знати відривні розміри, частоту генерації і паропродуктивність центра пароутворення. Аналітичне рішення задачі визначення відривного розміру бульбашки в утфелі шукається у виді

$$R_0 = [1/(3n+1)]g\tau_p^2 \quad (1.18)$$

при $n = 0,5$ і $R_0 = 0,4 g\tau_p^2$.

Вирішуючи рівняння (1.16) відносно τ_p , одержимо

$$\tau_p = R_0^2 / \alpha(\gamma \Xi)^2 \quad (1.19)$$

Підставляючи вираз (1.19) у (1.18), визначимо значення відривного розміру парової бульбашки

$$R_0 = 1.35 (\alpha^2 / g)^{1/3} (\gamma \Xi)^{4/3} \quad (1.20)$$

Періодичність роботи центрів поверхні тепловіддачі, характеризується частотою генерації парових бульбашок. Частота обернено пропорційна повному часу циклу, необхідному для проходження бульбашкою стадії росту, відриву і відновлення термодинамічних умов у пристінному шарі утфелю, необхідному для утворення наступної бульбашки

$$f = 1/(\tau_0 + \tau_p) \quad (1.21)$$

Значення часу росту парової бульбашки можна одержати шляхом спільного рішення рівнянь (3.16) і (3.18), у результаті чого

$$\tau_p = 1.84(\alpha^2 / g^2)^{1/3} (\gamma \Xi)^{2/3} \quad (1.22)$$

Зіставлення результатів аналітичного вираження (1.22) з результатами досвідів представлено. Досягнутий збіг дослідних даних з теоретичними дуже задовільно для такого складного процесу, яким є бульбашкове кипіння.

Час чекання обумовлений припливом «холодної» рідини у вільну область, утворену бульбашкою, що відірвався. За цей час відбувається нагрівання рідини до температури, що відповідає виникненню життєздатного парового зародка з наступним його ростом. При тисках нижче атмосферного $\tau_0 \Rightarrow \tau_p$ для визначення частоти генерації парової фази необхідно мати інформацію о τ_0 . Однак частота генерації знаходиться у визначеному зв'язку з відривним діаметром і не залежить від інтенсивності теплового потоку, що впливає тільки на число діючих центрів паротворення. Зв'язок між частотою генерації і відривним розміром бульбашки описується емпіричним рівнянням

$$f = 1.04 D_0^{-0.7} \quad (1.23)$$

яке отримано на підставі обробки дослідних даних для води, цукрового розчину із $CP = 70\text{—}72\%$, 25% - ного $NaCl$, 29% -ной Na_2CO_3 , 96% - ного C_2H_5OH , CH_3OH , CCl_4 , n - бутилового спирту, 4% - ного гліцерину, бензолу, фреону Ф-12 і даних для води, цукрового розчину зі $CP = 80\%$ і утфелю із вмістом кристалів $10 - 30\%$. При спільному розгляді рівнянь (1.22) і (1.23) можна судити про час чекання.

Відривні розміри парових бульбашок і частота їхнього утворення визначають середню швидкість росту парової фази. Спостереження показують, що окремі центри паротворення генерують бульбашки різних розмірів, причому більшій бульбашці відповідає менша частота і навпаки. Тому середня за цикл швидкість росту парових бульбашок змінюється для окремих центрів значно менше, ніж окремо відривні розміри і частота.

Значення $D_0 f$ при кипінні цукрових розчинів і утфеля можна одержати шляхом спільного рішення рівнянь (1.20) і (1.23), звідки

$$D_0 f = 1,125 a^2 (\gamma \Xi)^{0.4} \quad (1.24)$$

Приведені дані про внутрішні сховані характеристики теплообміну D_0 , τ_c , τ_p , f , $D_0 f$ при кипінні утфелю дозволили узагальнити дослідні дані в безрозмірній формі.

У рівнянні (1.25) усі теплофізичні параметри розраховуються по температурі насичення з обліком фізико-хімічної депресії. Виключення складають параметри D_0 і f , що розраховуються по теплофізичних властивостях середовища, що відповідає температурі стінки t_{ct} , тому що формування, ріст і відрив бульбашок з

визначеною частотою відбуваються в зоні поверхні тепловіддачі, відповідно до її температури.

За визначальну температуру в рівняннях (1.26) і (1.27) прийнята температура насичення з урахуванням фізико-хімічної депресії. При цій температурі визначалися теплофізичні властивості дослідженого утфеля.

Аналогічні рівняння отримані по тепловіддачі до утфеля, що кипить у трубах в умовах природної циркуляції.

$$Nu = 21Pr^{0.1}K^{0.6}_T \quad (1.28)$$

Величини D_{of} приймалися в залежності від тиску вторинної пари і концентрації міжкристального розчину,

Результат узагальнення в системі (1.26) і (1.27) приводить до одержання рівняння

$$Nu = 3,08 \cdot 10^{-4} Ga^{0.05} K^{0.84}_p Re^{0.6}_и \quad (1.29)$$

Рівняння (1.28) і (1.29) узагальнюють дані по тепловіддачі до висококонцентрованих цукрових розчинів і утфеля при незначних змінах тиску вторинної пари не тільки для оптимальних режимів в однотрубній моделі вакуум-апарата, але і для промислових апаратів, у яких відхилення від оптимального режиму, особливо до кінця процесу уварювання, значне.

Узагальнення експериментальних даних по теплообміну при кипінні утфеля, що стікає по похилій площині, виконано [4] в системі М. А. Кичигіна - Н. Ю. Тобілевича, доповненої критерієм K_{ω} ; враховуючи вплив швидкості потоку на коефіцієнт тепловіддачі при кипінні утфеля у гравітаційно стікаючому шарі. Дані узагальнюються рівнянням

$$Nu = 3.7 Ga^{0.125} K^{0.7}_p K^{-0.2}_{\omega} Re^{0.6}_и \quad (1.30)$$

у якому усі теплофізичні параметри відповідають температурі насичення з урахуванням фізико-хімічної депресії. Залежність (1.30) може використовуватися при розрахунку і конструюванні прямогочного вакуум-апарата.

Проведене [4,5] кінематографічне дослідження механізму пароутворення при кипінні цукрового утфеля високої доброякісності й аналітичне рішення задачі динаміки росту парових пухирців в умовах природної конвекції дозволили узагальнити експериментальні дані при кипінні гравітаційно-стікаючого шару

ульфеля в критеріальній формі, доповненої критерієм Рейнольдса, що враховує вплив змушеного руху на внутрішні характеристики процесу кипіння. Дані узагальнюються рівнянням:

$$Nu = 69.28 Pr^{-0.3} K^{0.43} Re^{0.1} \quad (1.31)$$

1.4. Експериментальне дослідження теплотехнічних показників роботи вакуум-апарата періодичної дії з механічними циркуляторами 1 продукту [1]

Для реалізації цієї мети були поставлені наступні задачі:

1.Провести експериментальні дослідження зміни параметрів роботи промислового вакуум-апарата ВАЦМ-40 з механічними циркуляторами виробництва ТОВ «Фірма ТМА» протягом циклу уварювання ульфелю 1 кристалізації.

2.Встановити взаємозв'язок між параметрами роботи ВА.

3.Провести математичне узагальнення отриманих результатів.

Схема розміщення приладів для проведення дослідження наведена на рис.

1.1.

