

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Криворізький національний університет
Навчально-науковий інститут економіки і торгівлі
імені Михайла Туган-Барановського
Кафедра загальноінженерних дисциплін та обладнання

ДОПУСКАЮ ДО ЗАХИСТУ
Гарант освітньої програми
«Обладнання переробної і харчової
промисловості»
Хорольський В.П.
« ____ » _____ 2025 року

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**
на здобуття ступеня вищої освіти «Магістр»
зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
за освітньою програмою «Обладнання переробної і харчової промисловості»

на тему: **«ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОЧИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛАДНАННЯ З ВИРОБНИЦТВА
ХАРЧОКОНЦЕНТРАТІВ»**

Виконав:
здобувач вищої освіти _____ Ревенко Андрій Володимирович _____
(прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Керівник: _____ професор, д.т.н., професор, Хорольський В.П. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у кваліфікаційній
роботі немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Кривий Ріг
2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Криворізький національний університет
Навчально-науковий інститут економіки і торгівлі
імені Михайла Туган-Барановського
Кафедра загальноінженерних дисциплін та обладнання

Форма здобуття вищої освіти денна
Ступінь магістр
Галузь знань Механічна інженерія
Освітня програма Обладнання переробної і харчової промисловості

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Гарант освітньої програми «Обладнання
переробної і харчової промисловості»
Хорольський В.П.
« » 2025 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Ревенку Андрію Володимировичу
(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Оптимізація робочих енергетичних характеристик обладнання з виробництва харчоконцентратів»
Керівник роботи професор, д.т.н., професор, Хорольський В.П.
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Затверджено: наказом ректора Криворізького національного університету від «30» травня 2025 р. № 32-с.

2. Строк подання здобувачем ВО роботи «22» листопада 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи:

1. Технічна документація до устаткування.
2. Монографії, наукові статті, автореферати дисертацій, тези доповідей на наукові конференції.
3. Навчальна і методична література, інформація мережі Інтернет.

4. Зміст пояснювальної записки:

1. Вступ.
 2. Аналіз обладнання для отримання харчоконцентратів.
 3. Оптимізація робочих енергетичних характеристик обладнання з виробництва харчоконцентратів.
 4. Аналіз результатів досліджень.
 5. Висновки.
 6. Список використаних джерел.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

Обладнання для отримання харчового концентрату.
Енергетично оптимізована концентрація фруктових соків.
Моделювання багатокорпусного випарника для концентрування соку.
Автоматизований контроль процесу концентрації фруктового соку.

6. Дата видачі завдання «10» червня 2025 р.

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи
1	Вступ	4.09-20.09.2025 р.
2	Аналіз обладнання для отримання харчо концентратів	21.09-18.10.2025 р.
3	Оптимізація робочих енергетичних характеристик обладнання з виробництва харчоконцентратів	19.10-08.11.2025 р.
4	Аналіз результатів досліджень	09.11-15.11.2025 р.
5	Висновки по роботі	16.11-22.11.2025 р.
6	Оформлення роботи і подання до захисту	23.11-26.11.2025 р.

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Ревенко А.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Хорольський В.П.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Обсяг і структура магістерської роботи. Повний обсяг магістерської роботи – 51 сторінка, в тому числі основного тексту – 47 сторінок. Робота містить: 1 таблицю, 11 рисунків. Список використаних джерел складається з 26 найменувань.

Об'єкт роботи – багатокорпусна випарна установка.

Предмет роботи – процес концентрування фруктового соку.

Мета роботи – оптимізація робочих енергетичних характеристик обладнання з виробництва харчоконцентратів.

У роботі зазначено, що концентрати – це речовини з яких були видалені надлишки води або інші розріджувачі. В результаті цього процесу виходить більш щільний і сильнодіючий продукт. Концентрати можуть бути рідкими, твердими або напівтвердими залежно від їх застосування та способу виробництва. Наприклад, концентрат апельсинового соку є рідкою формою, тоді як сухе молоко є твердим концентратом.

На основі аналізу, було зазначено, що під час переробки фруктів у фруктовий концентрат випарювання є етапом, який потребує найвищих енергетичних потреб. Тому вибір випарника є ключовим у процесі енергозбереження усєї системи.

Задля оптимізації робочих енергетичних характеристик обладнання з виробництва харчоконцентратів запропоновано включення енергоефективних компонентів, таких як багатоефективні системи та теплова рекомпресія пари, щоб мінімізувати споживання енергії під час роботи. Парову економічність випарника з кількома ефектами можна підвищити, повторно використовуючи пар з одного ефекту, підключаючи його до парової камери іншого ефекту. В свою чергу термічна рекомпресія пари може бути застосована до системи випарника для покращення економії пари.

Вважається за необхідне при оптимізації робочих енергетичних характеристик випарника враховувати такі основні параметри, як тиск, температура та швидкість потоку. На основі розрахунків здійснено моделювання багатоефектного випарника в програмному забезпеченні SolidWorks. Результати моделювання свідчать, що повторне використання енергії підвищує коефіцієнт корисної дії та, відповідно, енергоефективність усєї системи. Інтерпретовано результати дослідження.

Запропоновано контроль процесу концентрації фруктового соку на основі системи управління, яка заснована на використанні датчиків контролю температури, тиску, регулювання швидкості потоку та рівня рідини. Включення контролю основних параметрів багатосекційного випарювання забезпечує швидкі та плавні зміни під час коливань тих чи інших параметрів у процесі концентрування шляхом ефективної координації різних робочих параметрів для забезпечення мінімального порушення системи. Ефективність керування не погіршуватиметься з часом завдяки постійному моніторингу.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: харчоконцентрати, випарник, випарювання, концентрування соку, енергетичні характеристики, моделювання, енергоефективність, пара.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ХАРЧОКОНЦЕНТРАТІВ	7
1.1 Різновиди харчових концентратів	7
1.2 Методи отримання харчового концентрату	9
1.3 Обладнання для отримання харчового концентрату	12
РОЗДІЛ 2. ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОЧИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛАДНАННЯ З ВИРОБНИЦТВА ХАРЧОКОНЦЕНТРАТІВ	23
2.1 Енергетично оптимізована концентрація фруктових соків	23
2.2 Моделювання конструкції багатоефектного випарника для виробництва концентрованого соку	28
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	38
3.1 Контроль основних параметрів у процесі отримання концентрованого соку	38
ВИСНОВКИ	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	46
ДОДАТКИ	48

ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.		Ревенко		
Перевір.		Хорольський		
Н. Контр.		Омельченко		
Затверд.		Хорольський		
Оптимізація робочих енергетичних характеристик обладнання з виробництва харчоконцентратів			Літ.	Арк.
			5	1
ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО				

ВСТУП

Актуальність роботи. У роботі зазначено, що концентрати – це речовини з яких були видалені надлишки води або інші розріджувачі. В результаті цього процесу виходить більш щільний і сильнодіючий продукт. Концентрати можуть бути рідкими, твердими або напівтвердими залежно від їх застосування та способу виробництва. Наприклад, концентрат апельсинового соку є рідкою формою, тоді як сухе молоко є твердим концентратом. Процес концентрації дозволяє виробникам транспортувати та зберігати продукцію більш ефективно, тоді як споживачі отримують вигоду від більш тривалого терміну зберігання та стабільної якості.

Мета та задачі дослідження. Метою магістерської роботи є оптимізація робочих енергетичних характеристик обладнання з виробництва харчоконцентратів

Практична та наукова новизна. На основі аналізу, було зазначено, що під час переробки фруктів у фруктовий концентрат випарювання є етапом, який потребує найвищих енергетичних потреб. Тому вибір випарника є ключовим у процесі енергозбереження усієї системи.

Задля оптимізації робочих енергетичних характеристик обладнання з виробництва харчоконцентратів запропоновано включення енергоефективних компонентів, таких як багатоефективні системи та теплова рекомпресія пари, щоб мінімізувати споживання енергії під час роботи. Парову економічність випарника з кількома ефектами можна підвищити, повторно використовуючи пар з одного ефекту, підключаючи його до парової камери іншого ефекту. В свою чергу термічна рекомпресія пари може бути застосована до системи випарника для покращення економії пари.

Вважається за необхідне при оптимізації робочих енергетичних характеристик випарника враховувати такі основні параметри, як тиск, температура та швидкість потоку. На основі розрахунків здійснено моделювання багатоефектного випарника в програмному забезпеченні SolidWorks. Результати моделювання свідчать, що повторне використання енергії підвищує коефіцієнт корисної дії та, відповідно, енергоефективність усієї системи. Інтерпретовано результати дослідження.

Запропоновано контроль процесу концентрації фруктового соку на основі системи управління, яка заснована на використанні датчиків контролю температури, тиску, регулювання швидкості потоку та рівня рідини. Включення контролю основних параметрів багатосекційного випарювання забезпечує швидкі та плавні зміни під час коливань тих чи інших параметрів у процесі концентрування шляхом ефективної координації різних робочих параметрів для забезпечення мінімального порушення системи. Ефективність керування не погіршуватиметься з часом завдяки постійному моніторингу.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>	<i>Ревенко</i>				Оптимізація робочих енергетичних характеристик обладнання з виробництва харчоконцентратів	<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркуші</i>
<i>Перевір.</i>	<i>Хорольський</i>						6	1
<i>Н. Контр.</i>	<i>Омельченко</i>					ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО		
<i>Затверд.</i>	<i>Хорольський</i>							

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ХАРЧОКОНЦЕНТРАТІВ

1.1 Різновиди харчових концентратів

Концентрати – це речовини з яких були видалені надлишки води або інші розріджувачі. В результаті цього процесу виходить більш щільний і сильнодіючий продукт. Концентрати можуть бути рідкими, твердими або напівтвердими залежно від їх застосування та способу виробництва. Наприклад, концентрат апельсинового соку є рідкою формою, тоді як сухе молоко є твердим концентратом. Процес концентрації дозволяє виробникам транспортувати та зберігати продукцію більш ефективно, тоді як споживачі отримують вигоду від більш тривалого терміну зберігання та стабільної якості.

Харчові концентрати – це широке визначення, що охоплює продукцію, що належить до різних галузей харчової промисловості. Метою виробництва харчових концентратів є збереження продуктів харчування, зменшення їх обсягу при одночасному підвищенні концентрації поживних речовин і полегшення використання продукту в приготуванні їжі. До харчових концентратів належать концентрати для вечері (включаючи страви швидкого приготування та сублімовані), концентрати десертів, приправи, кава, харчові та дієтичні харчові продукти, гідролізати та білкові препарати, а також фруктові і овочеві концентрати та сушки, концентровані або сухомолочні продукти та інші продукти [4-7]. Харчові концентрати прості в приготуванні і багаті поживними речовинами, такими як вітаміни, мінеральні солі і біоактивні речовини. Наприклад, свіжий помідор містить 237 мг калію і 15 мг вітаміну С на 100 г сировини, в той час як томатний концентрат має цілих 1070 мг калію і 40 мг вітаміну С на 100 г продукту. Використання концентратів при приготуванні страв дозволяє готувати їх більш швидко, без втрати харчової цінності або органолептичних показників – без погіршення смаку і аромату по відношенню до свіжої сировини.

Харчові концентрати є одними з найпоширеніших типів концентратів з якими стикаються щодня. Вони забезпечують сильний смак, поживні речовини або функціональні переваги в компактній формі. Їх популярність пов'язана з їхньою здатністю посилювати смакові якості, продовжувати термін зберігання та знижувати витрати на транспортування. Від відділу заморожених соків у супермаркетах до протеїнових порошків у спортзалах – харчові концентрати є скрізь. Розглянемо види харчових концентратів [2, 8]:

– концентрати фруктових соків виробляється шляхом випаровування води з фруктових соків, зазвичай використовується в напоях, десертах і соусах. Великий відсоток води в свіжому фруктовому соку екстрагується для створення

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>	<i>Ревенко</i>				Оптимізація робочих енергетичних характеристик обладнання з виробництва харчоконцентратів	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>	<i>Хорольський</i>						7	16
<i>Н. Контр.</i>	<i>Омельченко</i>					ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО		
<i>Затверд.</i>	<i>Хорольський</i>							

концентрованих фруктових рідин. Такі методи, як зворотний осмос і випаровування, досягають такої концентрації. Завдяки своєму потужному фруктовому смаку концентровані соки підходять для тривалого зберігання та часто використовуються в кулінарії та приготуванні напоїв. Вони пропонують більш насичений фруктовий смак і є корисним варіантом для приготування напоїв і рецептів їжі, які вимагають концентрованого фруктового екстракту. Наприклад, концентрат яблучного соку є ключовим інгредієнтом багатьох безалкогольних напоїв;

– рослинні концентрати, а саме концентрована томатна паста, морквяне пюре та порошки шпинату використовуються в супах, готових стравах і закусках. Вони також необхідні у виробництві дитячого харчування через свою щільність поживних речовин;

– смакові концентрати – екстраговані есенції, такі як ванільна, мигдальна та цитрусова олії, які підсилюють смак у хлібобулочних та кондитерських виробах. Широкий спектр харчових продуктів і напоїв може мати покращений смак за допомогою смакових концентратів. Зазвичай ці концентрації досягаються шляхом екстракції ароматизаторів з природних джерел або синтезу ароматизаторів відповідно до конкретних смаків. Вони широко використовуються в харчовій промисловості для створення стійких смакових профілів. Одна крапля ванільного концентрату може замінити кілька чайних ложок ванільного екстракту;

– білкові концентрати отримують з білків сироватки, сої або гороху. Вони використовуються в харчових добавках і спортивних напоях. Особливою популярністю вони користуються серед спортсменів і тих хто дотримується рослинної дієти;

– концентрати підсолоджувачів – це сиропи, такі як кленовий і медовий концентрати, які забезпечують природну солодкість з меншим об'ємом. Їх часто використовують в енергетичних батончиках і напоях, які орієнтовані на здорове харчування.

