

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Інститут (факультет) _____ **ННІТІ ім. акад. І.С. Гулого**
Кафедра технологічного обладнання та комп'ютерних технологій проектування

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

« ___ » _____ 20__ р.

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

« ___ » _____ 20__ р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми Інжиніринг харчових виробництв

на тему: Дослідження та удосконалення вакуум-апарату А2-ПВЕ-60
продуктивністю 60 тон утфелю за одну варку

Виконав: здобувач 2 курсу, групи ОХ-2-2М

_____ Саяпін Артем Ярославович
(прізвище, ім'я, по батькові повністю)

_____ (підпис)

Керівник _____ Погорілий Тарас Михайлович
(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

_____ (підпис)

Консультанти _____
(ім'я та прізвище)

_____ (підпис)

_____ (ім'я та прізвище)

_____ (підпис)

_____ (ім'я та прізвище)

_____ (підпис)

Рецензент _____
(ім'я та прізвище)

_____ (підпис)

Я як здобувач(ка) Національного університету харчових технологій розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавав(-ла) і не одержував(-ла) недозволеної допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Здобувач _____
(підпис)

Київ – 2025 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інженерно-технічний інститут ім. акад. І.С.Гулого
Кафедра Технологічного обладнання та комп'ютерних технологій проектування
Освітній ступінь магістр
Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»
(шифр і назва)
Освітня програма «Інжиніринг харчових виробництв»
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТОКТП
проф. Микола ЯКИМЧУК

« ____ » _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Саяпін Артем Ярославович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Дослідження та удосконалення вакуум-апарату А2-ПВЕ-60 продуктивністю 60 тон утфелю за одну варку

керівник проекту (роботи) Погорілий Тарас Михайлович, доц., кандидат тех. наук
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом закладу вищої освіти від «17» вересня 2025 р. № 712-кс

2. Строк подання здобувачем роботи 01.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи 1. Технічний паспорт обладнання.
2. Альбом галузевого обладнання. 3. Навчальна та спеціальна література

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Реферат; Зміст; Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів (за необхідністю); Вступ; Аналіз сучасного стану об'єкта дослідження, вибір і обґрунтування основного напрямку дослідження; Розробка нового технічного рішення об'єкта дослідження; Дослідна частина та узагальнення результатів; Розрахункова частина; Принципи автоматизованого управління об'єктом проектування; Заходи з охорони праці та охорони довкілля; Маркетингове обґрунтування проекту; Висновки; Список використаних джерел; Додатки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
Загальний вигляд вакуум-апарату та його окремих частин – 4 аркуші; Схема автоматизаційного управління – 1 аркуш; Технологічна карта збирання вузла – 1 аркуш, Наукова частина – 6 аркушів.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання: 18.09.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>	18.09.2025	
2	<i>Аналіз сучасного стану об'єкта дослідження, вибір і обґрунтування основного напрямку дослідження</i>	20.09.2025	
3	<i>Розробка нового технічного рішення об'єкту дослідження</i>	25.09.2025	
4	<i>Дослідна частина та узагальнення результатів</i>	18.10.2025	
5	<i>Розрахункова частина</i>	26.10.2025	
6	<i>Принципи автоматизованого управління об'єктом проектування</i>	28.10.2025	
7	<i>Заходи з охорони праці та охорони довкілля</i>	01.11.2025	
8	<i>Маркетингове обґрунтування проекту</i>	05.11.2025	
9	<i>Висновки</i>	10.11.2025	
10	<i>Список використаних джерел</i>	12.11.2025	
11	<i>Додатки</i>	15.11.2025	
12	<i>Графічна частина формату А1 – 10 шт.</i>	18.11.2025	
13	<i>Подача кваліфікаційної роботи на кафедру</i>	01.12.2025	

Здобувач

_____ (підпис)

Саяпін А.Я.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Погорілий Т.М.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота на тему «Дослідження та удосконалення вакуум-апарату А2-ПВЕ-60 продуктивністю 60 тон утфелю за одну варку» подана на здобуття ОС «Магістр» зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування», освітньої програми «Інжиніринг харчових виробництв».

Робота присвячена підвищенню ефективності процесу уварювання цукрового сиропу у вакуум-апаратах.

Об'єкт дослідження – гідродинаміка та теплопередача сиропу в теплообмінній трубці грючої камери вакуум-апарата, предмет дослідження – теплообмінна трубка.

Створено 3D-моделі гладкої та профільованих труб, а також імітаційну CFD-модель у середовищі Autodesk CFD. Чисельне моделювання проведено на основі методу кінцевих об'ємів, рівнянь Нав'є–Стокса та $k-\epsilon$ моделі турбулентності з рахуванням теплообміну, фізичних властивостей модельних середовищ, заданих граничних умов.

Результати дослідження показали, що трубки з трапецевидною накаткою забезпечують найбільшу інтенсифікацію теплообміну та формування рівномірнішого температурного поля. На основі отриманих даних запропоновано удосконалену конструкцію вакуум-апарата А2-ПВЕ-60, що сприяє підвищенню ефективності уварювання, зменшенню енерговитрат.

Ключові слова: цукровий сироп, уварювання, вакуум-апарат, теплопередача, гідродинаміка, теплообмінна трубка, CFD-моделювання.

<i>Відповідальна організація</i> НУХТ	<i>Технічне узгодження</i> Погорілий Т.М.	<i>Вид документа</i> Пояснювальна записка		<i>Статус документа</i>		
<i>Власник документа</i> НУХТ	<i>Розробник документа</i> Саяпін А.Я.	<i>Назва, додаткова назва</i> Кваліфікаційна робота	240257.КР.19.000.ПЗ			
	<i>Документ затверджено</i> Якимчук М.В.		<i>Інд. змін.</i>	<i>Дата видання</i>	<i>Мова</i> UA	<i>Аркуш</i> 3/97

ABSTRACT

The qualification thesis titled “Research and improvement of the vacuum apparatus A2-PVE-60 with a capacity of 60 tons of massecuite per cooking” is submitted for obtaining the Master’s degree in the specialty 133 “Branch Mechanical Engineering”, educational program “Engineering of Food Production”.

The work is devoted to improving the efficiency of the sugar syrup boiling process in vacuum pans.

The object of the study is the hydrodynamics and heat transfer of syrup in the heat-exchange tube of a vacuum pan heating chamber, the subject is the design of the heat-exchange tube.

Includes the development of 3D models of smooth and profiled tubes, as well as a CFD simulation model in Autodesk CFD. Numerical modeling was performed based on the finite volume method, Navier–Stokes equations, and the $k-\epsilon$ turbulence model, taking into account heat transfer, physical properties of model media, and specified boundary conditions.

The results showed that tubes with a trapezoidal knurling profile provide the greatest intensification of heat transfer and a more uniform temperature field. Based on the data obtained, we offer an improved design of the A2-PVE-60 vacuum apparatus, which helps increase boiling efficiency and reduce energy consumption.

Keywords: sugar syrup, boiling, vacuum pan, heat transfer, hydrodynamics, heat-exchange tube, CFD simulation.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	
1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ОБ’ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ, ВИБІР І ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	
1.1. Огляд літературних джерел, аналіз прогресивних конструкційних рішень.....	
1.2. Обґрунтування актуальності дослідження, формулювання мети та завдання дослідження.....	
1.3. Висновки.....	
2. РОЗРОБКА НОВОГО ТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ ОБ’ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	
2.1. Постановка завдань нового технічного рішення, визначення необхідних технічних параметрів, розробка і опис нового технічного рішення, устрій та принцип його роботи.....	
2.2. Висновки.....	
3. ДОСЛІДНА ЧАСТИНА ТА УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	
3.1. Об’єкт та предмет досліджень.....	
3.2. Опис імітаційної моделі об’єкту досліджень.....	
3.3. Результати проведених досліджень.....	
3.4. Устрій та принцип роботи модернізованого об’єкту проектування.....	
3.5. Висновки.....	
4. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА.....	
4.1. Технологічний та конструктивний розрахунок вакуум-апарата.....	
4.2. Підбір конструкційних матеріалів.....	
4.3. Технологія машинобудування.....	
4.4. Правила монтажу та технічного сервісу модернізованого обладнання....	
5. ПРИНЦИПИ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ОБ’ЄКТОМ ПРОЕКТУВАННЯ.....	

6. ЗАХОДИ З ОХОРОНИ ПРАЦІ ТА ОХОРОНИ ДОВКІЛЛЯ.....

6.1 Заходи з охорони праці.....

6.2 Заходи з охорони довкілля.....

7. МАРКЕТИНГОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ.....

ВИСНОВКИ.....

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....

ВСТУП

Постійна конкуренція на товарних ринках вимагає від підприємств безперервного вдосконалення технологій виробництва, що забезпечують отримання високоякісної та конкурентоспроможної продукції. Це повною мірою стосується і цукрової промисловості – однієї із стратегічно важливих галузей харчової промисловості України. Сучасний етап розвитку цукрової галузі характеризується потребою значного скорочення витрат природних ресурсів, передусім природного газу та електроенергії, необхідних для виробництва цукру [10, 14, 17].

Комплекс енергозберігаючих заходів на цукрових заводах є досить широким і здебільшого має теплотехнічний характер, оскільки безпосередньо впливає на такі ключові технологічні показники, як вихід і якість цукру. Відомо, що за умови дотримання нормативної відкачки дифузійного соку найбільш суттєву економію паливно-енергетичних ресурсів можна забезпечити саме в продуктовому відділенні заводу [10].

Одним з найбільш енергомістких процесів у технологічній схемі виробництва є уварювання сиропу з метою кристалізації сахарози. Після сульфатації та фільтрування сироп надходить до вакуум-апаратів, де за температури близько 70 °С з нього випаровується вода, утворюючи пересичений розчин, у якому виділяються кристали цукру. Продукт уварювання – суміш кристалів сахарози та міжкристальної патоки – називається утфелем. Робота вакуум-апаратів за знижених температур дозволяє не лише запобігти термічному розкладу цукрози, але й підвищити ефективність теплопередачі завдяки збільшенню корисної різниці температур між гріючою парою та киплячим сиропом [15].

З огляду на те, що уварювання сиропу є найбільш ресурсомістким процесом щодо споживання гріючої пари, підвищення інтенсивності теплообміну у вакуум-апаратах є **актуальним завданням**.

Об'єкт дослідження – гідродинаміка та процес теплопередачі

цукрового сиропу в теплообмінній трубці гріючої камери вакуум-апарата А2-ПВЕ-60.

Предмет дослідження – теплообмінна трубка.

Мета роботи – удосконалення вакуум-апарату А2-ПВЕ-60 продуктивністю 60 тон утфелю за одну варку

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати основні чинники, що впливають на інтенсивність теплопередачі в трубчастих гріючих камерах вакуум-апаратів.
2. Розробити цифрові 3D-моделі теплообмінних труб: гладкої, з різним профілем накатки.
3. Створити імітаційну модель об'єкта досліджень.
4. Провести CFD-моделювання та визначити вплив профілю накатки на гідродинаміку та теплообмін у них.
5. Удосконалити вакуум-апарат А2-ПВЕ-60 з використанням теплообмінних труб із накаткою.

Наукова новизна:

1. У середовищі програмного забезпечення Autodesk CFD із застосуванням чисельного методу кінцевих об'ємів, рівнянь Нав'є-Стокса, $k-\epsilon$ моделі турбулентності, а також з урахуванням конвективного теплообміну, фізичних властивостей модельних середовищ і заданих граничних умов побудовано імітаційну CFD-модель об'єкта дослідження.
2. Створена модель дала змогу відтворити гідродинамічні та теплові процеси в теплообмінних трубках різної конструкції: гладкій та з профілем накатки прямокутної, сферичної, трикутної і трапецевидної форми.
3. Результати чисельного аналізу показали, що трубки з трапецевидним профілем накатки забезпечують найбільшу інтенсифікацію теплообміну, що проявляється в підвищенні швидкості руху сиропу поблизу стінки та формуванні більш рівномірного температурного поля по перерізу трубки.

Практична цінність роботи полягає у пропозиції удосконаленої

конструкції вакуум-апарата А2-ПВЕ-60 із модернізованою гріючою камерою, оснащеною теплообмінними трубками з трапецевидним профілем накатки, що забезпечує підвищення ефективності процесу уварювання та сприяє зниженню енерговитрат.

За результатами досліджень **опубліковано** тези: Саяпін А., Погорілий Т. Дослідження процесу гідродинаміки модернізованої гріючої камери вакуум-апарата. *Матеріали 91-ї Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів "Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті"*, 7–11 квітня 2025 р. – Київ: НУХТ, – Ч.2. С. 138

1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ, ВИБІР І ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Огляд літературних джерел, аналіз прогресивних конструкційних рішень.

Після очищення дифузійного соку в ньому міститься близько 15% СР (сухих речовин). Щоб отримати сахарозу в кристалічному вигляді шляхом кристалізації з пересиченого розчину, його необхідно згустити, тобто видалити зайву вологу (воду). Видалення води відбувається за рахунок випарювання.

Випарювання – це масообмінний та теплофізичний процес, у якому рідина перетворюється в пару за рахунок підведення тепла. Фізично випарювання є фазовим переходом першого роду: речовина змінює агрегатний стан із рідкого на газоподібний, не змінюючи хімічної природи.

Температура кипіння рідини залежить від тиску. В умовах вакууму кипіння відбувається за температур, значно нижчих за 100 °С. У точці кипіння тиск насиченої пари над рідиною дорівнює зовнішньому тиску. При подальшому підведенні тепла енергія не підвищує температуру, а витрачається на питома випаровування (теплоту пароутворення), яка становить для води ≈ 2260 кДж/кг при 100 °С.

Основні закономірності процесу

Кількість теплоти, необхідної для випаровування:

$$Q = mr$$

де: Q – кількість тепла, Дж;

r – питома теплота пароутворення, Дж/кг;

m – маса випареної рідини, кг.

Швидкість випаровування залежить від: температури кипіння, градієнта температури між теплоносієм і продуктом, площі теплообміну,

теплопровідності рідини, інтенсивності циркуляції.

Закон теплопровідності Фур'є:

$$Q=kA\Delta T$$

де: q – тепловий потік, Вт;

k – коефіцієнт теплопередачі;

A – площа теплообміну;

ΔT – різниця температур.

У міру зростання концентрації сухих речовин у розчині: підвищується в'язкість, знижується коефіцієнт теплопередачі, утворюється кірка (інкрустація) на теплообмінних поверхнях. Це знижує ефективність випаровування, тому важливо забезпечувати інтенсивну циркуляцію або перемішування.

Видалення води із цукрового соку проводиться у два етапи:

– спочатку видаляють воду на випарній установці до вмісту сухих речовин у сиропі 65-70%;

– після фільтрації сироп направляють у вакуум-апарати для уварювання утфелю, де концентрацію сухих речовин доводять до 92-94%.

Причиною дворазового випарювання води з соку є те, що у випарній установці при видаленні води з соку та збільшенні його концентрації розчинність деяких нецукрів знижується, і вони випадають в осад, тому їх необхідно видалити шляхом фільтрації сиропу. Крім того, при знаходженні у випарній установці колір сиропу збільшується, тому його необхідно додатково знебарвити шляхом сульфитації і також піддати фільтрації.

Процес згущення соку здійснюється у випарних установках, що складаються з окремих корпусів (випарних апаратів). Завдяки багаторазовому використанню тепла такі установки дозволяють знизити витрати пари на згущення соку до 40–50% від маси переробленого буряку. Для порівняння: при випаровуванні соку в одному апараті без повторного використання тепла, на

випаровування 1 кг води знадобилося б приблизно 1 кг гріючої пари, що призвело б до витрат пари на рівні 90–100% від маси буряку.

Згідно з дослідженнями [10, 14], підвищення концентрації сиропу перед уварюванням дозволяє суттєво зменшити витрати пари. Проте надмірне згущення сиропу потребує додаткових підкачок (водяних або сиропних) для розчинення "муки", що може призвести до збільшення загального споживання теплової енергії.

Оптимальна концентрація сиропу перед уварюванням є індивідуальною для кожного цукрового заводу та залежить від конструкції вакуум-апарата, його теплообмінної поверхні, рівня автоматизації, технологічного режиму.

Контроль температури та щільності сиропу дозволяє регулювати темп випаровування і підготувати сироп до подальшого етапу кристалізації. На рис. 1.1 показано, як змінюється температура кипіння утфелю залежно від часу кристалізації [18].



Рис. 1.1 Графік зміни температури кипіння утфелю впродовж процесу кристалізації

Випарювання здійснюється у вакуум-апаратах періодичної або безперервної дії. На сьогодні єдиного оптимального типу конструкції вакуум-апарата не визначено, що зумовлює різноманіття їх конструктивних рішень.

Вакуум-апарати класифікують за різними критеріями:

- за характером роботи: апарати періодичної та безперервної дії;

- за формою корпусу: циліндричні, сундучного типу, сферичні;
- за просторовою орієнтацією: горизонтального та вертикального розташування;
- за конструктивними особливостями нагрівальної поверхні: із змієвиком, трубчастими елементами або кільцевими поверхнями;
- за видом уварюваного продукту: апарати для уварювання I, II та III продуктів (для цукрових заводів із виробництва цукру-піску) та апарати для уварювання I та II рафінадних утфелів, а також продуктових утфелів (для рафінадних заводів).

В загальному, основними елементами конструкції вакуум-апаратів безперервної дії є: корпус, гріюча камера, сепараційний вузол, циркулятор, механізм для виведення утфелю та пристрій для подачі гріючої пари (рис. 1.2).

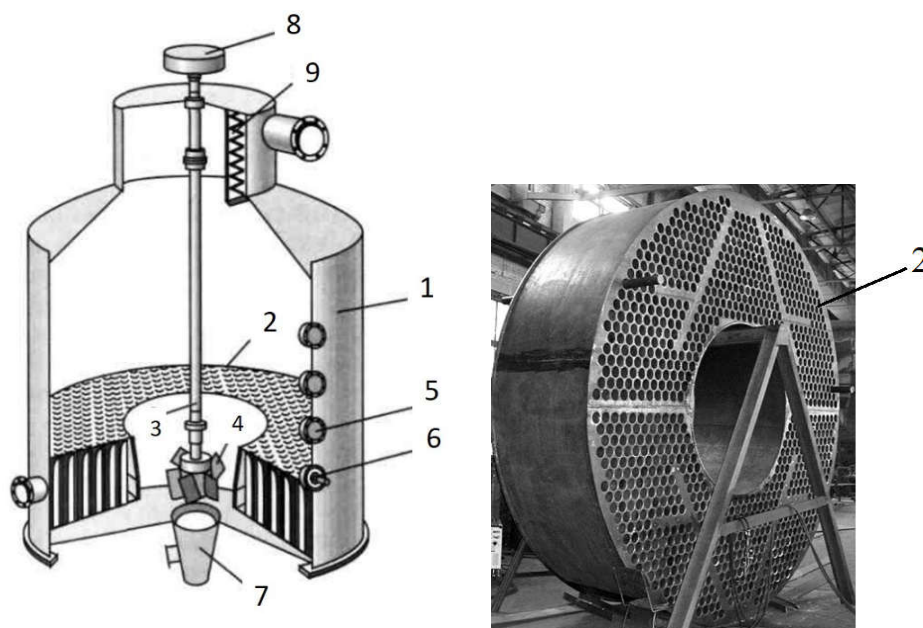


Рис. 1.2. Конструкція типового вакуум-апарата:

- 1 – корпус; 2 – гріюча камера; 3 – вал; 4 – турбіна; 5 – оглядові вікна;
 6 – пробний кран; 7 – затвор для вивантаження утфелю; 8 – привод;
 9 – сепаратор

Усередині гріючої камери, яка є одним із основних елементів обладнання, теплоносієм виступає насичена водяна пара. Існує кілька варіантів виконання

камер, з яких найчастіше використовують підвісні моделі. У таких пристроях пара циркулює у міжтрубному просторі, тоді як утфель проходить безпосередньо крізь гладкі труби.

Для розділення вторинної пари від крапельної фази продукту у верхній частині апарата монтується сепаратор.

У нижній частині апарата знаходиться днище зі встановленим випускним механізмом, який може бути клапанним або шиберним, з гідравлічним чи механічним управлінням. Для закріплення апарата на рамі або фундаменті передбачені спеціальні опорні елементи – лапи або кільцеві кріплення, приварені до нижньої частини корпусу.

Для ефективною кристалізації сахарози важливо підтримувати швидкість руху утфелю в межах 0,5–2 м/с протягом усього процесу. Це забезпечується механічним переміщенням за допомогою циркулятора (рис. 1.3).

У центрі вакуум-апарата (рис. 1.3) розміщено вертикальний вал 3 з приводом 1 угорі та турбіною 7 внизу. Вал спирається на дві опори: верхню з кулькових підшипників і нижню 6 — підшипник ковзання з текстолітовою втулкою. Для герметичності встановлено сальникове ущільнення 2, що запобігає проникненню повітря.

Привод циркулятора включає двоступінчастий редуктор і тришвидкісний електродвигун. У процесі уварювання, у міру згущення маси, швидкість обертання циркулятора зменшується від 64 до 32 об/хв.

Наприкінці уварювання циркуляція слабшає (до 0,02–0,03 м/с), тому для її підсилення застосовується конічний конфузор 4. Він оснащений кількома рядами заслінок 5, що автоматично відкриваються, покращуючи циркуляцію утфелю в надтрубному просторі апарата.

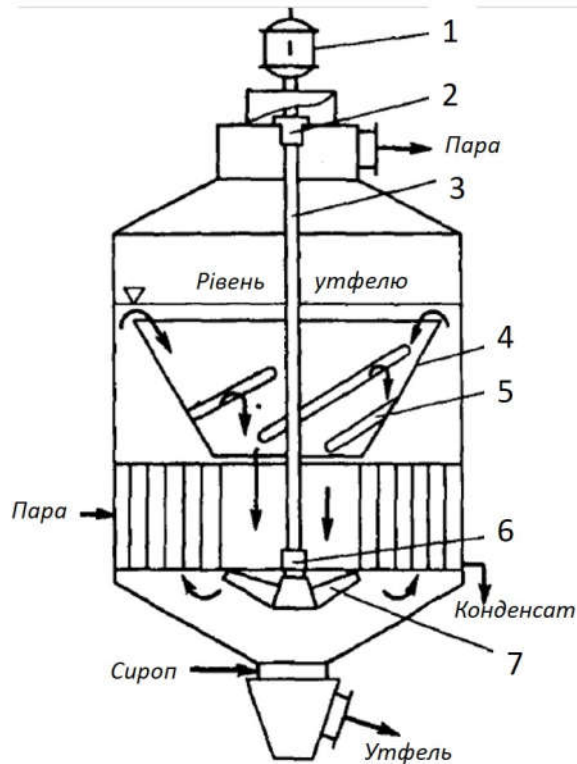


Рис. 1.3. Вакуум-апарат з механічним циркулятором і конфузором:
 1 – привід; 2 – ущільнення; 3 – вал циркулятора; 4 – конфузор; 5 – заслінки;
 6 – нижня опора; 7 – турбіна

Вакуум-апарат ПВА-400 (рис. 1.4 має цільнозварний корпус, усередині якого підвішені гріюча камера та пастка-сепаратор. У нижній частині апарату для спуску утфелю встановлено клапан із гідравлічним приводом. Під кришкою встановлена кільцева труба для пропарювання апарату. Пар в гріючу камеру 3 надходить через штуцери з мембранами, які прикріплені конічними патрубками (на рисунку не показані) до корпусу гріючої камери.

Гріюча камера складається з двох конічних трубних решіток, в які завальцьовані труби. До кінців решіток приварена циркуляційна труба. Між корпусом гріючої камери і корпусом апарату є кільцеве простір для циркуляції утфелю. Циркуляція маси відбувається по циркуляційній трубі та кільцевому простору, а потім вона піднімається по нагрівальних трубах.

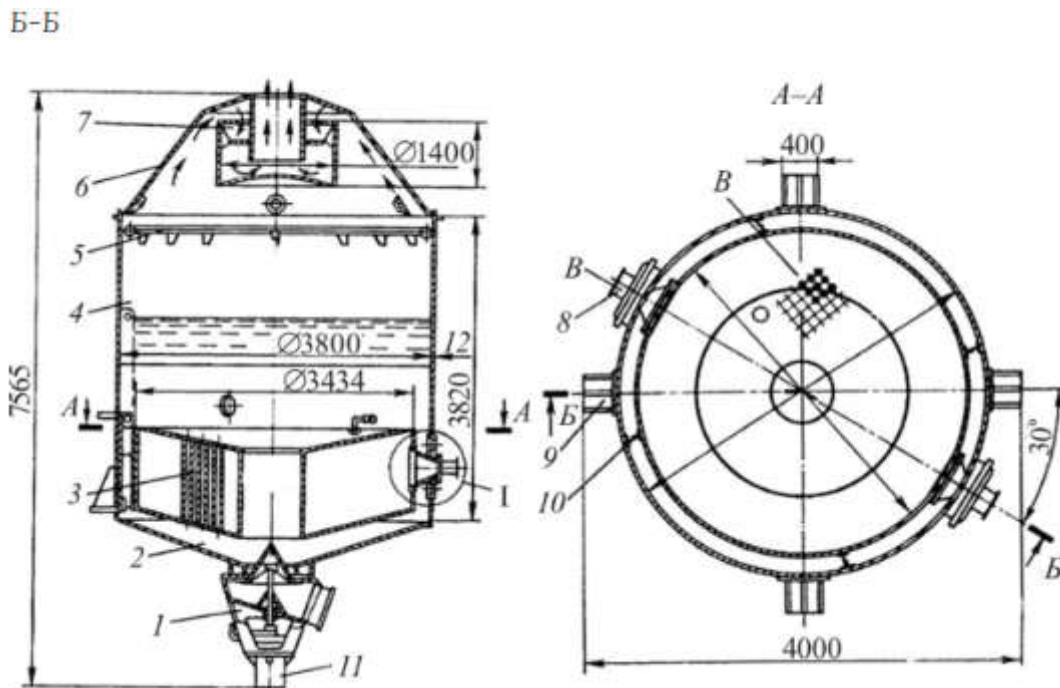


Рис. 1.4. Вакуум-апарат ПВА-400:

1 – клапан; 2 – днище; 3 – грійоча камера; 4 – корпус; 5 – кільцева труба;
 6 – кришка; 7 – пастка-сепаратор; 8 – штуцер для підведення пари;
 9 – опора; 10 – кронштейн; 11 – привод клапана; 12 – корпус грійочної камери

У промисловому виробництві використовується вакуум-апарат типу ВАВ-60 з механічною циркуляцією (рис. 1.5). Конструктивно це вертикальна циліндрична зварна посудина з конусним днищем. У нижній частині розміщена парова камера з вертикальними нагрівними трубами, з'єднаними з трубними решітками. У центрі – циркуляційна труба і дефлектор нагорі.

Уздовж внутрішньої стінки корпусу передбачено вертикальний канал для утфелю. Там же встановлені крани для проб, а також зливний бачок. Пара надходить у грійочу парову камеру через штуцери з обох боків. Неконденсовані гази відводяться через верхні патрубки, а конденсат – через зливні коробки. Зовнішня стінка парової камери одночасно є частиною корпусу.

Корпус має опорний фланець знизу та укріплений трьома кільцями жорсткості зверху. Нижнє конусне днище знімне, що полегшує демонтаж

турбіни циркулятора. До нього приєднано спускний затвор з двома гідрочиліндрами для відкривання/фіксації.

Подача сиропу, патоки, пари і води здійснюється через колектор у нижню частину апарата. У верхньому конусі розміщена пастка для крапель рідини, що потрапили у вторинну пару. Пастка має штуцер для пари, повітряний затвор з гідроприводом та відбійний щит усередині.

Циркулятор складається з вертикального вала з турбіною внизу. Вал має дві опори: верхню (радіально-упорні підшипники) та нижню (підшипник ковзання). Ущільнення запобігає підсосу повітря. Привід – від тришвидкісного двигуна через планетарний редуктор і втулково-пальцеву муфту. Швидкість вала змінюється залежно від густини маси.