Характеристика приладів: 1 - рівень в апараті (вимірювальний перетворювач тиску Aplisens PC-28 (мановакууметр -100..100кПа)); 2- термопара для визначення температури вторинної пари (ТСМ50М з перетворювачем (0-180⁰С)); 3 – вакууметр для визначення розрідження в апараті (вимірювальний перетворювач тиску Aplisens PC-28 (мановакууметр -100..100кПа)); 4 - термопара для визначення температури нагрівної пари (ТСМ50М з перетворювачем (0-180⁰С)); 5 – витратоміри для визначення витрати конденсату (Лічильник турбінний гарячої води СТВГ-I – 0,8-40 м³/год).

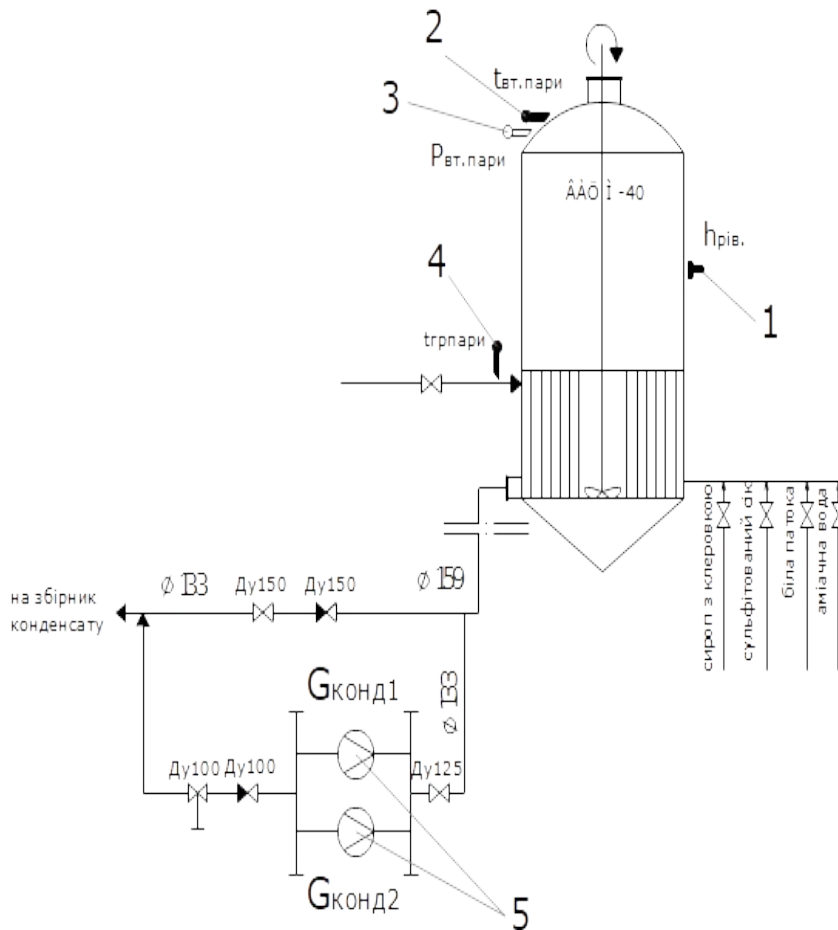


Рис 1.1. Схема розміщення приладів для проведення дослідження вакуум-апарата ВАЦМ-40

За об'єкт дослідження взятий вакуум-апарат для уварювання утфелю 1 кристалізації ВАЦМ-40 з механічними циркуляторами виробництва ТОВ «Фірма ТМА», встановлений на Згурівському цукровому заводі. Технічна характеристика апарата: площа теплообміну – 192 м², місткість по звареному утфелю 40 т, показник циркуляції – 2,7. Апарат оснащений системою автоматичного керування фірми «Віол-2» вітчизняного виробництва. В системі автоматизації використовується контролер MicroPC фірми Octagon Systems (США).

Предметом дослідження є зміна в часі режимних параметрів вакуум-апарата.

В результаті вимірів зміну температури нагрівної та вторинної пари вакуум-апарата представлено на рис 1.2.



Рис. 1.2. Графік зміни температури протягом циклу

Разом з цим зміна гідростатичного рівня протягом циклу в апараті становить

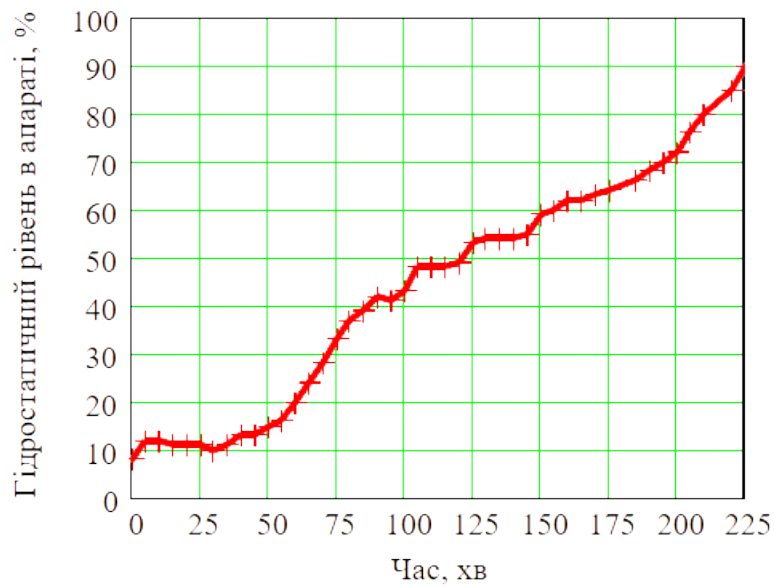


Рис. 1.3. Графік зміни гідростатичного рівня протягом циклу

Визначення витрати пари проводилася шляхом вимірювання кількості конденсату в i -тий момент часу.

$$D_{\text{парі}} = G_{\text{конд}_i}$$

Вимірювання витрати конденсату проводилося за допомогою двох витратомірів з періодичністю 5 хвилин. Після обробки дослідних даних одержали графік зміни витрати конденсату (пари) протягом циклу варіння утфеля I продукту (рис. 1.4).

