

Міністерство освіти і науки України
Одеський національний технологічний університет

Навчально-науковий інститут холоду, кріотехнологій та екоенергетики ім.
В.С. Мартиновського
Кафедра процесів, обладнання та енергетичного менеджменту
Ступінь вищої освіти: «Бакалавр»
Спеціальність: 133 Галузеве машинобудування
Освітня програма: «Енергетичний менеджмент та ІТ-сервіс обладнання»



ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

на тему Розробка вакуум-випарної установки з тепловим насосом
(назва кваліфікаційної роботи згідно наказу ОНТУ)

Здобувача: Тодоров В.І.

Курсу II групи ГМск-40

Керівник: доцент Сиротюк І.В.

Консультант: доцент Всеволодов О.М.

Кваліфікаційна робота допускається до захисту

Рішення кафедри ПОЕМ від «___» _____ 2025 р., протокол № ___

Завідувач кафедри ПОЕМ _____

Олег БУРДО

Одеса – 2025 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Навчально-науковий інститут холоду, кріотехнологій та екоенергетики

Кафедра: Процесів, обладнання та енергетичного менеджменту

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Спеціальність: 133 Галузеве машинобудування

Освітня програма: Енергетичний менеджмент та IT-сервіс обладнання

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри

Олег БУРДО

«___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Тодорова Владислава Івановича

1. Тема роботи: «Розробка вакуум-випарної установки з тепловим насосом»
Затверджена наказом ОНТУ від 25.11.2024 р. наказ №738-03
2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи 10.06.2025 р.
3. Вихідні дані роботи: продукт – гранатовий сік, початкова концентрація – 11%, кінцева концентрація – 50%, продуктивність апарату 5 кг/год, робочий тиск в апараті – 0,01 МПа.
4. Перелік питань, які потрібно розробити: критичний огляд обладнання аналогічного призначення, патентний пошук, обґрунтування конструкції, проведення технологічного, силового та конструктивного розрахунків, охорона праці.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): креслення лінії виробництва яблучного соку – 1 аркуш А1, креслення загального виду – 2 аркуші А1, креслення складальних одиниць: рама – 1 аркуш А1, випарна камера – 1 аркуш А1, конденсатор, деталювання – 1 аркуш А1, специфікація на загальний вигляд – 1 аркуш А4, специфікації на складальні одиниці: випарна камера – 1 аркуш А4.

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що стосуються їх.

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Безпека життєдіяльності та охорона праці	Доц. Всеволодов О.М.		

2. Дата видачі завдання _____

Керівник _____ Сиротюк І.В.

Завдання прийняв до виконання _____ Тодоров В.І.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Збір матеріалів до проекту. Розробити реферат та вступ до дипломного проекту.	До 17.02.2025 р.	
2.	Аналіз існуючого обладнання. Патентний пошук	До 04.03.2025 р.	
3.	Обґрунтування технічного рішення. Креслення загального виду	До 10.03.2025 р.	
4.	Підбір конструкційних матеріалів. Розробка технічного завдання	До 21.03.2025 р.	
5.	Проведення розрахунків	До 01.04.2025 р.	
6.	Монтаж, експлуатація та ремонт обладнання. Охорона праці	До 10.04.2025 р.	
7.	Креслення складальних одиниць та деталювання	До 22.04.2025 р.	
8.	Внесення коректив та оформлення РПЗ.	До 08.06.2025 р.	
9.	Підписання проекту, друк. Отримання рецензії.	До 16.06.2025 р.	

Здобувач-дипломник _____ Тодоров В.І.

Керівник роботи _____ Сиротюк І.В.

Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних web-ресурсах ОНТУ.

Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчесності.

Здобувач-дипломник: Тодоров В.І. _____

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота на тему: «Розробка вакуум-випарної установки з тепловим насосом» містить 62 сторінки машинописного тексту, рисунків – 11, таблиць – 1, формул – 38, використаних джерел – 11, листів специфікацій – 2.

Дана робота присвячена розробці вакуум-випарної установки з тепловим насосом. Головна ідея розробки полягає в підвищенні ресурсо- та енергоефективності процесу концентрування харчових розчинів за низьких температур шляхом залучення теплонасосних технологій.

Об'єкт досліджень – вакуум-випарна установка з тепловим насосом.

Предмет досліджень – механізм, кінетика та енергетика процесів концентрування харчових розчинів.

Ключові слова: *вакуум-випарна установка, тепловий насос, тепломасоперенесення, яблучний сік.*

					<i>КРБ.ПОтаЕМ.1.738-03.4.4</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розробив</i>		<i>Тодоров В.І.</i>			<i>ВВУ з тепловим насосом</i>	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевірив</i>		<i>Сиротюк І.В.</i>					4	62
<i>Рецензія</i>						<i>ОНТУ</i>		
<i>Зав. каф.</i>		<i>Бурда О.Г.</i>						
<i>Затвердив</i>								

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ КОНЦЕНТРАТІВ	8
1.1. Методи концентрування харчових розчинів.....	8
1.2. Вимоги до сировини і тари.	11
2. КРИТИЧНИЙ ОГЛЯД ІСНУЮЧОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ.....	16
3. ОГЛЯД ПАТЕНТНИХ МАТЕРІАЛІВ	28
4. ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРОБКИ ОБРАНОЇ КОНСТРУКЦІЇ.....	37
5. ОПИС РОЗРОБЛЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ УСТАНОВКИ.....	38
6. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗРАХУНОК	40
6.1. Матеріальний баланс.	40
6.2. Тепловий баланс.....	40
6.3. Розрахунок сепараційного простору.....	48
6.4. Розрахунок діаметрів штуцерів та трубопроводів для матеріальних потоків.	48
6.5. Розрахунок на міцність.....	49
Інструкція з охорони праці при роботі з випарним апаратом	58
ВИСНОВКИ.....	60
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	61

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
						5
<i>Змн.</i>	<i>Арк.ш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ВСТУП

Розмір ринку концентратів соків у 2023 році оцінювався в 77,24 мільярда доларів США, і очікується, що середньорічний темп зростання (CAGR) перевищить 5% у період з 2024 по 2032 рік [1].

Виходячи з джерела, ринок поділяється на концентрати фруктових і овочевих соків. Сегмент концентратів фруктових соків домінував приблизно на рівні 53,5 мільярда доларів США у 2023 році та, як очікується, досягне 82 мільярдів доларів США до 2032 року [1]. Це домінування пояснюється популярністю напоїв зі смаком фруктів та притаманною споживачам перевагою натуральної солодкості та різноманітних смакових профілів, які пропонують різні фрукти. Універсальність концентратів фруктових соків у застосуванні, починаючи від напоїв і закінчуючи кондитерськими та хлібобулочними виробами, ще більше зміцнює їхню значну присутність на ринку.

Залежно від способу обробки ринок концентратів соку поділяється на вакуумне концентрування, концентрування виморожуванням, мембранне концентрування тощо. Очікується, що сегмент вакуумного концентрування зростатиме зі середньорічним темпом зростання на рівні 4,6% до 2032 року [1]. Вакуумне концентрування займає значну частку ринку, спираючись на свою ефективність у видаленні води з соків під зниженим тиском, зберігаючи смак і поживну цінність концентрату. Концентрування виморожуванням, ще один значний гравець, використовує низькі температури для відділення води від соку, виробляючи концентрати з мінімальною деградацією, спричиненою нагріванням, що особливо приваблює споживачів, які цінують якість продукту.

Проте, незважаючи на широке використання таких методів видалення вологи, все ж їм притаманні певні недоліки, що спонукають до пошуку нових підходів їх реалізації. Так, традиційні вакуум-випарні апарати не в змозі забезпечити досягнення високих значень концентрації сухих речовин в

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
Змн.	Арк.ш	№ докум.	Підпис	Дата		6

розчині без завдання шкоди продукту через суттєве підвищення температури процесу при зростанні в'язкості.

Процеси виморожування безумовно не мають таких проблем, однак вартість обладнання, що забезпечує реалізацію таких процесів, надто висока. До того ж, організувати процес виморожування у безперервному режимі досить складно.

Відповідно до цього в роботі пропонується конструкція вакуум-випарної установки з використанням теплового насоса. Таким чином, з'являється можливість забезпечити процес видалення вологи при низьких температурах, оскільки температури кипіння та конденсації холодильного агенту зазвичай не перевищують 50°C. При цьому процес протікатиме з дотриманням принципів енергоефективності, так як тепловий насос використовує електроенергію лише на роботу компресора.

					<i>КРБ.ПотаЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
						7
<i>Змн.</i>	<i>Арк.ш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

1. ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ КОНЦЕНТРАТІВ

1.1. Методи концентрування харчових розчинів.

Концентрат фруктового соку виготовляється шляхом видалення води зі свіжовичавленого фруктового та овочевого соку. Зазвичай його використовують як основу для різних харчових продуктів. Маючи менший об'єм, він містить 65-70% розчинних твердих речовин. Процес концентрування фруктового соку є ефективним способом зменшення витрат на упаковку та транспортування. Він також гарантує стабільну якість кінцевої продукції. Водночас, зі збільшенням вмісту цукру та кислоти, перевага надається консервації.

Щоб вибрати відповідну технологію концентрування, якість має бути на першому місці. Якісний концентрат фруктового соку повинен зберігати той самий колір, смак та поживну цінність, що й оригінальний фруктовий сік після розведення. У зв'язку з цим процес концентрування повинен проводитися за низької температури. Найпопулярнішими технологіями виробництва фруктового соку є метод вакуумного концентрування, концентрування за допомогою заморожування та мембранні технології концентрування.

Метод вакуумного концентрування.

Вакуумне концентрування вимагає нагрівання фруктового соку під низьким тиском, щоб знизити температуру кипіння та швидко випарувати воду. Обладнання для вакуумного концентрування є найважливішим і найпоширенішим пристроєм у процесі концентрування фруктового соку. Його можна класифікувати на одноступеневі та багатоступеневі концентратори. За структурою гріючої камери випарні апарати поділяються на:

- циркуляційний трубчастий,

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
Змн.	Арк.ш	№ докум.	Підпис	Дата		8

- змійовиковий,
- плівковий з висхідною плівкою,
- плівковий з низхідною плівкою,
- пластинчастий,
- скребковий,
- відцентровий плівковий.

Тепло, необхідне для випаровування та концентрування, надходить від первинної та вторинної пари. Перший варіант називається одноступеневим випаровуванням, під час якого вторинна пара одразу конденсується, а не використовується для нагрівання. Якщо вторинна пара використовується для подальшого нагрівання, цей процес називається багатоступеневим випаровуванням. Зазвичай, концентрат фруктового соку проходить 1-5-кратне випаровування, при цьому вміст твердих речовин збільшується з 5%–15% до 70%–72%.

Оскільки концентрат фруктового соку зручний для зберігання та транспортування, він користується зростаючим попитом у сокопереробній промисловості. Метод вакуумного концентрування може скоротити час процесу та одночасно зберегти якість фруктового соку порівняно з концентруванням за високої температури.

Концентрування заморожуванням.

Концентрування заморожуванням означає зниження температури фруктового соку до точки льодоутворення. Перш ніж концентрація фруктового соку досягне евтектичної точки, вміст води заморожується та відділяється. Як відомо, концентрація розчину обмежена певним діапазоном. Коли вміст розчинених речовин перевищує евтектичну концентрацію, вони відокремлюються в кристалічній формі від перенасиченого розчину.

З іншого боку, якщо вміст розчинених речовин нижчий за евтектичну концентрацію, вміст води відокремлюється в кристалічній формі льоду. З

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.ш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		9

відділенням розчинника частка розчинених речовин значно зростає. Вищезазначене є основним принципом концентрування заморожуванням.

Цей метод особливо підходить для термочутливих харчових продуктів. Він дозволяє уникнути випаровування ароматичних сполук, спричинених нагріванням. Що стосується харчових продуктів з леткими речовинами, то заморожування концентрацією перевершує випарювання у вакуумі та мембранне розділення.

Однак концентрування заморожуванням має певні недоліки. По-перше, оброблені харчові продукти повинні пройти холодну або теплову обробку для зберігання. По-друге, ефективність концентрування заморожуванням визначається не лише концентрацією розчину, але й ступенем розділення кристалів та концентрованого розчину. Загалом, якщо розчин має високу в'язкість, важко відокремити розчинену речовину від розчинника. По-третє, втрата вмісту неминуча при концентрування заморожуванням, а вартість обладнання досить висока.

Мембранні технології концентрування.

Мембранна технологія включає зворотний осмос та ультрафільтрацію. Вона використовує осмотичний тиск як принцип. Контейнер розділений на 2 частини напівпроникною мембраною, встановленою в центрі, причому кожна частина окремо заповнена розчином А та розчином Б (рис. 1).

Коли розчин Б проникає в частину А через мембрану, утворюється осмотичний тиск з частини Б. Зокрема, осмотичний тиск обернено пропорційний різниці концентрацій між двома частинами. Тобто, якщо концентрація в частині А більша, ніж у частині Б, то вода проникає в А з частини Б. І навпаки, якщо на частину А чиниться більший тиск, то вода проникне з А в Б, що називається зворотним осмосом.

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
						10
<i>Змн.</i>	<i>Арк.ш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

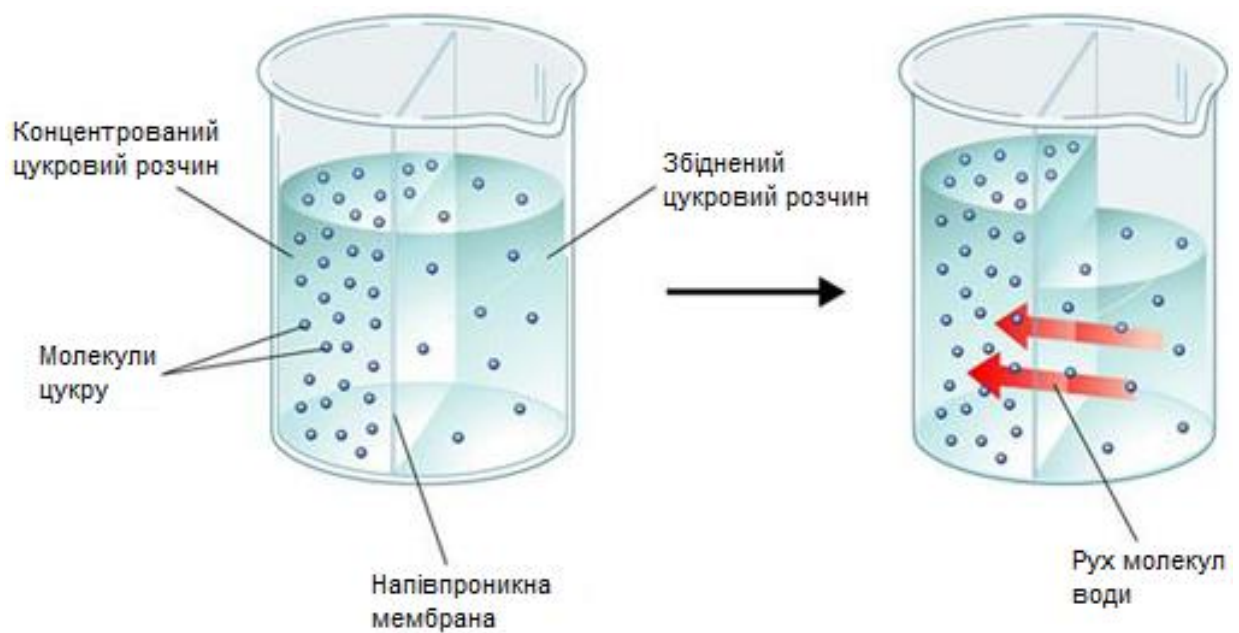


Рис. 1 – Принцип дії мембранного розділення розчинів.