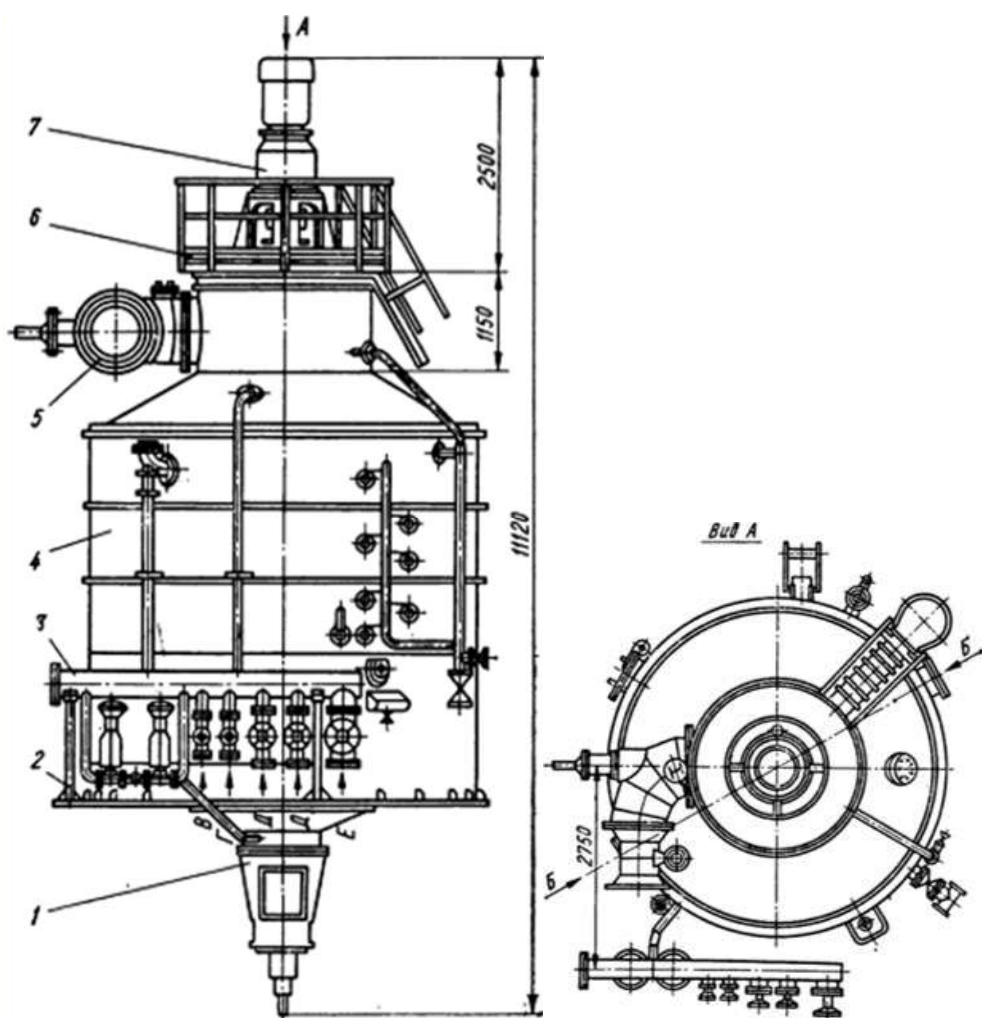


Рис. 1.5. Вакуум-апарат ВАВ-60

Таблиця 1.1. Технічні характеристики вакуум-апарата ВАВ-60

Маса звареного утфелю, т	60
Поверхня нагріву, м ²	321
Розрідження в апараті, МПа	0,093
Робочий тиск грючої пари, МПа	0,35

Вакуум-апарат періодичної дії марки ВАЦМ (виробник – ТОВ «ТМА», Яготин) призначений для уварювання утфелів із сиропу та/або відтоків методом випарювання води під розрідженням (рис. 1.6).

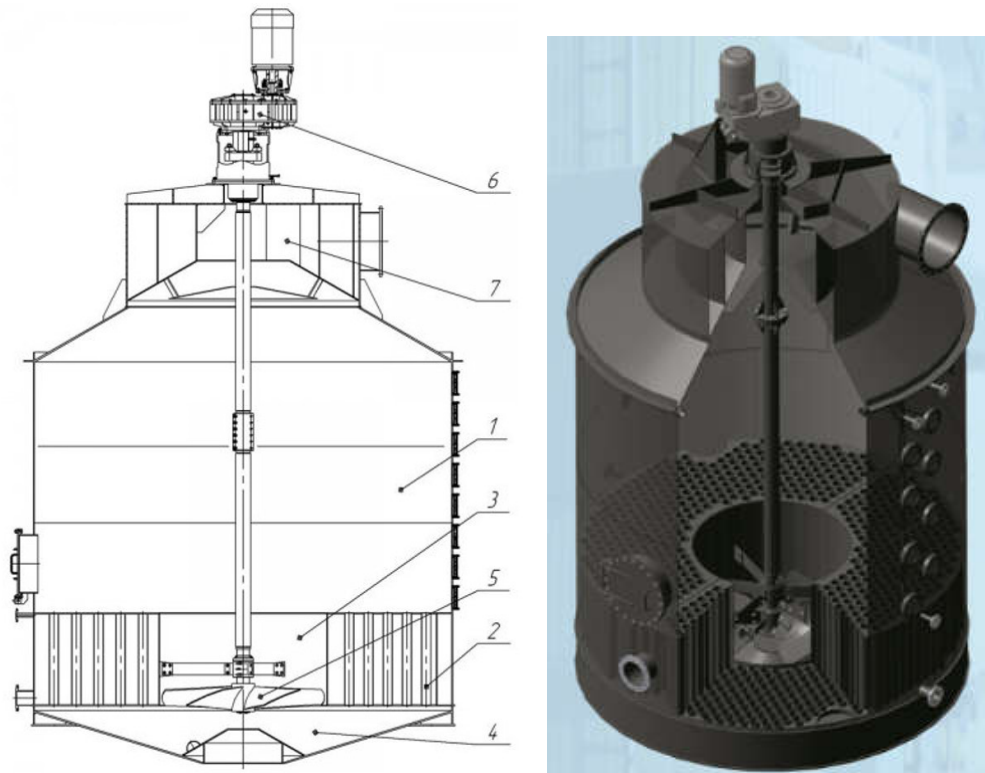


Рис. 1.6. Вакуум-апарат марки ВАЦМ:

- 1 – корпус; 2 – парова камера; 3- циркуляційна труба; 4 – днище;
5 – циркулятор; 6 – електропривод; 7 – пастка-сепаратор

Конструктивно апарат складається з вертикального циліндричного корпусу 1 з конічним верхом, трубчастої парової камери 2 з центральною циркуляційною трубою 3, блюдцеподібного днища 4, шестилопатевого

циркулятора 5, приводу з двигун-редуктором 6, встановленого на сепараторі-пастці 7. Безфланцеве виконання корпусу забезпечує герметичність і стабільний вакуум.

Сироп подається в кільцевий колектор у днищі, звідки потрапляє до утфельного простору. У нижній частині передбачено пристрій для вивантаження увареного продукту. Парова камера оснащена патрубками для пари, відведення конденсату та неконденсованих газів (включно з аміачною відтяжкою). Пастка-сепаратор має вихід на вакуумну магістраль.

Для контролю за процесом передбачені оглядові скельця, пробний кран, люк, патрубки для пропарки та місця під контрольно-вимірювальні прилади.

Переваги апарата: ефективне уварювання сиропів концентрацією 68–72 %, циркулятор із частотним регулюванням, широкий модельний ряд для реконструкції підприємств різної потужності, повна автоматизація процесу. Технічні характеристики вакуум-апарата ВАЦМ наведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2. Технічні характеристики вакуум-апарата ВАЦМ

Показник	ВАЦМ-40	ВАЦМ-50	ВАЦМ-60	ВАЦМ-70	ВАЦМ-80	ВАЦМ-90
Маса звареного утфелю, т	40	50	60	70	80	90
Корисний об'єм, м ³	28	35	42	55	57	64
Площа поверхні теплообміну, м ²	200	257,9	292,8	364,2	406,2	471,5

ТВА (виробник «Техінсервіс», Гребінківський машинобудівний завод) – ще один приклад вакуум-апаратів періодичної дії з механічним циркулятором, що призначений для випарної кристалізації утфелів першого, другого та третього продуктів під вакуумом із сиропу та відтоків цукрового виробництва.

Апарат ТВА (рис. 1.7) являє собою вертикальну циліндричну посудину зварної конструкції з конічним днищем. Конструкція включає: корпус 1,

гріючу камеру 2, сепаратор 3, опорне днище 4, механічний циркулятор з приводом 5.

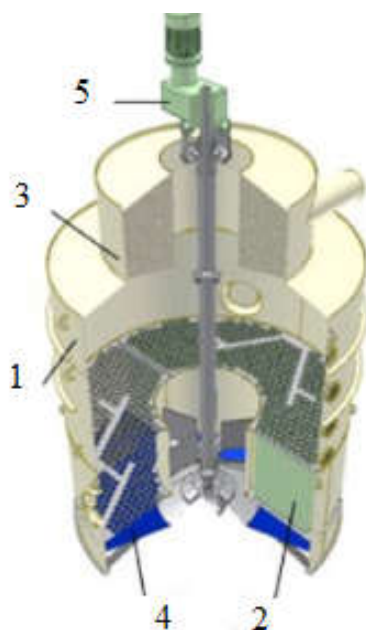


Рис. 1.7.Вакуум-апарат ТВА:

1 – корпус; 2 – гріюча камера, 3 – сепаратор; 4 – циркулятор; 5 – привід

Таблиця 1.3. Технічні характеристики вакуум-апаратів ТВА

Показник	Модель				
	ТВА-30	ТВА-40	ТВА-60	ТВА-75	ТВА-90
Маса звареного утфелю, т	30	40	60	75	90
Корисний об'єм апарата, м ³	21	27,6	41,4	52	62
Площа поверхні нагріву, м ²	165	330	380	460	590

Переваги вакуум-апаратів виробництва «Техінсервіс»:

- високий і рівномірний вміст кристалів в утфелі завдяки застосуванню механічних циркуляторів;
- можливість використання пари низького тиску (від $-0,1$ до $0,35$ кгс/см²), а також уварювання сиропів із вмістом сухих речовин понад 70%;

- скорочення часу варіння приблизно на 30% у порівнянні з апаратами без перемішувальних пристроїв;
- можливе виконання з нержавіючими трубами;
- система автоматичного керування забезпечує стабільність і високу ефективність технологічного процесу.

Вакуум-апарат ТС-VA (рис. 1.8) призначений для уварювання утфелю всіх ступенів кристалізації під вакуумом у процесах переробки цукрових буряків або цукру-сирцю на підприємствах цукрової промисловості.



Рис. 1.8. Вакуум-апарат періодичної дії ТС-VA

Його конструктивні особливості:

- завдяки наявності механічного циркулятора, вбудованої парової камери та обтічної форми днища забезпечується ефективна циркуляція продукту без застійних зон;
- подача сиропу або утфелю здійснюється прямо в циркуляційну трубу, що сприяє рівномірному розподілу маси в апараті;
- конструкція дозволяє працювати як із маточним утфелем, так і з холодним кристалізатом, адаптуючись до різних виробничих умов;
- конструкція парової камери забезпечує надійне видалення як

конденсату, так і легких/важких газів, що не конденсуються.

Таблиця 1.4. Технічні характеристики вакуум-апаратів ТС-VA

Показник	ТС-VA-60	ТС-VA-75
Маса звареного утфелю, т	60	75
Корисний об'єм апарата, м ³	40	50
Поверхня нагрівання парової камери, м ²	317	440
Питома поверхня теплообміну, м ² /т	5,28	5,33

Компанія Schaffer Sugar Services пропонує широкий асортимент обладнання для цукрової промисловості, включно з вакуум-апаратами (рис. 1.9).

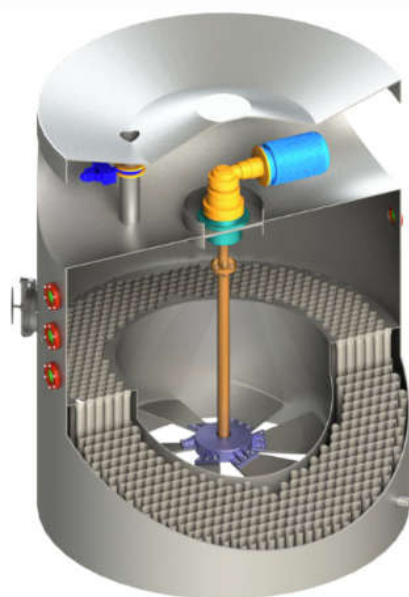


Рис. 1.9. Вакуум апарат фірми Schaffer Sugar

Основні характеристики вакуум-апарата:

- підвищена циркуляційна здатність: збільшена кількість лопатей циркуляторів забезпечує ефективну та рівномірну циркуляцію, що покращує якість обробки;
- регульована швидкість циркуляції: циркулятори плавно адаптують швидкість обертання відповідно до змін кристалізаційного процесу,

забезпечуючи оптимальні умови на кожному етапі;

- висока швидкість теплопередачі: рівномірна циркуляція сприяє покращенню теплопередачі, що підвищує загальну ефективність кристалізації;
- висока ефективність роботи завдяки планетарним приводам: інтегровані планетарні приводи гарантують максимальну надійність та продуктивність;
- повністю автоматизована система керування: забезпечує зручність управління та оптимізацію процесу в режимі реального часу.

Вакуум-апарат VKT (рис. 1.10) виробництва компанії ВМА (Німеччина) – це вертикальна безперервнодіюча установка, яка складається з чотирьох ідентичних кристалізаційних модулів 2, розташованих по вертикалі. Кожен модуль виконує функції вакуум-апарата періодичної дії та обладнаний механічним циркулятором 5.

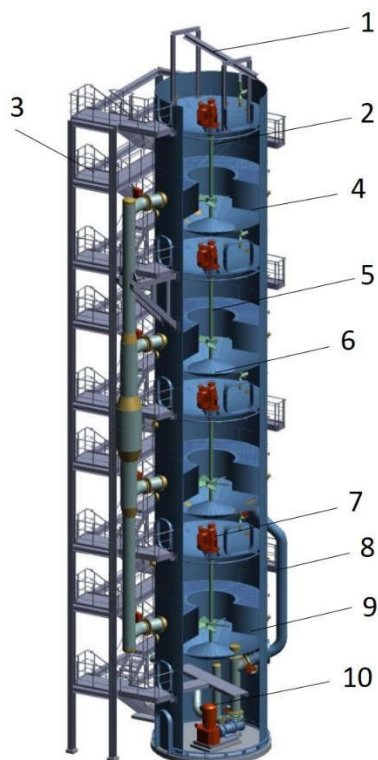


Рис. 1.10. Вакуум-апарат VKT:

1 – каркас; 2 – кристалізаційна камера; 3 – сходовая клітка; 4 – царга; 5 – циркулятор; 6 – зливне днище; 7 – гріюча камера; 8 – переливний трубопровід; 9 – царга з опорним кільцем; 10 – насос

Завдяки верхньому розміщенню циркуляторів і легкому доступу через проміжні секції 4, обслуговування обладнання є зручним і оперативним.

Кожна камера має двоконусне зливне днище 6 обтічної форми, що забезпечує ефективне відведення утфелю без застійних зон під трубними

решітками, запобігаючи охолодженню продукту та повторному кристалоутворенню.

Інтенсивне механічне перемішування утфелю дозволяє досягати високої концентрації кристалів – до 55% у масі утфелю I продукту, що забезпечує вихід цукру до 50% від маси увареного продукту.

Вакуум-апарат за патентом UA 75308 (рис. 1.11) складається з вертикального циліндричного корпусу 1, вбудованої підвісної трубчастої гріючої камери 2 з центральною циркуляційною трубою 3, до якої підводиться гріюча пара через патрубок 4. Цукровий розчин подається через патрубок 5, через який цукровий розчин надходить в додатковий патрубок подачі цукрового розчину 6, який безпосередньо направляє потік сиропу в зону дії лопатевої мішалки 7, що знаходиться на вертикальному валу 8 з'єднаного з приводом 9. Відведення готового продукту проводиться через патрубок 10 в нижній частині апарата.

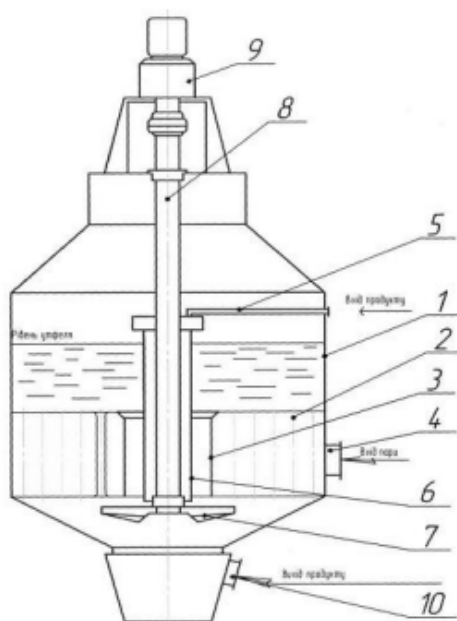


Рис. 1.11. Вакуум-апарат за пат. UA 75308

Особливістю даного вакуум-апарата є те, що для подачі цукрового розчину в вакуум-апарат додатково виконано патрубок, який розміщений

концентрично вертикальному валу циркулятора, причому його нижній торець розташований на рівні верхніх кромek лопатей циркулятора, а верхній торець знаходиться вище рівня цукрового розчину, що уварюється.

Виконання додаткового патрубкa подачі цукрового розчину забезпечує рівномірне нарощування кристалів цукру та прискорення процесу уварювання.

Вакуум-апарат за патентом UA 34983 (рис. 1.12) складається з корпусу 1, в якому розташована трубна решітка 2 з циркуляційною трубою 3, підтримуючий пристрій 4 для лопатей 5 і трубовал 6, встановлений в підшипники 7 і ущільнення 8. Пара подається в парову камеру 9, механічна енергія передається на зубчасту передачу 10, зварений утфель виводиться з апарата через вивантажуючий пристрій 11, сироп подається через патрубок 12, сепарація випареної пари відбувається відбивним щитом 13.

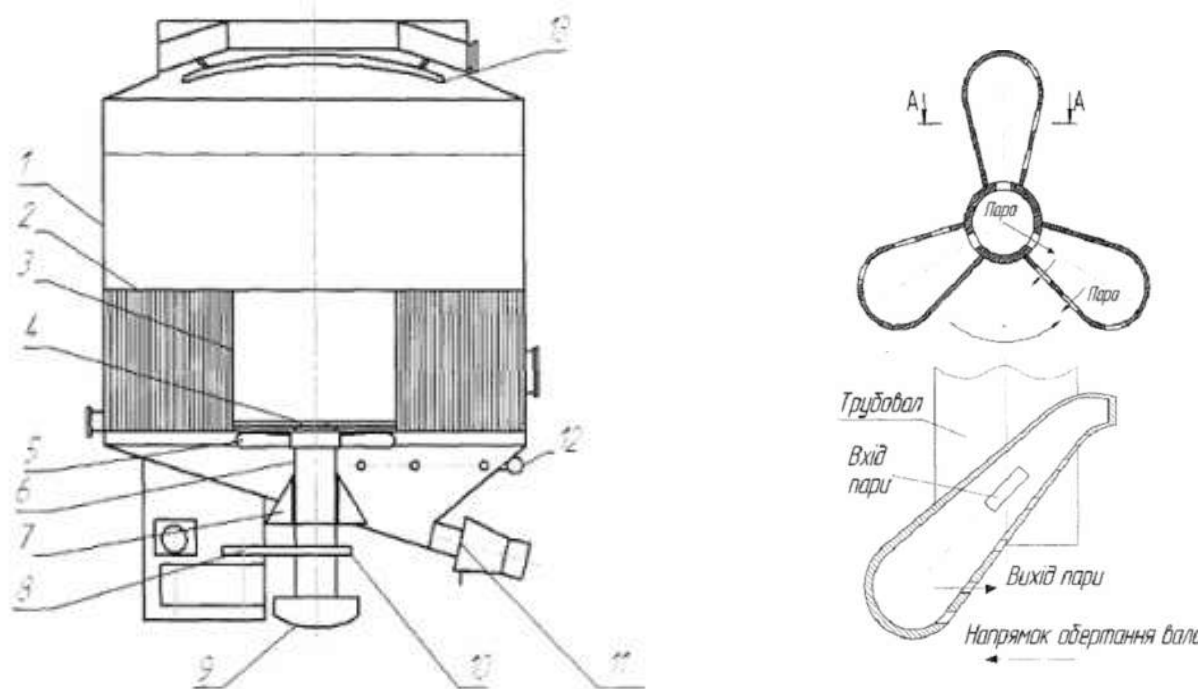


Рис. 1.12. Вакуум-апарат за пат. UA 34983

Особливістю даного вакуум-апарата є те, що циркулятор закріплений на пустотілому валу, з'єднаному з нерухомим паровим колектором, і виконаний

у вигляді мішалки з пустотілими лопатями, на тильних сторонах яких є отвори для барботажу пари в утфельну масу.

Такий апарат дає змогу інтенсифікувати циркуляцію утфельної маси і збільшити швидкість росту кристалів, зменшити в'язкість міжкристального розчину і збільшити коефіцієнт теплопередачі, зменшити витрати електроенергії та знизити питому металоємність обладнання.

Вакуум-апарат за патентом UA 14752 (рис. 1.13) складається з вертикального циліндричного корпусу 1, в нижній частині якого знаходяться вивантажувальний пристрій 2, підвісна трубчата гріюча камера 3 з патрубками підводу пари 4, відводу аміачних газів 5 і відводу конденсату 6. У верхній частині вакуум-апарату знаходиться патрубок відводу вторинної пари 7. На вертикальному валу 11 циркулятора, що приводиться в обертання двигуном 9 через редуктор 10, розміщена мішалка 12. В центральному опускному каналі розташовано порожнистий циліндр 8, який спирається бортиками 13, що знаходяться у його верхній частині, на парову камеру 3, і може вільно спливати при наповненні вакуум-апарата розчином під дією сили Архімеда, що діє на порожнистий циліндр 8 та поплавки 14, розташовані у верхній частині порожнистого циліндра. На зовнішній поверхні порожнистого циліндра 8 закріплені радіальні полоси 15, які для жорсткості у нижній частині скріплені обручем 16. Радіальні полоси служать для уникнення заклинювання порожнистого циліндра 8, а також утворюють підйомні циркуляційні канали у просторі між порожнистим циліндром 8 і стінкою парової камери 3.

Особливістю даного вакуум-апарата є те, що в центральному опускному каналі розташовано порожнистий циліндр, який спирається бортиками, що знаходяться у його верхній частині, на парову камеру, і може вільно спливати при наповненні вакуум-апарата розчином під дією сили Архімеда, що діє на порожнистий циліндр та поплавки, розташовані у верхній частині порожнистого циліндра. Це технічне рішення дозволяє оптимізувати теплообмін, інтенсифікувати циркуляцію утфелю, скоротити тривалість цих

процесів, а також збільшити середній розмір кристалів і зменшити коефіцієнт їх неоднорідності.

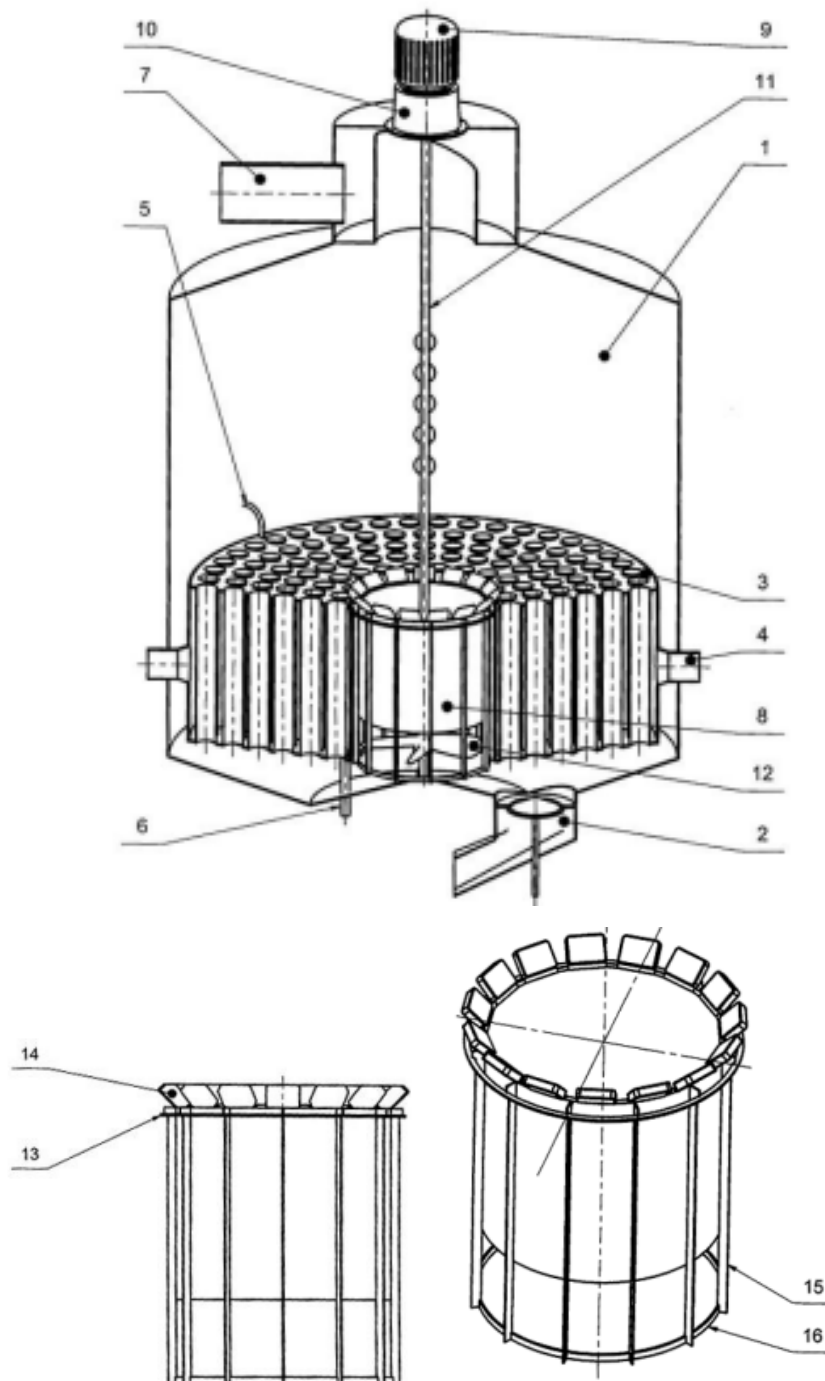


Рис. 1.13. Вакуум-апарат за пат. UA 14752

1.2. Обґрунтування актуальності дослідження, формулювання мети та завдання дослідження.

У сучасних умовах підвищених вимог до енергоефективності та ресурсоощадності виробничих процесів, актуальним залишається завдання вдосконалення теплотехнічного обладнання, зокрема випарних апаратів. Значну частку енерговитрат у таких апаратах становить теплова енергія, що витрачається у гріючих камерах.

Ефективність роботи гріючої камери значною мірою визначається конструктивними особливостями теплопередавальних труб. У типових конструкціях, через використання гладких труб, теплопередача часто відбувається в умовах недостатньої турбулізації потоку, що не дозволяє досягти високого коефіцієнта теплопередачі.

Одним із перспективних напрямів підвищення інтенсивності теплопередачі є профілювання теплопередавальних труб (виконання накатки, гофрування, тощо). Такий підхід дозволяє як збільшити площу теплообміну, так і впливати на гідродинамічний режим потоку, що сприяє підвищенню ефективності теплообмінного процесу без істотного ускладнення конструкції апарата.

Отже, дослідження, спрямоване на вдосконалення гріючої камери вакуум-апарата шляхом профілювання теплообмінних труб, є науково обґрунтованим і технічно доцільним, а також має прикладне значення для промисловості.