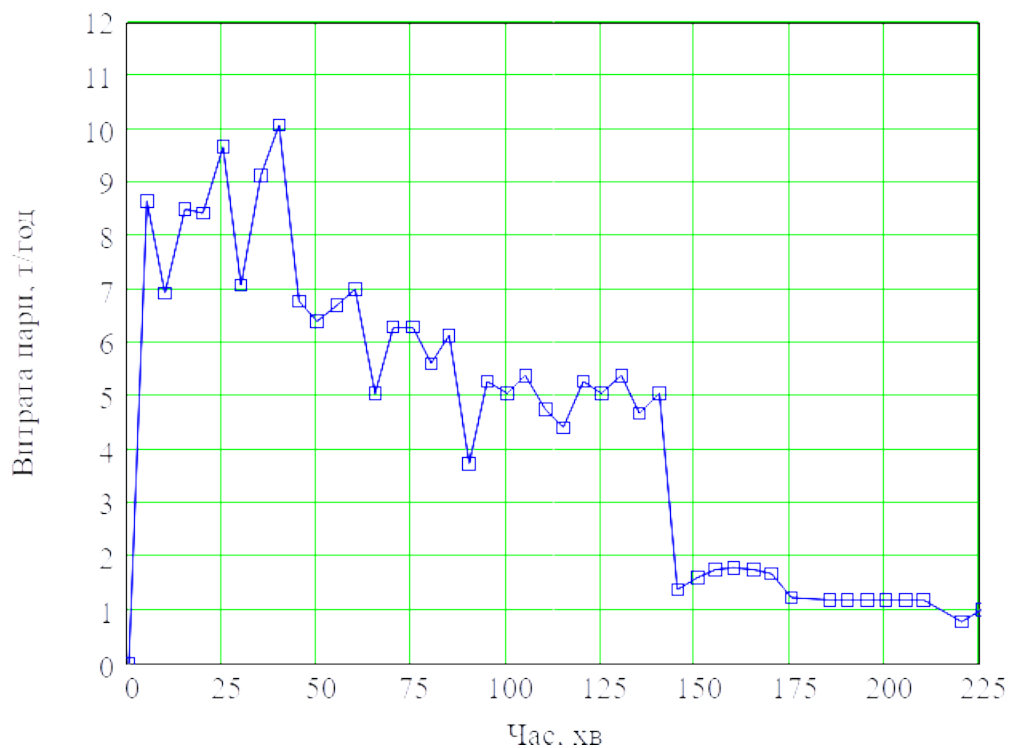


Рис. 1.4. Експериментальний графік зміни витрати конденсату (пари) протягом циклу варіння утфелю I продукту

Отримані авторами [1] результати дослідження вакуум-апарата для уварювання утфелю 1 кристалізації ВАЦМ-40 з механічними циркуляторами виробництва ТОВ «Фірма ТМА» підтвердили, що уварювання утфеля 1-го продукту складається із ряду послідовних стадій. Порядок виконання стадій наступний: 1 – набір апарата розчином для уварювання; 2- згущення; 3- заведення кристалів (кристалоутворення); 4 – рости 1–4 під час яких виконується підживлення розчином; 5 – відтік, коли підживлення виконується білою патокою; 6 – уварювання; 7 – утримання; 8 – вивантаження; 9 – пропарювання; 10 – набір вакууму. Час циклу становив 225 хв.

Об'єднавши деякі послідовні стадії процесу виділено чотири характерні періоди споживання пари:

- 1 період (0-30хв) – це стадії згущення, кристалоутворення;
- 2 період (30 хв- 75 хв) – це стадії Ріст1;
- 3 період (75 хв- 130 хв) – це стадії Ріст2,
- 4 період (130 хв- 225 хв) – це стадії Ріст3, Ріст4, відтік, утримання.

Інтерполюючи поліноми зміни витрати пари отримаємо лінійні залежності у вигляді рівняння кривої

$$D_{\text{пари}}(\tau_i) = k_j \cdot \tau_i + b_j \quad (1.32)$$

де k_j , b_j - коефіцієнти рівняння прямої j -го періоду

№ п.п.	№ періоду	Коефіцієнт k_j	Коефіцієнт b_j
1	Перший період	0,041	7,218
2	Другий період	-0,085	11,1
3	Третій період	-0,016	5,3
4	Четвертий період	-0,041	7,3

В результаті графік витрати пари на вакуум-апарати матиме вигляд



Рис. 1.5. Змодельований графік зміни витрати пари протягом циклу варіння утфеля I продукту

На рис. 1.6 зображені графіки зміни витрати пари на вакуум-апарат 1 продукту протягом циклу, що були визначені авторами для ВАЦМ-40, В.Д. Поповим для вакуум-апарата «Проток» та В.Н. Усиченком для вакуум-апарата БМА-50 (50 т утфеля) для різних початкових концентрацій.

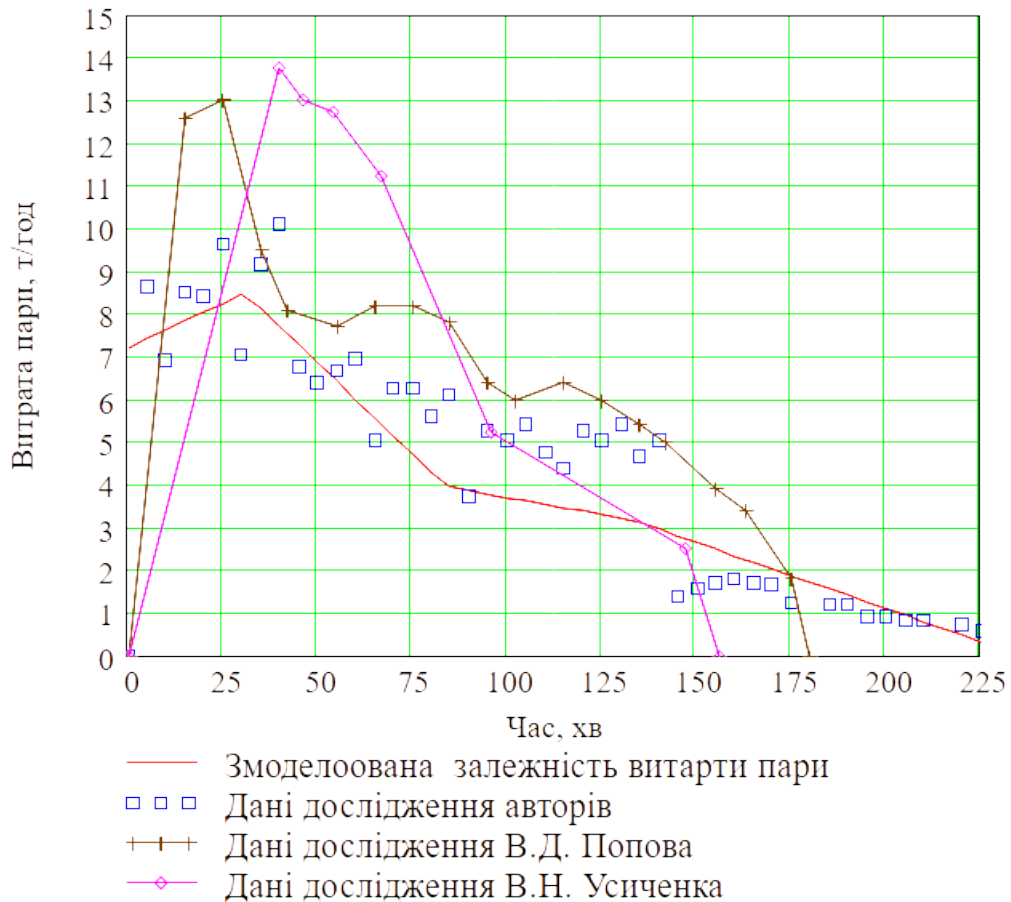


Рис. 1.6. Графіки зміни витрати пари протягом циклу варіння утфелю I продукту

Авторами [1] визначено зміну режимних параметрів роботи вакуум-апарата протягом циклу уварювання. Встановлено, що зміна витрати пари на уварювання утфеля у вакуум-апараті з вимушеною циркуляцією подібна кривій витрати пари на вакуум-апарат з природною циркуляцією [7]. Порівнюючи вище наведені графіки витрати пари на вакуум апарати можна зазначити, що у вакуум-апараті періодичної дії з вимушеною циркуляцією максимальне значення витрати пари менше ніж у вакуум-апараті з природною циркуляцією, і становить 10 т/год проти 13-14 т/год відповідно. Характер зміни витрати пари на вакуум-апарат періодичної дії з вимушеною циркуляцією більш монотонний, що призводить до зменшення впливу нерівномірності споживання пари вакуум-апаратом на зміну теплового навантаження випарного апарата, вторинною парою якого він обігривається. При цьому зменшується час перехідних процесів у випарному

апараті та у випарній станції в цілому, що як наслідок призводить до зменшення витрати пари (палива) на технологічний процес.