Зворотний осмос та ультрафільтрація мають подібний принцип, хоча перший вимагає вищого робочого тиску, без проходження дрібних частинок. Ефект зворотного осмосу визначається властивістю напівпроникної мембрани та швидкістю проникнення води.

Зворотний осмос має такі переваги:

- процес концентрування здійснюється за низької температури, що ефективно уникає якісних змін.
- поживні речовини та смакові речовини зберігаються у концентраті фруктового соку на високому рівні.
- мембранна технологія є більш енергоефективною, ніж інші методи.

Наразі мембранна технологія функціонує як процес попереднього концентрування, оскільки вона не може досягти вищого ступеня концентрації.

1.2. Вимоги до сировини і тари.

При виробництві харчових концентратів до сировини висуваються високі вимоги, які включають якість, підготовку, а також забезпечення необхідних умов переробки.

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
Змн.	Арк.ш	№ докум.	Підпис	Дата		11

Якість.

– Бактеріологічна якість:

Сировина має бути вільною від патогенних бактерій та мікроорганізмів, які можуть викликати псування або зараження концентрованого продукту. При випарюванні важливо підтримувати температуру вище 65-70°C, щоб не допустити розмноження терmostійких бактерій.

– Хімічний склад:

Сировина повинна відповідати встановленим нормативам щодо вмісту токсичних елементів, таких як свинець, кадмій, мідь, цинк та залізо (згідно з ГОСТ 30178-96).

– Фізичні характеристики:

Сировина має бути однорідною за структурою і не містити механічних домішок (пісок, камінці тощо).

– Смак та запах:

Сировина повинна мати сторонніх смаків чи запахів, які б вплинули на якість концентрованого продукту.

– Термін придатності:

Сировина має відповідати встановленим нормативним термінам придатності, щоб гарантувати збереження її якісних характеристик.

Загалом, якість сировини перед концентруванням має бути такою, щоб продукт після обробки відповідав усім вимогам безпеки та якісним показникам.

Підготовка.

– Промивання та сортування:

Сировина (фрукти, овочі) промивається видалення бруду і сторонніх предметів.

– Подрібнення:

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.ш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		12

Фрукти та овочі подрібнюються за допомогою різних видів обладнання (наприклад, подрібнювачів, ножів) для покращення віджиму соку.

– Віджимання соку:

З подрібненої сировини віджимається сік із застосуванням преса чи інших методів віджиму.

– Очищення:

Отриманий сік піддається очищенню для видалення суспензій, пектинів та інших небажаних домішок. Для цього використовуються сепаратори, центрифуги та інші технології.

– Додавання консервантів та ароматизаторів (опціонально):

У деяких випадках в сік додають консерванти та/або ароматизатори для покращення його якості та смаку.

Забезпечення умов.

В залежності від конкретної ситуації та властивостей розчинених речовин, вибирається найбільш підходящий спосіб та апаратура для забезпечення ефективного концентрування розчину.

– Температура:

Для випаровування та кристалізації необхідно контролювати температуру, щоб не пошкодити розчинені речовини.

– Тиск:

При вакуумуванні важливо підтримувати потрібний тиск ефективного видалення розчинника.

– Швидкість випаровування:

Контроль швидкості випаровування допомагає уникнути утворення перенасичених розчинів.

– Концентрація:

Необхідно стежити за зміною концентрації розчину у процесі концентрування.

					<i>КРБ.ПоташЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
						13
<i>Змн.</i>	<i>Арк.ш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

– Необхідна апаратура:

Посуд для випаровування: Круглі дном ємності, чашки випарювальні, плоскі тарілки.

Вакуумна установка: Для вакуумної дистиляції.

Холодильна установка: Для кристалізації.

Діалізно-ультрафільтраційні установки: Для поділу розчинів.

Мішалки та термометри: Для контролю процесу та температури.

Упаковка та зберігання.

Концентровані харчові розчини, такі як соки, сиропи або інші концентровані напої, слід зберігати у герметичній упаковці, яка захищає від світла, повітря та вологи. Краще використовувати скляні пляшки або банки з герметичними кришками або упаковувати в пластикові контейнери, які також забезпечують герметичність. Зберігати їх слід у прохолодному, сухому та темному місці, щоб уникнути псування та втрати якості.

– Герметичність:

Упаковка повинна бути щільно закритою, щоб запобігти попаданню повітря та вологи, які можуть сприяти розвитку бактерій та грибків, а також прискорити процес окиснення та руйнування концентрованих розчинів.

– Захист від світла:

Концентровані розчини, що особливо містять фрукти або овочі, можуть бути чутливі до світла, яке може прискорити їхню деградацію. Тому рекомендується зберігати їх у темній упаковці, як-от темне скло або щільна пластикова упаковка.

– Прохолодне та сухе місце:

Температура зберігання також має значення. Концентровані розчини слід зберігати у прохолодному та сухому місці, де температура не перевищує допустимих значень, вказаних виробником. Це допоможе запобігти псуванню та зберегти їх якості на тривалий час.

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
Змн.	Арк.ш	№ докум.	Підпис	Дата		14

– Оригінальна упаковка:

Слід намагатися зберігати розчини в їх оригінальній упаковці, щоб уникнути переплутування з іншими продуктами та зберегти інформацію про продукт, наприклад, термін придатності та рекомендації щодо застосування.

– Не переливати в інші контейнери:

Якщо необхідно перелити концентрований розчин в іншу тару, переконайтеся, що вона чиста та стерильна, щоб уникнути зараження.

Загалом, високоякісна сировина та її правильна підготовка є основою для отримання якісного харчового концентрату.

					<i>КРБ.ПотамЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
						15
<i>Змн.</i>	<i>Арк.ш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

2. КРИТИЧНИЙ ОГЛЯД ІСНУЮЧОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Серед розглянутих методів видалення вологи з рідини найбільшого розповсюдження зазнало випарювання. Обладнання для його реалізації має безліч варіацій. Розглянемо найпоширеніші з них.

Випарні апарати з природною циркуляцією.

Випарні апарати із природною циркуляцією (рис. 2) використовують різницю густини, спричинену нагріванням, для забезпечення циркуляції рідини, а не насоси. Коли рідина нагрівається, густина нагрітої рідини зменшується, що призводить до її підйому, тоді як холодніша та щільніша рідина опускається. Ця природна циркуляція сприяє випаровуванню та відділенню пари від концентрованої рідини.

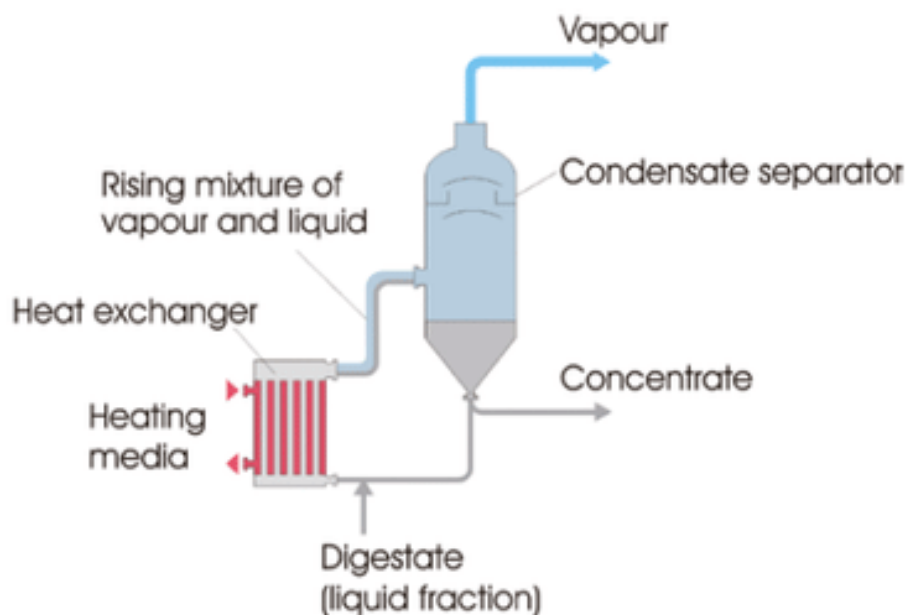


Рис. 2 – Схема випарного апарату з природною циркуляцією.

Принцип роботи наступний:

1. Нагрівання:

Тепло подається до рідини, зазвичай через нагрівальні поверхні, такі як трубки або пластини.

2. Кипіння та випаровування:

					КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4	Арк.
Змн.	Арк.ш	№ докум.	Підпис	Дата		16

Нагріта рідина починає кипіти, і утворена пара піднімається через свою нижчу густину порівняно з навколишньою рідиною.

3. Природна циркуляція:

Підйом пари переносить нагріту рідину вгору, тоді як холодніша та щільніша рідина стікає вниз до зони нагрівання, створюючи природний цикл циркуляції.

4. Відділення пари:

У верхній частині випарного апарату пара зазвичай відділяється від решти рідини, яка потім концентрується.

Недоліки: ці вертикальні установки потребують великої висоти. Як правило, вони не підходять для усунення накипу і чутливі до змін умов експлуатації.

Випарні апарати з вимушеною циркуляцією.

Ці випарні системи виготовляються в різних конфігураціях для застосувань, де вихідна та/або отримана рідина має тенденцію до солоного утворення або утворення накипу, а також де в'язкість розчинів настільки висока, що природна циркуляція неможлива. Теплові та потокові характеристики технологічної рідини настільки погані, що необхідне використання примусової циркуляції.

Примусова циркуляція досягається різними способами, такими як розміщення насосів зовні випарника (рис. 3). Примусова циркуляція призводить до високих швидкостей на стінках труб (1,8-8,6 м/с), а отже, до вищих коефіцієнтів теплопередачі та менших поверхонь нагріву. Позитивна циркуляція робить цей пристрій відносно нечутливим до змін фізичних властивостей або жирів, що робить його придатним для кристалізації розчинів або суспензій.

Випарники з примусовою циркуляцією мають найширший спектр застосування. Поверхня нагріву може бути всередині або зовні випарника; це

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.ш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		17

також стосується пристрою, який створює примусову циркуляцію. Трубки можуть бути горизонтальними або вертикальними.

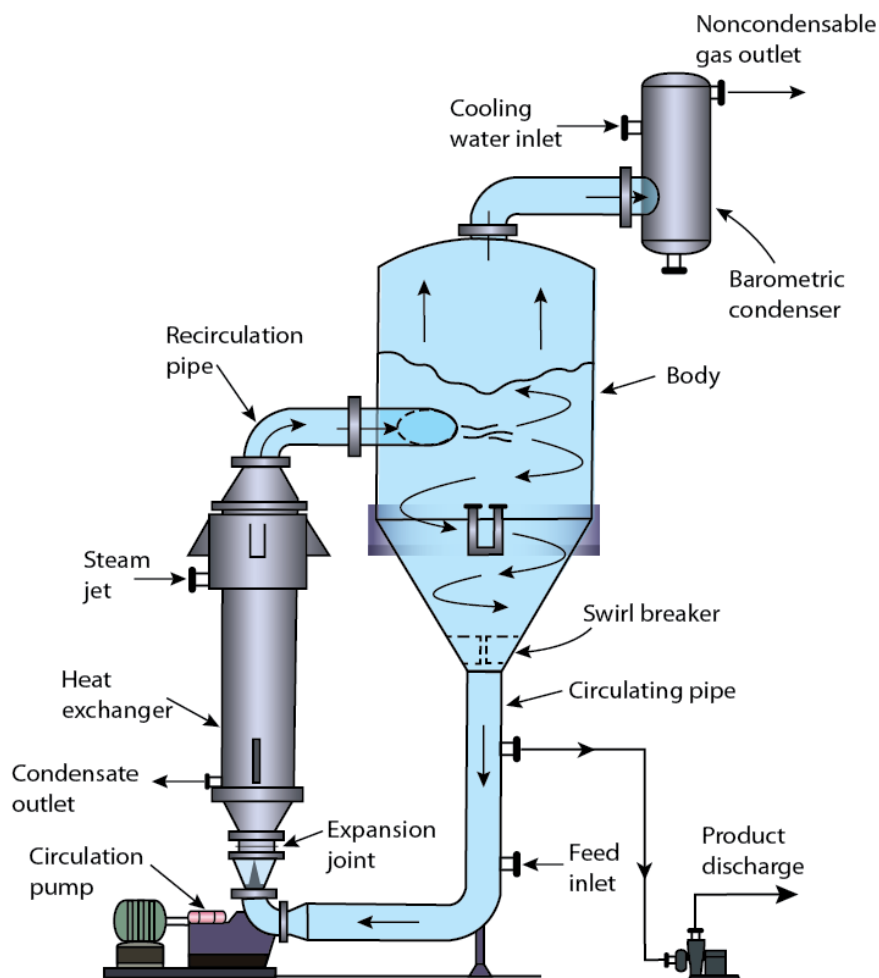


Рис. 3 – Схема випарного апарату з вимушеною циркуляцією.

Кипіння може відбуватися або пригнічуватися завдяки гідростатичному напору, що підтримується над верхньою трубною решіткою. В останньому випадку рідина перегрівається та спалахує, перетворюючись на рідинно-парову суміш. Тип використовуваної парової головки, від простого відцентрового сепаратора до кристалізаційної камери, вибирається на основі характеристик продукту.

Недоліки: Ці випарники зазвичай менш економічні, ніж інші типи, через експлуатаційні витрати та витрати на обслуговування насосів. Через високі швидкості циркуляції може виникати корозія/ерозія.

Пластинчасті випарні апарати.

Пластинчасті випарні апарати – це тип напівзварного пластинчастого теплообмінника з вихідною плівкою (рис. 4), і підходить для випадків, коли концентрація та в'язкість рідини високі. Типовим застосуванням пластинчастого випарника є системи випаровування цукрових заводів, системи випаровування підсолоджувачів, біоетанолу та каустичної рідини. Він також підходить як термосифонний ребойлер.