Мета дослідження – підвищити ефективність теплопередачі у гріючій камері вакуум-апарата А2-ПВЕ-60 шляхом розроблення конструктивної модернізації теплопередавальних труб з використанням накатки як засобу інтенсифікації теплообміну.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати основні чинники, що впливають на інтенсивність

теплопередачі в трубчастих гріючих камерах вакуум-апаратів.

2. Розробити цифрові 3D-моделі теплообмінних труб з різним профілем накатки.

3. Створити імітаційну модель об'єкта досліджень.

4. Провести CFD-моделювання та визначити вплив профілю накатки на гідродинаміку та теплообмін у них.

5. Удосконалити вакуум-апарат з використанням гріючої камери із теплообмінними трубками, які мають профільовану накатку.

1.3. Висновки.

1. Проведений аналіз показує, що одним із ключових факторів, які впливають на ефективність роботи вакуум-апарата, є інтенсивність теплопередачі в гріючій камері. У типових конструкціях, що використовують гладкі трубки, цей показник часто є недостатнім для забезпечення високої ефективності.

2. Встановлено, що одним з ефективних способів інтенсифікації теплопередачі є виконання на поверхні теплопередавальних труб накатки (рифлення). Це дозволяє не лише збільшити площу поверхні теплообміну, а й вплинути на гідродинаміку сиропу, підвищивши коефіцієнт теплопередачі.

3. З огляду на технічну простоту реалізації та відсутність потреби у кардинальній зміні конструкції апарата, запропонований підхід має високу практичну значущість для модернізації обладнання.

4. Сформульовані мета та завдання дослідження спрямовані на розроблення обґрунтованого технічного рішення щодо вдосконалення вакуум-апарата А2-ПВЕ-60 за рахунок використання гріючої камери з профільованими теплообмінними трубками.

2. РОЗРОБКА НОВОГО ТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Постановка завдань нового технічного рішення, визначення необхідних технічних параметрів, розробка і опис нового технічного рішення, устрій та принцип його роботи.

Інтенсифікація теплообміну є ключовим напрямом підвищення ефективності процесу згущення цукрового сиропу у вакуум-апараті.

Основними механізмами підвищення інтенсивності теплообміну є:

- збільшення площі поверхні теплообміну;
- руйнування або зменшення товщини примежового (граничного) шару;
- перебудова температурного профілю потоку.

Найпоширенішим способом збільшення площі теплообміну є ребрення теплообмінних елементів (труб, пластин). Ще одним підходом, що ефективно впливає на теплопередачу, є збурення структури пристінного потоку з метою зменшення товщини граничного шару. З цією метою застосовуються різні методи інтенсифікації такі як, пасивні, активні та комбіновані.

Пасивні методи не потребують зовнішнього підводу енергії. До цих методів належить:

- створення на теплообмінній поверхні мікродеформації, що сприяють покращенню теплообміну;
- підвищення шорсткості поверхні, що сприяє створенню турбулентного потоку без значного збільшення площі;
- ребрення поверхні, що не лише збільшує площу теплообміну, а й збурює потік, посилюючи тепловіддачу;
- застосування перемішуючих пристроїв – вставок, що сприяють переносу тепла в потоці, підвищуючи ефективність вимушеної конвекції.
- застосування закручувачів потоку – спіральні стрічки, виті труби тощо,

які викликають вторинну циркуляцію та посилюють турбулізацію потоку.

Аналіз літератури показав, що поперечні виступи у каналі дозволяють знизити витрати енергії на власні потреби енергоустановки на 5...26%. Окрім покращення тепловіддачі, такі виступи зменшують інтенсивність забруднення труб. Встановлено, що при турбулентному обтіканні поверхні з виступами водою з високою жорсткістю, відкладення солей зменшуються у 3...5 разів порівняно з гладкими трубами. При цьому ефект інтенсифікації зберігається навіть у забрудненій трубі, а товщина забруднень стабілізується на допустимому рівні. Це дає змогу експлуатувати теплообмінники без очищення протягом тривалого часу.

Виконання нарізи на внутрішній поверхні теплообмінних поверхонь є прикладом штучної шорсткості. Дослідження [7] вказують на суттєве покращення теплообміну: при зменшенні кроку нарізи з 10 мм 5 мм інтенсивність теплопередачі зростає на 30%, збільшення числа Рейнольдса сприяє розвитку турбулентності та покращенню тепловіддачі (до 5 разів). Разом з цим спостерігається підвищення гідравлічного опору до 10%.

Дослідження показали, що труба з гвинтовим гофром ($D = 325$ мм, глибина 12 мм, кут нахилу 30° , рис. 2.1) має аеродинамічний опір, близький до гладкої труби. При цьому виникає періодичне руйнування граничного шару, що покращує тепловіддачу.

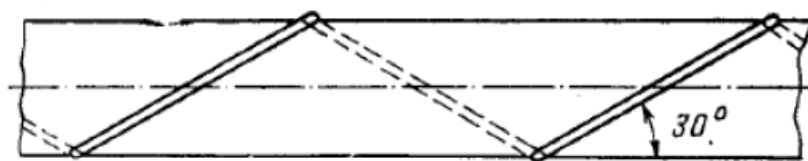


Рис. 2.1. Гофрована труба

Спіральна деформація каналів (рис. 2.2) дозволяє значно інтенсифікувати тепловіддачу, але супроводжується зростанням гідравлічного опору.



Рис. 2.2. Спірально-накатані труби

Активні методи потребують зовнішнього енергетичного впливу – механічного перемішування, вібрації тощо. Вони є менш поширеними через складність реалізації.

З метою підвищення ефективності роботи вакуум-апарата пропонується удосконалити його гріючу камеру, зокрема – гріючі теплообмінні трубки. Суть технічного рішення полягає у виконанні накатки у вигляді гвинтових канавок на поверхні теплообмінних трубок (рис. 2.3). Така конструктивна зміна сприятиме цілеспрямованій штучній турбулізації потоку уварюваної маси в пристінній зоні труб, збільшенню площі поверхні теплообміну.

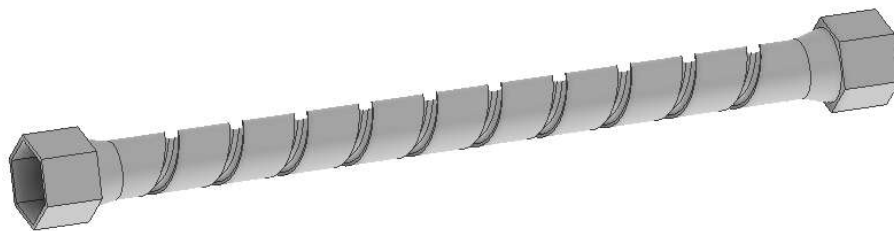


Рис. 2.3. Суть технічного рішення

Використання таких теплообмінних елементів у конструкції гріючої камери дозволить:

- підвищити коефіцієнт теплообміну – турбулентність у пристінному шарі зменшує товщину теплової межі шару та покращує передачу тепла від гріючої пари до сиропу;

- поліпшити перемішування сиропу – завихрення потоку сприяє більш рівномірному розподілу температури в уварюваній масі;
- зменшення утворення накипу – за рахунок постійного збурення потоку знижується ймовірність осадження твердих частинок на внутрішній поверхні труб, що запобігає утворенню теплоізоляційного шару.

У результаті впровадження такої модернізації очікується підвищення енергоефективності процесу уварювання, зменшення витрат енергії та подовження терміну експлуатації теплообмінних труб гріючої камери вакуум-апарата.

2.2. Висновки до розділу.

1. Інтенсифікація теплообміну є ключовим напрямом підвищення ефективності згущення цукрового сиропу у вакуум-апараті, що дозволяє зменшити енерговитрати та покращити якість продукту.

2. Найбільш доцільними способами підвищення інтенсивності теплообміну є пасивні методи інтенсифікації, оскільки вони не потребують додаткової енергії.

3. Виконання гвинтової накатки на теплообмінних трубках забезпечує турбулізацію потоку, підвищення коефіцієнта теплопередачі та зменшення утворення накипу.

4. Запропоноване технічне рішення сприятиме підвищенню енергоефективності процесу уварювання, скороченню витрат енергії та продовженню терміну служби теплообмінних елементів.

5. Наукові дослідження слід спрямувати на визначення оптимальних параметрів гвинтової накатки для досягнення найкращого співвідношення між ефективністю теплообміну та гідродинамічними параметрами потоку уварюваної маси.

3. ДОСЛІДНА ЧАСТИНА ТА УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1. Об'єкт та предмет досліджень.

Об'єктом дослідження є гідродинаміка та процес теплопередачі цукрового сиропу в теплообмінній трубці гріючої камери вакуум-апарата А2-ПВЕ-60. Предметом дослідження є теплообмінна трубка.

3.2. Опис імітаційної моделі об'єкту досліджень.

У процесі руху цукровий сироп, який є в'язкою, термозалежною неньютонівською рідиною, протікає всередині вертикальної нагрівної трубки. Зовнішня поверхня трубки омивається гріючою парою. Тепло передається від пари до стінки трубки, далі через металеву стінку – теплопровідністю, а потім – до сиропу за рахунок конвекції. Таким чином, процес є триланковим:

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{п}}} + \frac{\delta}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{с}}}}$$

де: $\alpha_{\text{п}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від пари до стінки;

$\alpha_{\text{с}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від стінки до сиропу;

δ – товщина стінки трубки;

$\lambda_{\text{ст}}$ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу трубки.

Метою побудови імітаційної моделі є відтворення гідродинамічних і теплових процесів у системі «нагрівна трубка – сироп – теплоносій» для подальшого аналізу впливу технологічних і конструктивних параметрів на ефективність теплообміну. Для реалізації моделі використовується чисельний метод кінцевих об'ємів у середовищі програмного забезпечення Autodesk CFD.

Для опису зазначених процесів побудовано імітаційну модель, яка базується на чисельному розв'язанні рівнянь Нав'є–Стокса з використанням k – ε моделі турбулентності та рівняння енергії з конвективною складовою.

Рівняння неперервності:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(r u_r)}{\partial r} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0$$

Рівняння руху (в осьовому напрямку):

$$\rho \left(u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r (\mu + \mu_t) \frac{\partial u_z}{\partial r} \right]$$

Рівняння енергії:

$$\rho c_p \left(u_r \frac{\partial T}{\partial r} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\lambda + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial r} \right]$$

де: u_r, u_z – компоненти швидкості сиропу;

p – тиск;

ρ – густина сиропу;

μ – динамічна в'язкість;

c_p – питома теплоємність;

λ – коефіцієнт теплопровідності;

T – температура сиропу;

Pr_t – турбулентне число Прандтля.

Турбулентна кінетична енергія k і швидкість її дисипації ε визначаються з рівнянь:

$$\rho \left(u_r \frac{\partial k}{\partial r} + u_z \frac{\partial k}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial r} \right] + P_k - \rho \varepsilon$$

$$\rho \left(u_r \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} + u_z \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

де: P_k – генерація турбулентної енергії за рахунок градієнта швидкості:

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_z}{\partial r} \right)^2$$

Емпіричні константи моделі:

$$C_\mu = 0,09, C_{1\varepsilon} = 1,44, C_{2\varepsilon} = 1,92, \sigma_k = 1,0, \sigma_\varepsilon = 1,3$$

Турбулентна в'язкість визначається як:

$$\mu_t = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Імітаційна модель побудована для теплообмінних труб різної конструкції (рис. 3.1): гладкої та з різним профілем накатки глибиною 7 мм.

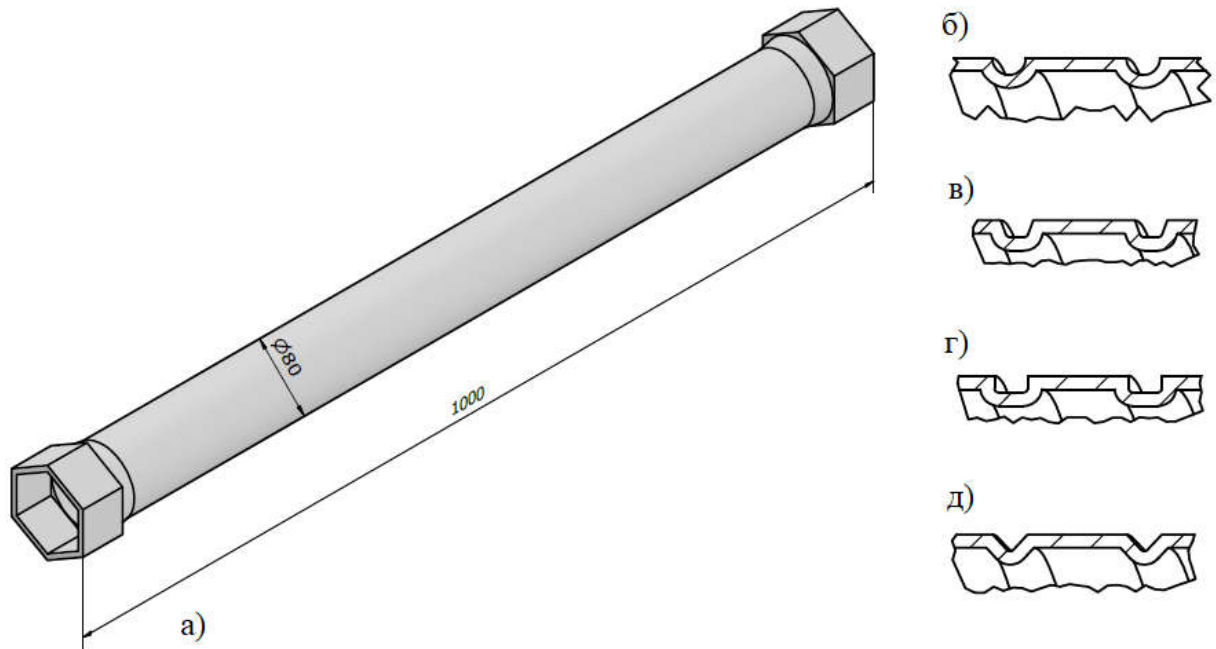


Рис. 3.1. Варіанти конструкції теплообмінної трубки:

а) – гладка; б) – з сферичною накаткою; в) – з трапецевидною накаткою; г) – з прямокутною накаткою; д) – з трикутною накаткою

Область розрахунку дискретизується на нерівномірну сітку, згущену поблизу стінки для адекватного опису приграничного шару.

У моделі розглядається двофазна система: тверда стінка трубки з сталі та рідина всередині трубки з властивостями, подібними до цукрового сиропу. Фізичні властивості матеріалу теплообмінної трубки показано на рис. 3.2, а фізичні властивості модельної рідини подано на рис. 3.3.

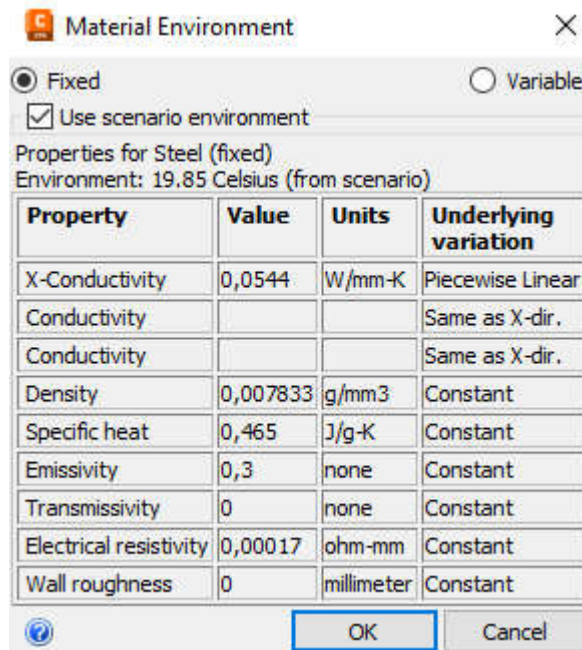


Рис. 3.2. Фізичні властивості матеріалу теплообмінної трубки

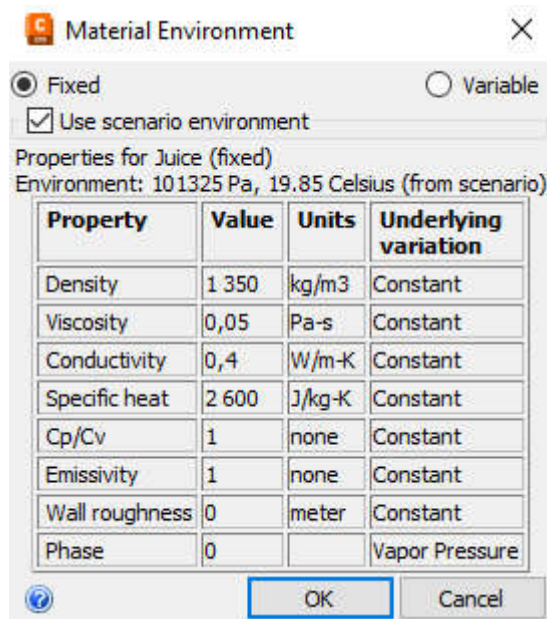


Рис. 3.3. Фізичні властивості модельної рідини

В моделі виділено три типи поверхонь (рис. 3.4):

1. Вхідна поверхня (Вхід) – через неї рідина надходить у трубку.
2. Вихідна поверхня (Вихід) – через неї потік залишає область розрахунку.
3. Стінка трубки (Стінка) – всі інші поверхні.

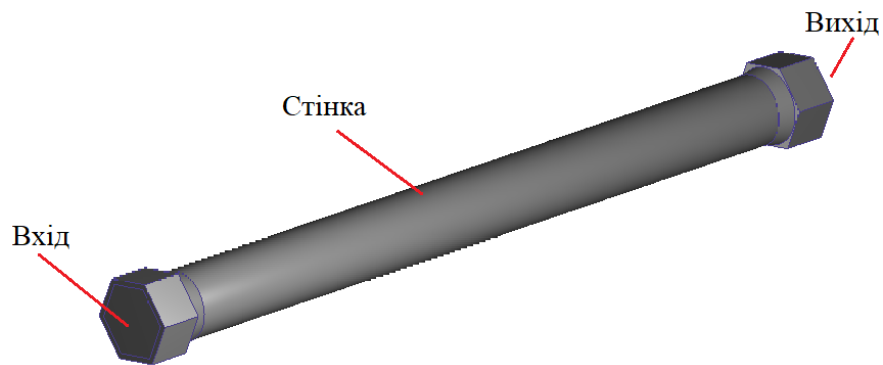


Рис. 3.4. Поверхні до яких прикладаються граничні умови

Для кожної з цих поверхонь задаються власні граничні умови руху та теплообміну, що відповідають процесу нагрівання сиропу в трубці грюючої камери. На вході в трубку задаються умови входу рідини: швидкість 1 м/с, температура 60 °С. На виході задається поверхня вільного витікання. На зовнішню поверхню стінки задається температура 120 °С (температура грюючої пари).

При побудові моделі прийнято такі припущення:

- випаровування (згущення) сиропу в трубці не відбувається;
- стінка трубки має постійну температуру.

3.3. Результати проведених досліджень.

Результати досліджень гідродинаміки та теплообміну у гладкій теплообмінній трубці

На рис. 3.5–3.9 наведено результати CFD-моделювання, що дають змогу проаналізувати особливості руху рідини в гладкій теплообмінній трубці.

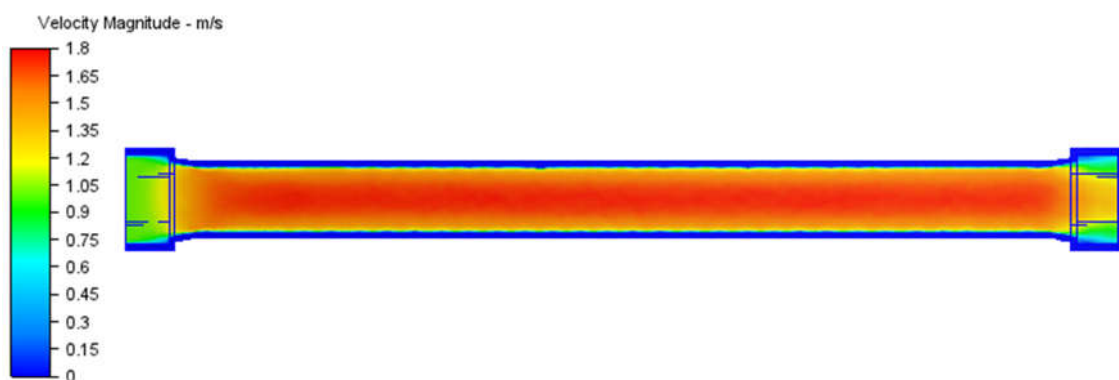


Рис. 3.5. Розподілення швидкості рідини в гладкій теплообмінній трубці

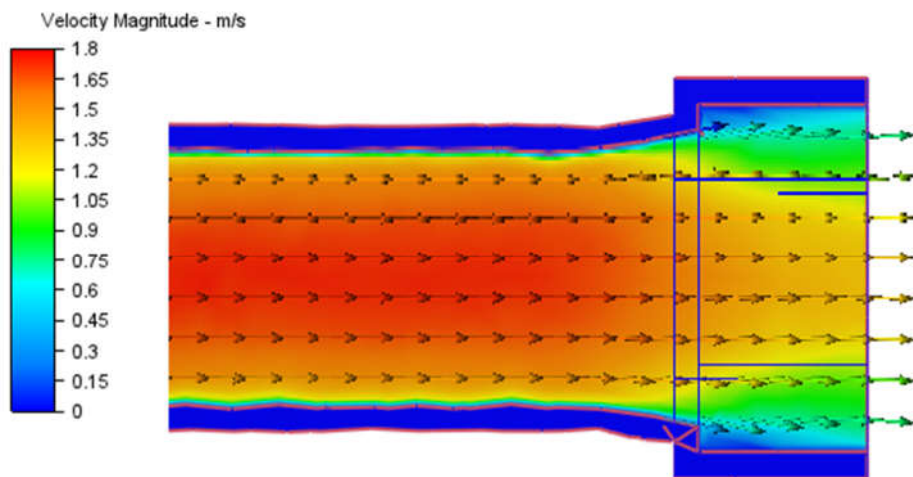


Рис. 3.6. Вектори швидкості рідини

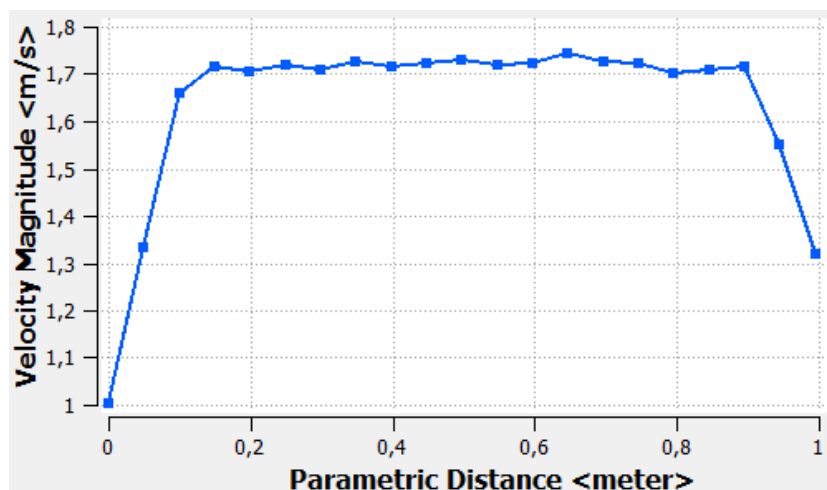


Рис. 3.7. Швидкість рідини по довжині теплообмінної трубки

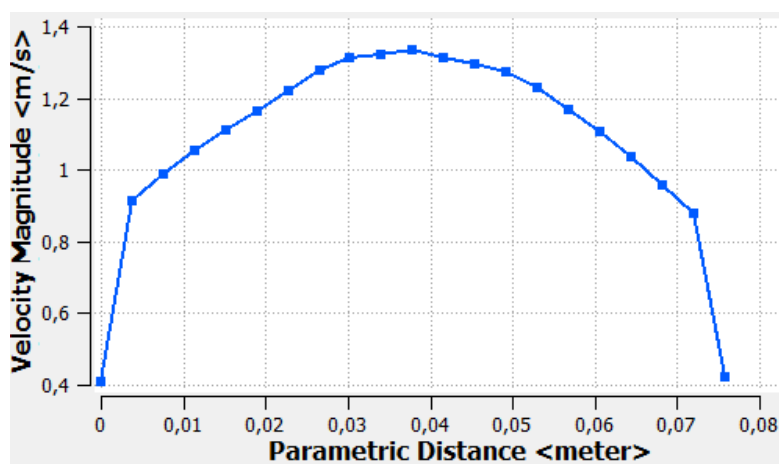


Рис. 3.8. Швидкість рідини по поперечному перерізу (на виході з теплообмінної трубки)

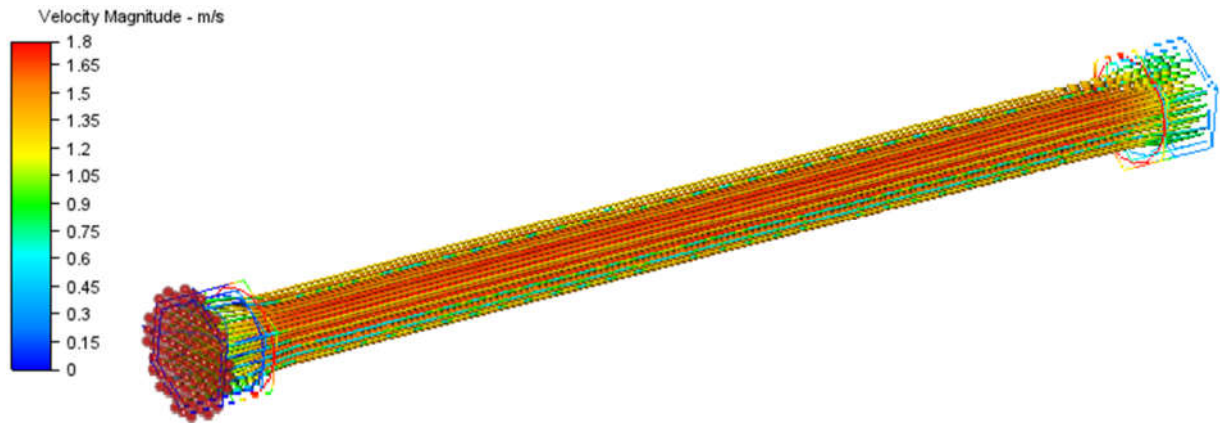


Рис. 3.9. Лінії напрямку руху потоку рідини

Аналіз наведених результатів дозволив встановити, що після входу рідини в трубку формується вхідна ділянка, де профіль швидкості вирівнюється під дією в'язкості. Далі встановлюється усталена ламінарна течія рідини зі швидкістю 1,7-1,75 м/с. На виході з трубки швидкість рідини становить 1,32-1,35 м/с по осі, і за рахунок тертя об стінки знижується до 0,4 м/с біля них.

Важливою частиною отриманих даних є результати, які характеризують теплові процеси в теплообмінній трубці (рис. 3.10–3.12).