Переваги харчових концентратів [2]:

– покращена інтенсивність смаку при менших кількостях, що дозволяє шеф-кухарям і виробникам точно контролювати смак;

– зниження витрат на зберігання та доставку завдяки нижчому вмісту води, що робить глобальну торгівлю більш ефективною;

– подовжений термін зберігання в порівнянні зі свіжими продуктами, зменшення харчових відходів у домогосподарствах і ланцюжках поставок;

– універсальність у виробництві продуктів харчування та розробці продуктів, що дозволяє впроваджувати інновації в готові до вживання страви, закуски та напої.

Наприклад, пекарня, яка використовує концентроване фруктове пюре, може досягти стабільного смаку цілий рік, незалежно від сезонної наявності фруктів.

Фруктовий концентрат – це висококонцентрована форма соку, яка отримана шляхом видалення більшої частини води з початкового соку. Цей процес передбачає вилучення рідкої есенції та смаку з фруктів або овочів, залишаючи міцний та густий сироп. Фруктові та овочеві концентрати є

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		8

важливими інгредієнтами в харчовій промисловості завдяки своїй універсальності та здатності додавати смак, колір і поживні речовини до різноманітних продуктів. Від соків і напоїв до оброблених харчових продуктів і добавок, концентрати є практичним і ефективним рішенням. Фруктово-овочеві концентрати – це продукти, створені шляхом часткового видалення води з соків, витягнутих зі свіжих фруктів або овочів. Цей процес концентрує необхідні сполуки, такі як цукор, вітаміни, мінерали та антиоксиданти, зберігаючи при цьому їх органолептичні властивості (смак, колір та аромат). Концентрати бувають різних форматів, таких як рідини, пюре або порошки і служать основою для багатьох продуктів у харчовій промисловості.

1.2 Методи отримання харчового концентрату

Концентровані соки виготовляються шляхом видалення води зі свіжого фруктового або овочевого соку в результаті чого виходить густий сироп з 65%-70% розчинних сухих речовин. Ця висока концентрація цукрів і поживних речовин робить концентрати соків популярними в харчовій промисловості та виробництві напоїв. Процес починається зі свіжовичавленого фруктового соку, який потім піддається різним методам для видалення води. Мета полягає в тому, щоб створити продукт, який збереже оригінальний смак і поживну цінність соку, а також продовжить термін його зберігання [4-7]. Концентрат фруктового соку відіграє важливу роль у виготовленні різних сокових продуктів. Природні соки одноразової концентрації доступні у таких великих об'ємах, що їхнє пакування, зберігання або транспортування економічно практично неможливе. Щоб подолати ці труднощі та забезпечити постачання поживно багатих сокових продуктів у всьому світі, обсяг соку часто зменшують шляхом концентрування. Велика частина природного вмісту води в фруктовому соку фізично видаляється під час концентрування. Мета концентрування соку:

- зменшення витрат на пакування, транспортування та зберігання за рахунок зменшення маси та об'єму продукту;
- зменшення водної активності фруктових соків, що дозволяє отримати стабільний концентрований сік. При високих концентраціях розчинених речовин ріст мікроорганізмів та активність ферментів ефективно пригнічується. Тому концентровані соки мають меншу ймовірність мікробного псування, ніж соки натуральної концентрації. Як важлива сировина він має величезний вплив на якість соку.

Концентрат фруктового соку виготовляється шляхом видалення води зі свіжовичавленого фруктового та овочевого соку. Зазвичай він використовується в якості базового запасу для різних харчових продуктів. При меншому об'ємі він містить розчинні сухі речовини 65%-70%. Процес створення концентрату фруктового соку є ефективним способом зниження витрат на пакування та транспортування [3]. І це гарантує стабільну якість кінцевої продукції. Щоб вибрати відповідну технологію концентрації, якість має бути на першому місці. Концентрат фруктового соку повинен зберігати такий же колір, смак і поживність, як оригінальний фруктовий сік після

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ	<i>Арк.</i>
						9
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

розведення. У зв'язку з цим процес концентрації повинен проводитися при низькій температурі.

Тверда частина більшості рідких продуктів харчування становить 8-16% і не є економічно вигідною для пакування та тривалого зберігання. Тому бажане видалення вологи разом із збільшенням твердої частини рідких продуктів харчування. Процес зменшення ваги та об'єму рідких продуктів шляхом видалення води називається концентрацією, що покращує стабільність та обробку продукту. Концентрація фруктового соку включає виробництво фруктового соку, фруктового напою та порошку фруктового соку. Випарна вакуумна концентрація, мембранна концентрація та заморожувальна концентрація – це деякі з методів, що здебільшого використовуються при концентрації харчових продуктів. Ці методи не тільки забезпечують стабільність проти мікробів, але й економічно вигідні з точки зору пакування, транспортування та розповсюдження.

1. Метод вакуумного концентрату. Випаровування – це метод розділення, що відбувається під дією тепла, який дозволяє отримати більш концентрований розчин шляхом видалення частини розчинника з розчину через випаровування. Цим методом можна видалити майже 99% води (розчинника), що робить випаровування домінуючим промисловим процесом концентрування. Передача тепла від нагрівального середовища до розчину відбувається непрямо через металеву стінку. Найбільш фундаментальний спосіб зниження температури кипіння рідини – це робота під зниженим тиском або у вакуумі. Тиск знижується шляхом конденсації парів за допомогою теплонасосів, вакуумних насосів, парових еджекторів тощо.

Вакуумна концентрація вимагає нагрівання фруктового соку під низьким тиском, щоб знизити температуру кипіння та дозволити вмісту води швидко випаровуватися. Обладнання для вакуумного концентрування є найважливішим і широко поширеним пристроєм у процесі концентрату фруктового соку. Його можна класифікувати як концентратний пристрій для отримання концентрату. Виходячи з конструкції нагрівача, він включає трубчастий випарник з центральною циркуляцією, випарник зміювика, випарник з висхідною плівкою, випарник падаючої плівки, випарник пластинчастого типу, випарник скребка та випарник відцентрової плівки [1, 3]. Оскільки концентрат фруктового соку сприяє зберіганню та транспортуванню він користується зростаючим попитом у промисловості переробки соків. Метод вакуумного концентрату може скоротити час процесу і водночас зберегти якість фруктового соку порівняно з високою температурою та нормальною температурною концентрацією. Загальна температура концентрації вакууму становить 35°C, ступінь вакууму – 94,7 кПа. Щоб запобігти виробленню мікробів і активності ферментів при такій сприятливій умові потрібно заздалегідь його пастеризувати.

2. Концентрація заморожуванням. Нетепловий процес, який використовується для концентрації фруктового соку, називається заморожувальною концентрацією або криоконцентрацією. Процес включає заморожування сирого соку та подальше відділення чистих кристалів льоду від концентрованої рідини. Смак і аромат залишаються незмінними, оскільки

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

теплова енергія не використовується. Процес складається з двох основних етапів – кристалізації води у лід (заморожування) та відділення. Перший етап пов'язаний з ростом кристалів. Другий етап включає відділення заморожених і незаморожених компонентів, а також відновлення концентрату, який прилипає до поверхні кристалів льоду. Концентрація заморожування означає зниження температури фруктового соку до точки льоду. Перш ніж концентрація фруктового соку досягне евтектичної точки, вміст води заморожується і відокремлюється [1, 3]. Концентрація розчину обмежена певним діапазоном. Коли вміст розчиненої речовини перевищує евтектичну концентрацію вони відокремлюються в терміні кристала від пересиченого розчину. З іншого боку, якщо вміст розчиненої речовини нижчий за евтектичну концентрацію, вміст води відокремлюється в терміні кристала льоду. При поділі розчинника частка розчиненої речовини стає набагато вище. Метод особливо підходить для термічно чутливих продуктів, що дозволяє уникнути випаровування ароматичних сполук, які викликані нагріванням. Стосовно сировини з леткими речовинами то концентрація заморожування перевершує, ніж вакуумна концентрація і мембранний концентрат. Однак концентрація заморожування має наступні недоліки:

- по-перше, оброблена сировина повинна пройти холодну або термічну обробку для консервації;
- по-друге, ефект заморожування концентрату визначається не тільки концентрацією розчину, але і ступенем поділу між кристалічним та концентрованим розчином. Якщо розчин має високу в'язкість то важко відокремити розчинену речовину від розчинника;
- по-третє, при концентрації заморожування неминучі втрати контенту, а вартість процесу досить висока.

3. Мембранна технологія. Технологія мембранного розділення є однією з сучасних методик, що застосовується для концентрування соків. За наявності відповідної рушійної сили напівпроникна мембрана дозволяє проходити одному або декільком компонентам. Використовуються два типи мембран – органічні мембрани та неорганічні мембрани. Мембранна технологія включає зворотний осмос і ультрафільтрацію. Він приймає осмотичний тиск як принцип. Ємність розділена на 2 частини напівпроникною мембраною, яка встановлена по центру, при цьому кожна частина окремо заповнюється розчином А і розчином Б. Коли розчин В інфільтрує частину А через мембрану, утворюється осмотичний тиск з частини В. Зокрема, осмотичний тиск обернено пропорційний диспропорції концентрацій між 2 частинами [1-5]. Якщо концентрація в частині А більша, ніж у частині В, то вода проникає в А з В. І навпаки, якщо на деталь А чиниться більший тиск то вода буде проникати від А до В, що називається зворотним осмосом. Зворотний осмос і ультрафільтрація схожі за принципом роботи, в той час, як перший вимагає більш високого робочого тиску при цьому не проходять дрібні частинки. Ефект зворотного осмосу визначається властивістю напівпроникної мембрани і швидкістю проникнення води.

Технологія отримання концентрату має наступні переваги:

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- процес концентрації здійснюється при низькій температурі, ефективно уникаючи якісних змін;
- поживні речовини і смакові речовини, що залишаються в концентраті фруктового соку утримуються у високій швидкості;
- мембранна технологія є більш енергоефективною, ніж інші методи.

В даний час мембранна технологія функціонує як процес передконцентрації, оскільки вона не в змозі досягти більш високого ступеня концентрації.

4. Розпилювальна сушка. Розпилювальна сушка спочатку була розроблена для виробництва фруктових порошків, але тепер її також використовують для виготовлення концентрованих фруктових соків. Розчинник подається через сопло вгору (атомайзер) і розпилюється у вигляді крапель у потоці гарячих газів, що рухається в тому ж або протилежному напрямку. Краплі розчинника висихають у польоті, перш ніж впасти на дно посудини у сушильній камері.

5. Омічне нагрівання. Техніка також відома як електричне нагрівання, джоулеве нагрівання та електропровідне нагрівання, серед іншого. У цій техніці змінний струм пропускається через харчовий матеріал. Соки містять високий рівень солей та води, які легко проводять електрику методом електролітичної провідності. В електричних полях відбувається рух іонів до електродів з протилежним зарядом. Швидкий рух іонів призводить до більшої кінетичної енергії та нагрівання продукту [1-4]. Процес забезпечує швидке нагрівання та рівномірний розподіл температури у різних видах рідких продуктів, що зменшує термічне пошкодження летких компонентів. Омічне нагрівання використовується для стерилізації, пастеризації, випаровування, бланшування, ферментації, дистиляції, приготування їжі та відтаювання. Завдяки високій енергоефективності та дуже короткому часу нагрівання омичне нагрівання може бути використане як альтернативний метод нагрівання.

1.3 Обладнання для отримання харчового концентрату

Операція одиничного процесу при якій рідкий розчин концентрується шляхом видалення частини розчинника після кип'ятіння називається випарюванням. Випарювання відрізняється від зневоднення тим, що кінцевий продукт все ще знаходиться в рідкій фазі, і від дистиляції тим, що утворена пара не розподіляється на фракції. В харчовій промисловості використовуються й інші методи, такі як заморожувальна концентрація, зворотний осмос, мембранна концентрація та ультрафільтрація. Однак випарювання залишається найекономічнішим і найпоширенішим завдяки технологіям, які розроблені для відновлення енергії. У більшості випадків, і в наступних дослідженнях, розчин для концентрації є розбавленим харчовим продуктом, а видалений розчинник – це вода у вигляді пари.

Видалення води з харчових продуктів має дві основні цілі:

- покращити мікробіологічну стабільність за рахунок зниження активності води, що є переважаючим фактором у більшості процесів органічного руйнування;

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– зменшити витрати на транспортування, пакування, дистрибуцію та зберігання шляхом мінімізації об'єму та ваги.