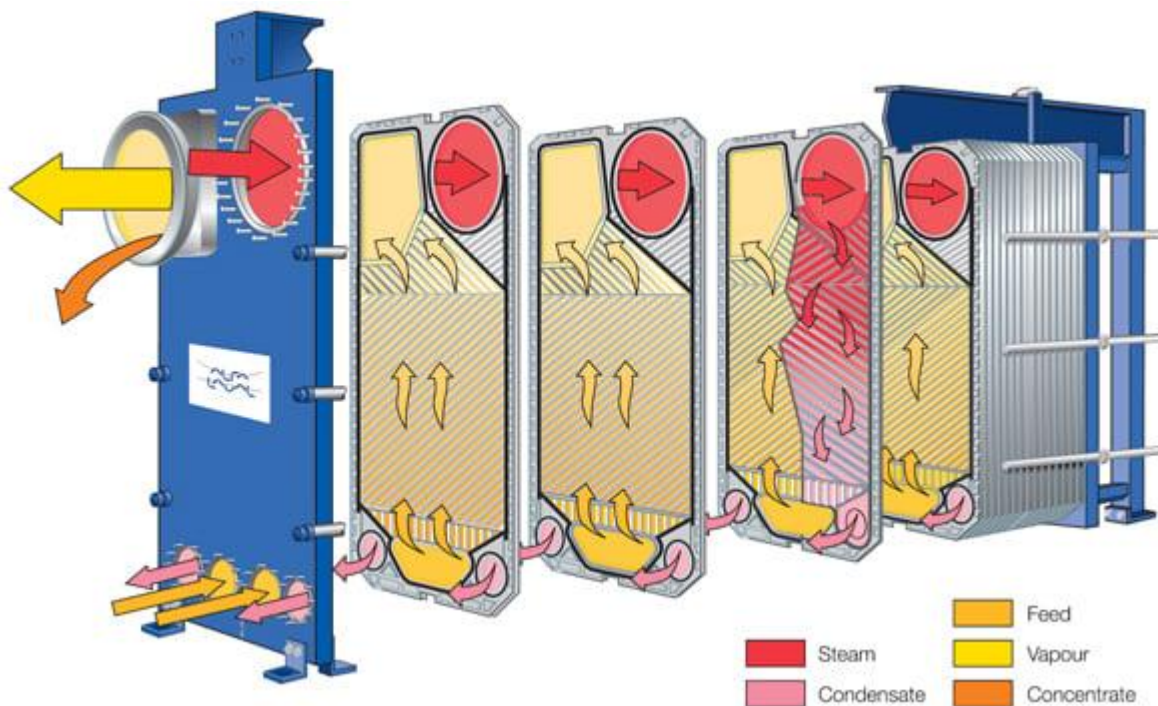


Рис. 4 – Схема пластинчастого випарного апарату з висхідною плівкою.

Його конструкція забезпечує вищу теплову ефективність, ніж традиційні кожухотрубні випарники, і завдяки цьому потрібна набагато менша площа теплопередачі. Пластинчасті випарники є економічно ефективними, особливо коли потрібні спеціальні металеві матеріали.

Його перевага полягає в тому, що вони працюють також, коли різниця температур між гарячою та холодною рідинами наближається до $2,5^{\circ}\text{C}$, а це означає, що в системі випаровування можна використовувати пару нижчого сорту та більше ефектів послідовно порівняно з кожухотрубними системами. Це економить витрати на пару.

					КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4	Арк.
Змн.	Арк.ш	№ докум.	Підпис	Дата		19

Пластинчасті випарні апарати, незважаючи на свої переваги, мають низку недоліків. Ключовим є чутливість до якості теплоносія, через що пристрої швидко забруднюються під час використання неякісних робочих середовищ. Це призводить до зниження продуктивності та ККД, а також погіршення якості роботи. Крім того, пластинчасті теплообмінники менш ефективні в умовах високих температур та тисків порівняно з трубчастими.

Основні недоліки:

- пластинчасті випарні апарати дуже чутливі до якості теплоносія. Забруднення, такі як накип або відкладення, можуть значно знижувати ефективність теплообміну та призвести до зниження продуктивності.
- пластинчасті теплообмінники зазвичай не рекомендуються для роботи в умовах дуже високих температур (вище 200°C) або тиску (вище 25 бар). У разі краще використовувати трубчасті теплообмінники.
- внутрішні поверхні пластинчастих теплообмінників можуть бути недоступними для очищення, особливо при сильному забрудненні.
- пластинчасті теплообмінники можуть бути не найкращим вибором для середовищ, що містять великі тверді частинки або кристалізуються речовини, так як це може призвести до закупорки каналів.
- для певних умов експлуатації, що вимагають високої стійкості до температур і тисків, вартість пластинчастих теплообмінників може бути вищою, ніж у трубчастих.

Плівкові випарні апарати.

Плівкові апарати в свою чергу поділяються на апарати з висхідною та низхідною плівкою.

Випарні апарати з висхідною плівкою – це оригінальна версія вертикального випарного апарату з довгою трубкою (рис. 5). Пара конденсується на зовнішніх поверхнях вертикальних трубок. Рідина всередині трубок доводиться до кипіння, а утворена пара займає серцевину трубки. Коли рідина рухається вгору по трубці, утворюється більше пари, що

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.ш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		20

призводить до вищої центральної швидкості, яка притискає решту рідини до стінки трубки. Це призводить до утворення тоншої та швидше рухомої рідкої плівки. Зі швидшим рухом плівки коефіцієнти теплопередачі збільшуються, а час перебування зменшується.

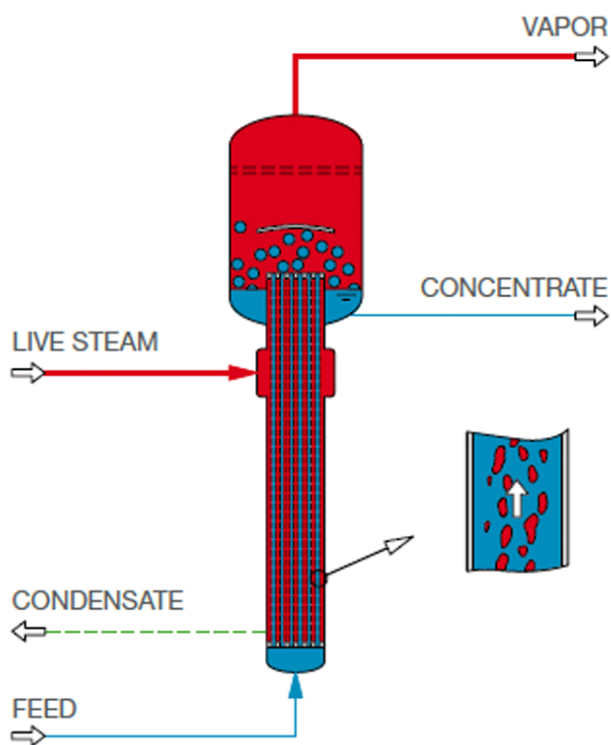


Рис. 5 – Схема випарного апарату з висхідною плівкою.

Оскільки пара та рідина течуть в одному напрямку, стоншення рідкої плівки не так виражене, як у випарному апараті зі спадаючою плівкою, а ймовірність висихання трубки менша. Це робить випарний апарат з висхідною плівкою особливо придатним для використання в умовах незначної схильності до утворення накипу.

Недоліки: Теплопередачу важко передбачити; перепад тиску вищий, ніж для типів із падаючою плівкою. Продуктивність надзвичайно чутлива до рушійної сили температури. Теплопередача падає при низьких перепадах температур (менше 2°C) або при низьких температурах (близько 120°C).

Гідростатичний напір може створювати проблеми з термочутливими рідинами. Існує схильність до утворення накипу. Крім того, установки чутливі до змін навантаження та умов подачі сировини.

Випарні апарати з низхідною плівкою розвинулися як засіб вирішення проблем, пов'язаних з типами випарних апаратів з висхідною плівкою. Зокрема, гідростатичний напір, необхідний для роботи установок з висхідною плівкою, призводить до проблем з деякими термочутливими продуктами.

У випарних апаратах з низхідною плівкою рідина, що подається, вводиться у верхню трубну решітку та стікає по стінці труби у вигляді тонкої плівки (рис. 6). Оскільки плівка рухається в напрямку сили тяжіння, а не проти неї, утворюється тонша плівка зі збільшеною швидкістю руху, що забезпечує вищі коефіцієнти теплопередачі та зменшує час контакту. Немає статичного напору, який би впливав на рушійну силу температури. Це дозволяє використовувати меншу різницю температур для роботи установок у плівковому режимі, і, отже, забезпечує кращу продуктивність при обробці термочутливих матеріалів.

					<i>КРБ.ПотаЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
						22
<i>Змн.</i>	<i>Арк.ш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

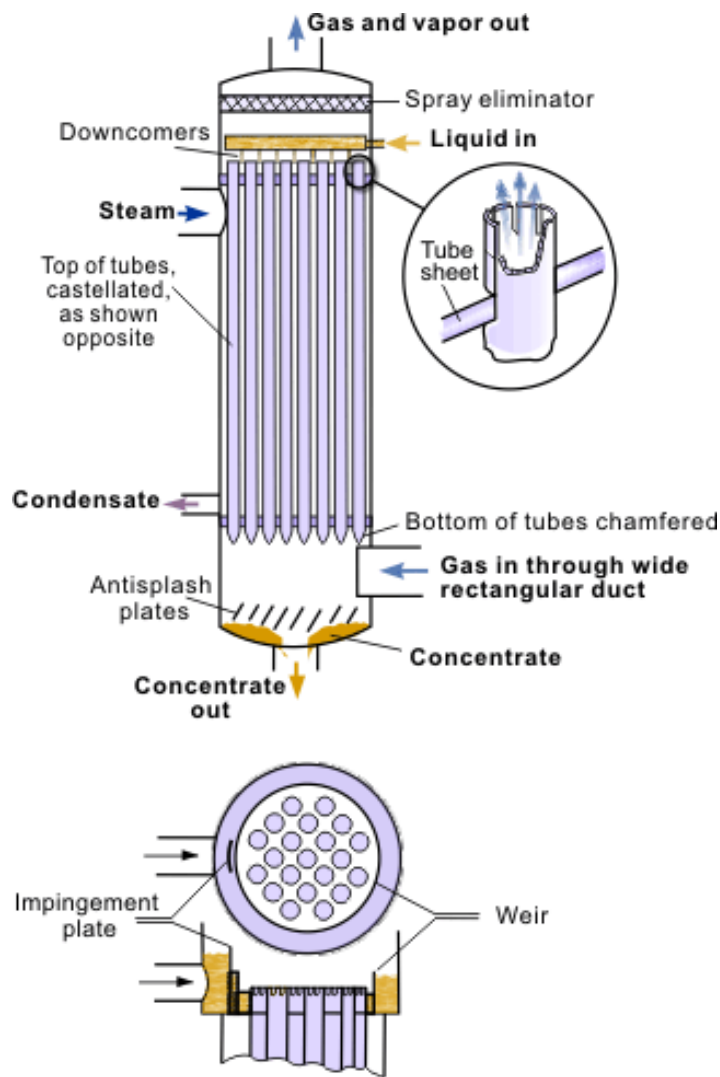


Рис. 6 – Схема випарного апарату з низхідною плівкою.

Потік пари та рідини може бути як прямою, в цьому випадку розділення пари та рідини відбувається знизу, так і протитечію (рідина відводиться знизу, а пара зверху). При прямому сили зсуву пари стоншують плівку рідини та забезпечують вищі коефіцієнти теплопередачі. Більше того, оскільки пара контактує з найгарячішою рідиною в точці відведення, відпарювання є більш ефективним.

У протитечії сили зсуву збільшують товщину рідинної плівки та зменшують коефіцієнт теплопередачі. Якщо швидкість потоку пари достатньо висока, це може призвести до затоплення трубок, при цьому рідина переноситься вгору за точку впорскування, що призводить до зниження продуктивності та нестабільної роботи. Протитечійний режим

використовується, коли необхідно випаровувати рідину при низькій температурі в умовах вакууму, або коли інертний газ (наприклад, азот або повітря) впорскується в трубки в нижній частині установки для зниження парціального тиску пари, а отже, і точки кипіння рідини.

Ще одним явищем, поширеним для випарних апаратів з низхідною плівкою, є утворення сухих плям, що знижує теплові характеристики. Сухі плями можуть бути спричинені недостатньою швидкістю потоку рідини для підтримки безперервної рідкої плівки або тим, що випарний апарат не є абсолютно вертикальним.

Основною проблемою випарних апаратів з низхідною плівкою є нерівномірний розподіл рідини, що подається, у вигляді плівки всередині трубок. Важливість рівномірного розподілу подачі неможливо переоцінити. Для підтримки безперервної рідкої плівки рідина, що подається, повинна бути рівномірно розподілена по периферії кожної трубки, а потік до кожної трубки має бути рівномірним. Для розподілу подачі було розроблено різноманітні пристрої, такі як перфоровані пластини, розподільники-павуки з радіальними кронштейнами, розпилювальні форсунки та розподільники зливного типу. Інформація про переваги та обмеження різних типів розподільника щодо вибору розподільника є недостатньою.

Недоліки: Вони такі ж, як і для випарних апаратів з висхідною плівкою, за винятком того, що розподіл сировини є основною проблемою. Однак, температурна рушійна сила не є обмежувальною, і можливий ширший спектр застосування.

Промислове застосування: У виробництві добрив ці випарні апарати використовуються для концентрування сечовини, фосфорної кислоти, аміачної селітри тощо. Випарники зі спадаючою плівкою також використовуються для переробки харчових продуктів та молочних продуктів, а також для знесолення морської води.

					<i>КРБ.ПотаЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
Змн.	Арк.ш	№ докум.	Підпис	Дата		24

Багатоступеневі випарні апарати.

Багатоступеневі випарні апарати – це серія резервуарів, які працюють за поступово нижчих тисків і температур, щоб мінімізувати споживання енергії та підвищити ефективність (рис. 7). У багатоефективному випарнику пара, що утворюється в одному резервуарі, використовується для нагрівання наступного, зменшуючи кількість енергії, необхідної для випаровування розчинника. Це досягається шляхом пропускання пари з першого резервуара через теплообмінник для нагрівання рідини в другому резервуарі. Потім пара конденсується, і розчин повертається в перший резервуар для повторення процесу.

Важливість багатоступеневих випарних апаратів полягає в їхній здатності підвищувати концентрацію розчинів з меншою енергоємністю, що робить їх більш сталим та економічно ефективним рішенням для промислових процесів. Процес також забезпечує вищу концентрацію та чистоту кінцевого продукту, що є важливим для якості та консистенції кінцевого продукту.