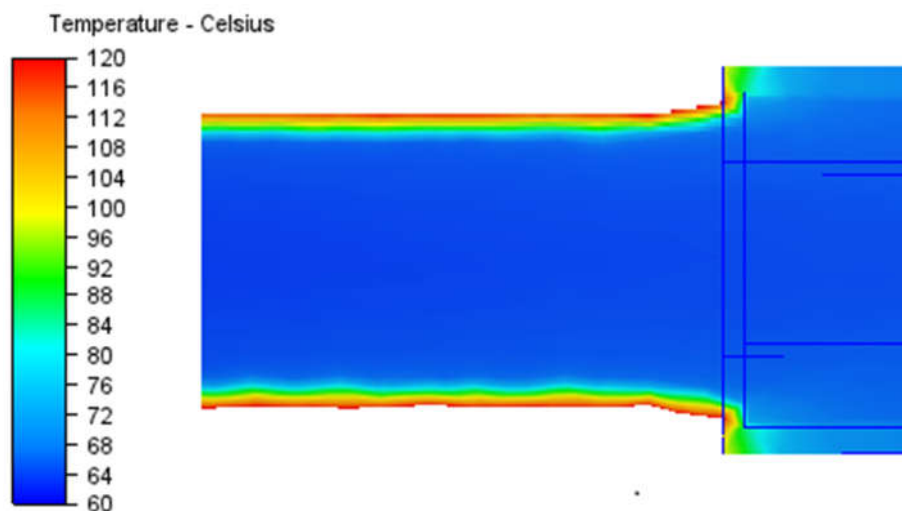


Рис. 3.10. Температура рідини на виході з гладкої теплообмінної трубки

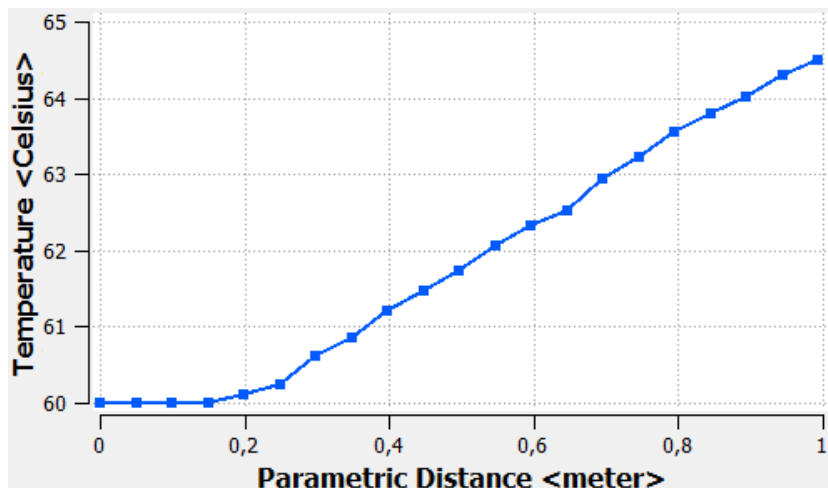


Рис. 3.11. Температура рідини по довжині теплообмінної трубки

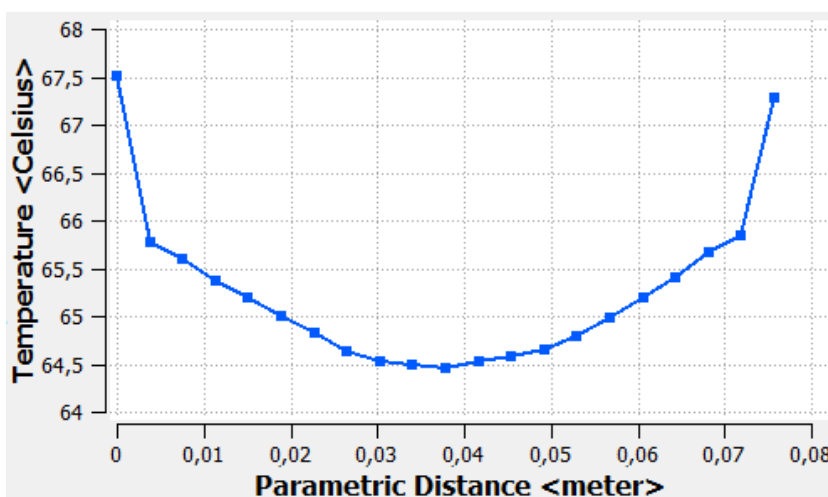


Рис. 3.12. Температура рідини по поперечному перерізу (на виході з теплообмінної трубки)

Встановлено, що по довжині (по осі) теплообмінної трубки відбулося нагрівання рідини на $4,5^{\circ}\text{C}$ (від 60°C до $64,5^{\circ}\text{C}$). У поперечному перерізі трубки температура біля стінки є дещо вищою ($65,7^{\circ}\text{C}$ - $67,5^{\circ}\text{C}$), оскільки саме через стінку передається тепло, і вона є джерелом теплової енергії для потоку. Крім того, при ламінарній течії шари рідини рухаються паралельно, без перемішування, тому тепло переноситься лише теплопровідністю – відносно повільно.

Результати досліджень гідродинаміки та теплообміну у теплообмінній трубі з прямокутним профілем накатки та кроком між витками 200 мм.

На рис. 3.13–3.17 наведено результати CFD-моделювання, що дають змогу проаналізувати характер течії рідини у теплообмінній трубі з прямокутним профілем накатки та кроком між витками 200 мм.

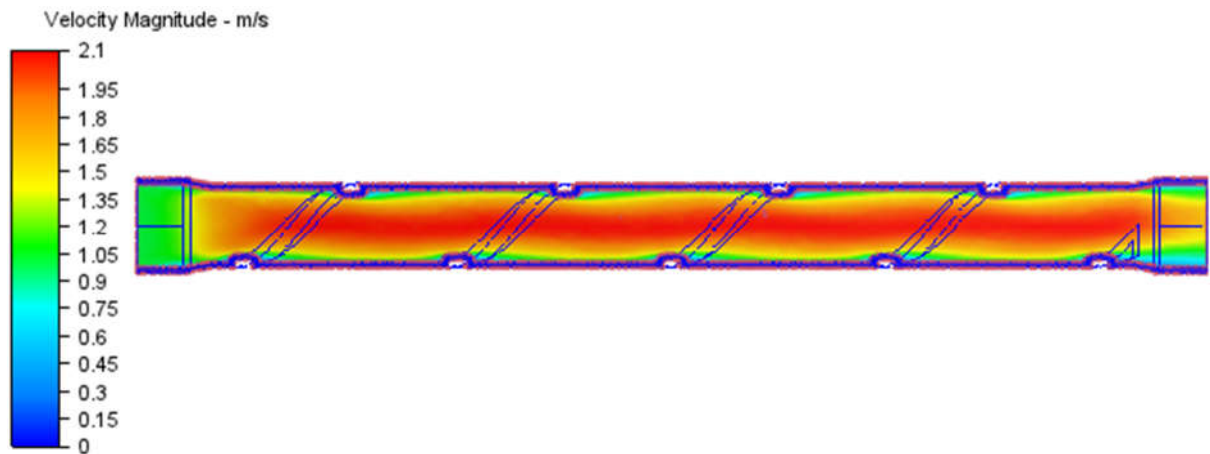


Рис. 3.13. Розподілення швидкості рідини в теплообмінній трубі

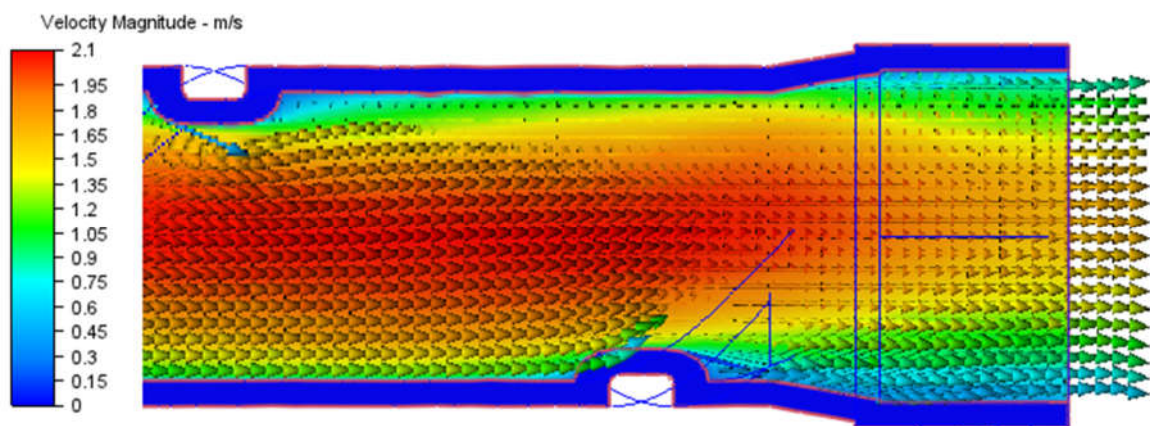


Рис. 3.14. Вектори швидкості рідини

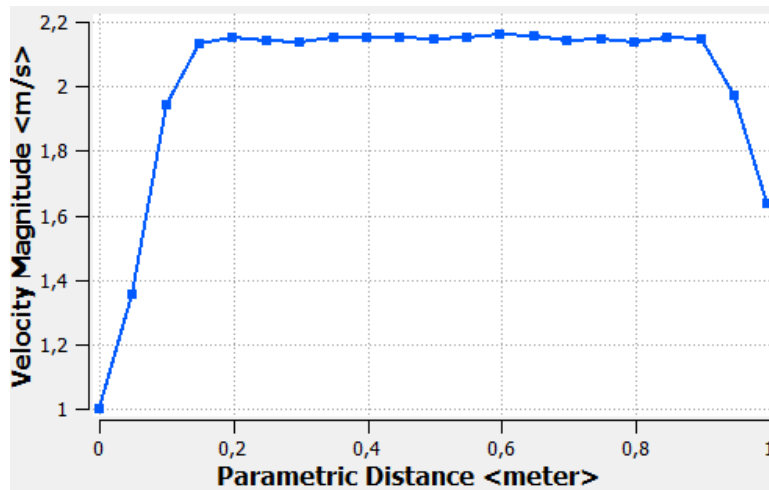


Рис. 3.15. Швидкість рідини по довжині теплообмінної трубки

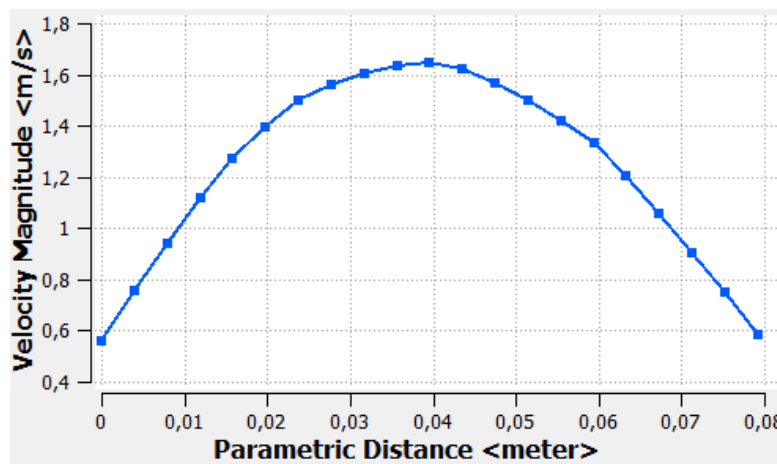


Рис. 3.16. Швидкість рідини по поперечному перерізу (на виході з теплообмінної трубки)

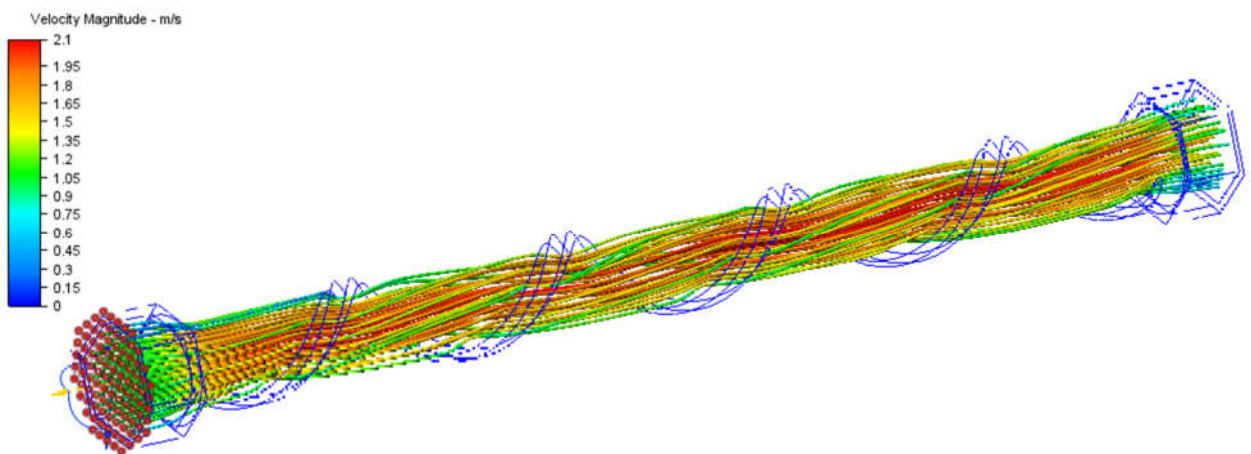


Рис. 3.17. Лінії напрямку руху потоку рідини

Встановлено, що виконання гвинтової накатки на поверхні теплообмінної трубки спричиняє закручування потоку рідини. Максимальна швидкість потоку досягає 2,1 м/с, що на 0,3 м/с більше порівняно з гладкою трубкою. На виході з трубки осьова швидкість становить близько 1,6 м/с, тоді як поблизу стінки – приблизно 0,6 м/с.

На рис. 3.18–3.20 подано результати, що відображають розподіл температури в теплообмінній трубці.

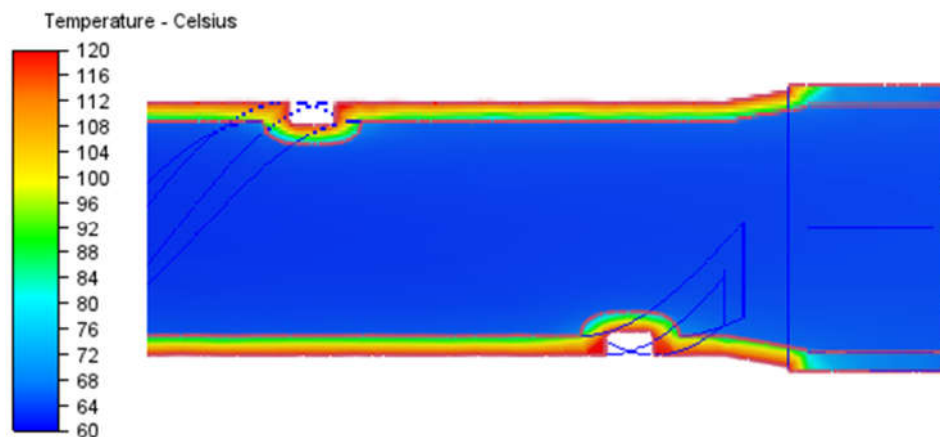


Рис. 3.18. Температура рідини на виході з теплообмінної трубки

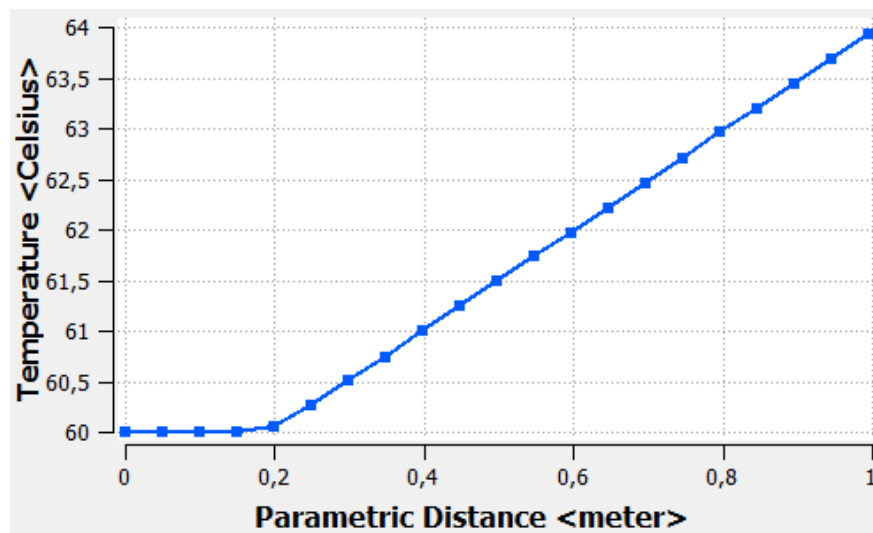


Рис. 3.19. Температура рідини по довжині теплообмінної трубки

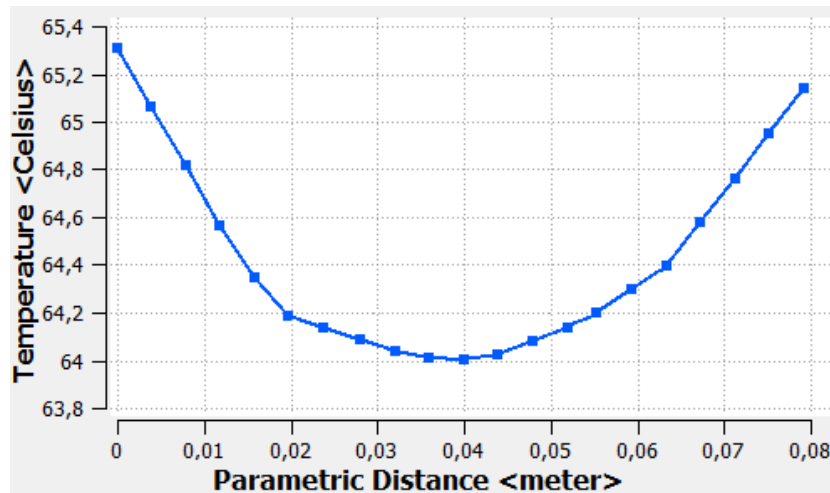


Рис. 3.20. Температура рідини по поперечному перерізу (на виході з теплообмінної трубки)

Встановлено, що по осі трубки температура рідини підвищується до 64 °С, тоді як поблизу стінок – до 65,2–65,3 °С. Порівняно зі гладкою трубкою, внаслідок інтенсифікації турбулентності у пристінковій зоні спостерігається зниження температури рідини біля стінок на 2,5 °С. Зменшення температури по осі трубки на 0,5 °С пов’язане зі збільшенням швидкості руху потоку.

Результати досліджень гідродинаміки та теплообміну у теплообмінній трубці з прямокутним профілем накатки та кроком між витками 100 мм.

На рис. 3.21–3.23 наведено результати CFD-моделювання, що дають змогу проаналізувати характер течії рідини в теплообмінній трубці з прямокутним профілем накатки та кроком між витками 100 мм.

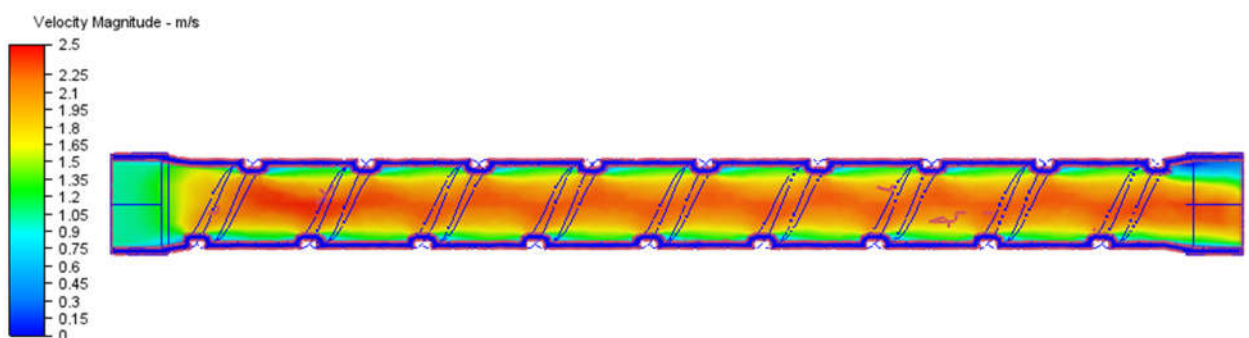


Рис. 3.21. Розподілення швидкості рідини в теплообмінній трубці

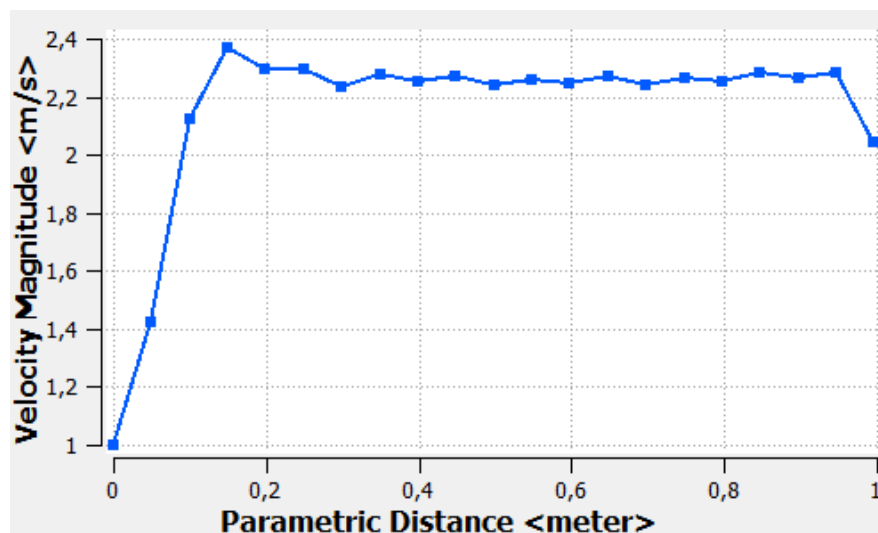


Рис. 3.22. Швидкість рідини по довжині теплообмінної трубки

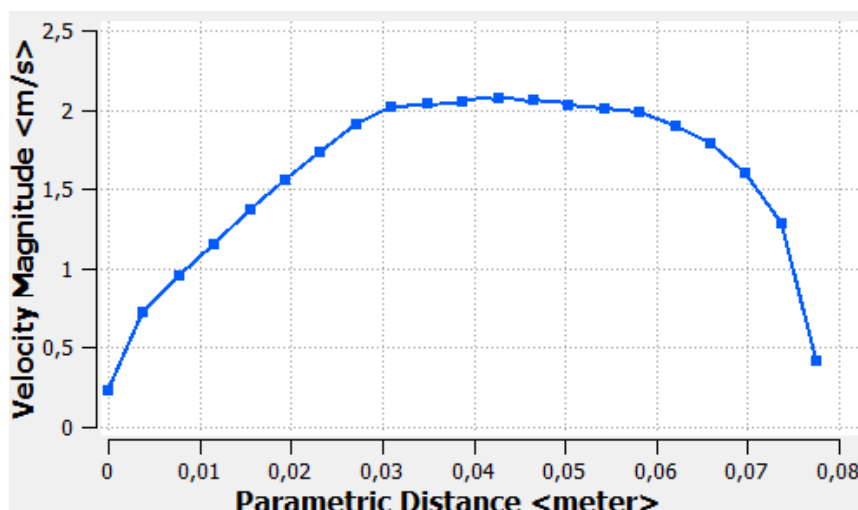


Рис. 3.23. Швидкість рідини по поперечному перерізу (на виході з теплообмінної трубки)

Встановлено, що зменшення кроку між витками накатки спричиняє зростання максимальної швидкості рідини до 2,4 м/с. На виході з трубки осьова швидкість становить близько 2 м/с, тоді як поблизу стінок – 0,25–0,4 м/с. Збільшення швидкості потоку пояснюється посиленням закручування рідини та інтенсифікацією турбулентних структур, що формуються у звужених міжвиткових каналах.

На рис. 3.24-3.25 зображено графіки зміни температури по осі та поперечному перерізу такої теплообмінної трубки.

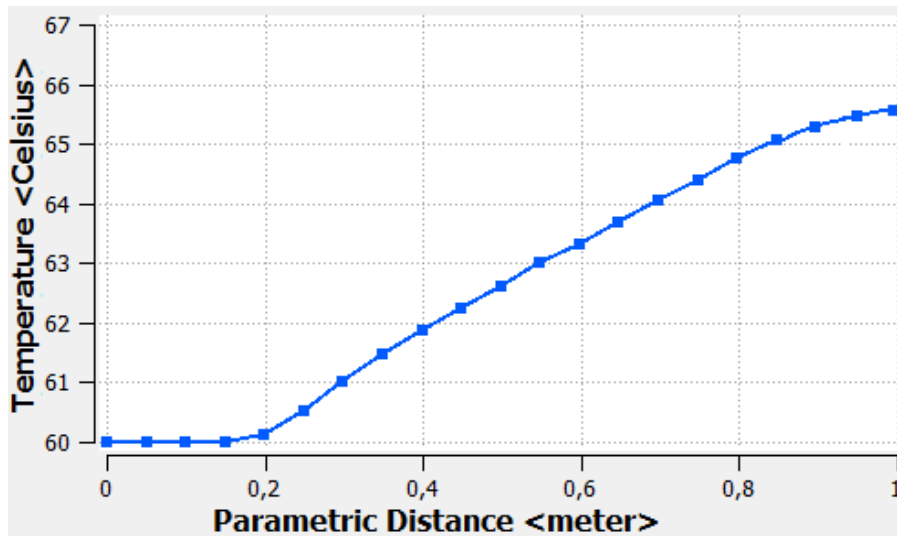


Рис. 3.24. Температура рідини по довжині теплообмінної трубки

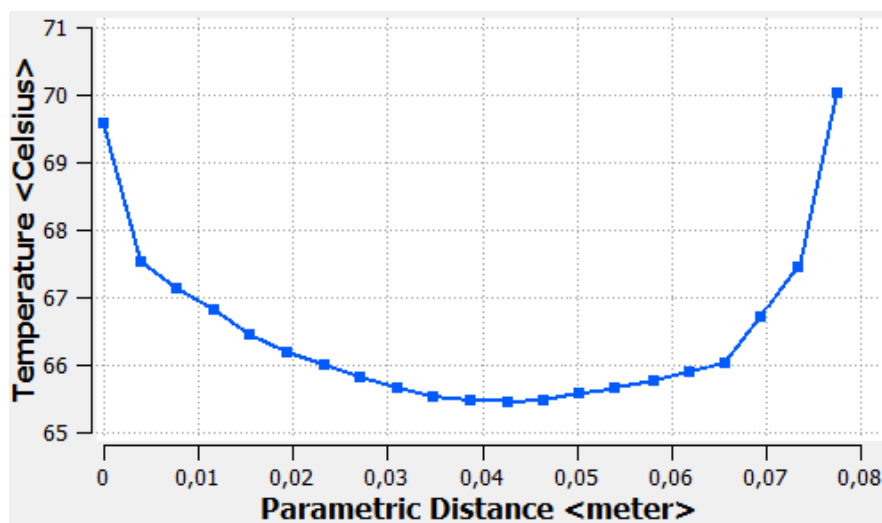


Рис. 3.25. Температура рідини по поперечному перерізу (на виході з теплообмінної трубки)

Аналіз отриманих результатів показав, що в такій трубці температура рідини досягає 65,5 °C по осі та 69,8–70 °C поблизу стінок, що відповідно на 1,5 °C та 4,5 °C вище, ніж у трубці з кроком витків 200 мм у тих самих контрольних точках. Підвищення температури рідини зумовлене збільшенням

ефективної теплообмінної поверхні та інтенсивнішим перемішуванням потоку.

Результати досліджень гідродинаміки та теплообміну у теплообмінній трубці з прямокутним профілем накатки та кроком між витками 50 мм.

На рис. 3.26–3.28 наведено результати, що відображають розподіл швидкості рідини в теплообмінній трубці з прямокутним профілем накатки та кроком між витками 50 мм.