У процесі випаровування концентрація продукту досягається шляхом випаровування розчинника, зазвичай води. Отриманий кінцевий продукт повинен мати оптимальний вміст твердих речовин, що відповідає бажаній якості продукту та економіці експлуатації. Вузлова операція, яка широко використовується при переробці харчових продуктів, фруктових соків, молочних продуктів, а також солодових та зернових напоїв. Також це вузлова операція, яка, можливо, за винятком дистиляції, є найбільш енергоємною. Наразі розроблено багато типів випарників та різні варіанти технологічних процесів з урахуванням різних характеристик продукту та параметрів експлуатації. Найбільш поширені типи випарників включають: підпримусова циркуляція, природна циркуляція, трубчаті пластинчасті, плівковий трубчатий та багато інших [1, 5, 9]. Найбільш поширеною технікою, що використовується для концентрації фруктових соків у промисловості є випарювання. Випарювання передбачає видалення води з розчину шляхом випаровування певної частини розчинника. Три основні компоненти конструкції випарника – теплопередача, розділення пари та рідини та ефективне використання енергії. Випаровування часто використовується з метою зниження температури, необхідної для кипіння, через високу теплочутливість продуктів харчування. Через рівновагу між тиском і точкою кипіння, нижчий тиск дозволяє кипіти при знижених температурах, тим самим мінімізуючи термічне пошкодження та деградацію продуктів харчування. Використовуються різні типи випарників: з природною циркуляцією, з примусовою циркуляцією та плівкові випарники.

Випарник – це пристрій, який концентрує розчин шляхом видалення частини його розчинника (зазвичай води) у вигляді пари. Зазвичай усі випарники складаються з однакових компонентів. Насправді їх можна визначити як теплообмінники у великій камері з резервуаром для введення рідини, якою в більшості випадків є конденсуюча пара, що постачає приховану теплоту. Якщо відбувається лише процес випаровування, пристрій називають одноступеневим випарником. Якщо пари, що утворюються, повторно використовуються в наступній камері, тоді можливо створити нові конфігурації, які називаються випарниками з багатьма ефектами (де число ефектів дорівнює кількості випарників).

Рідина з низькою концентрацією нагрівається до температури випаровування, після чого втрачає воду, утворюючи рідину з високою концентрацією, тоді як пар під високим тиском змінює фазу, стаючи насиченою водою. Розведену рідину зазвичай попередньо нагрівають і рівномірно розподіляють по поверхні пристрою теплообміну: для ефективної роботи і мінімального руйнування продукту потрібний кращий розподіл [1]. Наступним етапом є ефективний сепаратор (щоб уникнути витрат на виконану роботу), який може ізолювати концентрат від пари, яку можна повторно використовувати у наступному пристрої або направити на кінцевий конденсатор для підігріву води з метою енергетичного відновлення.

1. Випарники з природньою циркуляцією були першими комерційно розробленими випарниками і використовуються для випаровування

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

температурно-чутливих та чистих продуктів. Найпоширенішими типами випарників з природньою циркуляцією є випарники з короткими вертикальними трубками, випарники з довгими вертикальними трубками та випарники з горизонтальними трубками (рис. 1.1). У горизонтальному трубчастому випарнику пар рухається всередині труб, які розташовані горизонтально [1, 9]. Розчин поза трубами нагрівається і розчинник випаровується та виходить зверху. Таким чином, подача концентрується і вивільняється на дні випарника. Основна перевага горизонтального трубного випарника полягає в тому, що він потребує невеликої висоти. Він ідеально підходить для операцій де кінцевим продуктом є рідина, а не твердий матеріал, наприклад, цукрові сиропи.

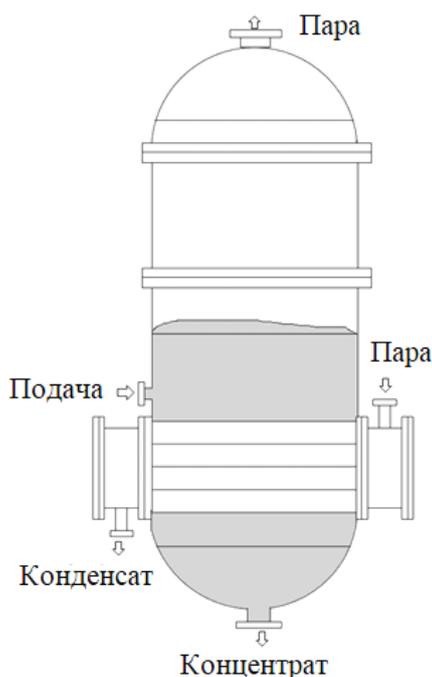


Рисунок 1.1 – Горизонтальний трубчастий випарник

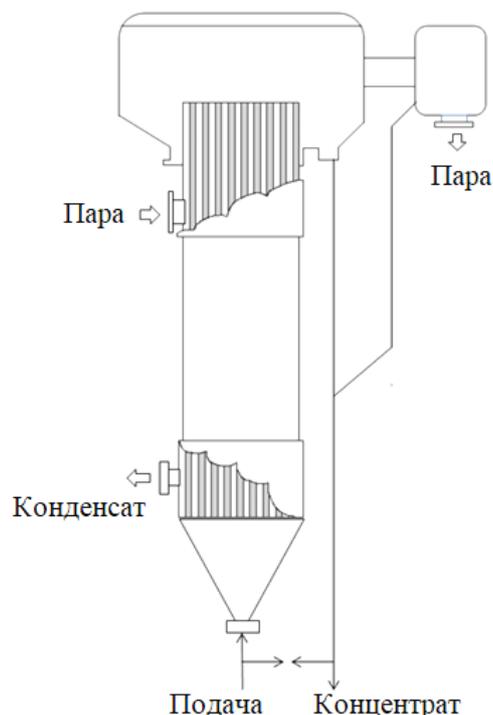


Рисунок 1.2 – Вертикальний випарник з довгою трубою

Короткотрубні вертикальні випарники складаються з пучка коротких трубок, які розташовані в циліндричному корпусі. Сировина подається вище верхньої трубної решітки через отвір. Труби розташовані між двома плитами труб. Рідина тече всередині труби, тоді як пара рухається зовні труб. Коли рідина нагрівається і починає кипіти то вона піднімається в трубі і повертається через центральний злив. Пара виходить зверху, коли розчинники випаровуються. Концентровану рідину збирають на дні випарника. Теплопередача сильно залежить від в'язкості та температури, що робить її непридатною для рідин, чутливих до температури (молоко, фруктові соки) та для виробництва кристалічних продуктів за відсутності перемішування.

Вертикальний випарник з довгою трубою або випарник з підйомною плівкою є теплообмінником з трубчастим пучком у якому нагрівальне середовище знаходиться на стороні оболонки. Розбавлена суміш подається в

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

нижню частину трубної решітки і рухається вгору через труби (рис. 1.2). На певній висоті над трубами починається кипіння, утворюються бульбашки, що збільшує лінійну швидкість і швидкість конвективного тепловідведення. Утворену піну руйнує парорідинний сепаратор, встановлений на верхній частині посудини. Однак у цьому обладнанні можуть виникати більші перепади тиску, а гідростатичний тиск на дні трубки може підвищувати температуру, що призводить до проблем із чутливістю температури в фруктових соках.

2. Випарники з примусовою циркуляцією складаються з сепаратора (флеш-камери), циркуляційного насоса та трубчастого теплообмінника. Насос підтримує рух рідини по трубах на високій швидкості. Розчин нагрівається в теплообміннику без кипіння. Флеш-камера знижує тиск і перегрітий розчин частково випаровується. Примусовий циркуляційний випарник був розроблений для обробки розчинів, які схильні до утворення накипу або кристалізації. Рідина циркулює з високою швидкістю через теплообмінник, при цьому кипіння всередині установки запобігається завдяки гідростатичному напору, який підтримується над верхньою трубною планшайбою. Коли рідина потрапляє в сепаратор де абсолютний тиск трохи нижчий, ніж у пучку труб, рідина випаровується, утворюючи пару [1, 3, 9]. Основні застосування випарника з примусовою циркуляцією полягають у концентруванні сировини з оберненою розчинністю, кристалізаційних процесах, а також у концентрації термочутливих матеріалів, що призводять до відкладення твердих речовин. У всіх випадках підвищення температури через пучок трубок підтримується на максимально низькому рівні, часто всього 2-3°C. Це призводить до коефіцієнта рециркуляції, який може досягати від 100 до 150 кг розчину на кілограм випареної води. Високі рівні рециркуляції забезпечують високу швидкість руху розчину через трубки, що допомагає мінімізувати накопичення відкладень або кристалів на нагрівальній поверхні. Випарники з примусовою циркуляцією зазвичай дорожчі за плівкові випарники через необхідність широких циркуляційних трубопроводів і потужних циркуляційних насосів.

3. Плівкові випарники. У цьому випарнику живильне середовище подається зверху де спеціально сконструйовані розподільники рівномірно розподіляють його по внутрішній поверхні обладнання. Дія гравітації, яка тягне плівку вниз через зону нагрівання, призводить до утворення тоншої, швидше рухомої плівки на внутрішній поверхні з коротшим часом перебування та високим коефіцієнтом теплопередачі. Випарник з падаючою плівкою особливо корисний, коли різниця температур між нагрівальним середовищем та рідиною відносно невелика (менше ніж 9-10°C). Він ідеально підходить для температурно-чутливих продуктів через його здатність працювати при мінімальних різницях температур і короткому часі перебування (рис.1.3).

Хоча кожен виробник має власну методику, розподіл падаючої плівки зазвичай базується на використанні перфорованої пластини, розташованої над верхньою трубною пластиною. Розподіл рідини по кожній трубці іноді додатково покращується за рахунок утворення «спалахової» пари в цій точці. Випарник з падаючою плівкою має перевагу в тому, що плівка рухається «за гравітацією», а не проти неї [1, 5, 9]. Це призводить до тоншої, швидше рухомої плівки, що забезпечує ще коротший час контакту продукту і подальше

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підвищення значення теплопередачі. Щоб створити добре розвинений плівковий апарат для підйомної плівки потрібна рушійна сила, зазвичай різниця температур щонайменше 14°C на поверхні нагріву. На відміну від цього, випарник зі спадною плівкою не має обмежень за рушійною силою, що дозволяє використовувати більше ефектів випарника в тих же загальних межах експлуатації. Наприклад, якщо пара доступна при 104°C то температура кипіння в останньому ефекті дорівнює 49°C.

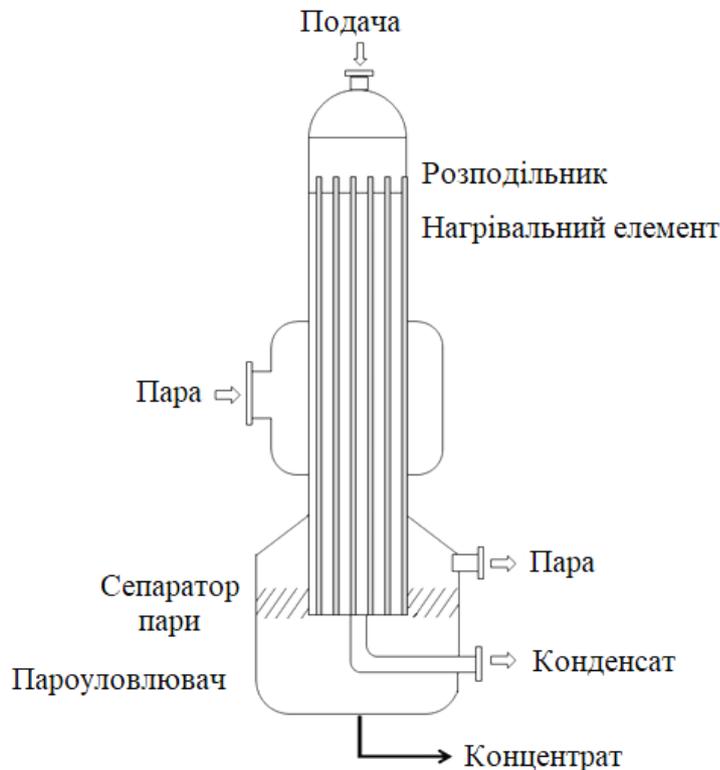


Рисунок 1.3 – Плівковий випарник

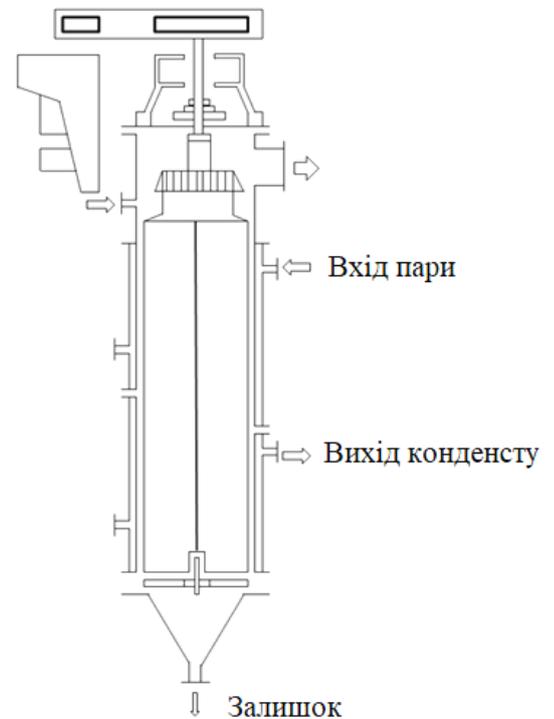


Рисунок 1.4 – Випарник з обертовим шаром

Основними перевагами плівкового випарника є хороша теплопередача, особливо при низьких температурах і незначних різницях температур, низька початкова вартість, мало необхідного місця та сильні характеристики розділення пари та рідини. Накопичення нальоту на нагрівальній поверхні відбувається в результаті деградації продукту. Рідкі продукти харчування, такі як яблучний сік та соєве молоко, серед інших не можна концентрувати при температурах вище 65°C, оскільки осадження з рідких продуктів харчування призводить до забруднення труб. Цей твердий шар також діє як бар'єр для теплопередачі та зменшує швидкість випаровування. Основним застосуванням є концентрація фруктових соків. Концентрація молочних продуктів (молочний білок, сироватка, знежирене молоко тощо), чорного лігніну, сечовини, фосфорної кислоти та цукрових розчинів є деякими з інших застосувань випарника з падаючою плівкою.