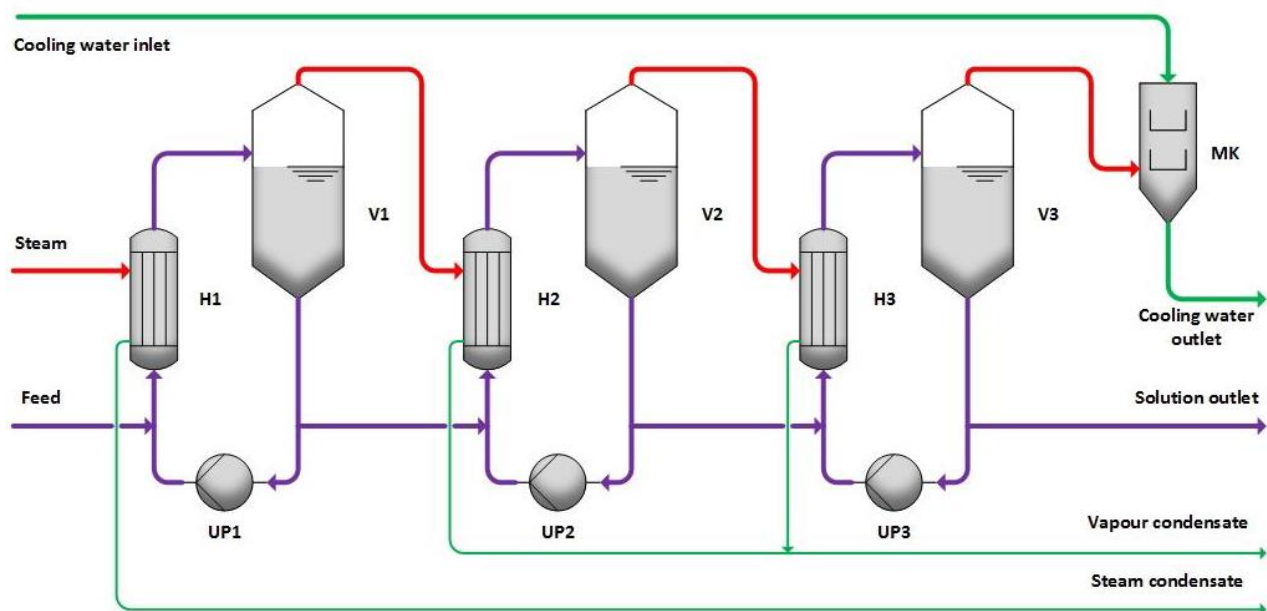


Рис. 7 – Схема багатоступеневого випарного апарату.

Принцип роботи

Типовий багатоступеневий випарний апарат складається з кількох резервуарів або ступенів, кожен з яких має власну поверхню нагріву та вакуумну систему. Кількість необхідних ступенів залежить від концентрації розчину, що виробляється, та характеристик теплопередачі розчину. Резервуари зазвичай розташовані каскадно, причому пара, що утворюється на кожному ступені, використовується для нагрівання розчину на наступному ступені.

Розчин, який потрібно концентрувати, подається на першу стадію, і тепло подається на нагрівальну поверхню. У міру нагрівання розчину розчинник починає випаровуватися та захоплюється паром. Пара, що утворюється на першій стадії, потім спрямовується на наступну стадію, де вона використовується для нагрівання розчину на цій стадії. Цей процес повторюється стільки стадій, скільки потрібно, доки не буде досягнуто бажаної концентрації.

Кожна секція в багатоступеневому випарному апараті виконує певну функцію. Перша секція використовується для кип'ятіння розчину, тоді як наступні секції використовуються для рекуперації пари, що утворилася на попередній стадії, та її конденсації. Теплообмінник використовується для передачі тепла від пари до розчину на наступній стадії. Теплообмінник зменшує кількість енергії, необхідної для випаровування розчинника, використовуючи приховану теплоту пари для нагрівання розчину.

Одноступеневі випарні апарати працюють шляхом кип'ятіння розчину в одній ємності, що вимагає великої кількості енергії для випаровування розчинника. На відміну від цього, багатоступеневі випарні апарати використовують приховану теплоту пари, що утворюється на кожному етапі, для нагрівання розчину на наступному етапі, зменшуючи кількість енергії, необхідної для випаровування розчинника. Це робить багатоступеневі

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
Змн.	Арк.ш	№ докум.	Підпис	Дата		26

випарні апарати більш енергоефективними та економічно вигідними, ніж одноступеневі.

Недоліки багатоступеневих випарних апаратів:

- є високоефективним та результативним рішенням для великомасштабних процесів випаровування, але вони можуть не підходити для всіх застосувань. Деякі з недоліків перелічені тут.
- можуть бути дорожчими в придбанні та встановленні порівняно з одноефективними випарниками через їхню складнішу конструкцію та вищий рівень автоматизації.
- можуть бути складнішими в обслуговуванні та ремонті порівняно з одноефективними випарниками. Вони можуть вимагати частіших перевірок, очищення та заміни компонентів, що може збільшити загальну вартість володіння.
- можуть бути більш чутливими до забруднення, яке виникає, коли тверді речовини або інші домішки накопичуються на поверхнях теплообміну. Це може знизити ефективність процесу випаровування та вимагати частішого очищення.
- можуть бути менш гнучкими, ніж одноефективні випарники, коли йдеться про обробку низки різних продуктів.
- можуть не підходити для обробки певних продуктів, чутливих до високих температур або потребуючих більш дбайливого поводження.

					<i>КРБ.ПотаЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
<i>Змн.</i>	<i>Арк.ш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		27

3. ОГЛЯД ПАТЕНТНИХ МАТЕРІАЛІВ

Патент на корисну модель №49675 «Пристрій для концентрування рідких розчинів».

Корисна модель відноситься до пристроїв концентрування рідких розчинів, в основному рослинного походження, і може бути використана в харчовій, фармакологічній, мікробіологічній та інших галузях виробництва.

Запропонована корисна модель представляє собою ємність з розчином, в якій нагрівач з отворами частково занурений в поверхневий шар розчину і рухається одночасно з зміною рівня розчину в ємності (рис. 8). Температура по всій площині нагрівача підтримується рівною і відповідає температурі поверхневого шару водяного розчину, в який частково занурений нагрівач з отворами. Досягнення технічного результату забезпечено за рахунок низької теплопровідності водяного розчину, що дає можливість ефективно використовувати рухому конструкцію нагрівача, який розміщується в поверхневому шарі водяного розчину.

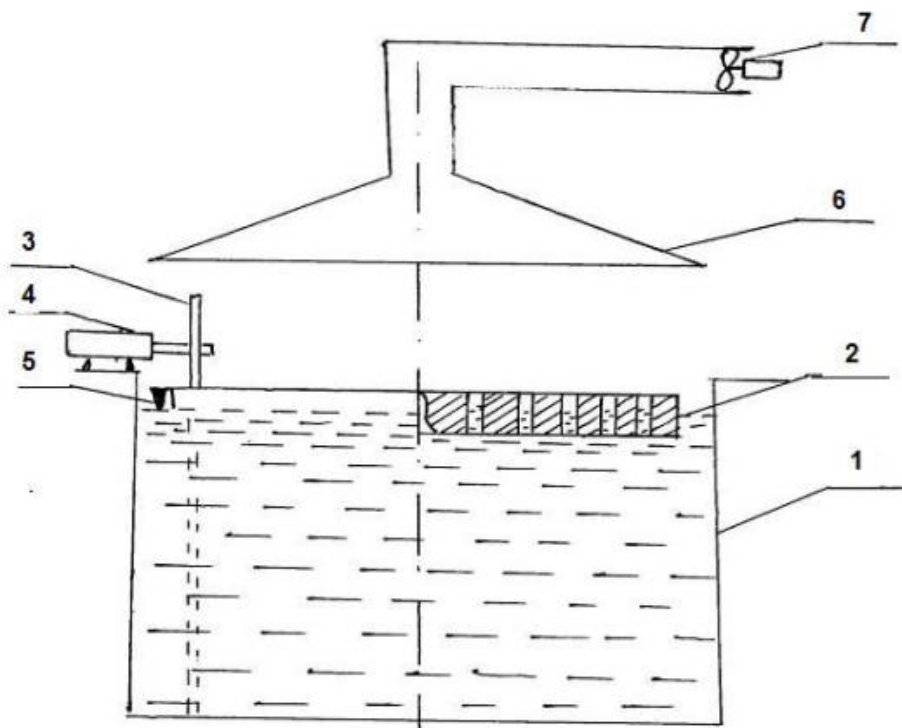


Рис. 8 – Схема пристрою для концентрування розчинів за патентом №49675.

					КРБ.ПОтаЕМ.1.738-03.4.4	Арк.
Змн.	Арк.ш	№ докум.	Підпис	Дата		28

Пристрій має ємність з розчином 1, в поверхневому шарі якого розміщується нагрівач 2 з отворами, переміщення якого по штоку 3 здійснюється з допомогою електродвигуна з редуктором 4 після включення датчика зміни рівня розчину 5. Водяні пари відводяться через паровідвід 6 електровентильатором 7. Робота пристрою здійснюється таким чином. В ємності 1 з водним розчином розміщується нагрівач з отворами 2, таким чином щоб було частково занурення його в розчин. При цьому клеми датчика рівня розчину 5 розімкнуті, і відповідно напруга не подається на клеми електродвигуна 4. Включення напруги, або подача пару в корпус нагрівача приводить до випаровування вологи через отвори в корпусі нагрівача з поверхневого шару розчину. При пониженні рівня розчину клеми на датчику рівня розчину замикається. Переміщення нагрівача відбувається до розімкнення клем датчика розчину.

Патент на винахід №54216 «Установка концентрування харчових продуктів і біологічних препаратів».

Винахід відноситься до технологічного устаткування, що призначено для концентрування харчових продуктів і біологічних препаратів.

Запропонована установка забезпечує концентрування рідких продуктів при температурах 10..35°C, що сприяє зберіганню вітамінів, ферментів, живих клітин і токсинів у біопрепаратах; вимагає малої витрати енергії для здійснення процесу концентрування харчових і біопродуктов; дозволяє створити більш глибокий вакуум, який забезпечує кипіння концентруемого продукту при температурі 10...35°C, виключити з технологічної схеми пар високого тиску для нагрівання продукту й охолоджувальну воду для конденсації водяної пари.

Схема запропонованої установки надана на рис. 9.

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
Змн.	Арк.ш	№ докум.	Підпис	Дата		29

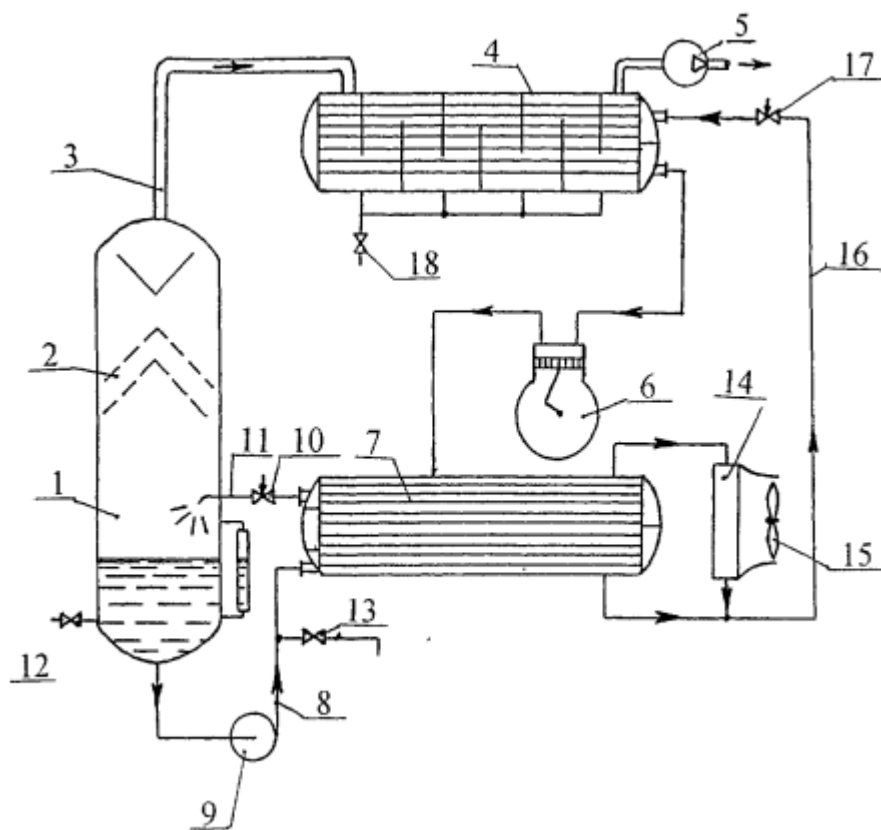


Рис. 9 – Схема пристрою для концентрування розчинів за патентом №54216.

Установка складається з випарного апарата 1, оснащеного краплеуловлювачем 2, і з'єднаного з ним через трубопровід 3 конденсатора водяної пари 4, вакуум-насоса 5. Конденсатор водяної пари 4 через компресор б з'єднаний з підігрівником 7 – конденсатором тепло-холодильної машини. На трубопроводі 8, що з'єднує нижню частину випарного апарата 1, яка служить збірником концентруемого продукту, із входом у підігрівник 7, встановлено насос 9. Дросельний пристрій 10 встановлено на трубопроводі 11, що з'єднує вихід концентруемого продукту з підігрівника 7 з випарним апаратом 1. Заповнення випарного апарата 1 концентруемым продуктом здійснюють через запірний вентиль 12, а випуск сконцентрованого продукту здійснюють через запірний вентиль 13. Підігрівник 7 – конденсатор тепло-холодильної машини, з'єднаний по лінії холодильного агента з додатковим повітряним конденсатором 14, який оснащено вентилятором 13 і зв'язаний з конденсатором водяної пари 4 – випарником тепло-холодильної машини трубопроводом 16, який оснащено дросельним вентилем 17. Конденсат, який

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
Змн.	Арк.ш	№ докум.	Підпис	Дата		30

нагромадився в конденсаторі водяної пари 4, видаляють за допомогою запірного вентиля 18. Пропонована установка працює наступним чином: Необхідну кількість концентруємого продукту завантажують у нижню частину випарного апарата 1 через запірний вентиль 12. За допомогою вакуум-насоса 5 відкачують повітря з конденсатора водяної пари 4 і з'єднаного з ним випарного апарата 1. По досягненні тиску, що відповідає температурі конденсації пари (10...20)°С, вмикають компресор 6 тепло-холодильної машини і вентилятор 15 додаткового конденсатора 14. Після зниження температури в конденсаторі водяної пари 4 – випарнику тепло-холодильної машини до (10...20)°С включають насос перекачування концентруємого продукту 9. Концентруємий продукт із випарного апарата 1 насосом перекачування концентруємого продукту 9 подають у підігрівник 7, де він нагрівається до температури 30...35°С. Нагрітий концентруємий продукт за допомогою дросельного пристрою 10, дроселюється до тиску, який дорівнює тиску у випарному апараті 1, і впорскується в його паровий простір нижче краплеуловлювача 2, утворюючи дрібнодисперсний смолоскип і відбувається самозакипання подаваного концентруємого продукту. В наслідок цього з нього випарюється частина вологи, і пара, яка утворилася, через краплеуловлювач 2 надходить у конденсатор 4 - випарник тепло-холодильної машини, де конденсується за рахунок відводу теплоти до киплячого холодительного агенту. Водяний конденсат, який утворюється, збирається в нижній частині конденсатора 4 і при необхідності може бути випущено через запірний вентиль 18, а пара холодительного агента компресором 6 нагнітається в конденсатор тепло-холодильної машини – підігрівник концентруємого продукту 7, де конденсується, віддаючи теплоту продукту, який концентрується. При цьому холодоагент, що не сконденсувався, конденсується в додатковому повітряному конденсаторі 14, який оснащено вентилятором 15. Далі рідкий холодительний агент за допомогою дросельного вентиля 17, який встановлено на трубопроводі 16,

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.ш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		31

дроселюється до тиску, рівного тиску холодоагенту, що кипить у випарнику тепло-холодильної машини – конденсаторі водяної пари 4, і подається в конденсатор 4, де він відбирає теплоту від водяної пари, яка конденсується. Таким чином, одержуємо замкнутий енергозберігаючий цикл роботи запропонованої установки.