Час роботи вакуум-апарата періодичної дії з вимушеною циркуляцією близький до часу роботи вакуум-апарата з природною циркуляцією і становить 225 хв, але при цьому варіння утфелю проводиться з використанням цукрового сиропу з клеровкою більшої концентрацією сухих речовин (68-72 %).

Внаслідок узагальнення отриманих результатів визначено чотири характерних періоди споживання пари вакуум-апаратом. Знайдено аналітичні залежності для визначення витрати пари в і-тий момент часу циклу уварювання утфеля І кристалізації.

1.5. Методика розрахунку теплоенергоспоживання для варіння утфелю у продуктовому відділенні цукрового заводу.

Існуючі методики розрахунку витрати пари на варіння утфелю ускладнені періодичністю роботи вакуум-апаратів. Як правило, вони базуються на матеріальних і теплових балансах і враховують потреби у нагрівній парі споживачів продуктового відділення [].

1.3.3. Витрата пари на вакуум-апарати першого продукту.

Кількість води, яку слід випарувати в процесі уварювання утфелю І кристалізації, визначають з рівняння:

$$W_I = (S_{сир} + S_{кл}) \left(1 - \frac{CP_{сир}}{CP_{у_I}}\right) \quad (1.32)$$

Величину сиропу і клеровки ($S_{сир}+S_{кл}$) визначають з розрахунку напівпродуктів і продуктів, їх концентрація $CP_{сир}$. Концентрація утфелю І кристалізації $CP_{у_I}$.

Витрата пари на одержання утфелю І кристалізації

$$D_I = 1.1W_I + C_I, \quad (1.33)$$

де: C_I – враховує можливі водні підкачки в процесі варіння утфелю. Прийmemo $C_I = 10$ кг/т;

1,1- враховує істотну різницю теплоти конденсації гріної і вторинної пари.

1.3.4. Витрата пари на вакуум-апарати II продукту.

Оскільки на уварювання утфелю II кристалізації концентрацією $CP_{ут. II}$ $кр=93\%$ використовуємо перший відтік утфелю I кристалізації у кількості $S_{Iкр}^{відм1}$ кг/т концентрацією $CP_{Iкр}^{відм1} = 68.7\%$, а також другий відтік утфелю I кристалізації у кількості $S_{Iкр}^{відм2}$ кг/т концентрацією 67.6% , то кількість випареної вологи буде дорівнювати:

$$W_{2кр} = S_{Iкр}^{відм1} \left(1 - \frac{CP_{Iкр}^{відм1}}{CP_{ут. II кр}}\right) + S_{Iкр}^{відм2} \left(1 - \frac{CP_{Iкр}^{відм2}}{CP_{ут. II кр}}\right) \quad (1.34)$$

Витрата пари на вакуум-апарати II продукту складає:

$$D_{II} = 1,1 W_{2кр}. \quad (1.35)$$

1.3.5. Витрата пари на вакуум-апарати III продукту.

Утфель III кристалізації концентрацією 93.5% уварюється із загального відтоку утфелю II кристалізації у кількості $S_{ут. II кр}^{відм}$, кг/т, концентрацією $CP_{ут. II кр}^{відм} = 87,3\%$ та з афінаційного відтоку $S_{аф}^{відм}$, кг/т, концентрацією $CP_{аф}^{відм} = 78,9\%$ (кількість відтоків приймають з таблиці №2).

Тоді:

$$W_{III} = S_{ут. II кр}^{відм} \left(1 - \frac{CP_{ут. II кр}^{відм}}{CP_{ут. III кр}}\right) + S_{аф}^{відм} \left(1 - \frac{CP_{аф}^{відм}}{CP_{ут. III кр}}\right) \quad (1.36)$$

Витрата пари на вакуум-апарати III продукту дорівнює

$$D_{III} = 1,1 W_{III} + c_{III} = 1,1 W_{III} + 53 \text{ кг/т}. \quad (1.37)$$

Витрата пари на інші споживачі продуктового відділення приймається за рекомендаціями, що базуються на емпіричних (експлуатаційних) даних.

1.6. Висновки до розділу 1

Проведено аналітичний огляд робіт, присвячених технологічним особливостям процесу варіння утфелю, гідродинаміці руху та теплообміну при кипінні утфелю у вакуум-апаратах, експериментальним дослідженням теплотехнічних показників роботи вакуум-апаратів періодичної дії з природною

циркуляцією і з механічними циркуляторами, розглянуто діючі методики розрахунку теплоенергоспоживання для варіння утфелю у відділенні кристалізації цукрового заводу.

Для опису фізичної моделі і перевірки адекватності математичної моделі кристалізаційного відділення наявних в літературі дослідних даних недостатньо через складність об'єкта таких досліджень, обумовлену специфікою тепломасообмінних процесів в трьохфазних середовищах під час кристалізації, різноманітність конструктивних рішень апаратів та їх продуктивностей, що впливають на ці процеси.

Проаналізовані результати експериментальних досліджень процесів тепло- та масообміну, які відбуваються в вакуум-апараті періодичної дії з природною та вимушеною циркуляцією, що реалізована шляхом встановлення мішалки з електроприводом.

Існуючі методики розрахунку теплоенергоспоживання для варіння утфелю у відділенні кристалізації цукрового заводу базуються на матеріальних і теплових балансах. Результатом розрахунку є визначення потрібної витрати пари для нагрівання споживачів цього відділення.

Оскільки найбільшими споживачами пари є апарати першої кристалізації, оптимізація їх енергозабезпечення є ключовим заходом підвищення енергоефективності виробництва та зниження питомих енергетичних витрат.

2. ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ ВАКУУМ-АПАРАТА ПЕРІОДИЧНОЇ ДІЇ З МЕХАНІЧНИМИ ЦИРКУЛЯТОРАМИ ДЛЯ ВАРІННЯ УТФЕЛЮ 1 ПРОДУКТУ

2.1. Вплив режиму роботи вакуум-апаратів I кристалізації на ефективність енергоспоживання цукрового виробництва

Режим роботи вакуум-апаратів значною мірою впливає на продуктивність та енергоспоживання продуктового відділення і цукрового заводу, тому ефективність процесів, що відбуваються в них, дуже важлива для оптимізації роботи цукрового виробництва.

Вакуум-апарати є найбільшим споживачем вторинної пари з випарної установки, тому зміна її витрати суттєво впливає на величину відпуску пари з ТЕЦ на технологічні потреби.

Як правило, вакуум-апарати I кристалізації є теплообмінними апаратами періодичної дії, вони працюють циклічно, споживаючи на кожній з чотирьох послідовних стадій варіння утфелю різну кількість нагрівної пари. Це, відповідно, призводить до коливань продуктивності випарної установки, які повинна гасити система автоматичного керування. Але можливості цієї системи не завжди дозволяють компенсувати коливання продуктивності і стабілізувати навантаження, що викликає неритмічність роботи всієї системи теплоенергоспоживання, включаючи і ТЕЦ.