Випарники з обертовим шаром добре працюють з широким спектром сировини, але вони не підходять для теплочутливих, в'язких, що забруднюють, або рідин з дуже високою температурою кипіння (рис. 1.4). Випарники з

обертювими шаром використовують механічний пристрій для очищення, щоб розподілити тонкий шар або плівку рідини на одній стороні металевої стінки. Пари виходять з камери через сопло для виведення пари та потрапляють в зовнішній конденсатор. Неліткі сполуки виводяться з нижнього кінця випарника [1, 4, 9]. Переваги випарника з обертовою плівкою включають:

- велика теплопередача завдяки турбулентності ротора;
- короткий час перебування у зоні нагрівання;
- здатність обробляти високі концентрації твердих речовин та в'язких матеріалів;
- низький рівень деградації продукту, що призводить до високих виходів;
- трубопровідний потік з мінімальним зворотним змішуванням;
- швидкості потоку рідини, що занадто низькі, щоб підтримувати нагрівальну поверхню випарника з падаючою плівкою постійно вологою.

4. Спрей-сушіння. Увага дослідників останнім часом була звернена на виробництво порошків на основі фруктів та овочів як більш вигідного рішення для економічно ефективного та безпечного транспортування й зберігання. На рисунку 1.5 зображено роботу типового випарника для розпилювального сушіння. Процес розпилювального сушіння використовує атомізацію частинок, що призводить до утворення великої площі поверхні.

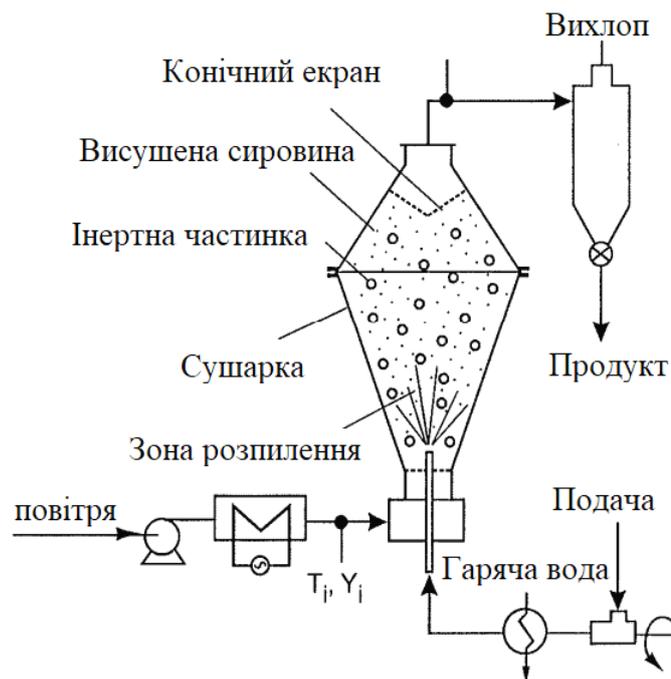


Рисунок 1.5 – Розпилювальна сушарка

5. Заморожувальна концентрація – видалення чистої води у вигляді кристалів льоду при субнульових температурах, що використовується в цьому методі, особливо корисне для концентрації або розділення термочутливих біологічних сполук, таких як вітаміни, білки та інші ароматичні речовини. Кристалізатор та миюча колона утворюють цю одностадійну концентруючу установку [1, 4, 9]. Кристалізатор по суті є великою судиною із зіскоблювальними теплообмінниками, які часто укладені у охолоджувальних

спіралях або через потік холодоагенту. Циркулюючий холодоагент охолоджує зовнішні стінки, що спричиняє утворення льоду та розвиток кристалів всередині кристалізатора. Концентрована рідина ефективно відділяється від кристалів льоду у мийній колоні. Щоб видалити всі сліди концентрованої рідини, стиснутий шар кристалів льоду промивають розтопльованим льодом.

Заморожене концентрування гарантує, що концентрат зберігає всі оригінальні властивості продукту. Криоконцентрація, на відміну від теплового випарювання, мінімально впливає на смак, колір, аромат чи поживні речовини соків. Заморожування досягає рівня концентрації, яка вища, ніж при зворотному осмосі, але нижча, ніж при кип'ятінні під вакуумом. Концентрація шляхом заморожування широко використовувалася у концентраціях різних фруктових соків, таких як ківі, ягідні, яблучні, грушеві, цитрусові [1]. Вона також застосовується у виноробстві та дистиляції, концентруванні цукрових розчинів, пивоварінні, виробництві соку та молочних продуктів. Недоліками цієї технології є тривалість процесу та високі витрати на обладнання та експлуатацію. Високі експлуатаційні витрати зумовлені насамперед втратою соку, що виникає при утворенні крижинок та складністю видалення крижинок без втрати твердих речовин продукту. Крім того, ступінь концентрації, що досягається, нижча, ніж при випаровуванні.

6. Випаровування з простим та з багаторазовим ефектом. Випарник простого ефекту є найпростішим у використанні і складається лише з одного робочого блоку. У цьому пристрої рідина отримує енергію безпосередньо від пари високого тиску, що подається з камери, яка конденсується та виводиться у вигляді гарячої насиченої води. Продукт виходить у концентрованому стані після видалення води. Отримана пара має нижчий тиск і меншу енергію, ніж початкова пара, яка не повторно використовується і направляється до конденсатора [1-4, 9]. Випаровування з багаторазовим ефектом – це метод випаровування, при якому пар, що утворюється на одному етапі, використовується як нагрівальне середовище на наступному. Внаслідок цього перший етап слугує генератором пари для другого етапу і так далі. Багатоефектні випарники з трубчастими та пластинчастими теплообмінниками є двома найпоширенішими видами випарників (рис. 1.6). Випарники пластинчастого типу дешевші у виготовленні, мають меншу масу та займають меншу площу, але вони більш проблематичні в експлуатації через біологічне забивання теплообмінників. Незважаючи на більші початкові інвестиційні витрати, трубчасті теплообмінники все ще є гарною та популярною альтернативою для концентрування фруктових соків.

У конфігурації з багаторазовим ефектом кілька пристроїв об'єднуються в послідовність з метою використання парів попереднього етапу як сервісної рідини на наступному кроці, в якому харчовий продукт входить частково концентрованим, не втрачаючи пов'язаної енергії. Тиск наступного етапу завжди нижчий, що забезпечує необхідну рушійну силу для випаровування розчинника розчину. Харчова промисловість зазвичай використовує від трьох до семи ефектів. Додавання більшої кількості етапів дозволяє отримати нижчі експлуатаційні витрати, але при цьому інвестиційні витрати будуть вищими.

Остаточний вибір здійснюється після належної економічної оцінки всього процесу.

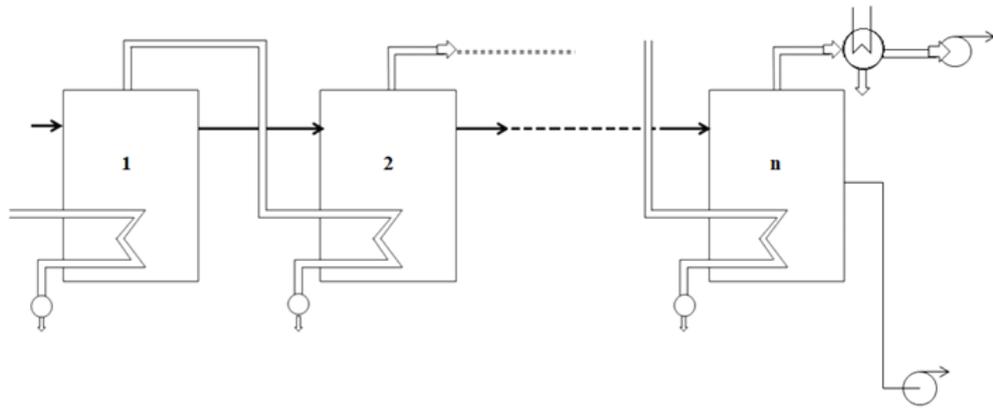


Рисунок 1.6 – Випаровування з багаторазовим ефектом

Випарник з множинним ефектом – це тип промислового процесу, який використовується для концентрації розчинів, як правило, рідин, шляхом википання розчинника (зазвичай води), щоб залишити після себе більш концентрований розчин або твердий продукт. У процесі використовується серія ємностей-випарників, кожна з яких працює при поступово нижчому тиску та температурі, щоб мінімізувати споживання енергії та підвищити ефективність. Випарники з множинним ефектом – це серія посудин, які працюють при поступово нижчому тиску та температурі для мінімізації споживання енергії та підвищення ефективності [25]. У випарнику з багаторазовим ефектом пара, що утворюється в одній посудині, використовується для нагрівання наступної посудини, зменшуючи кількість енергії, необхідної для випаровування розчинника. Це досягається шляхом пропускання пари з першої посудини через теплообмінник для нагріву рідини в другій посудині. Потім пара конденсується, а рідина повертається в першу посудину для повторення процесу.

Важливість випарників з множинним ефектом полягає в їх здатності збільшувати концентрацію розчинів з меншою потребою в енергії, що робить їх більш стійким і економічно ефективним рішенням для промислових процесів. Процес також забезпечує більш високу концентрацію та чистоту кінцевого продукту, що має важливе значення для якості та стабільності кінцевого продукту. Типовий випарник з множинним ефектом складається з декількох посудин або ступенів, кожна з яких має свою поверхню нагріву і вакуумну систему. Кількість необхідних етапів залежить від концентрації розчину, що підлягає отриманню, і характеристик теплопередачі розчину. Посудини зазвичай розташовуються в каскадній конфігурації, при цьому пара, що утворюється на кожному етапі, використовується для нагрівання розчину на наступному етапі.

Розчин, що підлягає концентруванню, вводиться на перший етап, а на поверхню нагріву подається тепло. У міру нагрівання розчин починає випаровуватися і виноситься парою. Потім пара, що утворюється на першому етапі, направляється на наступну стадію, де вона використовується для нагрівання розчину на цій стадії. Цей процес повторюється стільки етапів, скільки потрібно, поки не буде досягнута бажана концентрація.

Кожна посудина у випарнику з багаторазовим ефектом виконує певну функцію. Перша посудина використовується для кип'ятіння розчину, а наступні посудини використовуються для відновлення пари, що утворюється на попередній стадії, і для її конденсації. Теплообмінник використовується для передачі тепла від пари до розчину на наступному етапі. Теплообмінник зменшує кількість енергії, необхідної для випаровування розчинника, використовуючи приховану теплоту пари для нагрівання розчину [25]. Випарники з одноразовим ефектом працюють шляхом кип'ятіння розчину в одній посудині, що вимагає великої кількості енергії для випаровування розчинника. Навпаки, випарники з множинним ефектом використовують приховану теплоту пари, що утворюється на кожному етапі для нагрівання розчину на наступному етапі, зменшуючи кількість енергії, яка необхідна для випаровування розчинника. Це робить випарники з кількома ефектами більш енергоефективними та економічно вигідними, ніж випарники з одним ефектом. Існує три основних типи випарників з множинним ефектом:

1. Випарники з кількома ефектами прямого живлення: У цьому типі випарника пара, що утворюється в першому ефекті, використовується як джерело нагріву для другого ефекту тощо. Рідина подається в перший ефект і потім протікає через кожен наступний ефект, причому концентрація збільшується на кожному етапі.

2. Випарники з кількома ефектами зворотного живлення: цей тип випарника працює в напрямку протилежному випарнику з прямою подачею. В останній ефект подається рідина, а пар, що утворюється на кожному етапі, використовується як джерело нагріву для попереднього етапу.

3. Випарники з множинним ефектом змішаного живлення: У цьому типі випарника рідина подається в перший ефект, а потім частина концентрованої рідини змішується з вхідною подачею в кожному наступному ефекті. Пара, що утворюється на кожному етапі, використовується як джерело нагріву для наступного етапу, а концентрація рідини збільшується на кожному етапі.