Патент на винахід №74296 «Установка концентрування харчових продуктів і біологічних препаратів».

Винахід відноситься до технологічного устаткування, призначеного для концентрування харчових продуктів і біологічних препаратів.

Схема запропонованої установки приведена на рисунку 10.

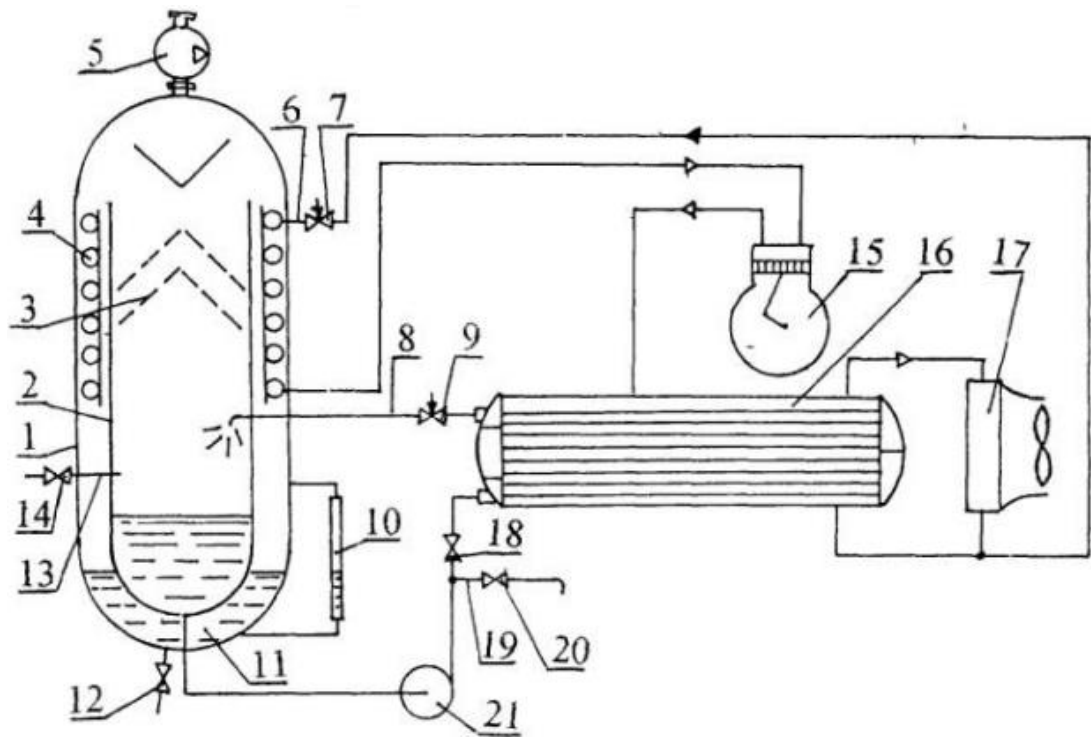


Рис. 10 – Схема установки для концентрування розчинів за патентом №74296.

Установка складається з випарного апарата, що включає корпус 1, у якому розміщені: стакан 2, крапельловлювач 3, конденсатор водяної пари 4, який розміщено у верхній частині зазору між корпусом 1 і стаканом 2, вакуум-насос 5, з'єднаний з верхньою частиною корпуса 1. До конденсатора водяної пари 4 приєднаний трубопровід холодильного агента 6, на якому

встановлено дросельний пристрій холодильного агента 7. До стакану 2 випарного апарата приєднаний трубопровід підігрітого продукту 8 із дросельним пристроєм 9. У нижній частині випарного апарата розташований покажчик рівня конденсату 10 в збірнику конденсату 11, вентиль для видалення конденсату 12, а до стакану 2 випарного апарата приєднаний трубопровід 13 подачі концентрованого продукту з запірним вентилям 14. Для забезпечення роботи установка також включає холодильний компресор 15, конденсатор теплохолодильної машини 16, додатковий конденсатор 17, запірний вентиль 18, трубопровід випуску концентрованого продукту 19 з випускним вентилям 20 і насосом 21. Пропонована установка працює слідуєчим чином: необхідна кількість концентрованого продукту через трубопровід 13 за допомогою вентиля 14 завантажують у нижню частину стакану 2 випарного апарата. За допомогою вакуум-насоса 5 відкачують повітря з корпусу вакуум-випарного апарата 1. По досягненні тиску, що відповідає температурі конденсації пари (10...20)°С, включають компресор 15 тепло-холодильної машини і додатковий конденсатор 17, а по досягненні необхідного режиму включають насос подачі концентрованого продукту 21, Після цього концентруємий продукт із нижньої частини стакану 2 випарного апарата насосом 21 подають у підігрівник концентрованого продукту 16 (конденсатор тепло-холодильної машини), де він підігрівається до температури (30...35)°С. Нагрітий продукт – за допомогою дросельного пристрою 9 по трубопроводу 8 дроселюється в стакан 2 у простір між краплевловлювачем 3 і поверхнею концентрованого продукту. При цьому відбувається самоскипання подаваного концентрованого продукту, у результаті чого з нього випарюється частина вологи, а пара, що утворилася, пройшовши поза краплеуловлювач 3 конденсується на поверхні конденсатора водяної пари А. Вода, що утворилася при конденсації пари, накопичується в нижній частині кільцевого зазору між стаканом 2 і корпусом 1 випарного апарата, а пара холодильного агента компресором 15

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.ш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		33

нагнітається в конденсатор тепло-холодильної машини 16, що є підігрівником концентрованого продукту. Холодильний агент, що не скондесувався в конденсаторі 16, конденсується в додатковому конденсаторі 17. Рідкий холодильний агент, що утворився в конденсаторах 16 і 17 за допомогою дросельного вентиля 7 дроселюється до тиску кипіння холодоагенту в конденсаторі водяної пари 4, де він відбирає теплоту, від водяної пари, що конденсується. Таким чином, одержуємо замкнутий енергозберігаючий цикл роботи установки.

Патент на винахід WO2013157907 «Однокорпусний вакуум-випарний апарат».

Завданням винаходу є розробка однокорпусного вакуум-випарного апарату з диском, що обертається, конічної або овальної форми (рис. 11). Новий вакуум-випарний апарат є однокорпусним і дозволяє не застосовувати сепаратор, а також підвищує якість продукту, що випаровується і забезпечує рівномірний розподіл продукту, що випаровується у вигляді плівки у випарнику.

На рисунку 11 показана принципова схема однокорпусного вакуум-випарного апарату згідно винаходу. Основними складовими частинами апарату є корпус 1, патрубок 2 для подачі розчину, що випаровується, диск-випарник 3, тени 4, теплоізолюючий шар 5, електродвигун 6, патрубок 7 для відведення випареного розчину, патрубок 8, підключений до вакуумної системи.

Пропонований апарат працює в такий спосіб. У корпус 1 апарату за допомогою патрубку 2 надходить нагрітий продукт, що концентрується, який подають на обертювий диск-випарник 3, що нагрівається. Диск-випарник 3 приводиться в обертання електродвигуном 6 і нагрівається тенями 4, прикріпленими із зовнішньої, неробочої сторони диска. Тени 4 покриті теплоізолюючим шаром 5 для збереження постійної температури диска та виключення втрат тепла. При надходженні продукту, що випаровується на

					<i>КРБ.ПотаЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
						34
Змн.	Арк.ш	№ докум.	Підпис	Дата		

диск 3 відбувається інтенсивне випаровування парів води. Продукт розтікається і утворює рівномірну по товщині плівку на поверхні диска, що обертається 3.

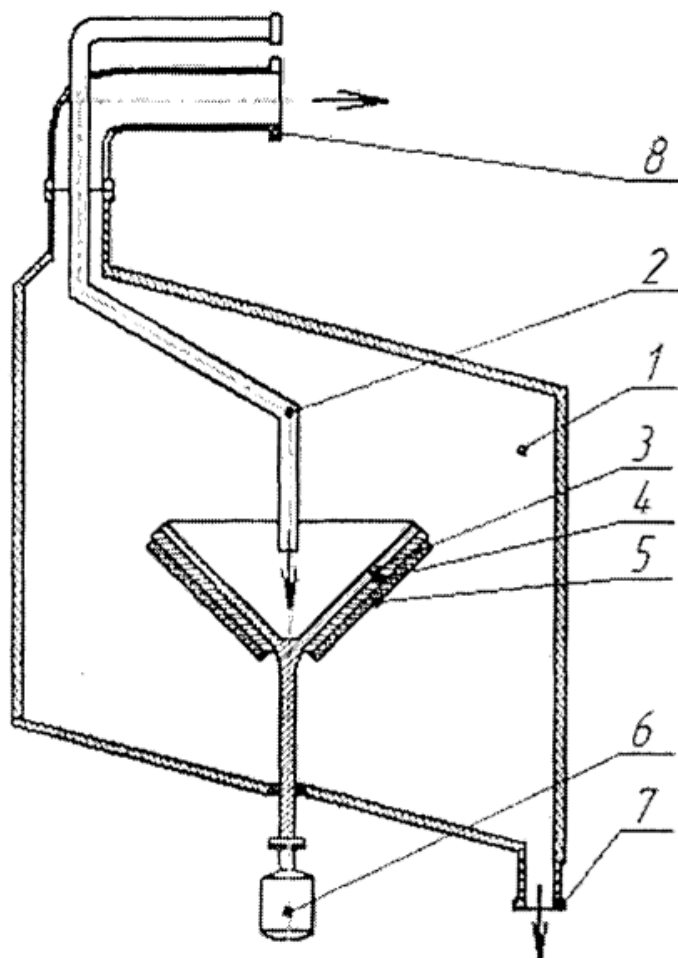


Рис. 11 – Схема однокорпусного вакуум-випарного апарату за патентом WO2013157907.

Утворена плівка за рахунок відцентрової сили притискається до поверхні нагрітого диска 3 і рухається до верхньої кромки диска, що обертається 3. Концентрований розчин, відокремлений від парів води, викидається на стінки корпусу 1 і стікає вниз, а потім видаляється через нижній патрубок 7. Пори води піднімаються вгору і видаляються через верхній пат. Рівномірне розтікання продукту, що концентрується, і утворення рівномірної плівки при упарюванні забезпечують отримання концентрованого продукту високої якості і вільне випаровування води без

утворення піни, що виключає винесення крапель продукту, що випаровується потоком водяної пари, а значить використання сепаратора.

Використання пропонованого технічного рішення дозволяє спростити, оптимізувати конструкцію однокорпусного вакуум-випарного апарату та підвищити якість та однорідність концентрованого продукту. Продуктивність пропонованого апарату може бути підвищена збільшенням кількості дисків-випарників.

					<i>КРБ.ПотаЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
<i>Змн.</i>	<i>Арк.ш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		36

4. ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРОБКИ ОБРАНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

На основі проведеного критичного аналізу наявного технологічного обладнання для забезпечення процесу випарювання харчових розчинів виявлено, що запропоновані технології та конструкції мають певний ряд недоліків, пов'язаних з високими температурами обробки сировини та складністю виконання.

Результати патентного пошуку вказують на те, наукова спільнота веде активну діяльність щодо спроб усунути ці недоліки, проте повноцінно вирішити поставлену проблему поки що не вдається.

В зв'язку із цим пропонується залучення теплонасосних технологій, які дають змогу використати теплову енергію вторинної пари, що надходить до конденсатора, на підтримання процесу випарювання розчину у випарній камері. Організація вакууму в системі дозволить забезпечити протікання процесу за відносно низьких температур, тим самим зберігаючи поживну цінність та якість готового продукту.

					<i>КРБ.ПотаЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
						37
<i>Змн.</i>	<i>Арк.ш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

5. ОПИС РОЗРОБЛЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ УСТАНОВКИ

Пропонується конструкція вакуум-випарної установки з використанням теплового насоса, роль якого полягає у передачі теплової енергії від вторинної пари, що конденсується в конденсаторі, до сировини, що концентрується у випарній камері. Схема установки зображена на рисунку 12.