Перспективним є розроблення математичних моделей вакуум-апаратів періодичної дії і всього відділення кристалізації, що дає можливість знайти відповіді на питання, пов'язані з оптимізацією роботи вакуум-апаратів періодичної дії, поліпшенням процесу уварювання утфелю і переходом від періодичного процесу до безперервного.

Розроблені ряд математичних моделей процесу варіння утфелю у ВАПД [], які враховують взаємозв'язані процеси гідродинаміки, тепло- і масообміну, що відбуваються під час кристалізації цукру в апараті з підвісною нагрівною камерою.

Математична модель ВАПД [6] є ефективним засобом для дослідження процесу кристалізації. Вона дозволяє:

- визначати оптимальний режим варіння продукту;
- оптимізувати конструктивні параметри апаратів;
- оптимізувати структури кристалізаційного відділення цукрового заводу.

Згідно з дослідними даними В.Д. Попова [7], що були отримані на цукрових заводах України, було проведено аналіз залежності показників роботи продуктового відділення та безпосередньо ВА I продукту.

Вихідними даними для розрахунку є:

- величина початкової концентрації сиропу і клеровки – $СР_{\text{поч}}$;
- температура нагрівної пари - $t_{\text{гп}}$;
- величина вакууму – V ;
- чистота- $Ч$.

2.2. Вихідні дані для розрахунку оптимальної тривалості варіння утфеля I кристалізації та теплотехнічних показників процесу

Продуктивність заводу $A_{\text{заводу}} := 2000 \frac{\text{т}}{\text{добу}}$
 $СР_{\text{поч}} := 68$

Початкова концентрація сиропу, %

Чистота сиропу, %, становить $Ч = 90$;

Кількість утфелю у ВА становить, т $S_{\text{ва}} = 40$;

Площа поверхні нагрівання вакуум-апарата I кристалізації: $F := 194 \cdot \text{м}^2$

Кількість водних підкачок $G_{\text{ВП}} := 3 \cdot \%$

2.3. Визначення оптимальної тривалості варіння утфеля I кристалізації

Оптимальний час варіння апарату $\tau_{\text{ц}}$ залежить від:

- якості вихідного продукту ($Ч$);
- початкової концентрації сиропу і клеровки;
- типу варіння (вручну чи автоматом);

Виконаємо згідно з методикою В.Д. Попова [7] визначення кількості випареної вологи в і-ий момент часу у ВА І продукту в залежності від початкових даних наведених вище.

Оптимальний час варіння апарату $\tau_{\text{Ц}}$ залежить від якості (чистоти) вихідного продукту (Ч); початкової концентрації сиропу і клеровки; типу варіння (вручну чи автоматом) та інших чинників.

Приймаємо:

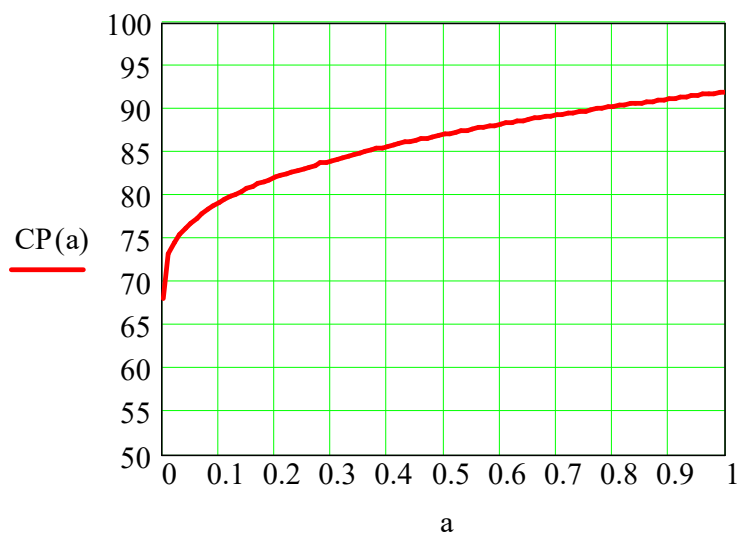
Початкова концентрація сиропу, %

Чистота сиропу становить у часі за даними [7] та отриманою апроксимованою функцією $CP(a)$

$$CP(a) := CP_{\text{поч}} + CP_{\text{поч}} \cdot (1 - 0.647) \cdot a^{\frac{1}{3}}$$

Час циклу, год

$$\tau_{\text{Ц}} := \left[50 + \frac{745 \cdot (1 - \text{Ч})}{\text{Ч} - 0.385} \right] \cdot \text{хв} \quad \tau_{\text{Ц}} = 194.66 \text{ хв}$$



$$\begin{aligned}
 CP(a_0) &= 68 \\
 CP(1) &= 92.004 \\
 n &:= 31 \\
 ii &:= 0..n-1 \\
 nn &:= n-1
 \end{aligned}$$

Рис. 2.1. Зміна концентрації утфелю залежить від часу варіння

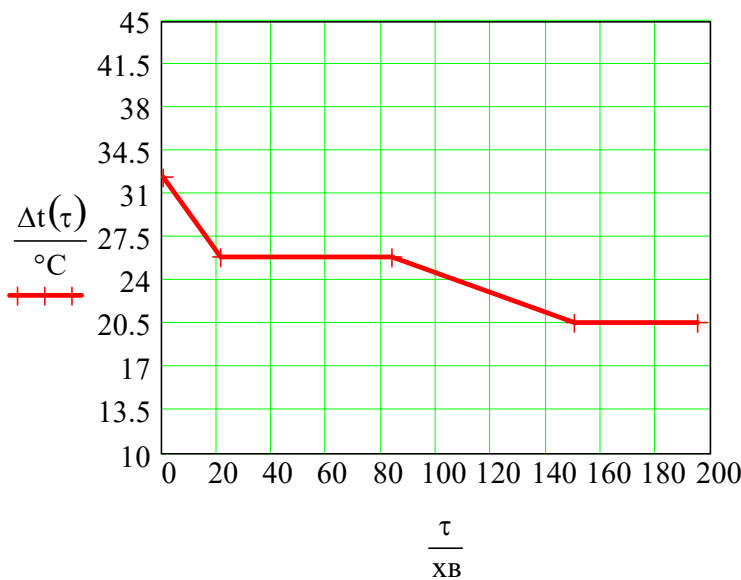
$$a = \frac{\tau_i}{\tau_{\Pi}}$$

де а – відношення і-го часу до часу циклу

2.4. Визначення теплотехнічних показників процесу під час варіння утфелю

Корисна різниця температур становить $\Delta t(\tau) := t_{гр}(\tau) - \left(t_{вт}(\tau) + \Delta y \left(CP \left(\frac{\tau}{\tau_{\Pi}} \right) \right) \right)$

Закон зміни температури утфелю залежить від часу варіння та величини розрідження за інтерполяційною кривою $t_y(B,t)$ [7]



$$\Delta t(\tau) = \begin{pmatrix} 32.4 \\ 25.821 \\ 25.911 \\ 20.5 \\ 20.596 \end{pmatrix} \text{ } ^\circ\text{C}$$

Рис. 2.2. Зміна корисної різниці температур під час варіння утфелю

Коефіцієнт теплопередачі залежить від часу варіння визначається за інтерполяційною кривою