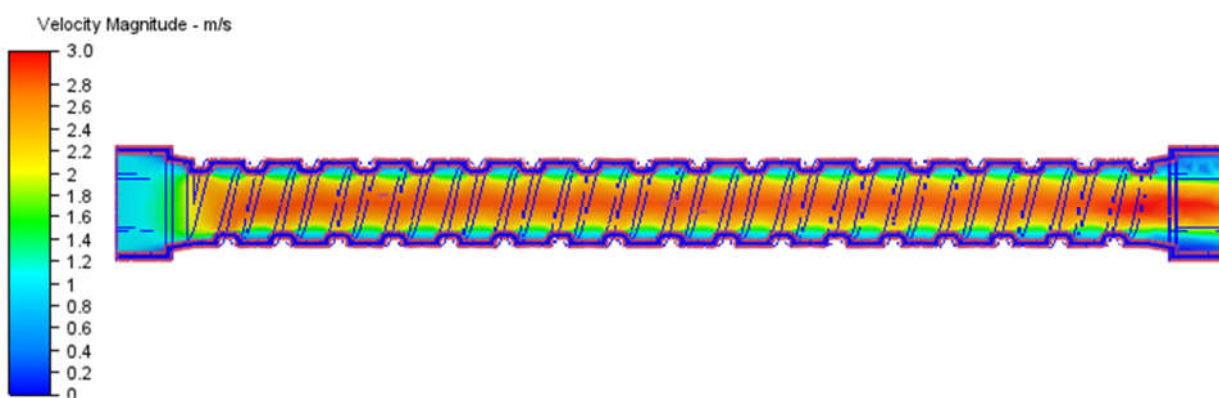


Рис. 3.26. Розподілення швидкості рідини в теплообмінній трубці

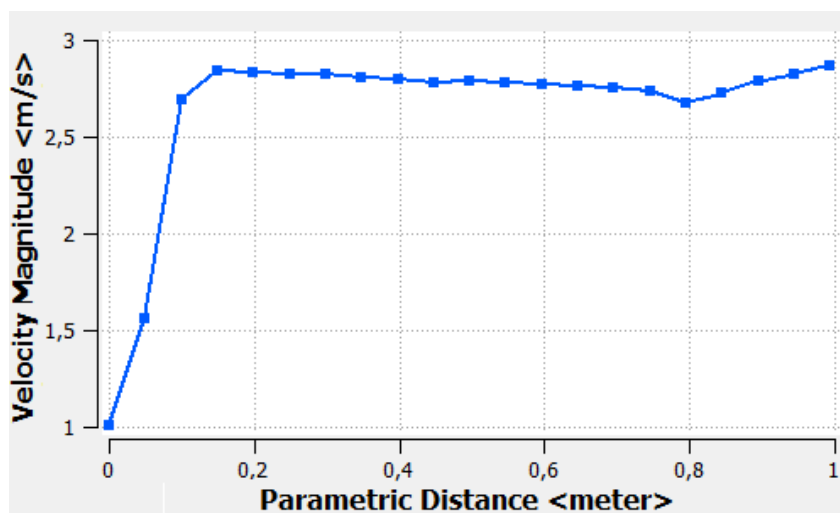


Рис. 3.27. Швидкість рідини по довжині теплообмінної трубки

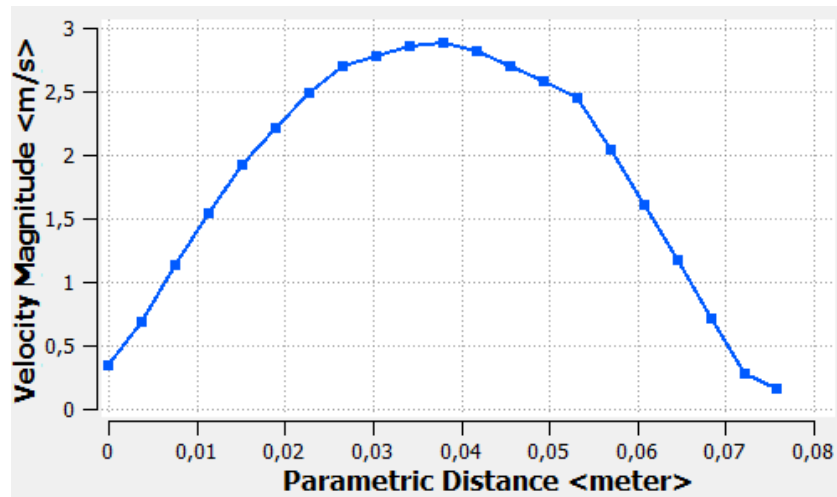


Рис. 3.28. Швидкість рідини по поперечному перерізу (на виході з теплообмінної трубки)

Встановлено, що, як і в попередніх випадках, зменшення кроку між витками накатки призводить до збільшення швидкості руху рідини. Уздовж трубки рідина рухається зі швидкістю 2,8–2,9 м/с. На виході з трубки осьова швидкість становить 2,9 м/с, тоді як поблизу стінок вона знижується до 0,2–0,4 м/с

На рис. 3.29-3.30 зображено графіки зміни температури по осі та поперечному перерізу такої теплообмінної трубки.

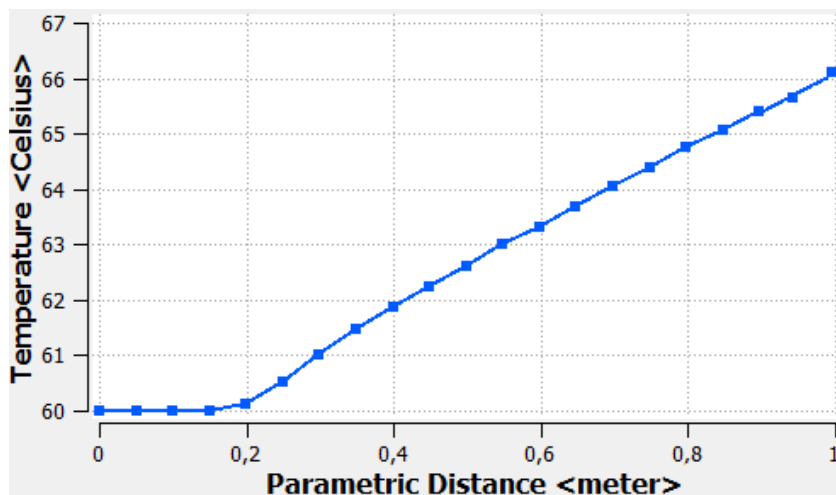


Рис. 3.29. Температура рідини по довжині теплообмінної трубки

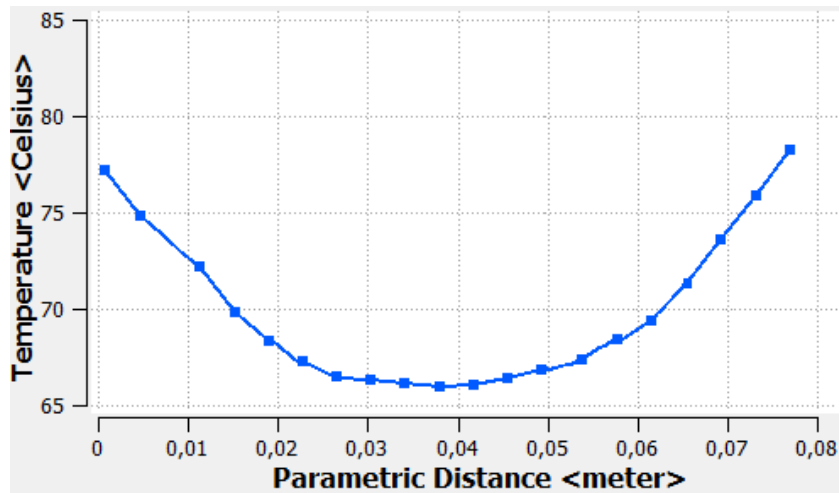


Рис. 3.30. Температура рідини по поперечному перерізу (на виході з теплообмінної трубки)

Зі зменшенням кроку між витками накатки до 50 мм температура рідини біля стінок зростає до 77–79 °С, що на 9 °С вище, ніж при кроці 100 мм. При таких умовах можливий перегрів соку, що знижує якість цукру та спричиняє утворення пригару на внутрішній поверхні трубки.

Результати досліджень гідродинаміки та теплообміну у теплообмінній трубці з прямокутним профілем накатки та кроком між витками 60 мм.

На рис. 3.31–3.33 наведено результати, які відображають розподіл швидкості рідини в теплообмінній трубці з прямокутним профілем накатки та кроком між витками 60 мм.

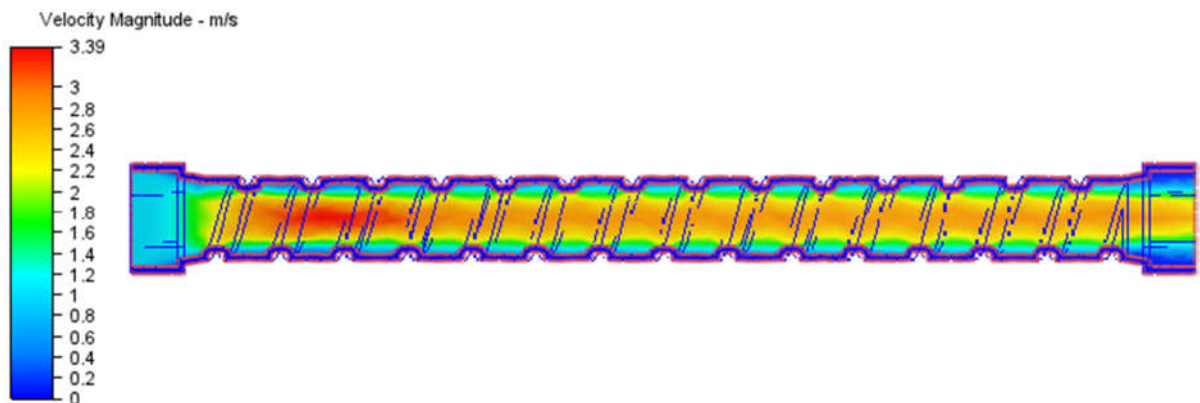


Рис. 3.31. Розподілення швидкості рідини в теплообмінній трубці

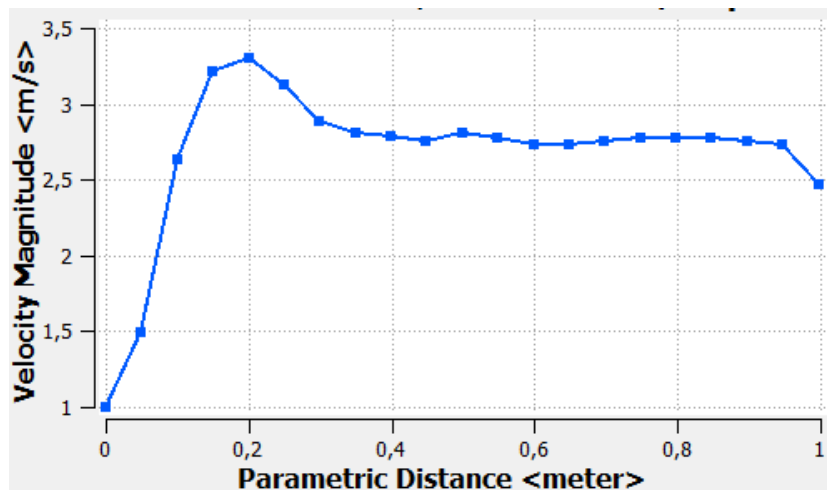


Рис. 3.32. Швидкість рідини по довжині теплообмінної трубки

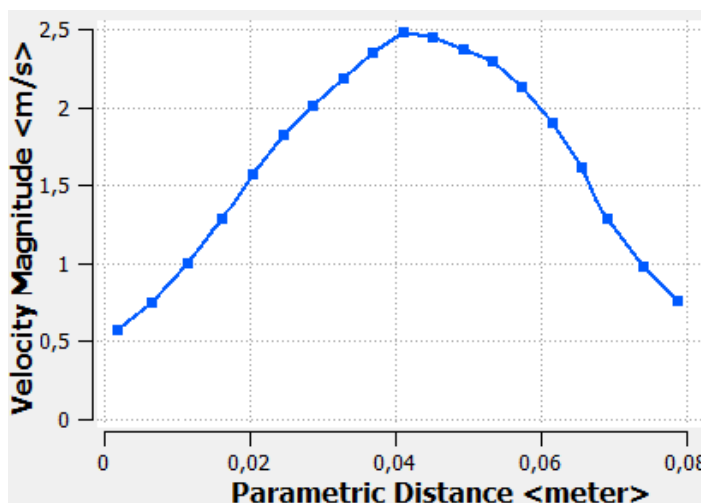


Рис. 3.33. Швидкість рідини по поперечному перерізу (на виході з теплообмінної трубки)

Встановлено, що в такій трубці формується локальна зона підвищеної швидкості потоку до 3,4 м/с, яка до виходу з теплообмінної трубки зменшується до 2,5 м/с по осі та до 0,5–0,8 м/с поблизу стінок.

На рис. 3.34-3.35 зображено графіки зміни температури по осі та поперечному перерізу такої теплообмінної трубки.

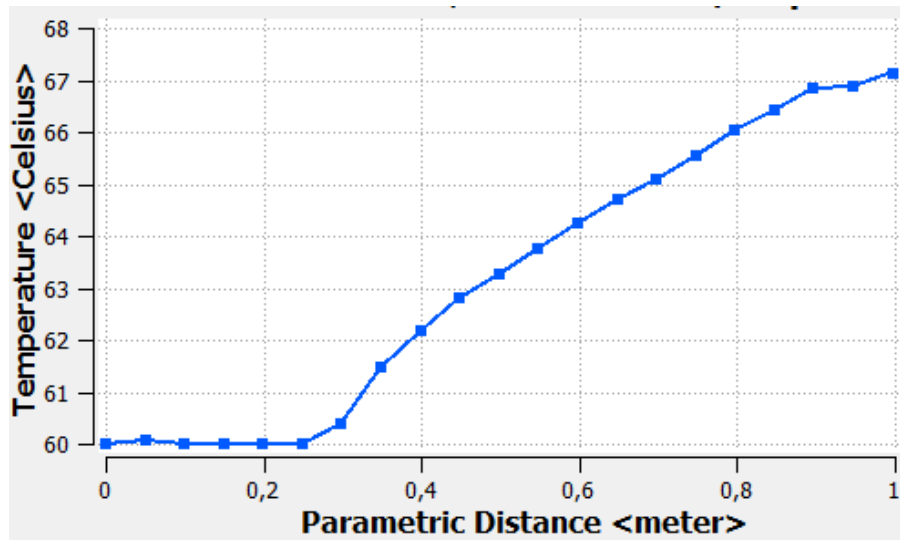


Рис. 3.34. Температура рідини по довжині теплообмінної трубки

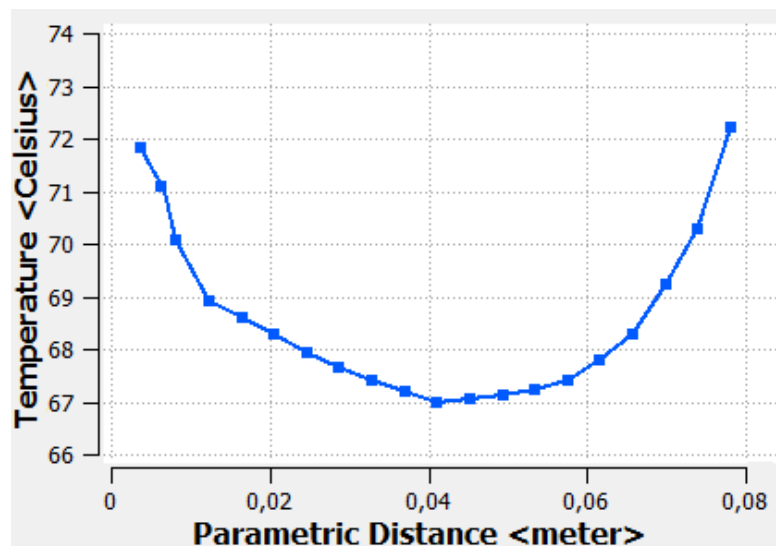


Рис. 3.35. Температура рідини по поперечному перерізу (на виході з теплообмінної трубки)

Аналіз отриманих даних показав, що в такій трубці температура рідини досягає 72–72,3 °С поблизу стінок та 67 °С по центру. Збільшення кроку між витками з 50 мм до 60 мм спричинило перерозподіл потоку рідини в трубці, що привело до зниження температури поблизу стінок на 5–7 °С та підвищення температури по центру на 1,5 °С.

Результати досліджень гідродинаміки та теплообміну у теплообмінній трубі з сферичним профілем накатки та кроком між витками 60 мм.

На рис. 3.36–3.38 наведено результати, що відображають розподіл швидкості рідини в теплообмінній трубі з сферичним профілем накатки та кроком між витками 60 мм.

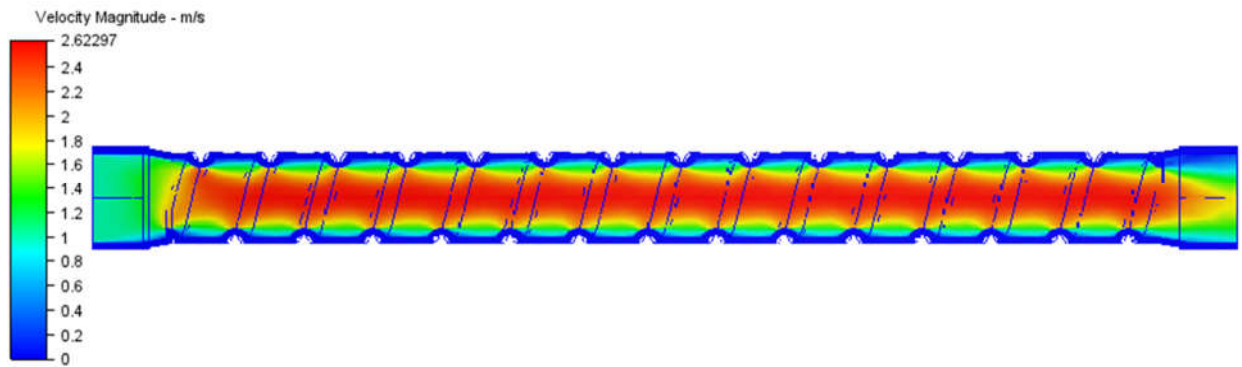


Рис. 3.36. Розподілення швидкості рідини в теплообмінній трубі

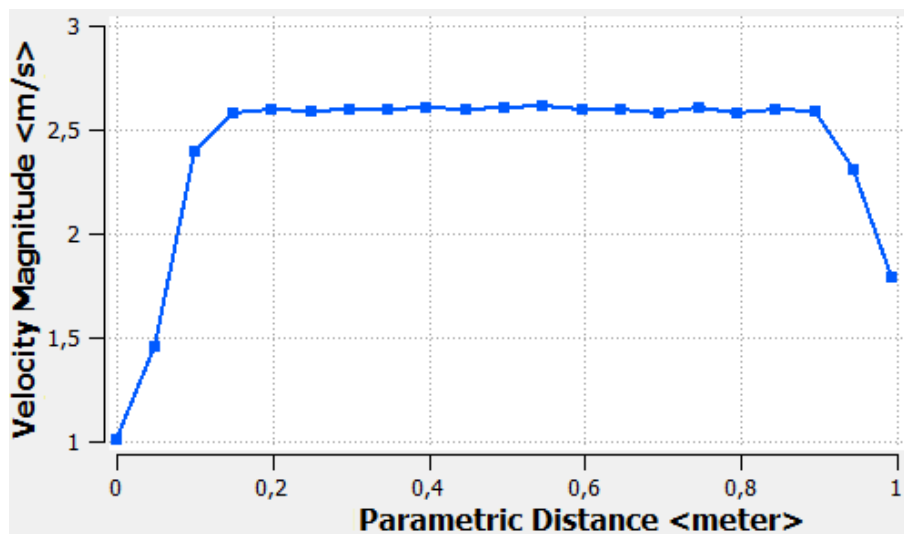


Рис. 3.37. Швидкість рідини по довжині теплообмінної трубки

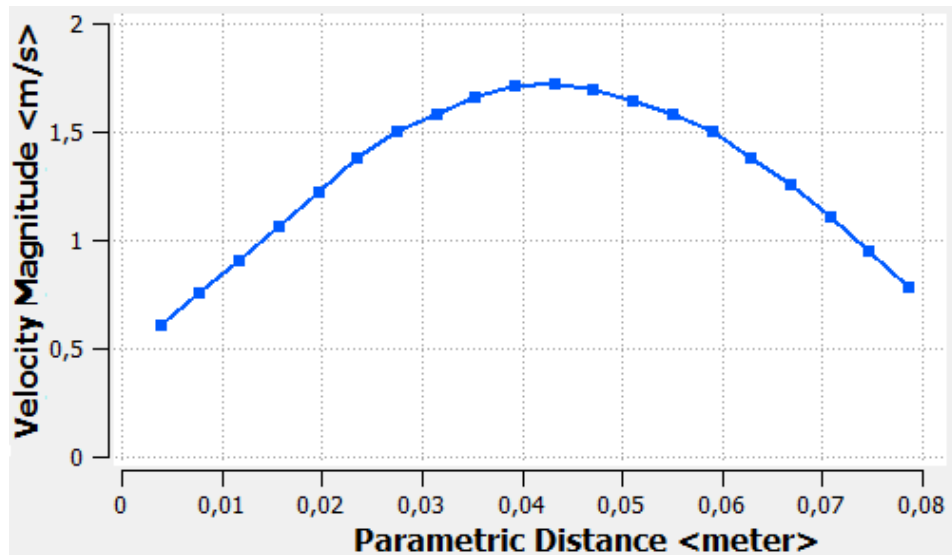


Рис. 3.38. Швидкість рідини по поперечному перерізу (на виході з теплообмінної трубки)

Аналіз даних показав, що максимальна швидкість рідини досягається по осі теплообмінної трубки і становить 2,6 м/с. На виході з трубки швидкість знижується до 1,7 м/с по осі та до 0,6–0,8 м/с поблизу стінок.

На рис. 3.39–3.40 наведено графіки зміни температури рідини по осі та в поперечному перерізі цієї теплообмінної трубки.

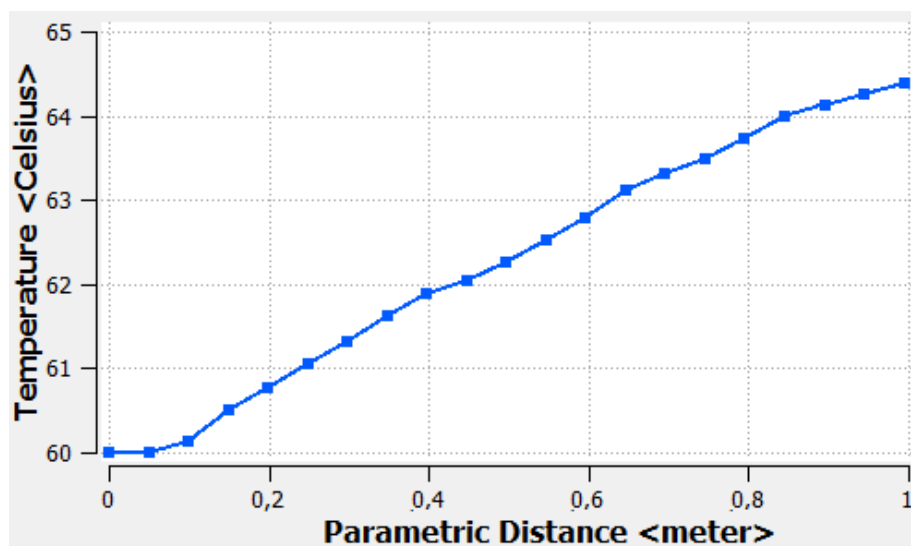


Рис. 3.39. Температура рідини по довжині теплообмінної трубки

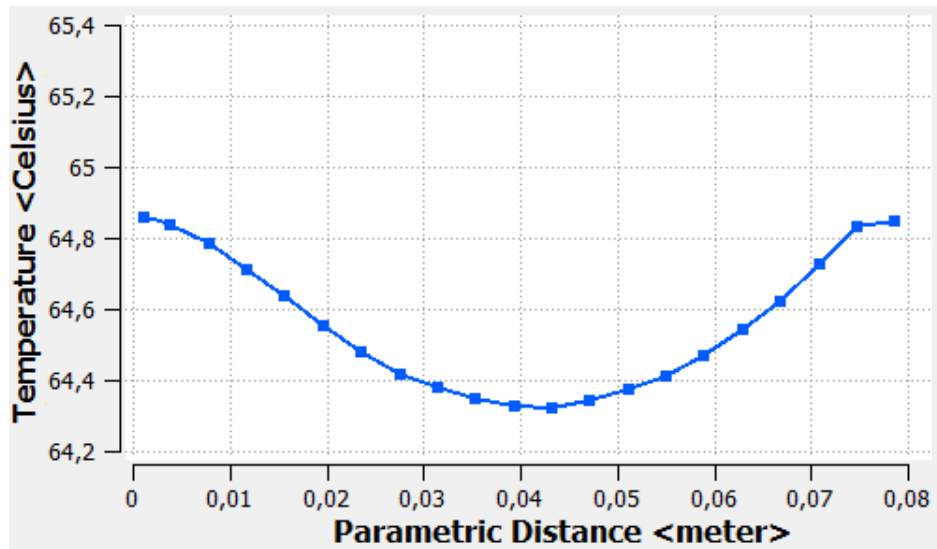


Рис. 3.40. Температура рідини по поперечному перерізу (на виході з теплообмінної трубки)

У такій теплообмінній трубці рідина нагрівається до 64,8–64,9 °С поблизу стінок та до 64,3 °С по центру. Таким чином, нагрівання рідини відбувається майже рівномірно по всьому поперечному перерізу трубки.

Результати досліджень гідродинаміки та теплообміну у теплообмінній трубці з трикутним профілем накатки та кроком між витками 60 мм.

На рис. 3.41–3.43 наведено результати, що ілюструють розподіл швидкості рідини в теплообмінній трубці з трикутним профілем накатки та кроком між витками 60 мм

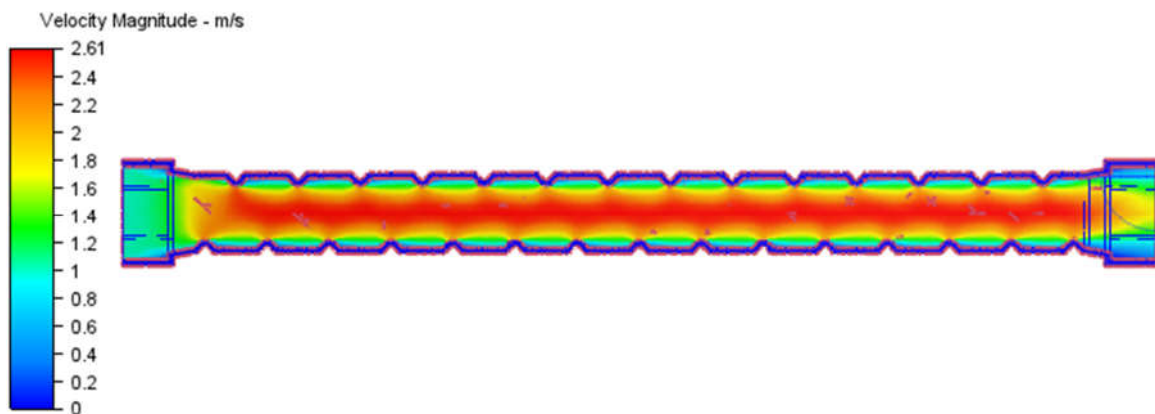


Рис. 3.41. Розподілення швидкості рідини в теплообмінній трубці

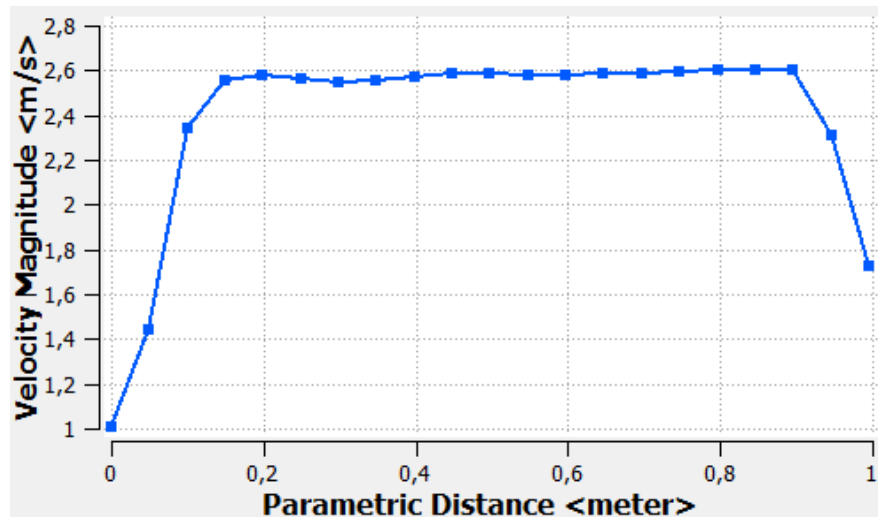


Рис. 3.42. Швидкість рідини по довжині теплообмінної трубки

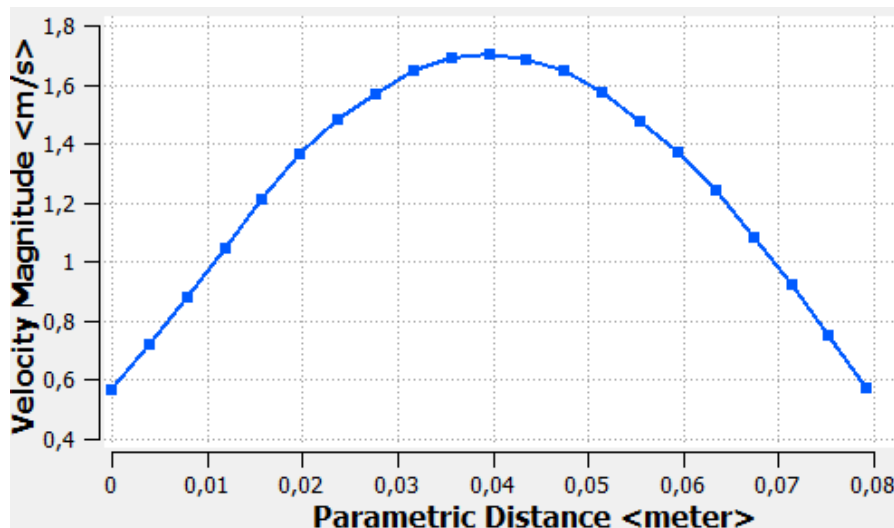


Рис. 3.43. Швидкість рідини по поперечному перерізу (на виході з теплообмінної трубки)

Встановлено, що такий профіль накатки забезпечує швидкість рідини по центру теплообмінної трубки таку ж, як у випадку сферичного профілю (2,6 м/с уздовж труби та 1,7 м/с у поперечному перерізі). Водночас поблизу стінок швидкість є дещо нижчою – близько 0,6 м/с.