Випарники з кількома ефектами мають ряд переваг перед випарниками з одним ефектом [25]:

– випарники з множинним ефектом можуть повторно використовувати пару, що утворюється на кожному етапі, як джерело нагріву для наступного етапу, що значно зменшує споживання енергії, необхідної для випаровування;

– випарники з кількома ефектами можуть обробляти більший об'єм рідини за короткий час порівняно з випарниками з одним ефектом. Це пов'язано з тим, що концентрація рідини збільшується на кожному етапі, що дозволяє досягти більш високих темпів виробництва;

– випарники з кількома ефектами можуть досягати більш високих рівнів концентрації, ніж випарники з одним ефектом. Це пов'язано з тим, що рідина піддається численним стадіям випаровування, що призводить до більш високої концентрації твердих речовин або розчинених речовин;

– випарники з множинним ефектом можуть відновлювати більш цінний продукт з оброблюваної рідини завдяки більш високому рівню концентрації. Це призводить до зменшення кількості відходів і зниження собівартості виробництва.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Недоліки багатоефектного випарника [25]:

– випарники з множинним ефектом є високоефективним рішенням для великомасштабних процесів випаровування, але вони можуть підходити не для всіх застосувань;

– випарники з кількома ефектами можуть бути складнішими в обслуговуванні та ремонті порівняно з випарниками з одним ефектом. Вони можуть вимагати більш частих перевірок, чищення та заміни компонентів, що може збільшити загальну вартість;

– випарники з множинним ефектом можуть бути більш чутливими до забруднення, яке виникає, коли тверді речовини або інші домішки накопичуються на поверхнях теплопередачі. Це може знизити ефективність процесу випаровування і зажадати більш частого очищення;

– випарники з кількома ефектами можуть бути менш гнучкими, ніж випарники з одним ефектом, коли справа доходить до обробки ряду різних продуктів.

Дизайн випарника є ключовим фактором у всьому процесі, оскільки енергоефективність залежить від теплообмінника. Покращення поверхні теплообміну може означати значне зниження витрат. Це пов'язано з тим, що харчові продукти зазвичай мають високу термочутливість і можуть бути пошкоджені навіть при відносно короткому часі перебування через поганий розподіл. Продуктивність процесу випарника залежить від характеристик рідини: видалення води підвищує в'язкість, що зменшує швидкість теплопередачі та підвищує температуру кипіння. Термічне руйнування можна мінімізувати, використовуючи вакуумні випарники, що знижує температуру та час перебування, що забезпечує оптимальну якість продукції.

Процес випаровування має бути енергоефективним, що вимагає:

– відповідний теплообмін: швидкість теплообміну залежить від типу випарника, термофізичних характеристик продуктів, площі теплообміну та її забруднення;

– ефективне розділення рідини та пари: це критично важливо, щоб не втратити якісну технологію;

– енергетичне відновлення: утворювана пара є джерелом енергії і для більш економічного процесу її не слід марнувати;

– обробка продукту: робота з харчовими продуктами означає, що продукт може бути дуже чутливим до тепла та пошкоджений під час процесу. Тому необхідно приділяти особливу увагу якості продукту та його можливому забрудненню.

На основі вище зазначеного можна вважати, що сокові концентрати виготовляються шляхом видалення води зі свіжого фруктового або овочевого соку, перетворюючи її на густий сироп з високим вмістом розчинних сухих речовин. При цьому процесі зберігається оригінальний смак і поживні речовини. Поширені методи концентрації включають вакуумну концентрацію, концентрацію заморожування та концентрацію мембрани, кожен з яких зберігає смак і поживні речовини. Одним з поширених методів отримання сокових концентратів є вакуумна концентрація. При цьому процесі сік нагрівається під низьким тиском, дозволяючи воді випаровуватися без шкоди для якості соку.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Метод не тільки допомагає ефективно видаляти воду, але й відіграє вирішальну роль у збереженні смаку, гарантуючи, що кінцевий концентрат дуже нагадує свіжий сік, з якого він походить. Працюючи в умовах вакууму, сік можна концентрувати при нижчих температурах, що мінімізує теплове пошкодження ніжних смаків і поживних речовин. Ще одним ефективним методом є концентрація заморожування. Тут сік охолоджують до тих пір, поки вода не замерзне, відокремлюючи його від соку у вигляді кристалів льоду. Метод особливо корисний для збереження природного смаку та харчового профілю соку, оскільки він дозволяє уникнути тепла, яке зазвичай пов'язане з іншими процесами концентрації. Коли вода видаляється отримується насичений концентрований сироп, який можна розбавити водою.

Мембранна концентрація є ще одним інноваційним підходом, який використовує зворотний осмос та ультрафільтрацію. Цей метод відокремлює воду від соку при низьких температурах, гарантуючи, що смак соку та поживні речовини залишаються недоторканими. Використовуючи цю технологію, виробники можуть досягти високого рівня концентрації, зберігаючи при цьому цілісність соку. Результатом є концентрований продукт, яким споживачі можуть насолоджуватися без шкоди для смаку чи користі для здоров'я.

Зазначено, що найбільш поширеною технікою, що використовується для концентрації фруктових соків у промисловості є випаровування. Випарювання передбачає видалення води з розчину шляхом випаровування певної частини розчинника. Наявні три основні компоненти конструкції випарника – це теплопередача, розділення пари та рідини та ефективне використання енергії. Випарювання часто використовується з метою зниження температури, необхідної для кипіння, через високу теплочутливість продуктів харчування. Через рівновагу між тиском і точкою кипіння, нижчий тиск дозволяє кипіти при знижених температурах, тим самим мінімізуючи термічне пошкодження та деградацію продуктів харчування.

Аналіз літературних джерел дав змогу виокремити основні типи випарників, які використовуються: з природною циркуляцією, з примусовою циркуляцією та плівкові випарники. Випарник – це пристрій, який концентрує розчин шляхом видалення частини його розчинника (зазвичай води) у вигляді пари. Наразі розроблено багато типів випарників та різні варіанти технологічних процесів з урахуванням різних характеристик продукту та параметрів експлуатації.

Вважається, що дизайн випарника є ключовим фактором у всьому процесі, оскільки енергоефективність залежить від теплообмінника. Покращення поверхні теплообміну може означати значне зниження витрат. Це пов'язано з тим, що харчові продукти зазвичай мають високу термочутливість і можуть бути пошкоджені навіть при відносно короткому часі перебування через поганий розподіл. Продуктивність процесу випарника залежить від характеристик рідини: видалення води підвищує в'язкість, що зменшує швидкість теплопередачі та підвищує температуру кипіння. Термічне руйнування можна мінімізувати, використовуючи вакуумні випарники, що знижує температуру та час перебування, що забезпечує оптимальну якість продукції.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		22

РОЗДІЛ 2

ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОЧИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛАДНАННЯ З ВИРОБНИЦТВА ХАРЧОКОНЦЕНТРАТІВ

2.1 Енергетично оптимізована концентрація фруктових соків

Випаровування – це одинична операція, яка відокремлює рідину від твердих речовин за допомогою передачі тепла шляхом випаровування або кип'ятіння. Метою випаровування є концентрація розчину нелеткої розчиненої речовини (тобто твердих речовин) і розчинника (тобто рідини), яким зазвичай є вода. Випаровування частини розчинника концентрує розчинену речовину в більш в'язкий рідкий продукт. Випаровування регулярно використовується в харчовій промисловості для виробництва рідких концентратів.

Під час переробки фруктів в концентрат фруктового соку випарювання є етапом процесу з набагато найвищими енергетичними потребами. Як і всі інші галузі, індустрія фруктових соків наразі стикається з такими викликами, як зростання вартості енергії та необхідність зменшити споживання первинної енергії [9, 13, 14]. Під час виробництва концентратів фруктових соків компоненти соку концентрують, наприклад, з 12 до 70 % сухої речовини, видаляючи відповідну кількість води, практично завжди за допомогою системи випаровування. Оскільки під час процесу випаровування цінні леткі ароматичні речовини також значною мірою переходять у пару разом з водою, їх потрібно максимально сконденсувати, сконцентрувати у відповідному ароматичному модулі та збирати окремо. Використання альтернативних методів, таких як концентрація заморожуванням та зворотний осмос не досягає необхідної кінцевої концентрації і тому рідко застосовується.

Хоча концентрація рідин шляхом випаровування є енергомістким процесом, існує багато методів для зменшення витрати енергії. Загальне правило полягає в тому, що чим більша система, тим більший ефект від підвищення термічної ефективності випарника. Проблема полягає у виборі правильної технології для кожного застосування. Основні фактори, що впливають на вибір технології, наведені нижче.

1. Швидкість випарювання. Чим більша потужність випарника тим легше обґрунтувати використання складних і дорогих систем випарювання для забезпечення високої енергоефективності. Для цілей проектування випарника потужність визначається як швидкість випарювання за годину. Однак у деяких випадках, наприклад у сезонних виробників фруктових соків, обладнання працює лише частину року. Це означає, що дорогий випарник простоює частину року. Економічні розрахунки повинні враховувати річну кількість годин експлуатації. Якщо швидкість випаровування менше 1000 кг/год важко обґрунтувати використання багатофазного випарювання. Зазвичай на таких

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Ревенко				Оптимізація робочих енергетичних характеристик обладнання з виробництва харчоконцентратів	Лім.	Арк.	Аркушів
Перевір.	Хорольський						23	15
Н. Контр.	Омельченко					ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО		
Затверд.	Хорольський							

потужностях обирають одноступінчастий випарник, часто з термовипарним рекомпресором. У багатьох випадках найбільш ефективним випарником є механічний випарник з рекомпресією пари. Проте ці системи працюють при низькій різниці температур, що призводить до великої площі теплообміну.

2. Час обробки та температура під час випаровування. Оскільки багато харчових та молочних продуктів надзвичайно чутливі до тепла, оптимальна якість досягається коли час обробки та температура під час концентрування продуктів зберігаються на мінімальному рівні. Найкритичніша частина процесу настає під час короткого контакту продукту з теплообмінною поверхнею, яка є гарячішою за сам продукт. Щоб запобігти можливому тепловому руйнуванню потрібно враховувати співвідношення часу та температури при виборі типу та принципу роботи випарника, який буде використовуватись. Для такого чутливого до тепла застосування ідеальними виявилися плівкові випарники з двох причин. По-перше, продукт утворює тонку плівку лише на теплообмінній поверхні, замість того щоб заповнювати весь об'єм, що значно скорочує час перебування всередині теплообмінника. По-друге, плівковий випарник може працювати при різниці температур між паром і продуктом всього лише 3,5°C. Коли температура продукту та нагрівальних поверхонь близька до однакової, локальні перегріву мінімізуються.

Збереження енергії є одним із основних параметрів при проектуванні системи випарника. Чим більша потреба у випаровуванні тим важливішим стає збереження енергії. Доступні такі методи:

1. Випарники з множинним ефектом. Якщо водяна пара від першого ефекту випарника з множинною дією може бути введена в парову скриню другого ефекту, що працює при більш низькій температурі кипіння то прихована теплота водяної пари може бути використана повторно. Зниження тиску пари другого ефекту щодо першого ефекту знижує температуру кипіння другого ефекту. Таке розташування повторного використання прихованого тепла пари називається багатоефектним випаровуванням.

Багатостадійне випарювання використовує пару, яка утворена під час випарювання на одному етапі, для надання тепла для випарювання продукту на другому етапі, який підтримується при нижчому тиску. У двоетапному випарнику можливо випарити приблизно 2 кг пари з продукту на кожен кг поданої пари. Зі збільшенням кількості етапів економія пари підвищується. Для деяких великих обсягів робіт економічно доцільно використовувати до семи етапів [9, 13, 14]. Збільшення кількості етапів для будь-якого конкретного завдання значно підвищує капітальні витрати, тому кожна система повинна ретельно оцінюватися. Загалом, коли швидкість випарювання перевищує 1350 кг/год, слід розглянути можливість багатостадійного випарювання.

Принципово, для випаровування одного кілограма води при точці кипіння завжди потрібна певна кількість енергії 2257 кДж/кг при 100°C. Ця кількість енергії в багато разів перевищує енергію, яка необхідна для нагрівання рідини до точки кипіння. Під час конденсації водяної пари ця енергія знову виділяється, так, що ще 1 кг води може бути випарований за рахунок конденсуючої пари, якщо забезпечено достатньо велику різницю температур для того, щоб конденсація могла відбутися. Цей принцип використовується у

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

широко застосовуваних багатоступеневих випарних установках: лише перший етап нагрівається парою котла і частина води видаляється з соку. Ця пара потім використовується на другому етапі нагрівання, де вона конденсується та використовується для видалення подібної кількості води. Щоб досягти необхідної різниці температур для теплообміну від конденсованої пари до соку, другий етап повинен проводитися під нижчим тиском і, отже, при нижчій температурі випаровування. Цей принцип можна повторювати для кількох подальших етапів. Можлива кількість етапів обмежена максимально дозвальною температурою продукту на першому етапі та необхідною різницею температур між етапами, при цьому також слід враховувати підвищення температури кипіння, яке викликане збільшенням концентрації сировини.