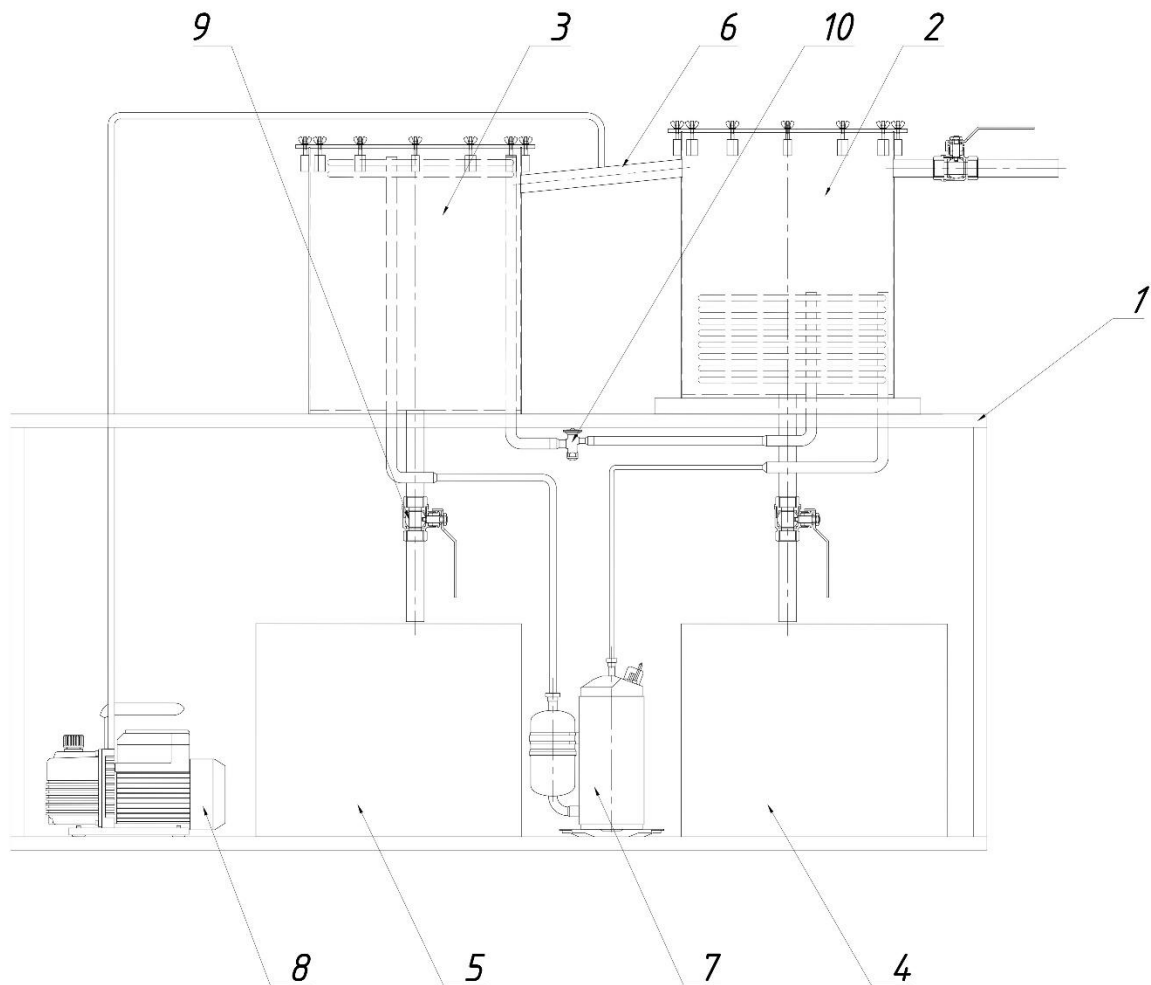


Рис. 11 – Схема вакуум-випарної установки з тепловим насосом.

Головними елементами установки є: рама (1), на якій встановлюються усі необхідні елементи та обладнання; вакуум-випарна камера з конденсатором теплового насоса (2); конденсатор з випарником теплового насоса (3), ємності для готового продукту (4) та конденсату (5); паропровід (6), що з'єднує вакуум-випарну камеру та конденсатор між собою; компресор (7), який забезпечує циркуляцію холодоагенту в системі

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
Змн.	Арк.ш	№ докум.	Підпис	Дата		38

теплового насоса; вакуумний насос (8), який слугує для створення необхідного розрідження в системі; вентилі (9), які слугують для подачі та відведення сировинних потоків; терморегулюючий вентиль теплового насоса (10), завдяки якому забезпечуються зони високого та низького тиску у конденсаторі та випарнику теплового насоса відповідно.

Установка працює наступним чином. Через вентиль завантажується початкова сировина у вакуум-випарну камеру (2) до необхідного рівня, після чого вентиль закривається. Видаляється повітря з системи завдяки вакуумному насосу (8) та запускається компресор (7) теплового насоса. В процесі кипіння розчину відбувається видалення вологи у вигляді вторинної пари, що направляється до конденсатора (3) через паропровід (6). Вторинна пара, потрапляючи до конденсатора, контактує з випарником теплового насоса та конденсується. Після досягнення необхідного рівня концентрації сухих речовин компресор (7) вимикається. З вакуум-випарної камери (2) через вентиль видаляється готовий продукт до ємності (4). З конденсатора (3) видаляється конденсат до ємності (5).

					<i>КРБ.ПотаЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
						39
<i>Змн.</i>	<i>Арк.ш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

6. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗРАХУНОК

Продукт – яблучний сік;

Тиск в апараті $P = 0,01$ МПа;

Продуктивність установки по початковій сировині $G_{II} = 6$ кг/год;

Концентрація сухих речовин: початкова $a = 12\%$, кінцева $a = 50\%$;

Температура початкової сировини $t_{II} = 15^\circ\text{C}$.

6.1. Матеріальний баланс.

Кількість вторинної пари, що утворюється в процесі випарювання, кг/с:

$$W = G_{II} \cdot \left(1 - \frac{a}{b}\right) = 0,0017 \cdot \left(1 - \frac{12}{50}\right) = 0,00129 \text{ кг/с} \quad (5.1)$$

де G_{II} – витрати початкової сировини, кг/с;

a і b – початкова та кінцева концентрація сухих речовин відповідно, %.

6.2. Тепловий баланс.

Рівняння теплового балансу процесу випарювання має вигляд:

$$Q + G_{II} \cdot c_{II} \cdot t_{II} = G_K \cdot c_K \cdot t_K + W \cdot i_{вт.п.} + Q_{втр} \quad (5.2)$$

де Q – тепловий потік, необхідний для випарювання, Вт;

G_K – витрати готового продукту, кг/с;

c_{II} , c_K – питомі теплоємності початкової сировини та готового продукту, Дж/(кг*°C);

t_{II} , t_K – температури початкової сировини та кипіння ($45,8^\circ\text{C}$ при $P = 0,01$ МПа) [6], °C;

$i_{вт.п.}$ – питома ентальпія вторинної пари, Дж/кг;

$Q_{втр}$ – втрати теплоти, Вт:

З рівняння теплового балансу (5.2) визначаємо тепловий потік, необхідний для випарювання:

$$Q = Q_{нагр} + Q_{вип} + Q_{втр} = G_{II} \cdot c_{II} \cdot (t_K - t_{II}) + W \cdot r_{вт.п.} + Q_{втр} \quad (5.3)$$

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
Змн.	Арк.ш	№ докум.	Підпис	Дата		40

де $Q_{нагр}$ – витрати теплоти на нагрів розчину до температури кипіння, Вт;

$Q_{вип}$ – витрати теплоти на випарювання розчинника, Вт;

$r_{вт.п.}$ – питома теплота пароутворення, Дж/кг.

$$Q_{нагр} = G_{п} \cdot c_{п} \cdot (t_{к} - t_{п}) = 0,0017 \cdot 4181 \cdot (45,8 - 15) = 218,9 \text{ Вт} \quad (5.3)$$

$$Q_{вип} = W \cdot r_{вт.п.} = 0,00127 \cdot 2392 \cdot 10^3 = 3090,5 \text{ Вт} \quad (5.4)$$

$$Q_{втр} = 0,03 \dots 0,05 \cdot (Q_{нагр} + Q_{вип}) = 0,04 \cdot (218,9 + 3037,8) = 132,4 \text{ Вт} \quad (5.5)$$

$$Q = Q_{нагр} + Q_{вип} + Q_{втр} = 218,9 + 3090,5 + 132,4 = 3441,8 \text{ Вт}$$

Для забезпечення процесу випарювання обираємо компресор GMCC ASM125V1VFT, який має наступні параметри [5]:

- тип компресора: ротаційний;
- тип фреону: R410a;
- напруга живлення: 220 В/50 Гц/1ф;
- споживча потужність: 845 Вт;
- об'єм циліндра: 12,5 см³;
- Холодопродуктивність при t°конд.+54,5°C; t°кип.+7,2°C (ASHRAE-НВР/АС) – 3610 Вт (12317 Wtu/h).

Поверхні теплообміну випарника та конденсатора визначаються з рівняння:

$$Q_k = k \cdot F \cdot \Delta t_{кор} \quad (5.6)$$

Звідси:

$$F = \frac{Q_k}{k \cdot \Delta t_{кор}} \quad (5.7)$$

де k – коефіцієнт теплопередачі, Вт/м²·К;

F – поверхня теплообміну, м²;

$\Delta t_{кор}$ – температурний напір, К.

Розрахунок випарника.

Температурний напір визначається за формулою:

					<i>КРБ.ПотвЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
Змн.	Арк.ш	№ докум.	Підпис	Дата		41

$$\Delta t_{\text{кор}} = t_{\text{конд}} - t_{\text{к}} = 54,5 - 45,8 = 8,7^{\circ}\text{C} \quad (5.7)$$

Коефіцієнт теплопередачі для випарника визначається за формулою:

$$k_{\text{в}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (5.8)$$

де α_1, α_2 – коефіцієнти тепловіддачі від холодоагенту до поверхні теплообміну та від поверхні теплообміну до рідини відповідно, Вт/м²·К;

$\delta_{\text{ст}}$ – товщина стінки, м; (приймається 0,0008 м);

$\lambda_{\text{ст}}$ – коефіцієнт теплопровідності (для міді 394 Вт/м·К) [7], Вт/м·К.

Визначити коефіцієнт тепловіддачі α_1 від холодоагенту R410a до стінки неможливо, оскільки дані по теплофізичним властивостям холодоагенту обмежені. В зв'язку із цим приймаємо коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_1 = 800$ Вт/(м²·К) (для занурювального випарника) [8].

Для сталого процесу теплопередачі справедлива рівність:

$$q = \alpha_1 \cdot \Delta t_1 = \frac{1}{\delta/\lambda} \cdot \Delta t_{\text{ст}} = \alpha_2 \cdot \Delta t_2 \quad (5.9)$$

де q – питоме теплове навантаження, Вт/м²;

Δt_1 – різниця між температурою конденсації пари і стінкою, °С;

$\Delta t_{\text{ст}}$ – перепад температур на стінці, °С;

Δt_2 – різниця між температурою стінки зі сторони сировини та температурою кипіння сировини, °С.

Розрахунок Δt_1 проводимо шляхом послідовних наближень. У першому наближенні приймаємо $\Delta t_1 = 5^{\circ}\text{C}$.

$$\Delta t_{\text{ст}} = \alpha_1 \cdot \Delta t_1 \cdot \left(\frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} \right) = 800 \cdot 5 \cdot \left(\frac{0,0008}{394} \right) = 0,008^{\circ}\text{C} \quad (5.10)$$

$$\Delta t_2 = \Delta t_{\text{кор}} - \Delta t_{\text{ст}} - \Delta t_1 = 8,7 - 0,008 - 5 = 3,692^{\circ}\text{C} \quad (5.11)$$

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
Змн.	Арк.ш	№ докум.	Підпис	Дата		42

Коефіцієнт тепловіддачі від стінки до киплячого розчину в умовах його природної циркуляції для бульбашкового режиму у трубах розраховується за формулою:

$$\alpha_2 = A \cdot q^{0,6} = 780 \cdot q^{0,6} \cdot \frac{\lambda_p^{1,3} \cdot \rho_p^{0,6} \cdot \rho_n^{0,06}}{\sigma_p^{0,5} \cdot r_p^{0,6} \cdot \rho_o^{0,66} \cdot c_p^{0,3} \cdot \mu_p^{0,3}} \quad (5.12)$$

де $\lambda_p, \rho_p, c_p, \mu_p, \sigma_p, r_p$ – теплопровідність (Вт/м·К), густина (кг/м³), теплоємність (Дж/кг·К), динамічний коефіцієнт в'язкості (Па·с), поверхневий натяг (н/м) та теплота пароутворення (Дж/кг) сировини за температури кипіння відповідно;

ρ_n – густина пари при тиску в апараті, кг/м³;

ρ_o – густина пари за атмосферного тиску, кг/м³.

Значення поверхневого натягу σ_p обираємо для води, оскільки дані для харчових розчинів відсутні.

Для яблучного соку (при $t_k = 45,8^\circ\text{C}$, $P = 0,01$ МПа):

$$\lambda_p = 0,559 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$$

$$\rho_p = 1048 \text{ кг/м}^3$$

$$c_p = 4181 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$$

$$\mu_p = 0,86 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$\sigma_p = 67,7 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$$

$$r_p = 2392 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$$

$$\rho_n = 0,0542 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_o = 0,59 \text{ кг/м}^3$$

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= 780 \cdot q^{0,6} \cdot \frac{0,559^{1,3} \cdot 1048^{0,6} \cdot 0,0542^{0,06}}{0,0677^{0,5} \cdot 2392000^{0,6} \cdot 0,59^{0,66} \cdot 4181^{0,3} \cdot 0,00086^{0,3}} = \\ &= 11,01 \cdot (\alpha_1 \cdot \Delta t_1)^{0,6} = 11,01 \cdot (800 \cdot 5)^{0,6} = 1596,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \end{aligned}$$

Перевіряємо правильність першого наближення за рівнем питомих теплових навантажень:

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
Змн.	Арк.ш	№ докум.	Підпис	Дата		43

$$q_1 = \alpha_1 \cdot \Delta t_1 = 800 \cdot 5 = 4000 \text{ Вт/м}^2$$

$$q_2 = \alpha_2 \cdot \Delta t_2 = 1596,5 \cdot 3,69 = 5894,2 \text{ Вт/м}^2$$

Оскільки $q_1 \neq q_2$, то приймаємо друге наближення $\Delta t_1 = 6^\circ \text{C}$.

$$\Delta t_{cm} = 800 \cdot 6 \cdot \left(\frac{0,0008}{394} \right) = 0,0098^\circ \text{C}$$

$$\Delta t_2 = \Delta t_{кор} - \Delta t_{cm} - \Delta t_1 = 8,7 - 0,0098 - 6 = 2,69^\circ \text{C}$$

$$\alpha_2 = 11,01 \cdot (800 \cdot 6)^{0,6} = 1781,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Перевіряємо правильність другого наближення за рівнем питомих теплових навантажень:

$$q_1 = \alpha_1 \cdot \Delta t_1 = 800 \cdot 6 = 4800 \text{ Вт/м}^2$$

$$q_2 = \alpha_2 \cdot \Delta t_2 = 1781,1 \cdot 2,69 = 4791,6 \text{ Вт/м}^2$$

Відносна похибка становить:

$$\left| \frac{4791,6 - 4800}{4791,6} \right| \cdot 100\% = 0,18\% < 5\%$$

Розраховуємо коефіцієнт теплопередачі:

$$k_e = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{800} + \frac{0,0008}{394} + \frac{1}{1781,1}} = 551,4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Розраховуємо поверхню теплообміну:

$$F = \frac{Q_k}{k \cdot \Delta t_{кор}} = \frac{Q_{нагр} + Q_{вип}}{k \cdot \Delta t_{кор}} = \frac{218,9 + 3090,5}{551,4 \cdot 8,7} = 0,690 \text{ м}^2$$

Довжина труб випарника розраховується за формулою:

$$L = \frac{F}{\pi \cdot d} = \frac{0,69}{3,14 \cdot 0,011} = 19,97 \text{ м} \quad (5.13)$$

Довжина спіралі Архімеда однієї площини розраховується за формулою:

$$l = \pi \cdot d_{сер} \cdot n = 3,14 \cdot 0,2 \cdot 4 = 2,512 \text{ м} \quad (5.14)$$

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
Змн.	Арк.ш	№ докум.	Підпис	Дата		44

Визначаємо кількість витків спіралі:

$$n_c = \frac{19,97}{2,512} = 7,95 \approx 8 \quad (5.15)$$

Розрахунок конденсатора.