На рис. 3.44-3.45 зображено графіки зміни температури по осі та поперечному перерізу такої теплообмінної трубки.

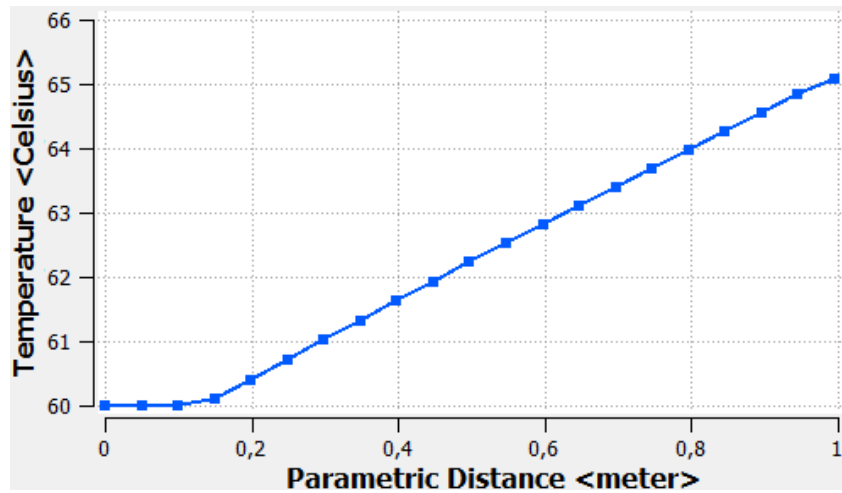


Рис. 3.44. Температура рідини по довжині теплообмінної трубки

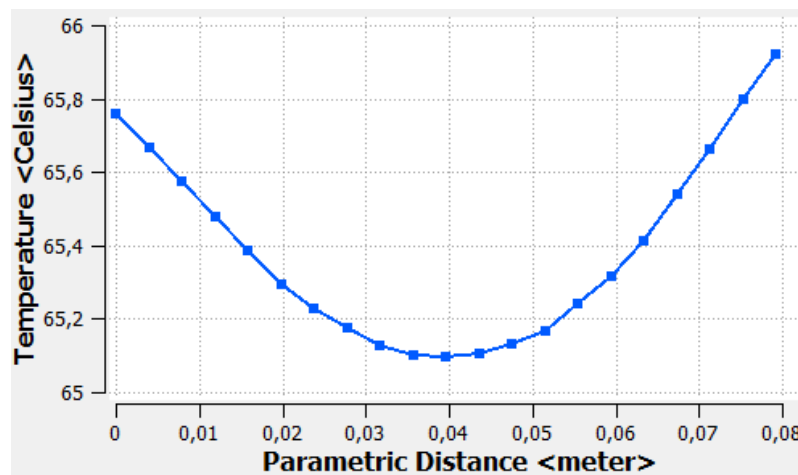


Рис. 3.45. Температура рідини по поперечному перерізу (на виході з теплообмінної трубки)

Встановлено, що в такій теплообмінній трубці рідина нагрівається до 65,8–65,9 °С поблизу стінок та до 65,1 °С по центру, що приблизно на 1 °С перевищує нагрівання рідини в трубці з сферичною накаткою.

Результати досліджень гідродинаміки та теплообміну у теплообмінній трубці з трапецевидним профілем накатки та кроком між витками 60 мм.

На рис. 3.46-3.48 наведено дані щодо розподілення швидкості рідини у теплообмінній трубці з трапецевидним профілем накатки та кроком між витками 60 мм.

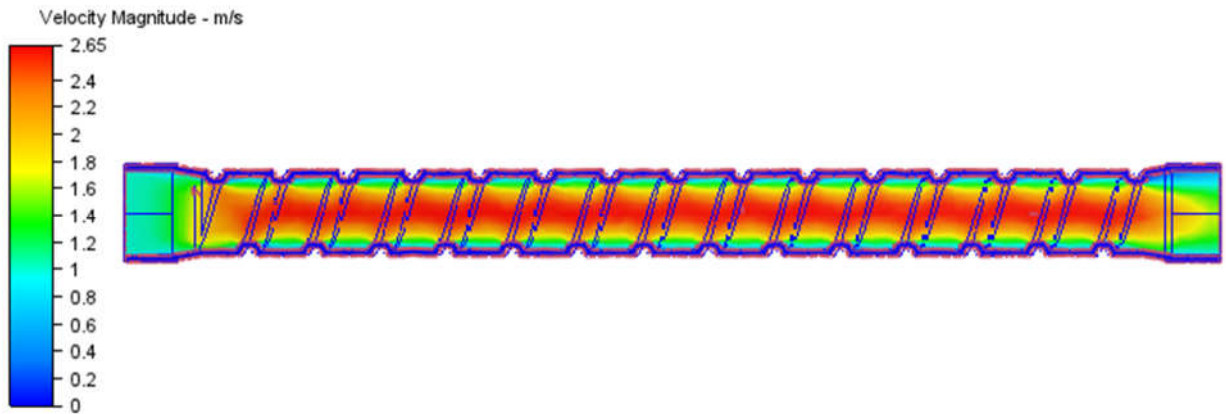


Рис. 3.46. Розподілення швидкості рідини в теплообмінній трубці

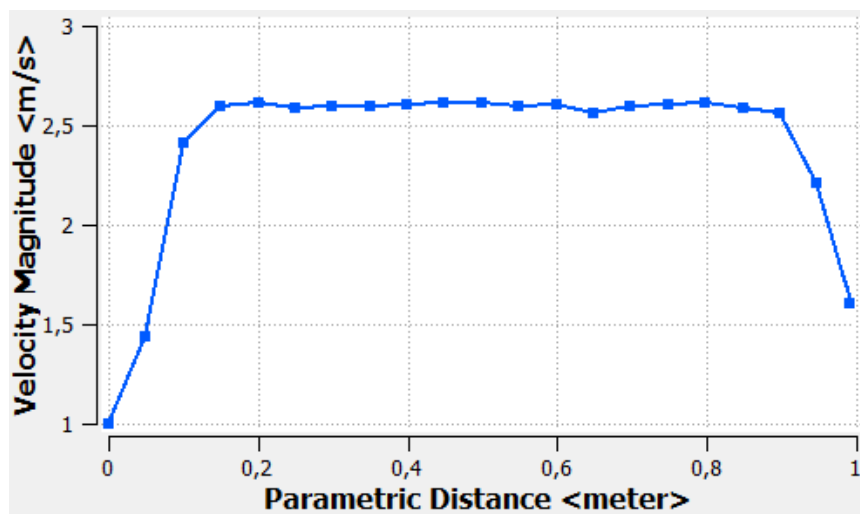


Рис. 3.47. Швидкість рідини по довжині теплообмінної трубки

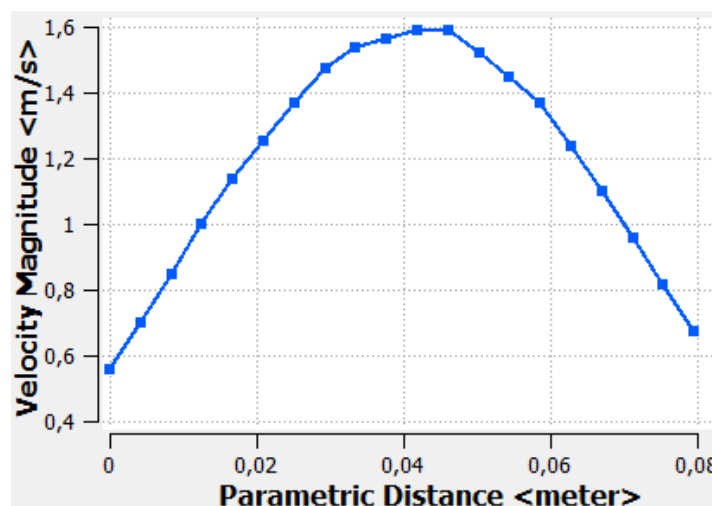


Рис. 3.48. Швидкість рідини по поперечному перерізу (на виході з теплообмінної трубки)

Встановлено, що такий профіль накатки забезпечує максимальну швидкість рідини вздовж труби 2,6 м/с, яка зменшується до 1,6 м/с на виході з трубки. Поблизу стінок швидкість становить 0,55–0,7 м/с.

На рис. 3.49-3.50 зображено графіки зміни температури по осі та поперечному перерізу такої теплообмінної трубки.

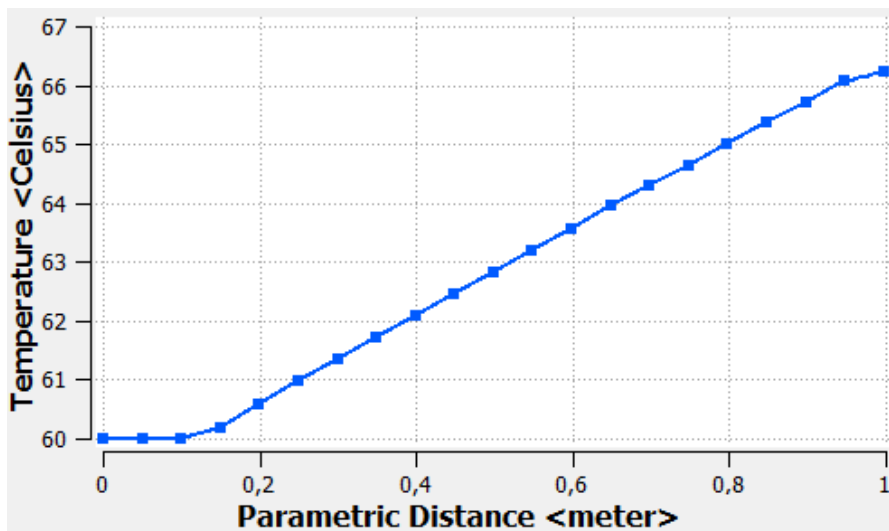


Рис. 3.49. Температура рідини по довжині теплообмінної трубки

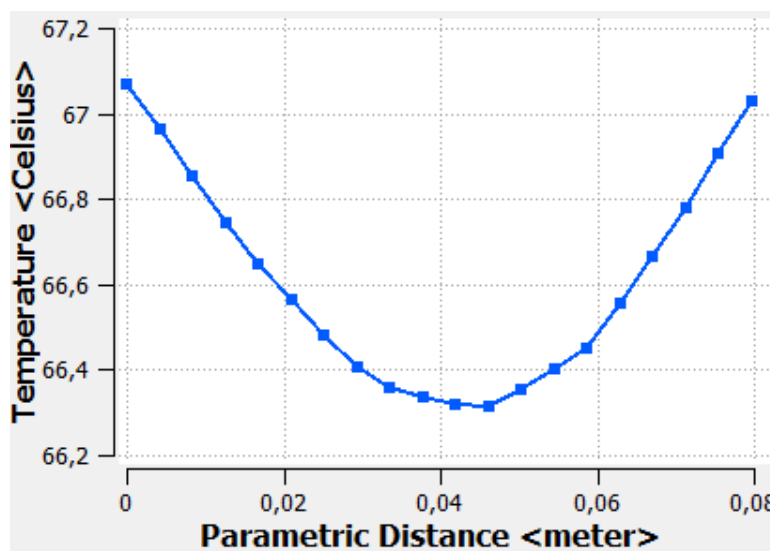


Рис. 3.50. Температура рідини по поперечному перерізу (на виході з теплообмінної трубки)

Встановлено, що в такій теплообмінній трубці рідина нагрівається до 67,1 °С поблизу стінок та до 66,3 °С по центру, що на 1,2 °С перевищує нагрівання рідини в трубці з трикутною накаткою і на 2,2 °С – у трубці з сферичною накаткою.

У таблиці 3.1 подано узагальнені дані результатів проведеного дослідження.

Таблиця 3.1. Узагальнені дані результатів проведеного дослідження

Профіль теплообмінної трубки	Максимальна швидкість рідини	Швидкість рідини по центру (на виході з трубки)	Швидкість рідини біля стінок (на виході з трубки)	Температура рідини по центру (на виході з трубки)	Температура рідини біля стінок (на виході з трубки)
Гладка	1,7-1,75	1,32-1,35	0,4	64,5	65,7-67,5
З прямокутною накаткою	3,4	2,5	0,5-0,8	67	72-72,3
З сферичною накаткою	2,6	1,7	0,6-0,8	64,3	64,8-64,9
З трикутною накаткою	2,6	1,7	0,6	65,1	65,8-65,9
З трапецевидною накаткою	2,6	1,6	0,55-0,7	66,3	67,1

Отже, для процесу уварювання цукрового сиропу у вакуум-апараті доцільніше використовувати теплообмінну трубку з трапецевидним профілем накатки. Така конструкція забезпечує максимальну швидкість рідини вздовж труби 2,6 м/с (із поступовим зниженням до 1,6 м/с на виході) та швидкість поблизу стінок 0,55–0,7 м/с. У цій трубці температура рідини досягає 67,1 °С біля стінок і 66,3 °С по центру, що гарантує майже рівномірний нагрів по всьому поперечному перерізу.

Здавалося б, використання теплообмінної трубки з прямокутним профілем накатки, при якій температура поблизу стінок становить 72–72,3 °С,

а по центру – 65,7–67,5 °С, могло б бути ефективнішим. Проте у процесі уварювання така локальна температура біля стінок вважається ризиковою: сироп може почати карамелізуватися на поверхні трубки. Крім того, різниця температур між стінками (72 °С) і центром (наприклад, 67 °С) створює значний температурний градієнт, що може спричинити локальне пересушування або перегрів невеликих обсягів сиропу.

3.4. Устрій та принцип роботи модернізованого об'єкту проектування.

На основі результатів наукового дослідження пропонується застосувати у гріючій камері вакуум-апарата А2-ПВЕ-60 теплообмінні трубки з трапецевидним профілем накатки (рис. 3.51).

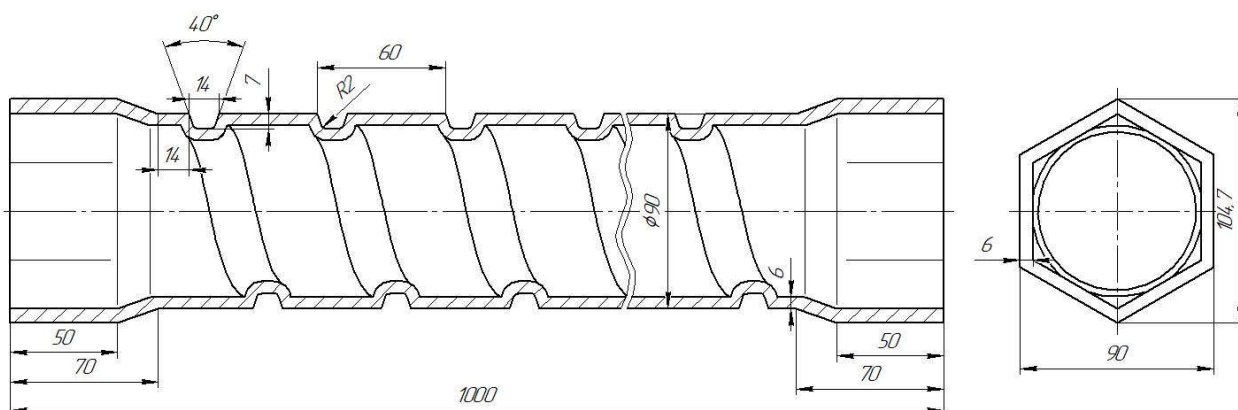


Рис. 3.51. Теплообмінні трубка з трапецевидним профілем накатки

Удосконалений вакуум-апарат А2-ПВЕ-60 (рис. 3.52) конструктивно складається з двох циліндричних корпусів – верхнього 2 та нижнього 3, а також гріючої камери 1 (рис. 3.53), у центрі якої розташована циркуляційна труба. До цієї камери через патрубок 9 подається гріюча пара. Надходження цукрового сиропу здійснюється через патрубки, розташовані в конічному днищі, безпосередньо до циркулятора 8, тоді як відведення готової утфельної маси відбувається через спусковий затвор 4.

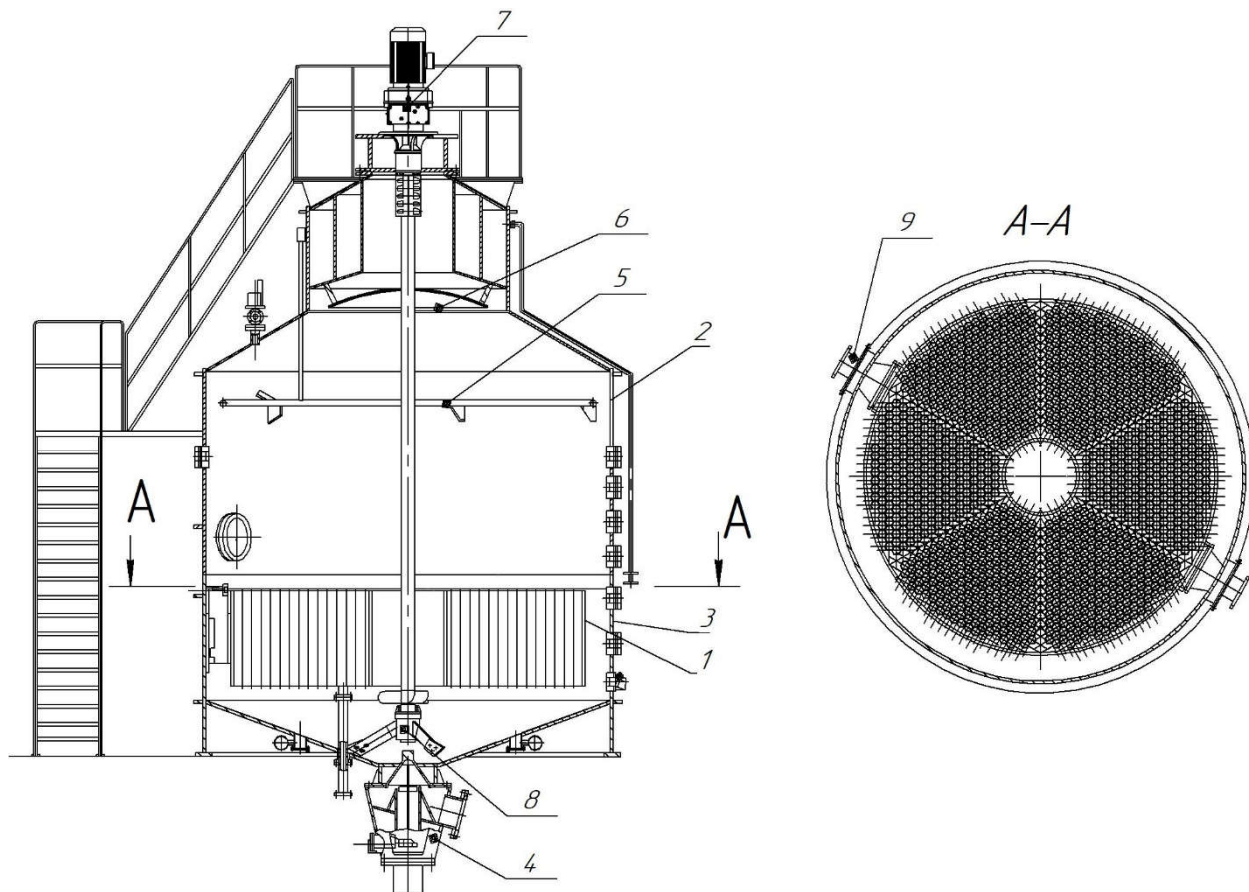


Рис. 3.52. Удосконалений вакуум-апарат А2-ПВЕ-60:

- 1 – гріюча камера; 2 – верхній корпус; 3 – нижній корпус; 4 – спусковий затвор; 5 – пропарювальний пристрій; 6 – сепаратор; 7 – привід; 8 – циркулятор; 9 – пристрій подачі пари

Гріюча камера даного вакуум-апарата (рис. 3.53) складається з ципуляційної труби 1, теплообмінних труб 2, обичайки 3, кільця 4, патрубка 5 для підведення пари.

Принцип роботи модернізованого вакуум-апарат А2-ПВЕ-60 полягає в наступному. Спочатку апарат заповнюють свіжим сиропом до рівня, що забезпечує повне перекриття гріючої камери 1. Після цього через патрубок 9 у гріючу камеру подається насичена пара, яка створює необхідні умови для початку уварювання. У ході нагрівання сироп поступово переходить у стан утфелю, у якому відбувається інтенсивне нарощування кристалів сахарози.

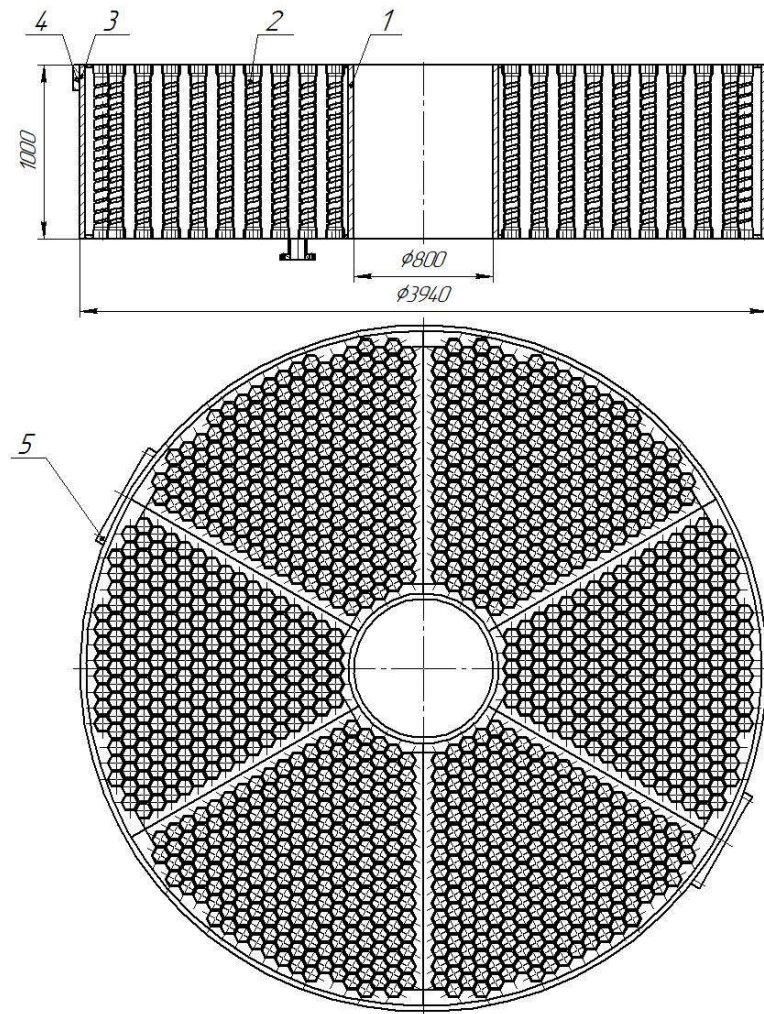


Рис. 3.53. Модернізована гріюча камера вакуум-апарат А2-ПВЕ-60:
 1 – циркуляційна труба; 2 – теплообмінна трубка; 3 – обичайка; 4 – кільце;
 5 – патрубок

Подача сиропу на лопаті циркулятора 8 забезпечує активну циркуляцію та перемішування утфельної маси всередині апарата. Проходячи через трубки гріючої камери, розчин додатково турбулізується завдяки гвинтовим накаткам, виконаним на їхній поверхні. Це підвищує ефективність теплообміну та пришвидшує нагрівання і випаровування вологи.

Періодичне дозавантаження сиропу здійснюється до підтримання необхідного рівня утфелю в апараті. Коли процес уварювання досягає завершальної стадії, а кристали цукру набувають заданих розмірів і структури, відбувається випуск готового продукту через спусковий затвор 4.

3.5 Висновки.

1. У середовищі програмного забезпечення Autodesk CFD з використанням чисельного методу кінцевих об'ємів та рівнянь Нав'є-Стокса у поєднанні з $k-\varepsilon$ моделлю турбулентності, а також із урахуванням конвективного теплообміну, фізичних властивостей модельних середовищ і заданих граничних умов, побудовано імітаційну модель об'єкта досліджень.

2. Створена CFD-модель забезпечила можливість відтворення гідродинамічних і теплових процесів у теплообмінних трубках різного конструктивного виконання: гладкій, а також із профілем накатки прямокутної, сферичної, трикутної та трапецевидної форми.

3. Результати чисельного аналізу показали, що трубки з трапецевидним профілем накатки забезпечують найбільш ефективну інтенсифікацію теплообміну. Це проявляється у зростанні швидкості руху сиропу поблизу стінки та формуванні більш рівномірного температурного поля по перерізу трубки, що вказує на підвищення ефективності прогрівання цукрового сиропу.

4. На основі отриманих результатів запропоновано удосконалену конструкцію вакуум-апарата А2-ПВЕ-60 із гріючою камерою, оснащеною теплообмінними трубками з трапецевидним профілем накатки.

4. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

4.1. Технологічний та конструктивний розрахунок вакуум-апарата

Розрахунок площі поверхні теплообміну гріючої камери

Поверхня нагріву (номінальна) гріючої камери визначається за рівнянням:

$$F_k = F_{mp.} + F_{ц} + F_{об.} + F_{mp.p.}, \text{ м}^2$$

де: $F_{mp.}$ – поверхня нагріву кип’ятильних труб, м^2 ;

$F_{ц}$ – поверхня нагріву циркуляційної труби, м^2 ;

$F_{об.}$ – поверхня нагріву обичайки корпусу гріючої камери, м^2 ;

$F_{mp.p.}$ – поверхня нагріву верхньої та нижньої трубних решіток, м^2 .