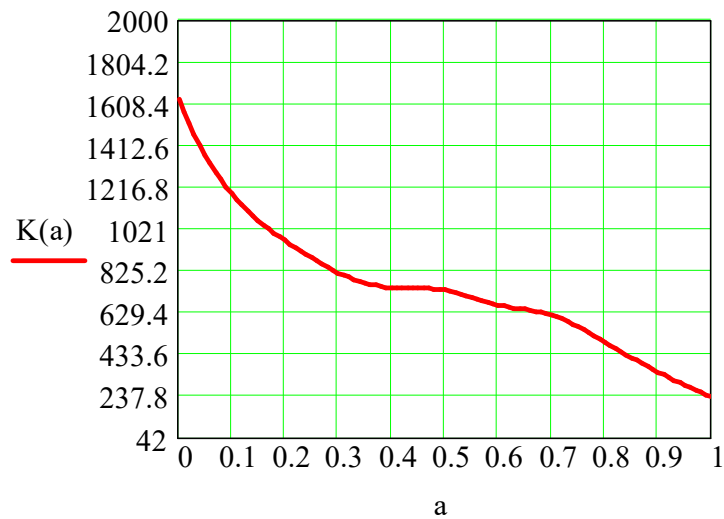
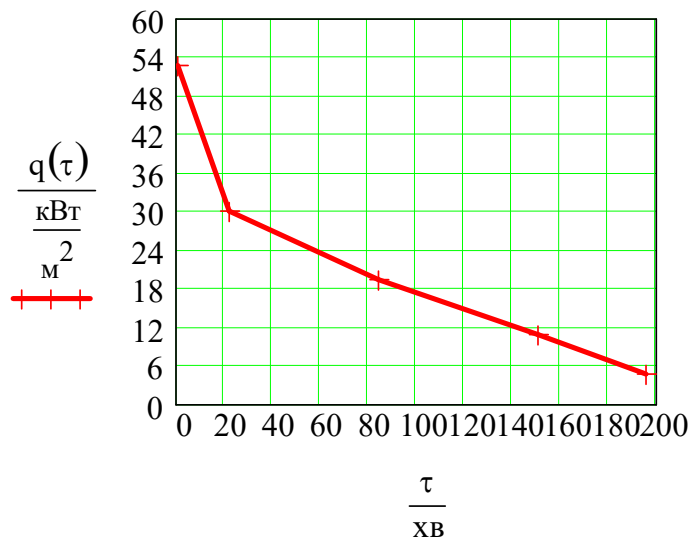


Рис. 2.3. Зміна коефіцієнта теплопередачі під час варіння утфелю

$$q(\tau)_{\text{Тепловий потік}} = K(\tau) \Delta t(\tau)$$

становитиме



$$q(\tau) = \begin{pmatrix} 52.754 \\ 29.872 \\ 19.206 \\ 10.877 \\ 4.754 \end{pmatrix} \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$$

$$\frac{\tau_{n-1}}{\tau_{\text{ц}}} = 0.781$$

Рис. 2.4. Зміна густини теплового потоку під час варіння утфелю

Кількість утфелю у ВА становить, кг

$$S_{\text{ва}} := 40 \cdot \tau$$

Кількість звареного утфелю на даний момент при

$$\phi := 61\%$$

$$S_y := S_{\text{ва}} \cdot \phi$$

$$S_y = 24.4 \text{ т}$$

$$n := \text{rows}(\tau)$$

$$n = 5$$

СР утфелю на даний момент, %

$$СР_y := СР \left(\frac{\tau_{n-1}}{\tau_{II}} \right)$$

Загальна кількість переробленого сиропу ВА становить, кг

$$S_{II} := \frac{S_y \cdot СР_y}{СР_{Поч}}$$

Загальна кількість випареної води становитиме

$$СР_y = 92.018$$

$$S_{II} = 33.018 \text{ т}$$

$$W_K := S_{II} - S_y$$

$$W_K = 8.618 \text{ т}$$

Звідси кількість випареної води в і-тий момент часу становитиме

$$W(\tau) := \frac{q(\tau)}{\sum q(\tau)} \cdot W_K$$

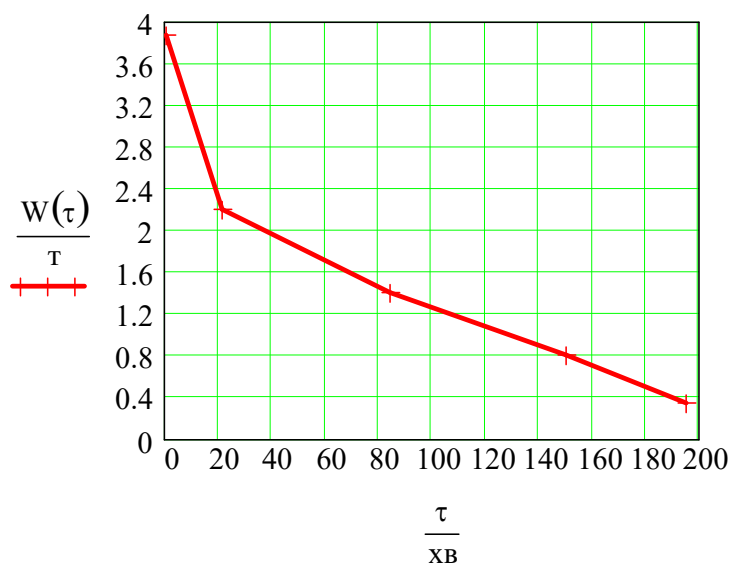


Рис. 2.5. Зміна паропроодуктивності під час варіння утфелю

Питома теплота конденсації нагрівної пари

$$r_{п}(\tau) := \overrightarrow{wspRST} \left(\frac{t_{гр}(\tau)}{^{\circ}\text{C}} + 273 \right) \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

Витрата нагрівної пари під час циклу варіння:

$$D_p(\tau) = \begin{pmatrix} 16.383 \\ 9.278 \\ 5.979 \\ 3.378 \\ 1.473 \end{pmatrix} \frac{\text{Т}}{\text{ГОД}}$$

$$D_p(\tau) := \frac{\overrightarrow{q(\tau)} \cdot F}{r_{п}(\tau)}$$

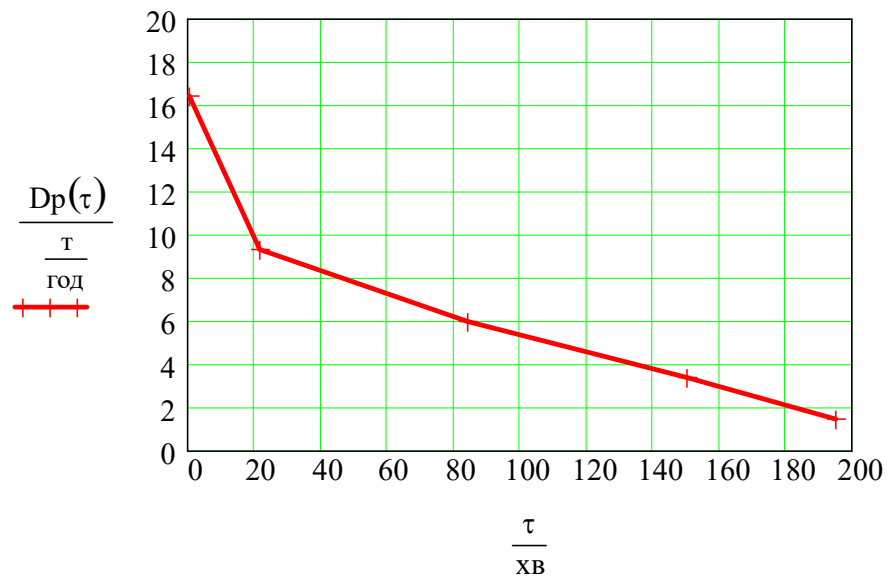


Рис. 2.6. Витрата нагрівної пари під час циклу варіння

$$G_{ВП} := 3 \cdot \%$$

Додаткова кількість внесеної води

$$G_w := G_{ВП} \cdot A_{заводу} \cdot \left(\frac{\phi}{100} \cdot \tau_{Ц} \right) \quad G_w = 0.049 \text{ т}$$