Визначаємо температурний напір:

$$\Delta t_{кор} = 45,8 - 15 = 30,8^\circ\text{C}$$

Коефіцієнт теплопередачі для конденсатора визначається за формулою:

$$k_e = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (5.16)$$

де α_1, α_2 – коефіцієнти тепловіддачі від вторинної пари до поверхні теплообміну та від поверхні теплообміну до холодоагенту відповідно, Вт/м²·К;

δ_{cm} – товщина стінки, м; (приймається 0,0008 м);

λ_{cm} – коефіцієнт теплопровідності (для міді 394 Вт/м·К) [7], Вт/м·К.

Коефіцієнт тепловіддачі від пари, що конденсується, до стінки трубки визначається як:

$$\alpha_1 = 0,72 \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_{нк}^2 \cdot \lambda_{нк}^3 \cdot r}{\mu_{нк} \cdot d_{зов} \cdot \Delta t_1}} \quad (5.17)$$

де $\rho_{нк}, \lambda_{нк}, \mu_{нк}$ – густина (кг/м³), теплопровідність (Вт/м·К), та динамічний коефіцієнт в'язкості (Па·с) плівки конденсату за середньої температури плівки $t_{nl} = t_k - \Delta t_1/2$, де Δt_1 – різниця температур конденсації пари та стінки, °С;

r – питома теплота конденсації вторинної пари, Дж/кг;

$d_{зов}$ – зовнішній діаметр трубки, м.

Розрахунок Δt_1 проводимо шляхом послідовних наближень. У першому наближенні приймаємо $\Delta t_1 = 5^\circ\text{C}$. Тоді $t_{nl} = 45,8 - 5/2 = 43,3^\circ\text{C}$.

Для плівки конденсату (при $t_k = 43,3^\circ\text{C}$):

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
Змн.	Арк.ш	№ докум.	Підпис	Дата		45

$$\lambda_{нк} = 0,635 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$$

$$\rho_{нк} = 992,2 \text{ кг}/\text{м}^3$$

$$\mu_{нк} = 0,653 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$r = 2392 \cdot 10^3 \text{ Дж}/\text{кг}$$

$$\alpha_1 = 0,72 \cdot \sqrt[4]{\frac{992,2^2 \cdot 0,635^3 \cdot 2392000}{0,653 \cdot 10^{-3} \cdot 0,012 \cdot 5}} = 8018,4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Визначити коефіцієнт тепловіддачі α_2 від холодоагенту R410a до стінки неможливо, оскільки дані по теплофізичним властивостям холодоагенту обмежені. В зв'язку із цим приймаємо коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_2 = 800 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ (для занурювального випарника) [8].

Для сталого процесу теплопередачі справедлива рівність (5.9):

$$q = \alpha_1 \cdot \Delta t_1 = \frac{1}{\delta/\lambda} \cdot \Delta t_{cm} = \alpha_2 \cdot \Delta t_2$$

де q – питоме теплове навантаження, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

Δt_1 – різниця між температурою конденсації пари і стінкою, $^\circ\text{C}$;

Δt_{cm} – перепад температур на стінці, $^\circ\text{C}$;

Δt_2 – різниця між температурою стінки зі сторони сировини та температурою кипіння сировини, $^\circ\text{C}$.

$$\Delta t_{cm} = \alpha_1 \cdot \Delta t_1 \cdot \left(\frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} \right) = 8018,4 \cdot 5 \cdot \left(\frac{0,0008}{394} \right) = 0,0814^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2 = \Delta t_{кор} - \Delta t_{cm} - \Delta t_1 = 30,8 - 0,0814 - 5 = 25,719^\circ\text{C}$$

Перевіряємо правильність першого наближення за рівнем питомих теплових навантажень:

$$q_1 = \alpha_1 \cdot \Delta t_1 = 8018,4 \cdot 5 = 40091,9 \text{ Вт}/\text{м}^2$$

$$q_2 = \alpha_2 \cdot \Delta t_2 = 800 \cdot 25,719 = 20574,9 \text{ Вт}/\text{м}^2$$

Оскільки $q_1 \neq q_2$, то приймаємо друге наближення $\Delta t_1 = 2,4^\circ\text{C}$. Тоді $t_{нл} = 45,8 - 2,4/2 = 44,6^\circ\text{C}$.

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
Змн.	Арк.ш	№ докум.	Підпис	Дата		46

Для плівки конденсату (при $t_k = 44,6^\circ\text{C}$):

$$\lambda_{нк} = 0,635 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$$

$$\rho_{нк} = 992,2 \text{ кг}/\text{м}^3$$

$$\mu_{нк} = 0,653 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$r = 2392 \cdot 10^3 \text{ Дж}/\text{кг}$$

$$\alpha_1 = 0,72 \cdot \sqrt[4]{\frac{992,2^2 \cdot 0,635^3 \cdot 2392000}{0,653 \cdot 10^{-3} \cdot 0,012 \cdot 2,4}} = 9633,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

$$\Delta t_{cm} = 9633,3 \cdot 2,4 \cdot \left(\frac{0,0008}{394} \right) = 0,047^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2 = \Delta t_{кор} - \Delta t_{cm} - \Delta t_1 = 30,8 - 0,047 - 2,4 = 28,353^\circ\text{C}$$

Перевіряємо правильність другого наближення за рівнем питомих теплових навантажень:

$$q_1 = \alpha_1 \cdot \Delta t_1 = 9633,3 \cdot 2,4 = 23120 \text{ Вт}/\text{м}^2$$

$$q_2 = \alpha_2 \cdot \Delta t_2 = 800 \cdot 28,353 = 22682,4 \text{ Вт}/\text{м}^2$$

Відносна похибка становить:

$$\left| \frac{23120 - 22682,4}{23120} \right| \cdot 100\% = 1,89\% < 5\%$$

Розраховуємо коефіцієнт теплопередачі:

$$k_s = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{9633,3} + \frac{0,0008}{394} + \frac{1}{800}} = 737,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Розраховуємо поверхню теплообміну:

$$F = \frac{Q_k}{k \cdot \Delta t_{кор}} = \frac{Q_{нагр} + Q_{вип}}{k \cdot \Delta t_{кор}} = \frac{218,9 + 3090,5}{737,6 \cdot 30,8} = 0,146 \text{ м}^2$$

Довжина труб випарника розраховується за формулою:

$$L = \frac{F}{\pi \cdot d} = \frac{0,146}{3,14 \cdot 0,011} = 4,21 \text{ м}$$

Довжина спіралі Архімеда однієї площини розраховується за формулою:

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
Змн.	Арк.ш	№ докум.	Підпис	Дата		47

$$l = \pi \cdot d_{cep} \cdot n = 3,14 \cdot 0,2 \cdot 3,5 = 2,2 \text{ м}$$

Визначаємо кількість витків спіралі:

$$n_c = \frac{4,21}{2,2} = 1,92 \approx 2$$

6.3. Розрахунок сепараційного простору.

Необхідний для достатньої сепарації крапель об'єм сепараційного простору залежить від потоку W вторинної пари із модуля ($W = 0,00129$ кг/с), її густини $\rho_{em.n.} = 0,068$ кг/м³ (при $P = 0,01$ МПа) [1] та максимально допустимого напруження парового простору $R_{II} = 0,61$ м³ пари/м³·с (за графіком при $P = 0,01$ МПа) [9, с. 731]:

$$V_{cep} = \frac{W}{\rho_{II} \cdot R_{II}} = \frac{0,00129}{0,068 \cdot 0,61} = 0,031 \text{ м}^3 \quad (5.18)$$

6.4. Розрахунок діаметрів штуцерів та трубопроводів для матеріальних потоків.

Завдання розрахунку полягає у визначенні швидкості руху v матеріальних потоків та порівнянні їх величин із рекомендованими. Діаметри трубопроводів приймають рівними діаметрам штуцерів.

$$v = \frac{S}{\rho \cdot F} \quad (5.19)$$

де S – масові витрати потоку, кг/с; ρ – густина потоку, кг/м³; F – перетин, через який проходить потік, м²:

$$F = \frac{\pi \cdot d_{um}^2}{4} \quad (5.20)$$

Тоді з (5.20):

$$d_{um} = \sqrt{\frac{4 \cdot F}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi \cdot \rho \cdot v}} \quad (5.21)$$

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
Змн.	Арк.ш	№ докум.	Підпис	Дата		48

Штуцер для подачі початкового розчину

Швидкість потоку малов'язкої рідини під час руху самопливом [10, с. 16]: $v = 0,5 \div 1,0 = 1,0$ м/с.

$$d_{um} = \sqrt{\frac{4 \cdot G_{II}}{\pi \cdot \rho_{II} \cdot v_{II}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0017}{\pi \cdot 1048 \cdot 1}} = 0,0014 \text{ м}$$

Штуцер для відведення готового продукту

Швидкість потоку в'язкої рідини під час руху самопливом [10, с. 16]: $v = 0,1 \div 0,5 = 0,5$ м/с.

$$d_{um} = \sqrt{\frac{4 \cdot G_K}{\pi \cdot \rho_K \cdot v_K}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0017}{\pi \cdot 1105 \cdot 0,5}} = 0,0019 \text{ м}$$

Штуцер для відведення вторинної пари

Швидкість потоку насиченої пари при тиску 0,005–0,02 МПа ($P = 0,01$ МПа) [10, с. 16]: $v = 60 \div 75 = 65$ м/с.

$$d_{um} = \sqrt{\frac{4 \cdot W}{\pi \cdot \rho_{em.n.} \cdot v_{em.n.}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00129}{\pi \cdot 0,0542 \cdot 65}} = 0,022 \text{ м}$$

6.5. Розрахунок на міцність.

Розрахунок плоских днищ апаратів.

Плоскі днища апаратів зустрічаються у вигляді круглих пластин постійної товщини з вільним (шарнірним) або жорстким закріпленням по зовнішньому контуру. При деформації пластинки товщиною h і діаметром $2R$ під дією деякого зовнішнього навантаження кільцевий переріз пластинки, розташований на поточному значенні радіусу від центру пластинки, повертається на кут φ до осі симетрії пластинки і прогинається на величину f . При цьому на кожен елемент пластинки діють: по торцевих гранях — рівномірно розподілені по всій довжині грані в окружному напрямку питомі радіальні моменти M_r , і сили, що перерізують Q по

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
Змн.	Арк.ш	№ докум.	Підпис	Дата		49

бокових гранях — рівномірно розподілені по всій довжині грані в радіальному напрямку питомі кільцеві моменти M_t .

Питомі сили, що перерізують, зазвичай знаходять з умови рівноваги центральної частини пластинки, вирізаної циліндричним перерізом, співвісним з віссю симетрії пластинки і розташованим від неї на поточному значенні радіуса.

Для пластинок, що знаходяться під рівномірно розподіленим по всій площі тиском P , питомі сили, що перерізують, рівні

$$Q = 0,5 \cdot P \cdot r \quad (5.22)$$

Це значення Q входить у розрахункові формули параметрів пластини.

Для пластин із зазначеним навантаженням розрахункові параметри визначають спочатку у центрі пластини (де вони найбільші), а потім на зовнішньому контурі.

У центрі пластини матимемо:

- при шарнірному закріпленні пластини за зовнішнім контуром:

$$\left. \begin{aligned} \varphi = 0; M_{r0} = M_{t0} = 6,25 \cdot 10^{-2} \cdot P \cdot R^2 \cdot (3 + \mu); \\ f_0 = 1,56 \cdot 10^{-2} \cdot P \cdot R^4 \cdot (5 + \mu) / [D \cdot (1 + \mu)] \end{aligned} \right\} \quad (5.23)$$

- при жорсткому закріпленні пластини за зовнішнім контуром:

$$\left. \begin{aligned} \varphi = 0; M_{r0} = M_{t0} = 6,25 \cdot 10^{-2} \cdot P \cdot R^2 \cdot (1 + \mu); \\ f_0 = 1,56 \cdot 10^{-2} \cdot P \cdot R^4 / D \end{aligned} \right\} \quad (5.24)$$

На контур пластини матимемо:

- при шарнірному її закріпленні по зовнішньому контуру:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_R = -12,5 \cdot 10^{-2} \cdot P \cdot R^3 / [D \cdot (1 + \mu)]; M_{rR} = 0; \\ M_{tR} = -12,5 \cdot 10^{-2} \cdot P \cdot R^2 \cdot (1 - \mu); f_R = 0 \end{aligned} \right\} \quad (5.25)$$

- при жорсткому її закріпленні по зовнішньому контуру:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_R = 0; M_{rR} = -12,5 \cdot 10^{-2} \cdot P \cdot R^2; \\ M_{tR} = -12,5 \cdot 10^{-2} \cdot P \cdot R^2 \cdot \mu; f_R = 0 \end{aligned} \right\} \quad (5.26)$$

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
Змн.	Арк.ш	№ докум.	Підпис	Дата		50

На мінус вказує на те, що нижня частина пластинки в цьому випадку відчуває стиснення.

Максимальний кут повороту нормального перерізу пластини, жорстко заробленою по зовнішньому контуру, дорівнюватиме:

$$\varphi_{\max} = 2,41 \cdot 10^{-2} \cdot P \cdot R^3 / D \quad (5.27)$$

У наведених формулах μ – коефіцієнт Пуассона; D – жорсткість пластини, Н*м:

$$D = (E \cdot h^3 / 12) / (1 - \mu^2) \quad (5.28)$$

де, E – модуль пружності першого роду матеріалу пластини, Па.

Напруги відповідно в радіальних та окружних перерізах на відстані $\pm h/2$ від серединної площини, де вони досягають своїх максимальних значень, визначаються за виразами:

$$\sigma_r = \pm 6M_r / h^2 \quad (5.29)$$

$$\sigma_t = \pm 6M_t / h^2 \quad (5.30)$$

Знак (+) вказує на розтяг нижніх шарів, знак (–) – на стиснення верхніх.

Рекомендується, щоб відношення прогину пластини до її товщини задовольняло умові: $f_0 / h < (0,2 - 0,5)$.

За ГОСТ 14249-89 товщину плоскої круглої пластинки (без отворів), виконаної з листового матеріалу і що знаходиться під дією рівномірно розподіленого по всій площі тиску, рекомендується розраховувати за формулою:

$$h = 2 \cdot R \cdot K \cdot \sqrt{P / [\sigma]} \quad (5.31)$$

де, K – коефіцієнт, що залежить від способу кріплення днища ($K = 0,38 - 0,50$);

$[\sigma]$ – допустима напруга при розтягуванні:

$$[\sigma] = \sigma / n_s \quad (5.32)$$

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
Змн.	Арк.ш	№ докум.	Підпис	Дата		51

де, σ – межа міцності,

n_g – коефіцієнт запасу міцності.

Розрахуємо кришку і днище випарного модуля діаметром 0,4 м.