Визначаємо поверхню теплообміну у кип’ятильних труб за формулою:

$$F_{mp.} = \pi \cdot d \cdot l \cdot n, \text{ м}^2;$$

де: d – діаметр кип’ятильних труб, $d = 0,078$ м;

l – активна довжина труб, $l = 0,9$ м;

n – кількість труб у камері, $n = 1326$ шт.

$$F_{mp.} = 3,14 \cdot 0,078 \cdot 0,9 \cdot 1326 = 292,3 \text{ м}^2.$$

Поверхня нагріву циркуляційної труби гріючої камери:

$$F_{ц} = \pi \cdot d_m \cdot l, \text{ м}^2,$$

де: d_m – діаметр циркуляційної труби, $d_m = 0,8$ м;

l – довжина циркуляційної труби, $l = 1$ м.

$$F_{ц} = 3,14 \cdot 0,8 \cdot 1 = 2,5 \text{ м}^2.$$

Поверхня нагріву обичайки корпусу гріючої камери:

$$F_{об.} = \pi \cdot D_k \cdot l_{об.}, \text{ м}^2,$$

де: D_k – діаметр зовнішньої обичайки гріючої камери, $D_k = 3,94$ м;

$l_{об.}$ – висота обичайки, $l_{об.} = 1$ м.

$$F_{об.} = 3,14 \cdot 3,94 \cdot 1 = 10,5 \text{ м}^2.$$

Поверхня нагріву верхньої та нижньої трубних решіток:

$$F_{mp,p} = 2[(\pi \cdot D_k^2 / 4 - \pi \cdot d_m^2 / 4) - \pi \cdot d^2 / 4 \cdot n], \text{ м}^2,$$

$$F_{mp,p} = 2[(3,14 \cdot 3,94^2 / 4 - 3,14 \cdot 0,8^2 / 4) - 3,14 \cdot 0,078^2 / 4 \cdot 1326] = 23,3 \text{ м}^2.$$

Поверхня нагріву гріючої камери вакуум-апарата:

$$F_k = 292,3 + 2,5 + 10,5 + 23,3 = 328,6 \text{ м}^2$$

Розрахунок товщини стінки обичайки гріючої камери.

Мінімальну товщину стінки обичайки гріючої камери визначаємо за формулою:

$$S_k = (P_p \cdot D_k / 2 \varphi \cdot \sigma_{\text{од.}} - P_p) + C + C_1, \text{ мм},$$

де: P_p – розрахунковий тиск, МПа;

D_k – діаметр обичайки гріючої камери, мм;

φ – коефіцієнт міцності зварного шва;

$\sigma_{\text{од.}}$ – границя текучості матеріалу, з якого виготовлена обичайка;

C – додаток до розрахункової товщини стінки, мм;

C_1 – додаток на зміну товщини під впливом корозії, мм;

$$S_k = (0,4 \cdot 3940 / 2 \cdot 1 \cdot 131 - 0,4) + 1 + 0,8 = 7,8 \text{ мм}$$

Конструктивно приймемо товщину стінки обичайки гріючої камери $S_k = 10$ мм.

Перевірочний розрахунок обичайки гріючої камери при проведенні гідравлічного випробування при збільшеному тиску, щоб навантаження не перевищувало межі текучості матеріалу, з якого вона виготовлена:

$$S_k = (P_p \cdot D_k / 2 \varphi \cdot \sigma_{\text{од.}} - P_p) + C + C_1,$$

звідки:

$$\sigma^* = (P_p \cdot D_k + C + C_1 + P_p) / S_k \cdot 2 \varphi,$$

Приймемо, що $P_p = 0,63$ МПа, тоді:

$$\sigma^* = (0,63 \cdot 3940 + 1 + 0,8 + 0,63) / 10 \cdot 2 \cdot 1 = 124,2 \text{ МПа}.$$

Отже, зі збільшенням товщини обичайки гріючої камери до 10 мм фактичне напруження при випробувальному тиску не перевищує значення допустимого напруження, тобто умова міцності витримана.

Розрахунок товщини стінки циркуляційної труби гріючої камери.

Мінімальну товщину стінки циркуляційної труби знаходимо за формулою:

$$S_u = 0,47 \cdot d_m / 100 \cdot (P_p \cdot l_{об} / d_m)^{0,4} + C + C_1, \text{ мм}$$

де: d_m – внутрішній діаметр циркуляційної труби гріючої камери, мм;

P_p – розрахунковий тиск у гріючій камері, МПа;

$l_{об}$ – довжина обичайки, мм;

Тоді:

$$S_u = 0,47 \cdot 800 / 100 \cdot (0,4 \cdot 1000 / 800)^{0,4} + 1,0 + 0,8 = 4,7 \text{ мм.}$$

Розрахунок товщини трубної решітки гріючої камери

Розрахунок мінімальної товщини трубної решітки гріючої камери здійснюємо за формулою:

$$S = K_1 \cdot (P \cdot (a^2 + b^2) / 100 \cdot \sigma_{доо})^{1/2}, \text{ мм}$$

де: K_1 – коефіцієнт з'єднання труб, які приварені з однієї сторони;

a, b – відстань в трубній решітці між центрами отворів труб, мм.

Перевіряємо товщину по вимогах котлонагляду по пробному тиску, який складає $P_{пр} = 0,63$ МПа.

тоді,

$$S = 0,42 \cdot (0,63 \cdot (90^2 + 80^2) / 100 \cdot 131)^{1/2} = 3,5 \text{ мм}$$

Розрахунок товщини стінки корпусу (циліндричної частини)

Мінімальну товщину стінки визначаємо за формулою:

$$S_p = \frac{P \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \phi_p - P}; \text{ мм}$$

де: P – внутрішній тиск, МПа;

D – внутрішній діаметр корпусу апарата, мм;

$[\sigma]$ – допустиме напруження для матеріалу стінки при роботі апарата під надлишковим тиском та розрідженням, МПа;

S_p – товщина стінки обичайки гріючої камери, мм;

φ_p – коефіцієнт міцності поздовжнього зварного шва.

Тоді:

$$S_p = \frac{0,4 \cdot 3940}{2 \cdot 126 \cdot 10^{-0,4}} = 0,63 \text{ мм}$$

Виконавча товщина стінки:

$$S = S_p + C, \text{ мм}$$

де: C – прибавка до розрахункової товщини:

$$C = C_1 + C_2 + C_3,$$

де: C_1 – прибавка на компенсацію корозії та ерозію, мм;

C_2 – прибавка для компенсації від'ємного допуску, мм;

C_3 – технологічна прибавка, мм.

$$C = 1 + 0,8 + 2 = 3,8 \text{ мм}$$

$$S \geq 0,63 + 3,8 = 4,43 \text{ мм}$$

Визначення діаметра підвідних та відвідних патрубків

Розрахунковий внутрішній діаметр патрубка для гріючої пари визначаємо за формулою:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot V}{3600 \cdot \pi \cdot \omega}}, \text{ м}$$

де: V – витрата пари, м³/год;

$\omega_{гр.п.}$ – швидкість гріючої пари, м/с.

Тоді,

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 39088}{3600 \cdot 3,14 \cdot 25}} = 0,75 \text{ м}$$

Розрахунковий внутрішній діаметр патрубка для вторинної пари, приймаючи, що швидкість вторинної пари $\omega_{вт.п.} = 35$ м/с:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 47586}{3600 \cdot 3,14 \cdot 35}} = 0,69 \text{ м}$$

Розрахунковий внутрішній діаметр патрубку для відводу конденсату, приймаючи, що швидкість руху конденсату $\omega_k = 0,7$ м/с:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 68}{3600 \cdot 3,14 \cdot 0,7}} = 0,19 \text{ м}$$

Розрахунковий внутрішній діаметр патрубку для підведення соку, прийнявши, що швидкість його руху $U_c = 1$ м/с:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 120}{3600 \cdot 3,14 \cdot 1}} = 0,2 \text{ м}$$

Розрахунковий внутрішній діаметр патрубку для відбору увареного соку, приймаючи, що швидкість його руху $\omega_{в.с.} = 0,7$ м/с:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 53}{3600 \cdot 3,14 \cdot 0,7}} = 0,16 \text{ м}$$

Визначення мінімального діаметра циркуляційної труби

Приведена швидкість пари на виході з теплообмінних труб, м/с:

$$\omega'' = \frac{W_g}{3600 \cdot f_k \cdot \rho''};$$

де: W_g – кількість випарованої води, кг/год;

f_k – сумарна площа перерізу труб поверхні теплообміну, м²:

$$f_k = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n = \frac{3,14 \cdot 0,078^2}{4} \cdot 1326 = 6,33 \text{ м}^2$$

Тоді:

$$\omega'' = \frac{63600}{3600 \cdot 6,33 \cdot 1,316} = 2,12 \text{ м/с}$$

Швидкість циркуляції сиропу, м/с:

$$\omega = 0,33 \cdot (\omega'')^{0,38} \cdot \left(\frac{L_{yp}}{L}\right)^x \cdot \frac{\rho^g}{\rho^p};$$

де: L_{yp} – рівень соку у теплообмінних трубах, м;

L – довжина теплообмінних труб, м;

x – коефіцієнт, $x = 7,1 \cdot (\omega'')^{-0,58} = 4,6$ – для режиму I корпусу.

Тоді:

$$\omega_I = 0,33 \cdot (2,12)^{0,38} \cdot \left(\frac{0,9}{1}\right)^{4,6} \cdot \frac{940}{1060} = 0,24 \text{ м/с}$$

Допустима втрата напору в циркуляційній трубі (без врахування рівня соку над верхньою трубною решіткою):

$$\Delta P_u = \rho^p \cdot g \cdot 0,8 \cdot (L - L_{yp}) = 1060 \cdot 9,81 \cdot 0,8 \cdot (1 - 0,9) = 832$$

Максимально допустима швидкість соку у циркуляційній трубі, м/с:

$$\omega_u = \sqrt{\frac{\Delta P_u \cdot 2}{\rho^p \cdot \left(\Sigma \cdot \xi_m + \frac{L_u}{d_u} \cdot \lambda\right)}}$$

де: $\Sigma \xi_m$ – сума коефіцієнтів місцевих опорів:

$$\Sigma \xi_m = \xi_{вх} + \xi_{вих} + \xi_{повор} = 0,6 + 1,0 + 1,1 = 2,7;$$

d_u – передбачуваний діаметр циркуляційної труби, м;

λ – коефіцієнт тертя.

Максимально допустима швидкість соку у циркуляційній трубі для режиму роботи першого корпусу випарної установки, м/с:

$$\omega_{uI} = \sqrt{\frac{25372 \cdot 2}{1060 \cdot \left(2,7 + \frac{1}{0,8} \cdot 0,015\right)}} = 4,2 \text{ м/с}$$

Максимально допустима швидкість соку у циркуляційній трубі для режиму роботи IV корпусу випарної установки, м/с:

$$\omega_{uIV} = \sqrt{\frac{19690 \cdot 2}{1300 \cdot \left(2,6 + \frac{1}{0,8} \cdot 0,015\right)}} = 2,4 \text{ м/с}$$

Мінімально-допустимий діаметр циркуляційної труби, м:

$$d_u = \sqrt{\frac{0,03^2 \cdot n\omega}{n_u \cdot \omega_u}}$$

Мінімально-допустимий діаметр циркуляційної труби для режиму роботи першого корпусу випарної установки, м:

$$d_u = \sqrt{\frac{0,03^2 \cdot 1326 \cdot 0,24}{1 \cdot 4,2}} = 0,26 \text{ м}$$

Розрахунок потужності привода циркулятора

Число Рейнольдса:

$$Re = nd^2\rho/\mu$$

де: n – частота обертання циркулятора, об/с;

d – діаметр лопатей циркулятора, м;

ρ – густина утфелю, кг/м³;

μ – в'язкість утфелю, Н/м²·с.

$$Re = (0,8 \cdot 1,2^2 \cdot 1460) / 0,0116 = 114994$$

Критерій потужності:

$$K_N = 1,581 Re_e^{0,88} \left(\frac{D}{d}\right)^{0,26}$$

де: D – внутрішній діаметр вакуум-апарата (м).

Тоді,

$$K_N = 1,581 \cdot 114994^{0,88} (4,5/1,2)^{0,26} = 633258$$

Потужність, яка витрачається на перемішування, Вт:

$$N = K_N \mu n^2 d^3 = 633258 \cdot 0,0116 \cdot 0,8^2 \cdot 1,2^3 = 8124 \text{ Вт}$$

Розрахунок діаметра валу циркулятора у найменшому перерізі

Розрахунок виконуємо з урахуванням залежності міцності від крутного моменту, мм:

$$d = 1,71 \sqrt[3]{\frac{M_{кр}}{\tau_\delta}} + C$$

Додаток товщини на вплив корозії та ерозії (C) приймаємо $C = 1$ мм.

Допустиме напруження на кручення τ_δ :

$$\tau_\delta \approx 0,6\sigma_\delta, \text{ МПа}$$

де: σ_{∂} – допустиме напруження на розтяг, Н/м²:

$$\sigma_{\partial} = \frac{\sigma_{\sigma}^t}{n_{\sigma}} \cdot \eta$$

$$\sigma_{\partial} = \frac{\sigma_{\tau}^t}{n_{\tau}} \cdot \eta$$

де: σ_{σ}^t – границя міцності на розтяг, МПа;

n_{σ} та n_{τ} – коефіцієнти запасу міцності при згинальних та дотичних напруженнях. Матеріал валу циркулятора Сталь 45 ДСТУ 7809:2015.

Тоді,

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{K_{\sigma D} \cdot \sigma_a + \psi_{\sigma} \cdot \sigma_m}$$

де: $\sigma_a = \sigma$ – амплітуда номінальних згинальних напружень;

W_0 – осьовий момент опору, м³;

ψ_{σ} – коефіцієнт чутливості матеріалу до асиметрії циклу напружень при згинанні;

$K_{\sigma D} = 1,6$ – коефіцієнт концентрації напружень.

$$K_{\sigma D} = \frac{K_{\sigma} + K_{\sigma}^n - 1}{E_{\sigma}}$$

$$n_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{K_{\tau D} \cdot \tau_a + \psi_{\tau} \cdot \tau_m}$$

де: $\tau_a = \tau_m = \tau/2$ – амплітуда та середнє значення номінальних напружень кручення;

$K_{\tau D}$ – ефективний коефіцієнт концентрації напружень при крученні;

K_{σ}^n – коефіцієнт, який залежить від шорсткості поверхні;

E_{σ} – коефіцієнт впливу абсолютних розмірів деталей.

$$K_{\tau D} = \frac{K_{\tau} + K_{\tau}^n - 1}{E_{\tau}}$$

де: K_{τ} – ефективний коефіцієнт концентрації напружень;

K_{τ}^n – коефіцієнт стану поверхні;

E_{τ} – коефіцієнт впливу абсолютних розмірів деталей.

$$K_{\sigma D} = \frac{1,6 + 1,18 - 1}{0,78} = 2,28$$

$$K_{\tau D} = \frac{1,4 + 1,18 - 1}{0,78} = 2,$$

За нормативними даними для вала діаметром $d > 100$ мм, виготовленого зі сталі 45, $K_{\sigma D} = 2,45$, $K_{\tau D} = 1,9$. Приймаємо більші значення, тобто $K_{\sigma D} = 2,45$, $K_{\tau D} = 2,02$.

$$\tau = \frac{M_{кр}}{W_p}, \text{ МПа}$$

де: W_p – полярний момент опору;

$M_{кр}$ – крутний момент, Н/м²;

τ – напруження при крученні, МПа.

Тоді,

$$W_p = \frac{\pi d^3}{16} = \frac{3,14 \cdot 0,15^3}{16} = 0,00066 \text{ м}^3$$

$$\tau = \frac{1990}{0,00066} \approx 3 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\partial} = \frac{420}{8} \cdot 0,85 = 44,6 \text{ МПа}$$

$$n_{\tau} = \frac{150}{2,45 \cdot 7,5 + 0,05 \cdot 7,5} = 8$$

Розрахунковий діаметр вала циркулятора у найменшому перерізі, мм:

$$d = 1,71 \sqrt[3]{\frac{1990}{3 \cdot 10^6} + 0,001} = 0,149 \text{ м} \approx 150 \text{ мм}$$

4.2. Підбір конструкційних матеріалів

Підбір конструкційних матеріалів є одним із визначальних етапів проектування та виготовлення виробу. Від правильного вибору матеріалів залежать експлуатаційні характеристики вузлів, їхня міцність, надійність,

зносостійкість і довговічність. При цьому особливе значення має економічна доцільність – вибраний матеріал повинен не лише забезпечувати необхідні технічні параметри, а й бути раціональним з погляду вартості, доступності та ефективності використання у виробництві. При виборі матеріалу необхідно враховувати умови роботи виробу, вплив навантажень, температури, агресивних середовищ.

Вакуум-апарат А2-ПВЕ-60 використовується на цукрових заводах для випарювання сиропу з метою отримання утфелю. При різних схемах кристалізації змінюється склад утфелів, що безпосередньо впливає на умови експлуатації апарата. Найскладнішими є умови під час уварювання утфелю III кристалізації – продукту з високою концентрацією нецукрів та підвищеною в'язкістю.

Середовища, що циркулюють у вакуум-апараті, містять розчинні й нерозчинні сухі речовини, значну кількість органічних і неорганічних домішок. Це призводить до:

- виникнення електрохімічної корозії;
- гідроабразивного зношування;
- ерозії поверхонь, що контактують із високотемпературною парою та в'язкою масою.

Вакуум-апарат працює в умовах агресивного середовища (особливо утфелю III кристалізації), підвищеної температури (до 150 °С у гріючій камері), постійного впливу вакууму (5...50 кПа).

З урахуванням наведених умов та конструктивних особливостей апарата А2-ПВЕ-60 для виготовлення його основних частин приймаємо наступні матеріали:

- корпус, гріюча камера, лопаті циркулятора, рама – сталь Ст3 2651:2005/ГОСТ 380-2005;
- теплообмінні труби – сталь 20 ДСТУ 7809:2015;
- вал циркулятора, муфта – сталь 45 ДСТУ 7809:2015.

4.3. Технологія машинобудування

Складання є завершальним етапом процесу виготовлення виробу, під час якого окремі деталі та складальні одиниці об'єднуються в єдину систему. Від правильності виконання складання залежить не лише працездатність виробу, але й його надійність, довговічність та відповідність технічним вимогам. На цьому етапі особливу увагу необхідно приділити точності з'єднань, взаємному розташуванню елементів, а також дотриманню технологічної послідовності операцій.

Для розроблення схеми та маршруту складання виробу обрано гріючу камеру модернізованого вакуум-апарата А2-ПВЕ-60 (рис. 4.1).

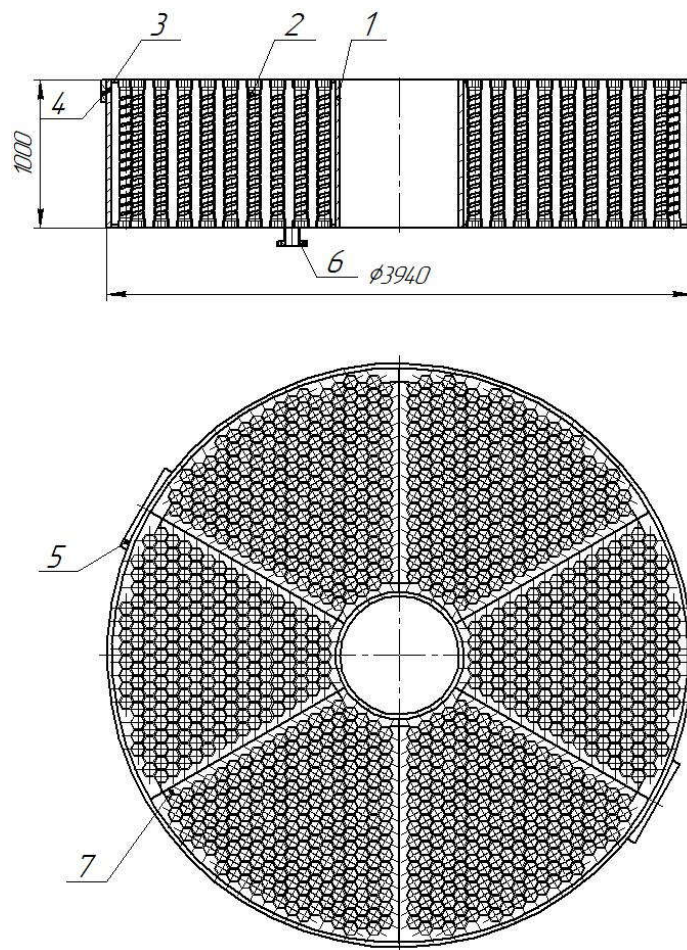


Рис. 4.1. Гріюча камера

- 1 – циркуляційна труба; 2 – теплообмінна трубка; 3 – обичайка;
4 – кільце; 5 – патрубок для пари; 6 – патрубок відведення конденсату;
7 – корпус

На рис. 4.2 зображено технологічну схему складання гріючої камери вакуум-апарата А2-ПВЕ-60.

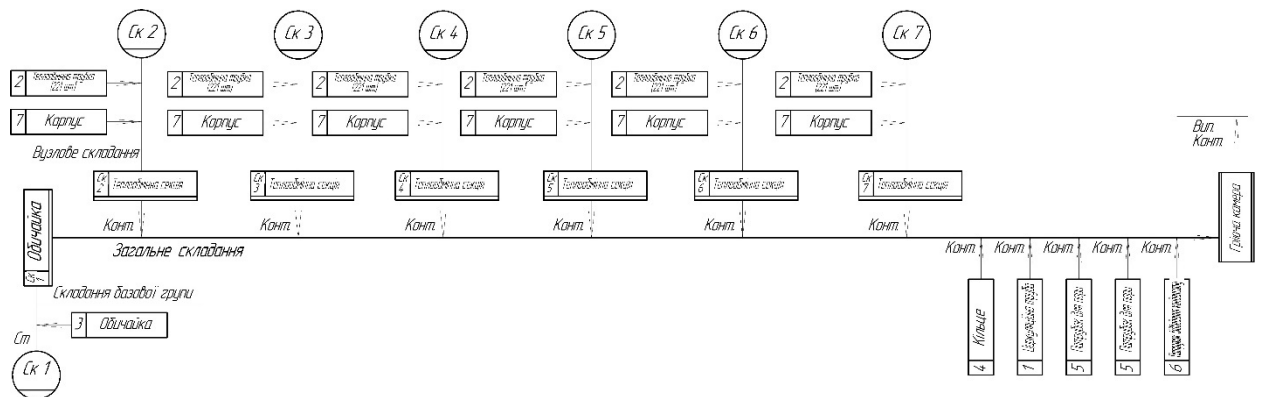


Рис. 4.2. Технологічна схема складання гріючої камери

Вертикальні лінії зі стрілками показують послідовність складання окремих складальних одиниць, а горизонтальні лінії – послідовність з'єднання складальних одиниць. У прямокутниках вказано найменування деталей і номери їхніх позицій на кресленні, а в прямокутниках з двома потовщеними лініями подано найменування складальної одиниці. Застосовані також такі умовні позначення, що містять технологічні вказівки: Ст – складання на стенді; Конт. – контроль; Вип. – випробовування.

Технологічний маршрут складання гріючої камери подано у табл. 4.1.

Таблиця 4.1. Технологічний маршрут складання гріючої камери

Номер операції	Номер переходу, зміст переходу
10. Складання обычайки (Ск.1)	1 Встановити обычайку на складальний стенд та закріпити її. 2. Затупити гострі кромки, очистити від забруднень.

20-70. Складання теплообмінної секції (Ск.2-Ск.7)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Встановити 221 теплообмінну трубку в корпус. 2. З'єднати електрозварюванням теплообмінні трубки. 3. Встановити теплообмінну секцію в обичайку. 4. З'єднати електрозварюванням теплообмінну секцію з обичайкою. 5. Проконтролювати якість складання.
80. Приєднання кільця	<ol style="list-style-type: none"> 1. Встановити кільце на обичайку. 2. З'єднати електрозварюванням кільце з обичайкою. 3. Проконтролювати якість складання.
90. Приєднання циркуляційної труби	<ol style="list-style-type: none"> 1. Встановити циркуляційну трубу в обичайку між теплообмінними секціями. 2. З'єднати електрозварюванням циркуляційну трубу з теплообмінними секціями. 3. Проконтролювати якість складання.
100-110. Приєднання патрубків для підведення та відведення пари	<ol style="list-style-type: none"> 1. Встановити патрубки для пари на обичайці. 2. З'єднати електрозварюванням патрубки для пари з обичайкою. 3. Проконтролювати якість складання.
120. Приєднання патрубка для відведення конденсату	<ol style="list-style-type: none"> 1. Встановити патрубок для відведення конденсату на корпус теплообмінної секції. 2. З'єднати електрозварюванням патрубків для відведення конденсату з теплообмінною секцією. 3. Проконтролювати якість складання.
130. Контрольна	<ol style="list-style-type: none"> 1.Перевірити загальну якість складання.

4.4. Правила монтажу та технічного сервісу модернізованого обладнання.

У процесі монтажу та подальшої експлуатації вакуум-апарата А2-ПВЕ-60 необхідно суворо дотримуватися вимог з охорони праці та техніки безпеки, встановлених нормативними документами, які регулюють порядок виконання робіт на підприємствах цукрової промисловості [27].

До початку монтажу вакуум-апарата необхідно виконати комплекс підготовчих операцій, що забезпечують точність монтажу, безпеку робіт та відповідність технічним вимогам. Зокрема слід:

1. Переконатися у повноті комплекту постачання, звіривши фактичну наявність усіх складальних одиниць та елементів з відомістю комплектності;
2. Ознайомитися з наданою технічною документацією, включаючи інструкції з монтажу, технічні умови, креслення, схеми підключення;
3. Перевірити стан вузлів і деталей на предмет механічних пошкоджень, дефектів та порушення герметичності, що могли виникнути під час транспортування чи зберігання;
4. Провести контроль геометричних параметрів фундаменту, зокрема його висоти, ширини, рівності та прив'язки до технологічної осі — відповідність має бути перевірена згідно з проектною документацією;
5. Оцінити технічний стан вантажопідйомного обладнання та допоміжних пристроїв (лебідок, тельферів, кранів), які будуть використовуватися при монтажі, – вони повинні бути справними, перевіреними та допущеними до роботи.

Технологічна послідовність монтажу

1. Підготовка корпусу апарата:
 - відповідно до креслень, виконується обрізка верхньої частини корпусу та демонтаж з'єднувальних смуг;
 - у зонті прорізається отвір Ø165 мм;
 - у верхньому конусі апарата вирізають отвір Ø1000 мм для подальшого встановлення елементів циркулятора;
 - демонтується спускний затвор, через який вводиться нижня опора під парову камеру, що встановлюється в проектне положення та зварюється;
 - за допомогою відвісу виконується центрування нижньої опори відносно осі циркуляційної труби.
2. Монтаж циркулятора:

- нижню частину циркулятора (без лопатей) опускають через отвір у верхньому конусі, встановлюючи нижній кінець вала у підшипник нижньої опори;

- монтується зонт;

- на опорний фланець укладається прокладка, вкручуються шпильки, після чого встановлюється верхня частина циркулятора та з'єднується з нижньою через шпильки і гайки.

3. Альтернативний варіант складання (при обмеженій висоті приміщення):

- монтаж верхньої частини виконується окремими вузлами;

- верхній вал монтується зсередини апарата;

- після цього проводиться зворотний монтаж нижньої частини циркулятора.

4. Збирання вузлів, які обертаються:

- демонтується вал, знімаються елементи ущільнення: підшипниковий вузол, втулка, кільце, набивка;

- встановлюється рама верхньої частини циркулятора, яка закріплюється шпильками;

- верхній вал вставляється у корпус, після чого встановлюється підшипниковий вузол із комплектом ущільнювальних елементів;

- редуктор монтується на рамі з прокладками, фіксується над валом та суміщається з його осью лінією;

- вал із редуктором підіймається для збирання вузла, затягується гайка та контргайка, фіксуються кришка підшипника та кільце;

- після опускання валу фланець підшипника повинен лягти на раму та бути надійно закріпленим.

5. Завершальні операції:

- зонт встановлюється остаточно;

- нижня частина циркулятора (якщо ще не встановлена) опускається та фіксується;

- з'єднується верхній та нижній вал за допомогою муфти;
- лопаті циркулятора монтуються на нижній частині вала;
- сектори та перегородки циркуляційного контуру встановлюються у проектне положення.

6. Перевірка роботи механізму:

- з верхньої трубної решітки вручну повертанням перевіряють обертання вала;
- контролюють відсутність дотику лопатей до стінок корпусу та гріючої камери;
- вузол ущільнення збирається із прокладкою, втулкою та шпильками;
- підключається електродвигун та електрообладнання;
- виконується пробний запуск на 10...15 секунд для перевірки справності.