На практиці найчастіше використовуються 4-6-ступінчасті системи, іноді 7 ступенів для дуже великої продуктивності випаровування. Пара з останнього ступеня повинен конденсуватися в конденсаторі, зазвичай охолоджуваному водою з охолоджуючої вежі, щоб підтримувати вакуум. Не беручи до уваги кількість пари, що використовується для можливого попереднього нагріву продукту, об'єм конденсату приблизно відповідає всій кількості випаровуваної води ділити на кількість стадій. Розмір конденсатора та продуктивність охолоджувальної башти повинні бути відповідно спроектовані. Остання стадія зазвичай проводиться при тисках 100-150 мбар. Найнижче досягне питоме споживання пари для багатоступінчатих випарників фруктових соків (7 ступенів) становить приблизно 0,18 кг/кг. Установки цього типу є найсучаснішими і дозволяють здійснити просте поєднання попереднього та фінального концентрування, а також відновлення аромату в одній установці.

2. Рекомпресії. Другий метод повторного використання прихованої теплоти пари полягає в підвищенні температури її конденсації шляхом стиснення. Це збільшує тиск і температуру конденсації пари та створює температурний градієнт, необхідний для повторного використання прихованого тепла в системі випарника [10-12, 14]. Термічна рекомпресія пари використовує паровий ежектор для стиснення пари, що виходить із посудини випарника. У цьому застосуванні паровий ежектор часто називають термокомпресором. Його основне призначення – стиснення пари, але його вторинна перевага – створення вакууму в посудині випарника. Термокомпресор використовує пару високого тиску (0,8-2,1 МПа) як рушійну рідину для втягування пари низького тиску з випарника та створення комбінованої пари відповідного тиску та температури для нагрівання випарника. Одна з можливих конфігурацій трьохефектного випарника показана на рисунку 2.1. У цьому прикладі термокомпресор підвищує температуру насичення пари з 71°C до 88°C, тому його можна повторно використовувати для нагрівання другого ефекту, працюючи при 80°C.

Термічна рекомпресія пари може бути застосована до системи випарника для покращення економії пари. Термокомпресор підвищує температуру насичення пари, виходячи з ефекту, який повторно використовується для нагрівання наступного ефекту. Економія пари випарника сильно залежить від початкової температури сировини при його надходженні в систему випарника і властивостей концентрованої рідини. Сировина, що надходить в перший ефект при температурі вище точки кипіння, спочатку спалахує деякою кількістю пари

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ще до того, як почнеться теплообмін у випарнику. Таким чином, економічність пари буде вищою, ніж якби початкова температура подачі була нижчою за точку кипіння, що вимагало б передачі тепла рідині, перш ніж відбудеться випаровування.

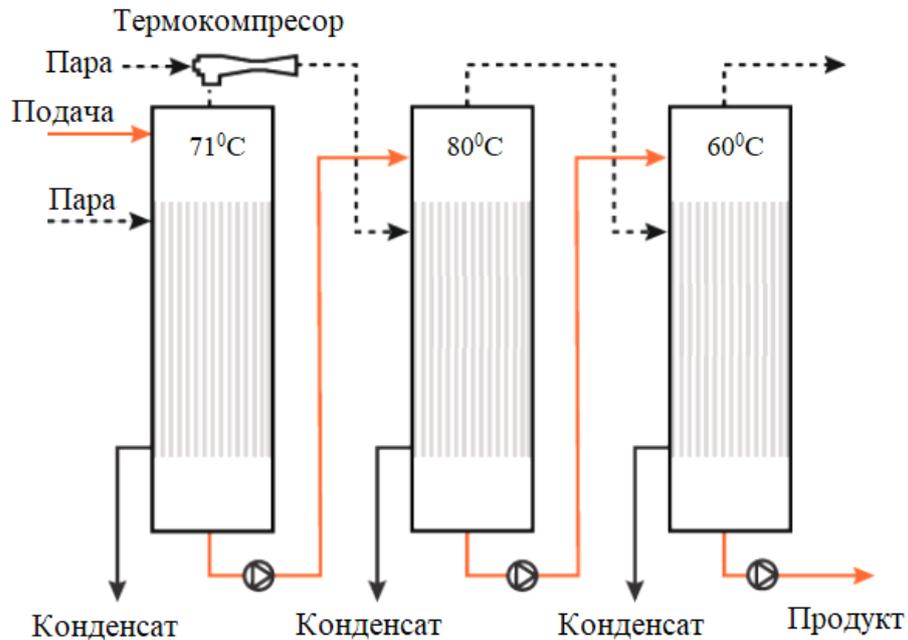


Рисунок 2.1 – Застосування термічної рекомпресії для багатокамерних випарників

Технологія забезпечує економію енергії при використанні живої пари в процесах випаровування. Пара низького тиску, що надходить з випарника, надходить у термокомпресор з ефектом вакууму, а потім з'єднується з живою парою та використовується в теплообміннику, який використовується як джерело тепла для нагрівання розчину всередині випарника. Ця технологія випаровування використовує набагато менше пари ніж конструкції з прямим паровим обігрівом, але вимагає тиску рушійної пари [10-12]. Щоб зменшити споживання енергії, термокомпресор зазвичай використовується у випарнику односторонньої дії або на першому ступені випарника з подвійним або потрійним ефектом. Технологія термічної рекомпресії може застосовуватися в розчинах з низькими температурами кипіння завдяки критичному ступеню стиснення пари.

Термопарова рекомпресія пари є простою та економічно ефективною можливістю підвищення енергоефективності за допомогою використання термічних парових компресорів. Пар захоплюється всмоктуванням у паровий компресор, де він змішується, наприклад, у співвідношенні 1:1,5 з живим паром і додатково нагрівається під вищим тиском. Потім стиснена суміш пари/парової пари використовується для нагрівання того ж або попереднього технологічного етапу. З термодинамічної точки зору, найбільш ефективним методом випаровування води є використання механічної термокомпресії пари. Цей

процес забирає пару, що випарувалася з продукту, механічно стискає її, а потім використовує пару під вищим тиском у паровій камері. Стискання пари здійснюється за допомогою радіального вентилятора або компресора. Вентилятор забезпечує відносно низьке співвідношення стиснення 1:30, що призводить до великої площі теплообміну [9, 13, 14]. Хоча вищі співвідношення стиснення можна досягти за допомогою відцентрового компресора, вентилятор став стандартом для такого типу обладнання через його високу надійність, низьку вартість обслуговування та загалом нижчі оберти на хвилину. Технологія потребує лише достатньої кількості енергії для стиснення пари, оскільки енергія прихованого тепла завжди повторно використовується. Енергію, що подається в компресор, можна отримати від електродвигуна, парової турбіни, газової турбіни або двигуна внутрішнього згоряння. У будь-якому випадку експлуатаційна економічність є надзвичайно високою.

1. Механічна рекомпресія пари передбачає стискання парів до більш високого рівня тиску за допомогою механічного компресора [10-12].

2. Насичена пара стискається механічним компресором для створення перегрітої пари з вищою температурою та ентальпією.

3. Вода (конденсат) впорскується до точки насичення – пара охолоджується, але все ще має вищу температуру та ентальпію, ніж до стискання.

4. Стисла та насичена пара направляється на нагрівальний відсік корпусу випарника, де вона конденсується і спричиняє випаровування приблизно такої ж кількості води з соку у відсіку продукту. Утворена пара повертається всмоктуванням у механічний компресор при тій же температурі та ентальпії, що й початкова пара, завершуючи енергетичний цикл.

Механічні парові компресори у фруктовій промисловості використовуються порівняно рідко у порівнянні з іншими сферами застосування, такими як молочна промисловість. Причинами цього є необхідність поділу на попереднє та фінальне випарування, часто сезонне використання установок та технічні ускладнення, що виникають під час відновлення цінних фруктових ароматів. Установки мають найнижче енергоспоживання і, отже, найнижчі експлуатаційні витрати серед усіх видів випарників [9, 13, 14]. Невелика різниця температур між нагрівальною парою та продуктом мінімізує негативний вплив на продукт. Налаштування для роботи при нижчій кількості та концентрації можна досить легко регулювати, контролюючи швидкість (об/хв) двигуна. Одним із недоліків є те, що делікатні ароматичні речовини можуть частково руйнуватися через перегрів пари під час стиснення, а також через невелику різницю температур між нагрітою парою та продуктом, потрібна відносно велика нагрівальна поверхня.

Механічна рекомпресія пари використовує механічний компресор або вентилятор для стиснення пари низького тиску, залишаючи випарник на більш високому тиску та температурі для повторного використання, як джерела тепла випаровування. Внутрішнє повторне використання пари також усуває потребу в зовнішньому конденсаторі, який потрібен більшості систем випарників для

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ	Арк.
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

конденсації пари, залишаючи останній ефект. Оскільки ступінь стиснення 1,2-1,4 достатній для підвищення температури конденсації на 6-12°C, відцентрові вентилятори використовуються завдяки їхній великій об'ємній місткості, економічності роботи та відносно невисокій вартості.

На основі вище зазначеного можна вважати, що оптимізація робочих енергетичних характеристик обладнання з виробництва харчоконцентратів потребує включення енергоефективних функцій, таких як багатоефективні системи та теплова рекомпресія пари, щоб мінімізувати споживання енергії під час роботи.

2.2 Моделювання конструкції багатоефектного випарника для виробництва концентрованого соку

Вибір випарника є ключовим фактором у всьому процесі концентрування, оскільки енергоефективність залежить від теплообмінника. Покращення поверхні теплообміну може означати значне зниження витрат. Це пов'язано з тим, що харчові продукти зазвичай мають високу термочутливість і можуть бути пошкоджені навіть при відносно короткому часі перебування через поганий розподіл. Продуктивність процесу випарника залежить від характеристик рідини: видалення води підвищує в'язкість, що зменшує швидкість теплопередачі та підвищує температуру кипіння. Термічне руйнування можна мінімізувати, використовуючи вакуумні випарники, що знижує температуру та час перебування, що забезпечує оптимальну якість продукції. Тому випарювання є дуже важливою технологічною операцією і має здійснюватися плавно.

Важливим є визначення оптимальної кількості ефектів в системі випарювання, де оптимум досягається тоді, коли існує економічний баланс між економією енергії та додатковими інвестиціями, тобто мінімізація загальних витрат. Випарювання – це видалення розчинника у вигляді пари з розчину. Це операція, яка використовується для концентрації розчину. Можуть бути однократні або багаторазові випарники. З додаванням кожного наступного ступеня економія пари в системі також збільшується. Кожен ефект у процесі представлений низкою змінних, які пов'язані рівняннями енергетичного та матеріального балансу для потоку сировини, продукту та пари для прямого надходження.

Випарники – це обладнання для теплопередачі, де механізм передачі керується природною або примусовою конвекцією. Розчин, що містить бажаний продукт, подається у випарник і нагрівається джерелом тепла, наприклад парою. Через прикладене тепло вода в розчині перетворюється на пару і конденсується, тоді як концентрований розчин або виводиться, або подається у другий випарник для подальшого концентрування [9, 13, 14]. Зростання обізнаності щодо скорочення витрат на енергоспоживання в поєднанні зі збільшенням споживання концентрованих та зневоднених продуктів харчування зробило управління енергією необхідним у харчовій промисловості. Одним із таких процесів отримання цих продуктів є

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

використання випаровування у харчовій промисловості. Процес випаровування застосовується в харчовій промисловості насамперед як засіб зменшення обсягу та ваги рідин. Тому випаровування є однією з найбільших операцій у харчовій промисловості. Енергія є найважливішим елементом витрат на експлуатацію при випаровуванні. Експлуатаційні витрати системи випарника в основному визначаються енергією, необхідною для досягнення певної швидкості випаровування. За умов стаціонарного стану має бути забезпечено баланс між енергією, що надходить, і енергією, що виходить в систему. Енергію можна зберегти, використовуючи повторно пару, що утворюється при кипінні продукту. Одним із небагатьох способів досягнення цього є багатоетапне випарювання.

Багатоефектний процес називається системою рівного потоку при якому концентрований сік та пара течуть в одному напрямку і подаються в один і той самий пристрій (який є першим та має найвищу температуру). Коли пара надходить у перший випарник, а сировина подається у останню стадію випарювання, два потоки рідини рухаються у різних напрямках, утворюючи протитечійну систему. Ця схема дозволяє уникнути обробки концентрованої рідини, яка має найвищу в'язкість на останньому етапі, на відміну від конфігурації з паралельним потоком, яка характеризується найнижчим тиском і найнижчою температурою [16, 18]. Деградація хімічних продуктів органічних сполук є природним наслідком термічної обробки, що використовується для забезпечення кращого збереження продуктів харчування. Додавання теплової енергії впливає на мікробіологічну нестабільність та якісні характеристики продуктів, зумовлюючи втрату або денатурацію важливих поживних сполук, супроводжувану змінами кольору, смаку та текстури. Контроль випаровування за допомогою аналізу температури та часу перебування є ключовим фактором у запобіганні цих небажаних реакцій.