Розрахункова кількість спожитої пари

$$W_p := 1.07 \cdot \left(\int_0^{\tau_{n-1}} D_p(\tau) d\tau + Gw \right)$$

$$W_p = 19.609 \tau$$

Розрахунок витрати нагрівної пари на вакуум-апарат I кристалізації протягом циклу уварювання:

$$D_{pp1}(\tau) := \frac{D_p(\tau)}{\frac{\text{kg}}{\text{s}}} \quad D_{pp2}(i) := \frac{D_p(\tau)}{\frac{\text{kg}}{\text{s}}} \quad D_{pp3}(i) := \frac{D_p(\tau)}{\frac{\text{kg}}{\text{s}}}$$

$$i := 0..8$$

$$D_{pp1}_i := \begin{cases} D_i & \text{if } 0 \leq i < 4 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \cdot \frac{\text{tonne}}{\text{hr}} \quad D_{pp2}_i := \begin{cases} D_{i-2} & \text{if } 2 \leq i < 6 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \cdot \frac{\text{tonne}}{\text{hr}}$$

$$D_{pp3}_i := \begin{cases} D_{i-4} & \text{if } 4 \leq i < 8 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \cdot \frac{\text{tonne}}{\text{hr}}$$

$$D_{pp1} = \begin{pmatrix} 14 \\ 17 \\ 7.75 \\ 5.23 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \frac{\text{tonne}}{\text{hr}} \quad D_{pp2} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 14 \\ 17 \\ 7.75 \\ 5.23 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \frac{\text{tonne}}{\text{hr}} \quad D_{pp3} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 14 \\ 17 \\ 7.75 \\ 5.23 \\ 0 \end{pmatrix} \frac{\text{tonne}}{\text{hr}}$$

$$D_{med0_i} := \frac{\sum_{i=0}^4 D_{pp1_i}}{5}$$

$$D_{med0} = \frac{\begin{pmatrix} 8.796 \\ 8.796 \\ 8.796 \\ 8.796 \\ 8.796 \\ 8.796 \\ 8.796 \\ 8.796 \\ 8.796 \end{pmatrix}}{\text{hr}} \text{ tonne}$$

Споживання пари одним апаратом I кристалізації наведено на рис.2.7. Найбільше споживання нагрівної пари характерне для першого і другого періодів циклу, а в подальшому воно зменшується. Різниця між найбільшою і найменшою витратою пари дуже суттєва. Джерелом нагрівної пари є вторинна пара другого або третього корпусів випарної установки. Зміна витрати цієї пари призводить до зміни продуктивності установки і, відповідно, до зміни концентрації сиропу. Коливання споживання пари впливають на ефективність роботи системи автоматичного керування випарною установкою і на стабільність виробництва теплової і електричної енергії в ТЕЦ, тому уварювання утфелю I кристалізації одним вакуум-апаратом є малоефективним.

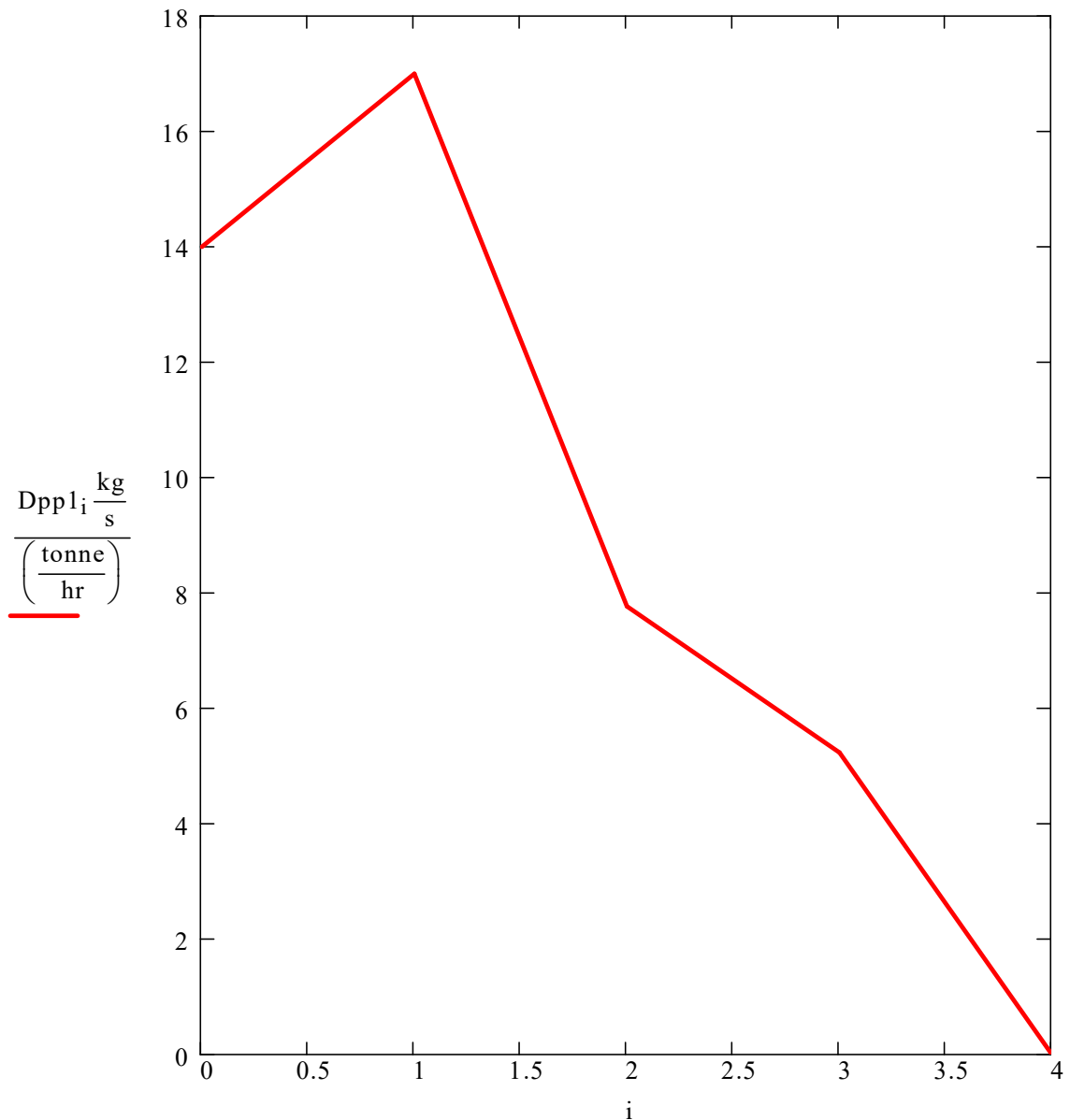


Рис. 2.7. Зміна витрати нагрівної пари на вакуум-апарат I кристалізації протягом періоду циклу уварювання.