Зовнішній тиск на поверхню – 90 кПа.

Матеріал – нержавіюча сталь 08Х18Н10, яка має наступні властивості:

Межа міцності $\sigma = 505$ МПа,

Модуль пружності $E = 2,0 \cdot 10^5$ МПа,

Коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,29$

Коефіцієнт запасу міцності $n_g = 3,5$.

Допустима напруга:

$$[\sigma] = 505 \cdot 10^6 / 3,5 = 144,3 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

З рівняння (5.32) визначимо товщину стінки:

$$h = 2 \cdot 0,2 \cdot 0,45 \cdot \sqrt{\frac{90000}{144,3 \cdot 10^6}} = 0,0045 \text{ м}$$

Приймаємо товщину 0,005 м.

Максимальні моменти і напруга будуть в центрі стінки. За формулами (5.23), (5.29) та (5.30) вони будуть дорівнювати:

$$M_{r0} = M_{t0} = 6,25 \cdot 10^{-2} \cdot 90000 \cdot 0,2^2 \cdot (3 + 0,29) = 740,25 \text{ Н}$$

$$\sigma_r = 6 \cdot 740,25 / 0,005^2 = 177,7 \cdot 10^6 \text{ Па} > 144,3 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

Оскільки умова $\sigma_r < [\sigma]$ не виконується, то товщину стінки необхідно збільшити.

Приймаємо товщину 0,007 м.

$$\sigma_r = 6 \cdot 740,25 / 0,007^2 = 90,6 \cdot 10^6 \text{ Па} < 144,3 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

Умова $\sigma_r < [\sigma]$ виконується, тому товщина стінки є прийнятною.

Кришка і днище конденсатора має такий самий діаметр 0,4 м, тому аналогічно з випарною камерою обираємо товщину 0,007 м.

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
Змн.	Арк.ш	№ докум.	Підпис	Дата		52

Розрахунок циліндричних апаратів та їх елементів, що знаходяться під дією зовнішнього надлишкового тиску.

Тонкостінний апарат, що працює під зовнішнім надлишковим тиском, знаходиться в менш сприятливих умовах міцності в порівнянні з апаратом, що працює під внутрішнім надлишковим тиском.

Якщо внутрішній надлишковий тиск сприяє утворенню та підтримці круглої форми апарату, то зовнішній надлишковий тиск, навпаки, сприяє порушенню круглої форми апарату, збільшуючи вже наявні відхилення від неї і викликаючи при цьому додаткові напруги вигину. Останні можуть призвести апарат до руйнування (втрати стійкості).

Якщо при зовнішньому надлишковому тиску напруга стиснення в стінці циліндричного апарата досягне межі плинності, міцність апарату порушиться. Цей випадок уражає циліндричних оболонки, товщина стінки яких становить 0,046 його зовнішнього діаметра. Розрахунок на міцність таких апаратів виробляють так само, як і тих, які знаходяться під дією внутрішнього надлишкового тиску, замінюючи лише у формулі для визначення товщини стінки апарату допустиму напругу при розтягуванні напругою при стисканні, тобто

$$\delta_p > P \cdot D_B / (2 \cdot \beta \cdot [\sigma_{cm}]) \quad (5.33)$$

де P – робочий тиск, що допускається;

D_B – внутрішній діаметр апарату;

β – коефіцієнт міцності зварних швів;

$[\sigma_{cm}]$ – допустима напруга при стисканні.

Допустима напруга при стисканні можна приймати рівним однієї четвертої частини межі плинності матеріалу апарату при даній температурі.

Зовнішній тиск, у якому втрачається стійкість оболонки, називають критичним. Воно залежить від геометричної форми, розмірів та від фізичних властивостей матеріалу оболонки.

					<i>КРБ.ПОтаЕМ.1.738-03.4.4</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.ш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		53

Оболонки поділяються на довгі та короткі. Як критерій для порівняння служить критична довжина оболонки, що розраховується за формулою:

$$L_{кр} = 4,644 \cdot r \cdot \sqrt{(r/\delta) \cdot (1 - \mu^2)} \quad (5.34)$$

де r – радіус оболонки;

δ – товщина стінки оболонки;

μ – коефіцієнт Пуассона матеріалу оболонки.

Довгі оболонки розраховуються однозначно шляхом визначення критичного тиску, критичної напруги і зіставлення останньої межі плинності матеріалу оболонки.

Якщо коротка оболонка і на величину критичного тиску впливають умови на краях, критичний тиск визначають за наближеними формулами:

– при дії тиску тільки на бічну поверхню оболонки:

$$P_{кр} = \frac{E}{(n^2 - 1) \cdot N^2} \cdot \frac{\delta}{r} + \frac{E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{\delta}{r}\right)^3 \cdot \left[n^2 - 1 + \frac{2 \cdot n^2 - 1 - \mu}{N} \right] \quad (5.35)$$

– при дії тиску на всю поверхню оболонки (всебічний тиск):

$$P_{кр} = E \cdot \frac{\delta}{r} + \frac{1}{n^2 + 0,5 \cdot (\pi \cdot r/L)^2} \cdot \left[\frac{1}{N^2} + \frac{N^2}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{\delta}{r}\right)^2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot r}{L}\right)^4 \right] \quad (5.36)$$

де, L – фактична довжина ємності;

n – число хвиль.

$$N = 1 + \frac{n \cdot L}{\pi \cdot r} \quad (5.37)$$

Як видно з цих формул, у пружній стадії критичний тиск залежить не від міцності матеріалу, а від його модуля пружності та коефіцієнта Пуассона. Зазвичай, починаючи з $n = 2$, критичний тиск падає, досягаючи при деякому значенні числа хвиль мінімальної величини, а потім знову повільно збільшується.

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.ш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		54

Для полегшення розрахунків за формулами (5.35) та (5.36) число хвиль залежно від конструктивних розмірів циліндричної оболонки можна визначити за таблицею 1.1.

Робочий тиск приймають у кілька разів менше критичного:

$$P = P_{кр} / m \quad (5.38)$$

де, m – коефіцієнт запасу стійкості.

Таблиця 5.1.

Число хвиль для циліндричних сталевих та алюмінієвих обичайок, які знаходяться бік боковим тиском або тиском з усіх сторін

Значення відношення δ/r	Значення відношення L/r				
	2	3	4	5	6
0,005	7	6	5	5	4
0,010	6	5	4	4	4
0,015	5	4	4	4	3
0,020	5	4	4	4	3
0,025	5	4	3	3	3
0,030	4	4	3	3	3
0,040	4	3	3	3	3

Для точно виготовлених вертикальних циліндричних оболонок запас стійкості приймають рівним 4, для горизонтальних – 5. Для циліндричних оболонок звичайної точності, виготовлених з вуглецевої сталі, запас стійкості дорівнює 6–9.

Якщо виявляється, що розрахунковий тиск менший за робочий, то товщина стінки циліндра повинна бути збільшена, або повинні бути встановлені кільця жорсткості.

Розрахунок реактора випарного апарату.

Реактор являє собою циліндр з плоскими днищами, діаметром 0,4 м і висотою 0,5 м.

Зовнішній тиск на поверхню – 90 кПа.

Матеріал – нержавіюча сталь 08X18H10, яка має наступні властивості:

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
Змн.	Арк.ш	№ докум.	Підпис	Дата		55

Межа міцності $\sigma = 505$ МПа,

Модуль пружності $E = 2,0 \cdot 10^5$ МПа,

Коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,29$

Коефіцієнт запасу міцності $n_s = 3,5$.

З довідників вибираємо коефіцієнт міцності зварних швів $\beta=0,8$ і коефіцієнт запасу міцності для зварних ємностей, що не нагріваються $n=3,75$.

Тоді допустима напруга при стисканні буде:

$$[\sigma_{cm}] = \sigma/n = 505 \cdot 10^6 / 3,5 = 144,3 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

Тоді з рівняння (5.18) товщина стінки буде дорівнювати:

$$\delta_p > 90000 \cdot 0,4 / (2 \cdot 0,8 \cdot 144,3 \cdot 10^6) = 0,0016 \text{ м}$$

Приймаємо товщину 0,002 м.

Визначаємо критичну довжину оболонки з (5.34):

$$L_{кр} = 4,644 \cdot 0,2 \cdot \sqrt{\frac{0,2}{0,002} \cdot (1 - 0,29)} = 7,83 \text{ м}$$

За результатом розрахунку бачимо, що оболонка коротка.

Визначаємо:

$$L/r = 0,9/0,2 = 4,5 \approx 5$$

$$\delta/r = 0,002/0,2 = 0,01$$

З таблиці 5.1 обираємо число хвиль $n = 4$.

За формулою (5.35) при $N = 1 + \frac{n \cdot L}{\pi \cdot r} = 1 + \frac{4 \cdot 0,9}{3,14 \cdot 0,2} = 5,73$

$$P_{кр} = \frac{2,1 \cdot 10^{11}}{(4^2 - 1) \cdot 5,73^2} \cdot \frac{0,002}{0,2} + \frac{2,1 \cdot 10^{11}}{12 \cdot (1 - 0,29^2)} \cdot \left(\frac{0,002}{0,2}\right)^3 \times \\ \times \left[4^2 - 1 + \frac{2 \cdot 4^2 - 1 - 0,29}{5,73} \right] = 4,6 \text{ МПа}$$

При запасі стійкості 6:

$$P = P_{кр} / 6 = 4,6 \cdot 10^6 / 6 = 767 \text{ кПа} > 90 \text{ кПа}$$

Значить товщина стінки 0,002 м відповідає умовам міцності.

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
Змн.	Арк.ш	№ докум.	Підпис	Дата		56

Оскільки конденсатор являє собою циліндр із нержавіючої сталі 08X18Н10 з аналогічними діаметром 0,4 м і висотою 0,5 м, то товщину стінки також візьмемо 0,002 м.

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
<i>Змн.</i>	<i>Арк.ш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		57

ІНСТРУКЦІЯ З ОХОРОНИ ПРАЦІ ПРИ РОБОТІ З ВИПАРНИМ АПАРАТОМ

Інструкція з охорони праці при роботі з випарним апаратом включає вимоги безпеки, що стосуються роботи з цим обладнанням, щоб уникнути травм, нещасних випадків та пожеж. Інструкція охоплює всі етапи роботи, починаючи з підготовки обладнання до його відключення та очищення. Вона також визначає порядок дій у аварійних ситуаціях.

Основні моменти інструкції з охорони праці під час роботи з випарним апаратом:

1. Підготовка до роботи:

Перевірка справності обладнання: переконайтеся, що всі частини апарата перебувають у хорошому стані, без пошкоджень та відсутніх елементів.

Підготовка робочого місця: приберіть зайві предмети, щоб не заважати роботі та не створювати небезпечних зон.

Ознайомлення з правилами: прочитайте інструкцію з експлуатації та правила безпеки, які мають бути надані разом із апаратом.

Приготування необхідних матеріалів та інструментів.

Використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) відповідно до інструкції та вимог безпеки.

2. Вимоги безпеки під час роботи:

Не залишайте прилад без нагляду під час роботи.

Не підходьте близько до гарячих поверхонь та випарів.

Не використовуйте апарат за призначенням.

Не перевантажуйте апарат більше, ніж рекомендовано.

Не допускайте потрапляння сторонніх предметів до апарату.

Не модифікуйте апарат без дозволу виробника.

					<i>КРБ.ПотаЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
						58
<i>Змн.</i>	<i>Арк.ш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Не відключайте та не запускайте апарат самостійно, якщо не впевнені у правильності дій.

У разі виявлення неполадок припиніть роботу та повідомте про них керівника.

3. Дії в аварійній ситуації:

Під час займання використовуйте вогнегасники, передбачені для цього пожежі.

При травмах надайте першу допомогу та повідомте про нещасний випадок у відповідні органи.

У разі виявлення витoku або збою в роботі апарата негайно відключіть його та припиніть роботу.

Повідомте про подію керівнику та працівникам, які можуть бути у небезпеці.

4. Очищення та обслуговування:

Очистіть апарат після завершення роботи відповідно до інструкції.

Не використовуйте для очищення агресивні засоби для чищення, які можуть пошкодити апарат.

Повідомте про необхідність ремонту апарата у разі виявлення дефектів.

Не намагайтеся ремонтувати апарат самостійно, якщо ви не маєте необхідних знань та навичок.

Увага: Завжди дотримуйтесь правил безпеки при роботі з випарним приладом, щоб уникнути травм та нещасних випадків. У разі виникнення запитань чи сумнівів зверніться до керівника чи фахівця.

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
<i>Змн.</i>	<i>Арк.ш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		59

ВИСНОВКИ

1. Розроблено конструкцію вакуум-випарної установки з тепловим насосом для концентрування яблучного соку продуктивністю 5 кг/год.
2. Проведені технологічні та силові розрахунки вказують на надійність та працездатність представленої конструкції.

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
						60
<i>Змн.</i>	<i>Арк.ш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Електронний ресурс: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/juice-concentrates-market> (Дата звернення: 13.02.2025 р.).
2. Патент на корисну модель №49675 «Пристрій для концентрування рідких розчинів» <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/260234/>
3. Патент на винахід №54216 «Установка концентрування харчових продуктів і біологічних препаратів»
<https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/364511/>
4. Патент на винахід №74296 «Установка концентрування харчових продуктів і біологічних препаратів»
<https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/387004/>
5. Патент на винахід WO2013157907 «Однокорпусный вакуум-выпарный аппарат»
<https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2013157907>
6. Електронний ресурс: <https://intercool.com.ua/kompressory/kompressory-dlja-kondicionerov/kompressor-kondicionera-gmcc-asm125v1vft.html> (Дата звернення: 13.02.2025 р.).
7. Електронний ресурс:
https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fbteg/chepurnij_tplomasoob/d.htm (Дата звернення: 13.02.2025 р.).
8. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учеб. пособие / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков ; под ред. П. Г. Романкова. — Изд. 10-е, перераб. и доп. — Л.: Химия, 1987. — 576 с.
9. Холодильные установки: учебник/ И. Г. Чумак, В. П. Чепуренко, С. Ю. Ларьяновский, Г. К. Мнацаканов ; под ред. И.Г. Чумака. — Изд. 3-е, перераб. и доп. — М. : Агропромиздат, 1991. — 495 с.
- 10.Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: Учебник: В 2 кн./В.Г. Айнштейн, М.К. Захаров, Г.А. Носов и др.; под ред. В.Г.

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
Змн.	Арк.ш	№ докум.	Підпис	Дата		61

Айнштейна. М.: Университетская книга; Логос; Физматкнига, 2006. Кн. 1.
912 с.

11. Дытнерский Ю.И. Основные процессы и аппараты химической
технологии. Пособие по проектированию. – М.: Химия, 1991. – 493 с.

					<i>КРБ.ПотдЕМ.1.738-03.4.4</i>	Арк.
						62
<i>Змн.</i>	<i>Арк.ш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		