Одноступінчастий випарник використовує більше ніж 1 кг пари для випаровування 1 кг води. Пара, що виходить з випарника, вважається відходом, тому одноступінчастий випарник можна вважати марнотратним щодо енергії, оскільки теплота випаровування вихідної пари не використовується, а викидається [16-18]. Багатоефектне випарювання – це випарювання на декількох стадіях, при якому пари, що утворюються на одній стадії, служать тепловим «паром» для наступної стадії. Таким чином, перша стадія функціонує як «генератор пару» для другої, яка, у свою чергу, діє як конденсатор для першої і так далі. Кількість «ефектів» – це кількість стадій, організованих таким чином. Перший ефект нагрівається котловим паром. Пари з останнього ефекту направляються до конденсатора. Економічні та екологічні наслідки цього результату очевидні. У багатоефектному випарнику на кожен кілограм випареної води:

1. Кількість спожитого пару обернено пропорційний кількості ефектів.
2. Кількість охолоджувальної води, що використовується в конденсаторі, обернено пропорційна кількості ефектів. Для здійснення теплопередачі на кожному ефекті має бути наявне падіння температури. Температура парів, що утворюються на даному ефекті повинна перевищувати температуру кипіння на наступному ефекті.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При виконанні розрахунків системи багатоефектного випарника, значення, які зазвичай потрібно визначити, включають площу нагрівальної поверхні в кожному ефекті, масу (кг) пари на годину, що подається та кількість пари, що виходить з кожного ефекту. На рисунку 2.2 показана масова витрата в трьохефектному випарнику. Пар від першої секції стає джерелом нагріву для другої секції. Це можливо завдяки тому, що температура кипіння другого ефекту була знижена до 60°C , що менше, ніж температура насиченості першого ефекту – 70°C [9, 13, 14]. Прихована теплота знову використовується і стає джерелом тепла третього ефекту, де температура кипіння знижена до 50°C . Випарники зазвичай оцінюються на основі швидкості випаровування – кількості води, яку вони випаровують за годину. Перший ефект має найвищу температуру кипіння, а останній – найнижчу. Кожен наступний ефект використовує пару з попереднього ефекту як джерело тепла.

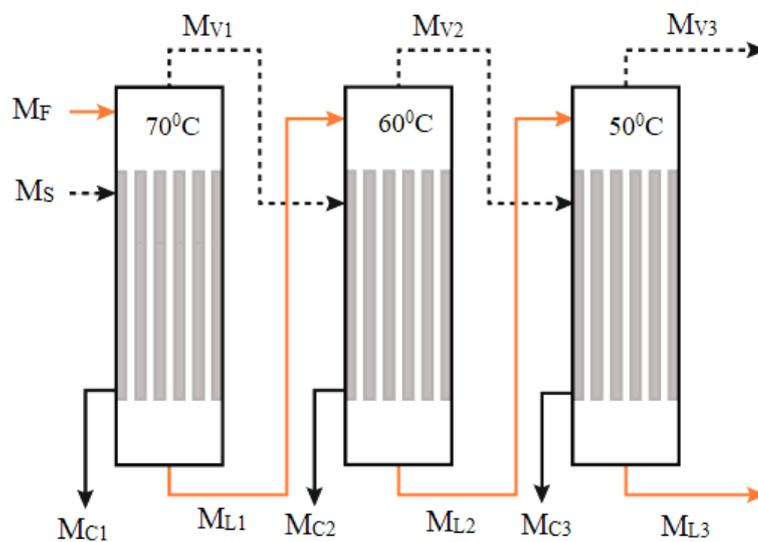


Рисунок 2.2 – Триступенева випарна установка для отримання концентрованого соку

Головною метою випарника є випаровування та видалення певної кількості розчинника з розчину (що входить у систему, повинно вийти з системи, щодо як пари так і розчину). Масовий потік сиропу позначається F , масовий потік пари – V , а масовий потік водяної пари – S , масовий потік сировини L , концентрація розчиненої речовини позначається C .

При розрахунку конструкції випарників з багатьма ефектами було виконано [21]:

1. Визначення температури кипіння на останньому ефекті на основі бажаної концентрації продукту та тиску на останньому ефекті.
2. Визначення загальної кількості водяної пари, що випарувалася в процесі масової рівноваги. Припускаючи, що $V_1 = V_2 = V_3$ (отримано L_1, L_2, L_3).
3. Розрахунок значення теплопередачі в кожному ефекті та обчислення середнього значення площі поверхні для теплоперенесення в кожному ефекті, якщо область значно відрізняється в кожному ефекті, тоді переходьте до другої ітерації.

4. Обчислення площі теплообміну у кожному новому ефекті.

Розгляньте баланс розчиненої речовини навколо системи [15]:

$$L_3 = \frac{(0.05) \left(10,000 \frac{kg}{h}\right)}{0.80} = 625 \frac{kg}{h}$$

Загальний баланс у системі [15]:

$$F = L_3 + V$$

$$V = 10,000 - 625 = 9,375 \frac{kg}{h}$$

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

Припустимо, що спочатку швидкість випаровування в кожному ефекті однакова:

$$V_1 = V_2 = V_3 = \frac{1}{3}V = \frac{1}{3}(9,375) = 3,125 \frac{kg}{h}$$

Для першого ефекту [15]:

$$F = L_1 + V_1$$

$$L_1 = 10,000 - 3,125 = 6,875 \frac{kg}{h}$$

$$x_1 = \frac{(0.05)(10,000)}{6,875} = 0.0727$$

Для другого ефекту:

$$L_1 = L_2 + V_2$$

$$L_2 = 6,875 - 3,125 = 3,750 \frac{kg}{h}$$

$$x_2 = \frac{(0.0727)(6,875)}{3,750} = 0.1333$$

Тепловий баланс з 0°C як відлікове значення. Розчини часто складаються з розчинника та розчиненої твердої речовини. За допомогою простого теплового розділення розчинник можна випарувати, залишаючи розчин з підвищеною концентрацією. Мета теплового розділення може бути

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

різною, але найчастіше йдеться про концентрування розчину, відновлення розчинника або відновлення розчиненої речовини. У харчовій промисловості розчин часто містить більше води, ніж потрібно. Коли харчовий продукт є рідиною, найпростішим способом видалення води є її випаровування. Як частина виробничого процесу, випарник має дві основні функції: обмінювати теплову енергію для поглинання розчинником та відокремлювати утворений пар, який формується з вхідного розчину.

Розрахунок значення теплопередачі в кожному ефекті та обчислення середнього значення площі поверхні для теплоперенесення в кожному ефекті, якщо область значно відрізняється в кожному ефекті, тоді переходьте до другої ітерації [15].

$$F C_{pF}(T_F - 0) + S \lambda_S = L_1 C_{pL_1}(T_1 - 0) + V_1 H_1$$

$$C_{pF} = 4.19 - 2.35x = 4.19 - 2.35(0.05) = 4.0725 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

$$\lambda_S = 2,194.89 \frac{kJ}{kg}$$

$$L_1 = F - V_1 = 10,000 - V_1$$

$$C_{pL_1} = 4.19 - 2.35x = 4.19 - 2.35(0.0727) = 4.0192 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

$$S = 1,503.49 + 1.0232V_1$$

Для другого ефекту [15]:

$$L_1 C_{pL_1}(T_1 - 0) + V_1 \lambda_{S2} = L_2 C_{pL_2}(T_2 - 0) + V_2 H_2$$

$$L_1 = L_2 + V_2; L_1 = F - V_1;$$

$$L_2 = F - V_1 - V_2 = 10,000 - V_1 - V_2$$

$$\lambda_{S2} = 2,228.22 \frac{kJ}{kg}$$

$$C_{pL_2} = 4.19 - 2.35x = 4.19 - 2.35(0.1333) = 3.8767 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

$$V_2 = 391.32 + 0.9269 V_1$$

Для третього ефекту [15]:

$$L_2 C_{pL_2} (T_2 - 0) + V_2 \lambda_{S3} = L_3 C_{pL_3} (T_3 - 0) + V_3 H_3$$

$$V_3 = L_2 - L_3; L_2 = F - V_1 - V_2;$$

$$V_3 = (10,000 - V_1 - V_2) - 625 = 9,375 - V_1 - V_2$$

$$\lambda_{S3} = 2,278.75 \frac{kJ}{kg}$$

$$C_{pL_3} = 4.19 - 2.35x = 4.19 - 2.35(0.80) = 2.31 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

$$V_2 = 4,629.21 - 0.497 V_1$$

$$391.32 + 0.9269 V_1 = 4,629.21 - 0.497 V_1$$

$$V_1 = 2,976.26 \frac{kg}{h}, V_2 = 3,150.01 \frac{kg}{h}, V_3 = 3,248.73 \frac{kg}{h}$$

$$S = 4,548.80 \frac{kg}{h}$$

Пар низького тиску, що утворюється в випарнику, може бути використаний в іншому випарнику. Один випарник можна назвати ефектом, а систему, де кілька ефектів з'єднанні послідовно, відповідно називають випарником з кількома ефектами. Парову економічність випарника з кількома ефектами можна підвищити, повторно використовуючи пар з одного ефекту, підключаючи його до парової камери іншого ефекту. Повторне використання енергії підвищує коефіцієнт корисної дії та, відповідно, енергоефективність усієї системи [19]. Якщо пар, який подається випарником, буде кип'ятити рідину в наступному ефекті, температура кипіння наступного ефекту повинна бути нижчою, ніж у першому ефекті. Тому наступний ефект повинен працювати при нижчому тиску. Отже, тиск потрібно знижувати після кожного ефекту. Випадок, коли найбільш концентрований розчин утворюється в останньому ефекті, називається прямою подачею. Альтернативний варіант полягає у зворотному потоці розчину, коли найбільш концентрований розчин утворюється в першому ефекті. Це називається зворотною подачею.

Знайдіть площу теплообміну для кожного ефекту.

Для першого ефекту [15]:

$$q = S \lambda_s = UA \Delta T_1$$

$$A_1 = \frac{\left(4,548.80 \frac{kg}{h} \times \frac{1 h}{3,600 s}\right) \left(2,194.89 \frac{kJ}{kg} \times \frac{1,000 J}{kJ}\right)}{\left(3123 \frac{W}{m^2 \cdot K} \times \frac{J/s}{W}\right) (11.94 K)} = 74.38 m^2$$

Для другого ефекту:

$$q = V_1 \lambda_{S2} = UA \Delta T_2$$

$$A_2 = \frac{\left(2,976.26 \frac{kg}{h} \times \frac{1 h}{3,600 s}\right) \left(2,228.22 \frac{kJ}{kg} \times \frac{1,000 J}{kJ}\right)}{\left(1987 \frac{W}{m^2 \cdot K} \times \frac{J/s}{W}\right) (18.76 K)} = 49.42 m^2$$

Для третього ефекту [15]:

$$q = V_2 \lambda_{S3} = UA \Delta T_3$$

$$A_3 = \frac{\left(3,150.01 \frac{kg}{h} \times \frac{kg}{h} \times \frac{1 h}{3,600 s}\right) \left(2,278.75 \frac{kJ}{kg} \times \frac{kJ}{kg} \times \frac{1,000 J}{kJ}\right)}{\left(1136 \frac{W}{m^2 \cdot K} \times \frac{J/s}{W}\right) (32.81 K)} = 53.50 m^2$$

Повторне використання пари, що утворюється в випарнику, називається так званою паровою рекомпресією, що здійснюється шляхом рекомпресії пари та повернення її в парову камеру випарника, який її виробив. Це можна зробити за допомогою парового струминного еджектора. Паровий струминний еджектор може рекомпресувати частину пари, використовуючи свіжу високопресовану пару. Це підвищує загальну економію пари. Однак, вартість цього полягає у падінні тиску свіжої пари [19]. При використанні парових струминних еджекторів метод називається тепловою паровою рекомпресією. Ще один аспект, який слід враховувати при розгляді економії пари випарника – це температура подачі. Якщо розчин не знаходиться на своїй точці кипіння при поточному тиску то необхідно використати додаткове тепло для підвищення температури перед початком випаровування. Можна використовувати окремий переднагрівач або серію переднагрівачів для підвищення температури розчину перед потраплянням у випарник. Теплообмінники зазвичай використовуються як переднагрівачі.

Короткотрубний вертикальний випарник з прямозамкненою робочою схемою є типом випарника, який зазвичай використовується у процесі випаровування соку. Цей тип випарника використовує природну циркуляцію для механізму теплообміну. Швидкість циркуляції цього типу перевищує швидкість надходження, яка залежить від теплообмінника [21]. Визначення розміру нагрівача стає важливим для забезпечення потоку розчину з верхньої частини випарника до нижньої. Цей тип випарника відносно недорогий і може

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ	Арк.
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використовуватися для нев'язких розчинів, які мають високий коефіцієнт теплопередачі та некристалічні рідини. Через слабку циркуляцію рідини в цьому типі випарника він не підходить для рідин з високою в'язкістю. У майже всіх випадках цей тип випарника працює безперервно, де швидкість надходження є постійною, а швидкість отримання концентрату також постійна.

Процес випаровування є важливим етапом у виробництві концентрованого соку. Використання випарника з багаторазовими ефектами стає все більш поширеним і відіграє важливу роль у харчовій промисловості, особливо при виробництві високоякісної сировини. Тому при оптимізації робочих енергетичних характеристик випарника необхідно враховувати такі основні параметри, як тиск, температура та швидкість потоку.