Суттєво покращує стабільність роботи випарної установки і її системи автоматичного керування використання декількох вакуум-апаратів для уварювання утфелю I кристалізації. На рис 2.8. показані результати розрахунку витрати пари для заданих нами умов виробництва, коли для підвищення рівномірності споживання вторинної пари випарної установки використовуються два вакуум-апарати продуктивністю 40 т.

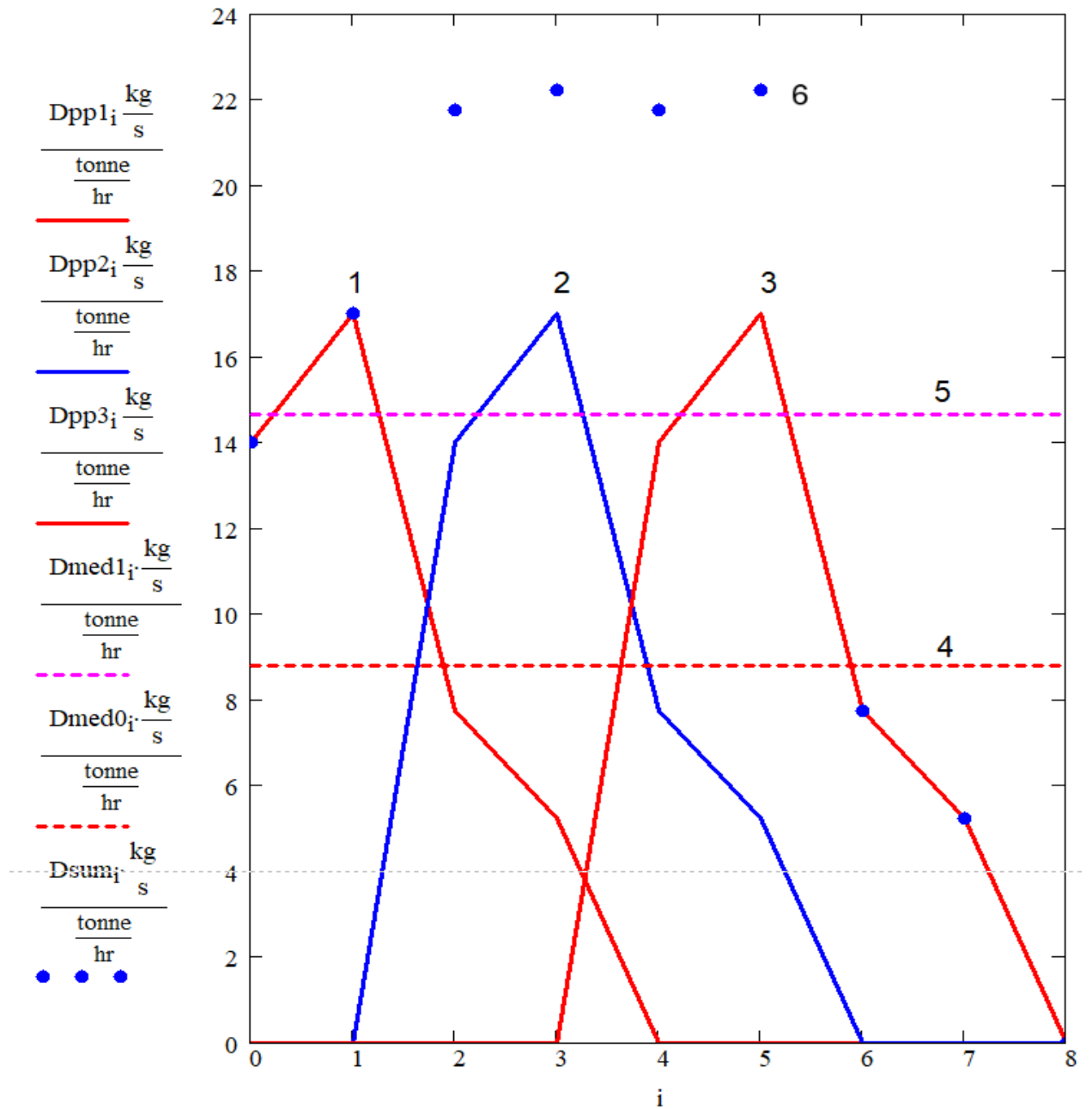


Рис. 2.8. Зміна витрати нагрівної пари на вакуум-апарати I кристалізації

1 – в/а № 1; 2 – в/а № 2; 3 – в/а № 1; 4 – середня витрата пари для одного працюючого апарата; 5 – середня витрата пари для двох працюючих апаратів; 6 – сумарна витрата пари для двох працюючих апаратів.

ВИСНОВКИ

Проведено аналіз літературних джерел за темою кваліфікаційної роботи. На базі існуючих моделей та експериментальних даних розроблена методика розрахунку фактичних теплотехнологічних показників процесу уварювання утфелю першої кристалізації у вакуум-апаратах періодичної дії.

Використовуючи розроблену методику для бурякоцукрового заводу продуктивністю 2000 т перероблення буряків за добу визначено: фактичну тривалість циклу варіння; фактичні значення витрат теплоти і пари та інших теплотехнологічних параметрів, необхідних для проведення технологічного процесу варіння утфелю першої кристалізації у вакуум-апаратах періодичної дії з механічними циркуляторами продуктивністю 40 т.

Визначено зміну режимних параметрів роботи вакуум-апарата протягом кожного з чотирьох характерних періодів циклу варіння, що відрізняються споживанням нагрівної пари.

Для підвищення рівномірності споживання пари з випарної установки відділенням кристалізації запропоновано режим варіння утфелю першої кристалізації двома апаратами періодичної дії, розраховано графік їх включення у роботу та споживання пари всіма працюючими вакуум-апаратами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бойко В.О., Масліков М.О, Петренко В.П., Прядко М.О.
Експериментальне визначення теплотехнічних показників роботи вакуум-апаратів 1 продукту періодичної дії з механічними циркуляторами. – Цукор України, №2(58) – 2010.-с. 45-48
2. Бойко В.О., Масліков М.О, Прядко М.О. Визначення концентрації і температури дифузійного соку. – К. Наукові праці НУХТ., № 18 - 2006 р. – с.86-89.
3. Гулый И.С. Непрерывная варка й кристаллизация сахара: Теоретические и экспериментальные разработки. — М.: Пищ. Пром-сть, 1976. — 269 с.
4. Интенсификация процесса уваривания утфелей / В.Т. Горяжа, В.Р. Кулинченко, Ю.Г. Артюхов, Б.Г. Дидушко М.. Легкая и пищ. пром-сть, 1981. – 152с.
5. Павелко, В. І. Інтенсифікація процесів тепломасообмінну і гідродинаміки у вакуум-апаратах цукрового виробництва / В. І. Павелко, Д. В. Потапський // Наукові праці НУХТ. - 2010. - № 32. - С. 39-43.
6. Петренко В.П., Прядко М.О. Бойко В.О. Моделювання впливу нерівномірності споживання вакуум-апаратами на роботу випарної установки. – «Цукор України», № 12 – 2011 р. – с. 24–30
7. Попов В.Д. Основы теории тепло- и массообмена при кристаллизации сахарози. — М.: Пищ. пром-сть, 1973.—320с.
8. Сигорский В.П. Математический аппарат инженера. – М.: Техника, 1975. – 768с.