Основні правила технічного сервісу вакуум-апарата

1. Регулярність і періодичність обслуговування:

- проводити регламентні огляди згідно з графіком технічного обслуговування (ТО-1, ТО-2, сезонне, позапланове).
- відповідно до умов експлуатації, рекомендується: щоденний візуальний огляд основних вузлів; технічний огляд — щотижня; детальне сезонне обслуговування — 1 раз на сезон або перед запуском у міжсезоння.

2. Контроль стану основних елементів, а саме перевірка:

- герметичності з'єднань, фланців, патрубків;
- стану циркулятора (лопатей, валів, муфти);
- роботи ущільнень та підшипників;
- наявності сторонніх шумів чи вібрацій під час роботи;
- рівня мастила у редукторі.

3. Змащування та заміна мастил:

- рівень мастила в редукторі перевіряється щотижня;
- заміна мастила — один раз на сезон або згідно з інструкцією виробника мастильного матеріалу;

- ущільнення та рухомі частини змащуються відповідно до карти змащування.

4. Контроль вузлів кріплення та центрування:

- регулярна перевірка та підтягування шпильок, гайок, з'єднань;
- перевірка центрування валів і положення циркулятора для запобігання перекосам;
- у разі виявлення осьового або радіального зміщення — проведення регулювання або ремонту.

5. Перевірка стану електрообладнання:

- візуальна перевірка електричних з'єднань та стану ізоляції;
- перевірка справності електродвигуна, редуктора, керувальної автоматики.

5. ПРИНЦИПИ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ОБ'ЄКТОМ ПРОЕКТУВАННЯ

Система автоматизованого управління вакуум-апаратом А2-ПВЕ-60 передбачає контроль і регулювання основних параметрів технологічного процесу у п'яти взаємопов'язаних контурах: температури, тиску (розрідження), рівня, в'язкості та питомої електропровідності. Кожен контур побудований за принципом замкненої системи автоматизованого регулювання з використанням мікропроцесорного контролера, аналогових модулів введення/виведення сигналів, вторинних вимірювальних приладів і виконавчих механізмів (рис. 5.1).

Контур регулювання температури.

Контроль температури здійснюється наступним чином. Сигнал уніфікованого формату 0...5 мА, який надходить від термоперетворювача (поз. 1а), передається на вторинний вимірювальний прилад (поз. 1б) для реєстрації поточного значення температури. Паралельно цей сигнал подається на вхід №1 аналогового модуля контролера, де обробляється процесором та порівнюється із заданими параметрами. Результати вимірювання та управління передаються на станцію оператора, де здійснюється контроль з дисплея та коригування уставок через клавіатуру.

Регулюючий вплив формується контролером і подається з виходу №1 модуля аналогового виводу на електропневматичний перетворювач (поз. 1в). Останній перетворює струмовий сигнал 0...5 мА у пневматичний 20...100 кПа, який впливає на мембранний виконавчий механізм регулюючого клапана (поз. 1г). Клапан змонтований у лінії подачі сиропу до вакуум-апарата, а вибір режиму керування виконується перемикачем (поз. SA1).

Контур регулювання тиску (розрідження)

Сигнал 0...5 мА з перетворювача тиску-розрідження (поз. 2а) надходить на вторинний прилад (поз. 2б), який виконує реєстрацію параметра.

Паралельно інформація подається до входу №2 контролера, де відбувається її обробка та порівняння з нормативними значеннями. Дані передаються на робочу станцію оператора для контролю та можливості зміни налаштувань.

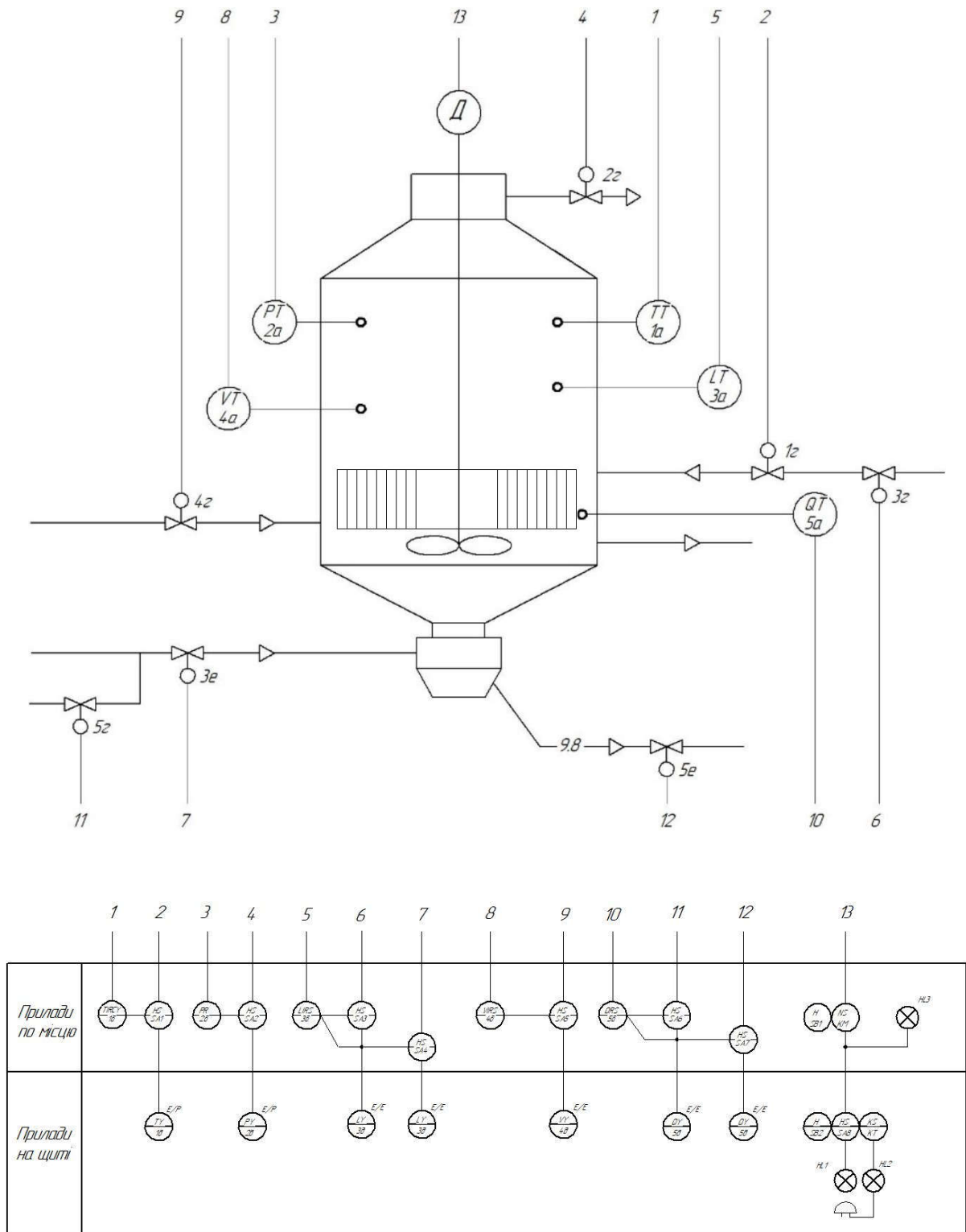


Рис. 5.1. Схема автоматизованого управління вакуум-апаратом А2-ПВЕ-60

Керуючий сигнал формується процесором і з виходу №2 модуля аналогового виводу подається на електропневматичний перетворювач (поз. 2в). Після конвертації сигналу ($0...5 \text{ мА} \rightarrow 20...100 \text{ кПа}$) він надходить до виконавчого механізму клапана (поз. 2г), встановленого у лінії відведення конденсату. Перемикач SA2 забезпечує вибір режиму керування.

Контур регулювання рівня

Вихідний сигнал $0...5 \text{ мА}$ з рівнеміра (поз. 3а) подається на вторинний прилад (поз. 3б), а далі – на вхід №3 контролера. Там відбувається обробка даних і порівняння із заданими параметрами. Дані дублюються на станції оператора для моніторингу та корегування.

Керуючий сигнал з виходу №3 подається на підсилювач (поз. 3в), який перетворює його у потенційний сигнал 220 В. Отриманий сигнал впливає на електромагнітний клапан (поз. 3г). Додатково з виходу №4 формується ще один керуючий сигнал, який через підсилювач (поз. 3д) подається на клапан (поз. 3е) лінії подачі сиропу. Вибір режиму керування здійснюється перемикачами SA3 і SA4.

Контур регулювання в'язкості

Сигнал $4...20 \text{ мА}$ від ротаційного віскозиметра (поз. 4а) подається на вторинний прилад (поз. 4б) і одночасно на вхід №4 аналогового модуля контролера. Процесор виконує обробку сигналу та порівнює його з регламентованими значеннями. Результати відображаються на станції оператора.

Регулюючий сигнал формується контролером і з виходу №5 модуля аналогового виводу надходить до підсилювача (поз. 4в), який перетворює $0...5 \text{ мА}$ у 220 В. Далі сигнал подається на електромагнітний клапан (поз. 4г), розміщений на лінії подачі затравочної пасти. Режим керування вибирається перемикачем SA5.

Контур регулювання електропровідності

Уніфікований сигнал $4...20 \text{ мА}$ від кондуктометра (поз. 5а) надходить на

вторинний прилад (поз. 5б), який виконує реєстрацію та формує керуючий вплив на електромагнітний клапан (поз. 5г) у лінії подачі сиропу. Режим роботи обирається перемикачем SA6.

Паралельно сигнал з датчика подається на вхід №5 контролера, обробляється процесором і передається на робочу станцію для моніторингу. З виходу №7 модуля аналогового виводу формується керуючий сигнал, який через підсилювач (поз. 5д) перетворюється у потенційний сигнал 220 В. Цей сигнал подається на клапан (поз. 5е), розташований на лінії відведення утфеля. Режим задається перемикачем SA7.

Запуск циркулятора вакуум-апарата

Після натискання кнопки «Пуск» (станція SB1) вмикається проміжне реле, активуючи сигнальну лампу HL3 на щиті. Одночасно спрацьовує дзвоник НА і лампа HL2 поблизу апарата. Через 10 секунд реле часу КТ вимикає сигналізацію і готує електродвигун до запуску.

Якщо автоматичний вимикач увімкнено, перемикач SA8 встановлено в положення «Дист.», а кришка апарата зачинена (контакт кінцевого вимикача замкнений), двигун циркулятора запускається. Схема передбачає ручний режим «Ручн.» та автоматичний режим «Авт.».

6. ЗАХОДИ З ОХОРОНИ ПРАЦІ ТА ОХОРОНИ ДОВКІЛЛЯ

6.1 Заходи з охорони праці.

Нормативно-правова база з охорони праці в цукровій промисловості

В основі нормативного регулювання питань охорони праці на підприємствах виробничої сфери лежать положення Закону України «Про охорону праці» та Кодексу законів про працю України. Для підприємств цукрової промисловості діє також спеціалізований галузевий нормативний документ – «Правила охорони праці для працівників, зайнятих на цукровому виробництві» [27], який має статус ДНАОП.

Цей документ регламентує вимоги до безпечної організації робочого процесу, визначає обов'язки як роботодавців, так і працівників під час виконання виробничих операцій, пов'язаних із переробкою цукрових буряків та виробництвом цукру.

Одним із ключових елементів системи управління охороною праці є проведення навчання та інструктажів. Таке навчання є обов'язковим для всіх категорій працівників, незалежно від форми власності підприємства, і має здійснюватися впродовж усієї трудової діяльності працівника. Відповідальність за організацію процесу навчання, контроль за своєчасністю інструктажів та перевіркою знань з охорони праці покладається на керівника підприємства або уповноважену ним особу.

Вимоги безпечної експлуатації вакуум-апаратів

Вакуум-апарат є технологічним обладнанням, яке працює під тиском. З огляду на це, його належить віднести до обладнання з підвищеним ступенем небезпеки. Додатково, продукти кристалізаційного відділення – такі як утфель, відтоки або меляса – при високій концентрації сухих речовин мають вибухонебезпечні властивості.

Для забезпечення безпечної роботи вакуум-апарата слід дотримуватися таких правил:

1. Обладнання має бути оснащене вакуумметрами, термометрами, манометрами та надійною тепло-, паро- й електроізоляцією.

2. На циліндричній ділянці апарата мають бути встановлені оглядові вікна з термостійкого скла так, щоб забезпечити видимість утфеля по всій висоті.

3. В разі перекидання утфелю використовують уловлювачі виносного типу з гідравлічним затвором, які встановлюються перед конденсаторами.

4. Спускні та повітряні шибери повинні мати дистанційні приводи. У повітряних шиберів обов'язково передбачений байпас із дистанційно керованим вентилям для попереднього розрідження.

5. Пробні крани, через які беруть зразки утфелю, мають мати обмежувачі підняття пробок або вакуумне блокування для запобігання витокам.

Нормативне регулювання та підготовка до перевірок устаткування

При проектуванні, виготовленні, монтажі, наладці, експлуатації і ремонті вакуум-апаратів слід керуватися «Правилами охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском» [28].

Перед внутрішнім чи зовнішнім оглядом апарат необхідно підготувати:

- охолодити та ретельно промити від залишків продуктів і накипу;
- при потребі демонтувати або частково зняти обмурівку.

Якщо виявлено, що товщина стінки зменшилась на 30 % або більше порівняно з початковою, апарат має бути визнаний непридатним.

Підготовка до випробувань

Перед гідравлічним або іншим випробуванням обладнання потрібно:

- ознайомити персонал з порядком робіт та правилами безпеки;
- перевірити кріплення фундаментних болтів, ізоляцію, заземлення, наявність огорожень, справність запобіжних пристроїв і контрольно-вимірювальних приладів;
- обмежити доступ до зони випробувань сторонніх осіб;
- забезпечити достатнє освітлення, протипожежні заходи та наявність інструкцій з безпеки.

Потенційні небезпеки при роботі вакуум-апарата

До основних ризиків у роботі вакуум-апарата належать:

- зрив болтів або кришок люків;
- випинання або руйнування днищ;
- інші види руйнувань унаслідок дефектів виготовлення, корозії, ерозії, порушення режимів або несправностей арматури та запобіжних систем.

Обладнання повинно бути оснащене контрольно-вимірювальними приладами, засобами АСУ, запірною або запірно-регулювальною арматурою. Під час варіння утфелю слід уникати витоків вологи чи пари, перевищення температури в робочій зоні, газоутворення, розливів продуктів чи води.

Пари, гази від вакуумконденсатної системи чи аміачні відтяжки відводяться за межі приміщення. Підлога у місці установки апарата – з неслизького матеріалу, що легко очищується.

Використання вакуум-апарата, який виведено в резерв, як ємності для інших продуктів заборонено. При виведенні апарата в резерв його очищають, пропаровують, від'єднують від комунікацій і встановлюють заглушки з хвостовиками. Зовні апарат маркується табличкою «у резерві».

Пожежна безпека

Забезпечення пожежної безпеки при експлуатації вакуум-апарата передбачає дотримання низки організаційних і технічних заходів:

- експлуатація обладнання має здійснюватися в межах паспортних характеристик та відповідно до технологічного регламенту;
- приміщення повинні відповідати категорії за вибухопожежонебезпекою;
- апарат має бути оснащений приладами контролю, сигналізації та елементами автоматичного захисту, які попереджають виникнення аварійних ситуацій;
- обладнання повинно мати герметичне виконання, а також бути теплоізованим у місцях нагріву;
- важливо дотримуватись регламентів обслуговування, зокрема щодо

мастила редуктора, профілактичного огляду та недопущення перевантаження апарата;

- роботи з відкритим вогнем та розбиранням вузлів одночасно заборонені;
- при зупинках – обов'язкове дотримання правил безпеки технічного огляду та ремонту.

У разі загоряння на початковій стадії використовуються вуглекислотні вогнегасники. Норма оснащення вогнегасниками – один на кожні 100 м² площі. Їх встановлюють на зручній висоті на стінах.

6.2 Заходи з охорони довкілля.

З метою мінімізації негативного впливу виробничого процесу на навколишнє природне середовище передбачено впровадження комплексу природоохоронних заходів, які відповідають чинному законодавству України, зокрема:

- Закон України "Про охорону навколишнього природного середовища";
- Закон України "Про відходи";
- Закон України "Про охорону атмосферного повітря";
- ДСТУ ISO 14001:2015 – Система екологічного управління.

Основні екологічні заходи:

1. Контроль викидів в атмосферу. Всі газопарові викиди від вакуум-апаратів (у т.ч. парів утфелю, аміачних відтяжок, неорганізованих викидів) направляються в систему конденсації та очищення, оснащену гідрозатворами та фільтраційними елементами. Це дозволяє знизити забруднення повітря до допустимих концентрацій.

2. Рециркуляція води. Для охолодження вакуум-апаратів застосовується замкнена система водопостачання, що виключає скидання нагрітих стоків у навколишнє середовище. Використання оборотних систем дозволяє значно зменшити водозабір із природних джерел.

3. Утилізація та переробка відходів. Усі органічні залишки (включаючи

мелясу, фільтраційні осади тощо), що утворюються під час уварювання утфелю, вивозяться на біогазові установки або передаються на переробку, відповідно до технології підприємства. Технічні відходи (наприклад, мастила) збираються в герметичні контейнери та передаються ліцензованим організаціям.

4. Навчання персоналу. Співробітники, які обслуговують вакуум-апарат, проходять інструктажі з екологічної безпеки, ознайомлюються з планами дій у випадку аварій або екологічних інцидентів.

5. Ведення екологічної документації. На виробництві повинна функціонувати система обліку викидів, використаної води, відходів та впливу на навколишнє середовище відповідно до форми звітності №2-ТП (повітря, вода, відходи).

7. МАРКЕТИНГОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ

Метою проекту є модернізація вакуум-апарата для уварювання утфелю в цукровому виробництві шляхом нанесення гвинтової накатки на теплообмінних трубках гріючої камери. Такий підхід покликаний підвищити ефективність теплообміну, покращити циркуляцію утфелю, знизити теплові втрати.

Проект відповідає як актуальним технологічним викликам, так і ринковим трендам у галузі.

Аналіз галузі та ринку

Аналіз стану розвитку цукрової промисловості в Україні дозволив виявити наступне:

- виробництво цукру стабільне, але з невеликими зниженнями внаслідок зменшення площ під цукровим буряком. Наприклад, площі скоротилися до ~ 198 тис. га, що на ~22 % менше, ніж у попередньому році;
- передбачається, що у сезоні 2025/2026 виробництво цукру складе близько 1,5 млн тонн, що трохи менше, ніж у попередньому;
- експорт цукру з України значно зріс. У 2024 році експорт досяг обсягу понад 746 тис. тонн на \$419 млн.;
- зростає частка експорту за межі ЄС – виробники шукають нові ринки, серед яких Туреччина, країни Близького Сходу, Африки тощо;
- внутрішнє споживання цукру оцінюється приблизно в 900 тис. тонн на рік; надлишок виробництва направляється на експорт.

В таблиці 7.1 узагальнено глобальні тенденції ринку.

Таблиця 7.1. Глобальні тенденції ринку

Аспект	Дані	Вплив на проект
Ринок обладнання	\$5.1 млрд у 2024, зростання 6.2%/рік до 2033	Високий попит на оновлення обладнання
Попит в Азії	Розвинута галузь (Індія, Китай)	Потенційні партнери/експорт

Тренди	Автоматизація, енергоефективність, гігієнічність	Модернізація має враховувати це
--------	--	------------------------------------

Проблеми традиційного вакуум-апарата:

- перевитрати пари/енергії;
- недостатнє прогрівання маси;
- пригар маси → втрати цукру.

Очікувані результати модернізації:

- покращений теплообмін завдяки турбулізації потоку і збільшенню поверхні теплообміну (гвинтова накатка);
- менше нагару на трубках
- підвищення якості утфелю та виходу цукру.

У табл. 7.2 подано порівняльний аналіз виробників обладнання

Таблиця 7.2. Порівняльний аналіз виробників обладнання

Компанія	Країна	Переваги	Недоліки
Shrijee Turnkey Sugar Factory	Індія	Великий досвід, сучасні рішення, експорт	Орієнтація на великі проекти
Indiana Suro-Tech	Індія	Пропонують безперервнодіючі вакуум-апарати, висока енергоефективність	Висока ціна за інноваційні рішення
Schaffer Sugar	США	Модульні рішення, СІР-системи	Висока вартість, складність логістики
ŚFUP Sp. z o.o.	Польща	Близькість до України, гнучкість виробництва	Обмежений асортимент
Fives (Cail & Fletcher)	Франція	Інновації, безперервна робота, SCADA	Висока вартість
Сміламаш	Україна	Локальний сервіс, адаптація під потреби, нижча вартість	Потребує техмодернізації

Калинівський МЗ	Україна	Досвід виробництва обладнання	Обмежене оновлення дизайну
Яготинський МЗ	Україна	Працює з українськими заводами	Не представлений на міжнародному ринку

Унікальна цінність модернізації вакуум-апарата:

- технічна перевага: інтенсифікація теплообміну – одна з основних задач при уварюванні утфелю. Гвинтова накатка дозволяє створити турбулентніший потік, збільшити поверхню теплопередачі, що покращує уварювання утфелю;
- енергоефективність: менше пари – менше витрат;
- масштабованість: технологію можна застосувати до існуючих апаратів, не змінюючи всю установку.

Проект модернізації вакуум-апарата є економічно доцільним, технічно обґрунтованим та ринково релевантним. Враховуючи експортний потенціал українського цукру, оновлення обладнання допоможе відповідати вимогам міжнародних стандартів. У разі успішної реалізації – можливе масштабування технології на інші цукрові заводи або комерціалізація як окремого продукту. Доцільно провести пілотну модернізацію на одному заводі, з подальшим аналізом ефективності.

На сьогодні більшість цукрових заводів в Україні використовують обладнання ще з 70–90-х років із частковою модернізацією. Це дає вікно можливостей щодо реалізації проекту в межах держави.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що ефективність роботи вакуум-апарата значною мірою визначається інтенсивністю теплопередачі у гріючій камері. Використання традиційних гладких теплообмінних труб є недостатньо ефективним.

2. Одним із найрезультативніших способів інтенсифікації теплопередачі є використання пасивних методів, зокрема нанесення профільної накатки на поверхню теплообмінних труб. Профілювання сприяє збільшенню площі теплопередачі, турбулізації потоку та підвищенню коефіцієнта теплопередачі без додаткових витрат енергії.

3. Побудована у середовищі Autodesk CFD імітаційна модель об'єкта досліджень дала можливість відтворити гідродинамічні та теплові процеси в теплообмінних трубках різних конструкцій.

4. CFD-аналіз показав, що трубки з трапецевидним профілем накатки забезпечують найвищу інтенсифікацію теплопередачі. Це проявляється у зростанні швидкості руху сиропу поблизу стінки, кращій турбулізації потоку та формуванні рівномірнішого температурного поля, що приводить до підвищення ефективності уварювання.

5. Запропонована модернізована конструкція вакуум-апарата А2-ПВЕ-60, оснащеного гріючою камерою з теплообмінними трубками із трапецевидним профілем накатки, дозволяє підвищити енергоефективність процесу уварювання.

6. Практична значущість отриманих результатів полягає у можливості впровадження розробленого технічного рішення на діючих цукрових заводах без потреби кардинальної зміни конструкції апарата, що робить запропоновану модернізацію економічно доцільною.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вакуум-апарат для кристалізації цукрових розчинів: пат. 75308 Україна. № u201206204; опубл. 26.11.2012, бюл. № 22.
2. Вакуум-апарат з гідромеханічним циркулятором: пат 34983 Україна. № u200804918; опубл. 26.08.2008, бюл. № 16.
3. Вакуум-апарат для кристалізації розчинів: пат 14752 Україна. № u200512661; опубл. 15.05.2006, бюл. № 5.
4. Naphon P., Nuchjaro M., Kurujareon J. Tube side heat transfer coefficient and friction factor characteristics of horizontal tubes with helical rib. *Energy Conversion and Management*. 2006. Vol. 47. P. 3031–3044.
5. Rainieri S., Bozzoli F., Cattani L. Passive techniques for the enhancement of convective heat transfer in single phase duct flow. *Journal of Physics: Conference Series*. 2014. P. 1–10.
6. Baskova O., Voropaiev G. Influence of the flow structure formation on heat transfer processes in tubes with spiral corrugation inserts. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 3/8 (99). P. 29–35.
7. Pradip R.B., Dinesh K.K. Experimental Investigation on Convective Heat Transfer Analysis in a Circular Tube with Internal Threads of Different Pitches. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*. 2013. Vol. 3, Issue 1. P. 280–284.
8. Moor B., Rosettenstein S., Plessis N. Key considerations for high-performance continuous vacuum pans. *International sugar journal*. 2020. 122 (1464). P. 852–858.
9. Теплообмін малорядних пучків гвинтоподібних труб / С.А. Рева та ін. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2013. Т. 3, №8 (63). С. 54–56.
10. Теплотехнічні та технологічні резерви продуктового відділення / К.О. Штангеев та ін. *Цукор України*. 2015. №5 (113). С. 18–21.

11. Стан і проблеми ринку цукру в Україні / Д.С. Боляновська та ін. *Вісник нац. Універ. «Львівська політехніка»*. 2010. №669. С. 167–171.

12. Баскова О.О., Воропаєв Г.О. Вплив геометрії поглиблення гофрованої поверхні на структуру течії та інтенсивність теплообміну в трубі. *Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: матеріали XVI міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів і студентів, м. Київ, 24–27 квітня 2018 р., 2018. Т. 1. С. 87.*

13. Красняк О.П. Тенденції розвитку ринку цукру України: проблеми та перспективи. *Зб. Наук. Праць ВНАУ*. 2011. №1. С. 49–55.

14. Петрова О.І., Крамаренко О.С. Технологія цукрового виробництва: методичні рекомендації для проведення лабораторних занять. Миколаїв: Миколаївський національний аграрний університет, 2020. 100 с.

15. Технологія цукру: підручник в 3 т. Т. 3. Кристалізація / А.А. Ліпец та ін.; Експрес-об'ява. Київ, 2015. 208 с.

16. Загальні технології харчових виробництв: підручник / В.А. Домарецький та ін.; університет Україна. Київ, 2010. 814 с.

17. Штангеев К.О. Раціоналізація теплового господарства цукрових заводів: навчальний посібник. Київ: ІПДО НУХТ, 2006. 86 с.

18. Современные технологии и оборудование свеклосахарного производства. Часть 2. / В.О. Штангеев и др.; Цукор України. Киев. 2004. 320 с.

19. Скорик К.Д. Промислова кристалізація цукру: навчальний посібник. Київ: ТОВ «Сталь», 2004. 202 с.

20. Справочник по технологическому оборудованию сахарных заводов / В.Г. Белик и др. Техніка. Київ, 1982. 304 с.

21. Правила ведення технологічного процесу виробництва цукру з цукрових буряків: правила усталеної практики 15.83-37-106:2007. Київ: Цукор України. 419 с.

22. Автоматизація виробничих процесів: підручник / Б.М. Гончаренко та ін. Кіровоград, 2016. 352 с.

23. Запольський А.К., Українець А.І. Екологізація харчових виробництв: підручник. Київ: Вища школа, 2005. 423 с.

24. Сорокін А.І. Оборотні системи охолоджувального водопостачання в бурякоцукровому виробництві та сучасні технології обробки оборотних вод: навчальний посібник. Київ: ІПДО НУХТ, 2009. 60 с.

25. ДСТУ 4623:2023. Цукор. Технічні умови.

26. Сухенко Ю.Г., Литвиненко О.А., Сухенко В.Ю. Надійність і довговічність устаткування харчових і переробних виробництв: підручник. Київ: НУХТ, 2010. 547 с.

27. Правила охорони праці для працівників, зайнятих на цукровому виробництві: наказ Міністерства соціальної політики України від 05 жовтня 2018 року, №1467.

28. Про затвердження правил охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском: наказ Міністерства соціальної політики України від 05.03.2018, №333.