На основі розрахунків здійснено моделювання багатоефектного випарника в програмному забезпеченні SolidWorks. Процес моделювання здійснюється від початку введення сировини в ефекті 1 до виведення сировини в ефекті 3. Початковими умовами в процесі моделювання є термодинамічними параметрами з температурою 50°C. На рисунку 2.3 показані результати моделювання багатоефектного випарника в програмному забезпеченні SolidWorks. Щоб досягти необхідної різниці температур для теплообміну від конденсованої пари до соку, другий етап повинен проводитися під нижчим тиском і, отже, при нижчій температурі випаровування. Цей принцип можна повторювати для кількох подальших етапів. Можлива кількість етапів обмежена максимально дозволеною температурою продукту на першому етапі та необхідною різницею температур між етапами, при цьому також слід враховувати підвищення температури кипіння, яке викликане збільшенням концентрації сировини.

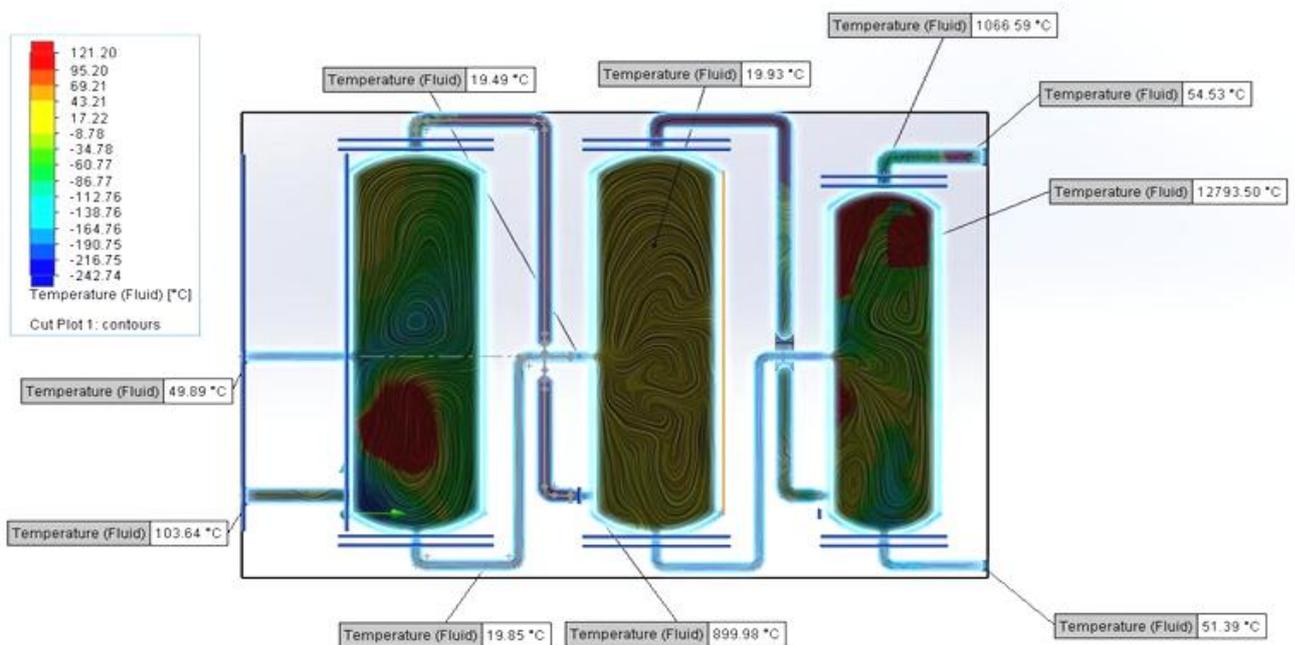


Рисунок 2.3 – Моделювання багатокорпусного випарника

Процес моделювання здійснюється від початку введення сировини в ефекті 1 до виведення сировини в ефекті 3, так що значення, які представлені в

таблиці 2.1 є загальними значеннями при різних температурах.

Таблиця 2.1 – Результати моделювання параметрів

Секція	Температура	Тиск
1	70 ⁰ С	51,8 кПа
2	60 ⁰ С	29 кПа
3	50 ⁰ С	17,5 кПа

Пар від першої секції стає джерелом нагріву для другої секції. Це можливо завдяки тому, що температура кипіння другого ефекту була знижена до 60⁰С (при 29 кПа), що менше, ніж температура насиченості першого ефекту – 70⁰С (при 51,8 кПа). Прихована теплота знову використовується і стає джерелом тепла третього ефекту, де температура температури кипіння знижена до 50⁰С (при 17,5 кПа).

На основі вищезазначеного можна вважати, що під час переробки фруктів у концентрат фруктового соку випарювання є етапом процесу з набагато найвищими енергетичними потребами. За умов стаціонарного стану має бути забезпечено баланс між енергією, що надходить, і енергією, що виходить в систему. Енергію можна зберегти, використовуючи повторно пару, що утворюється при кипінні продукту. Одним із небагатьох способів досягнення цього є багаторічне випарювання. Багаторічне випарювання – це випарювання на декількох стадіях, при якому пари, що утворюються на одній стадії, служать тепловим «паром» для наступної стадії. Таким чином, перша стадія функціонує як «генератор пару» для другої, яка, у свою чергу, діє як конденсатор для першої і так далі. Кількість «ефектів» – це кількість стадій, організованих таким чином. Перший ефект нагрівається котловим паром. Пари з останнього ефекту направляються до конденсатора. Економічні та екологічні наслідки цього результату очевидні. З додаванням кожного наступного ступеня економія пари в системі також збільшується. Кожен ефект у процесі представлений низкою змінних, які пов'язані рівняннями енергетичного та матеріального балансу для потоку сировини, продукту та пари для прямого надходження.

Зазначено, що оптимізація робочих енергетичних характеристик обладнання з виробництва харчоконцентратів потребує включення енергоефективних функцій, таких як багаторічні системи та тепла рекомпресія пари, щоб мінімізувати споживання енергії під час роботи. Пар низького тиску, що утворюється в випарнику, може бути використаний в іншому випарнику. Парову економію випарника з кількома ефектами можна підвищити, повторно використовуючи пар з одного ефекту, підключаючи його до парової камери іншого ефекту.

В свою чергу термічна рекомпресія пари може бути застосована до системи випарника для покращення економії пари. Термокомпресор підвищує температуру насичення пари, виходячи з ефекту, який повторно використовується для нагрівання наступного ефекту. Економія пари випарника сильно залежить від початкової температури сировини при його надходженні в

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ	Арк.
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

систему випарника і властивостей концентрованої рідини. Сировина, що надходить в перший ефект при температурі вище точки кипіння, спочатку спалахує деякою кількістю пари ще до того, як почнеться теплообмін у випарнику. Таким чином, економічність пари буде вищою, ніж якби початкова температура подачі була нижчою за точку кипіння, що вимагало б передачі тепла рідині, перш ніж відбудеться випаровування.

Технологія забезпечує економію енергії при використанні живої пари в процесах випаровування. Пара низького тиску, що надходить з випарника, надходить у термокомпресор з ефектом вакууму, а потім з'єднується з живою парою та використовується в теплообміннику, який використовується як джерело тепла для нагрівання розчину всередині випарника. Щоб зменшити споживання енергії, термокомпресор зазвичай використовується у випарнику односторонньої дії або на першому ступені випарника з подвійним або потрійним ефектом.

Здійснено розрахунок конструкції випарників з багатьма ефектами, а саме визначення температури кипіння на останньому ефекті на основі бажаної концентрації продукту та тиску на останньому ефекті; визначення загальної кількості водяної пари, що випарувалася в процесі масової рівноваги; розрахунок значення теплопередачі в кожному ефекті та обчислення середнього значення площі поверхні для теплоперенесення в кожному ефекті.

Вважається за необхідне при оптимізації робочих енергетичних характеристик випарника враховувати такі основні параметри, як тиск, температура та швидкість потоку. На основі розрахунків здійснено моделювання багатоефектного випарника в програмному забезпеченні SolidWorks. Процес моделювання здійснюється від початку введення сировини в ефекті 1 до виведення сировини в ефекті 3. Початковими умовами в процесі моделювання є термодинамічними параметрами з температурою 50°C. Щоб досягти необхідної різниці температур для теплообміну від конденсованої пари до соку, другий етап повинен проводитися під нижчим тиском і, отже, при нижчій температурі випаровування. Цей принцип можна повторювати для кількох подальших етапів. Можлива кількість етапів обмежена максимально дозвальною температурою продукту на першому етапі та необхідною різницею температур між етапами, при цьому також слід враховувати підвищення температури кипіння, яке викликане збільшенням концентрації сировини. Пар від першої секції стає джерелом нагріву для другої секції. Це можливо завдяки тому, що температура кипіння другого ефекту була знижена до 60°C (при 29 кПа), що менше, ніж температура насиченості першого ефекту – 70°C (при 51,8 кПа). Прихована теплота знову використовується і стає джерелом тепла третього ефекту, де температура кипіння знижена до 50°C (при 17,5 кПа).

Констатовано, що повторне використання енергії підвищує коефіцієнт корисної дії та, відповідно, енергоефективність усієї системи. Якщо пар, який подається випарником, буде кип'ятити рідину в наступному ефекті, температура кипіння наступного ефекту повинна бути нижчою, ніж у першому ефекті. Тому наступний ефект повинен працювати при нижчому тиску. Отже, тиск потрібно знижувати після кожного ефекту.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ	Арк.
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Контроль основних параметрів у процесі отримання концентрованого соку

Процес випаровування є досить простим процесом, який, по суті, полягає у кип'ятінні сировини до більш високої концентрації шляхом видалення випарованої води. Бажана концентрація отриманого розчину може змінюватися, але часто прагнуть до сухої речовини у 80%. Контроль процесу, попри простоту процесу, є дуже важливим. Якщо вміст сухої речовини наближається до 85%, розчин може затвердівати і його доведеться видалити з системи вручну. Процес випаровування має бути енергоефективним, що вимагає:

- відповідний теплообмін: швидкість теплообміну залежить від типу випарника, термофізичних характеристик продуктів, площі теплообміну та її забруднення;
- ефективне розділення рідини та пари: це критично важливо, щоб не втратити якісну технологію;
- енергетичне відновлення: утворювана пара є джерелом енергії і для більш економічного процесу її не слід марнувати;
- обробка продукту: робота з харчовими продуктами означає, що продукт може бути дуже чутливим до тепла та пошкоджений під час процесу.

Пластинчастий теплообмінник. Щоб підвищити температуру та досягти кипіння вхідного розчину часто зручно використовувати теплообмінники. Теплообмінник – це, по суті, енергоефективний пристрій для передачі тепла від одного середовища до іншого і може бути побудований різними способами. У харчовій промисловості пластинчасті теплообмінники поширені через низьку в'язкість розчинів. Площа пластини створює велику контактну поверхню де можлива передача тепла. Разом із великою площею тонкі шари забезпечують, що більшість розчину контактує з пластинами. Вся конструкція також спричинює турбулентний потік, що покращує здатність теплообміну. Всі інші аспекти, такі як схема потоку та кількість пластин, спеціально обираються з метою покращення теплопередачі теплообмінника.

Сепаратор розділення пар-рідина – це частина системи, де пара відділяється від розчину, що все ще перебуває в рідкій фазі. Принцип дуже простий: використовується сила тяжіння у вертикальній судині, що спричиняє осідання рідини на дно та підйом пари догори. Пару та рідину можна відкачувати через різні виходи і процес випаровування завершується. Внаслідок цього отримана рідина матиме більшу концентрацію, ніж вхідний розчин.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ		
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розроб.</i>	<i>Ревенко</i>				<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушіє</i>
<i>Перевір.</i>	<i>Хорольський</i>					38	6
<i>Н. Контр.</i>	<i>Омельченко</i>				ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО		
<i>Затверд.</i>	<i>Хорольський</i>						

Випарник – це пристрій, який концентрує розчин шляхом видалення частини його розчинника (зазвичай води) у вигляді пари. Зазвичай усі випарники складаються з однакових компонентів. Насправді їх можна визначити як теплообмінники у великій камері з резервуаром для введення рідини, якою в більшості випадків є конденсуюча пара, що постачає приховану теплоту. Якщо відбувається лише процес випаровування, пристрій називають одноступеневим випарником. Якщо пара, що утворюється, повторно використовується в наступній камері, тоді можливо створити нові конфігурації, які називаються випарниками з багатьма ефектами (де число ефектів дорівнює кількості випарників).

У традиційному процесі виробництва концентрованого соку оператор процесу зазвичай не може точно контролювати температуру та процес змішування, що може вплинути на якість продукту [21]. Крім того, виробнича потужність традиційного процесу зазвичай невелика, тому велика кількість сиропу зазнає змін хімічного складу, що ускладнює її переробку у концентрат. Енергія, яка необхідна в традиційному процесі, висока як для палива для варіння, так і для енергії, що витрачається людьми на приготування. З цієї причини необхідно впровадження технології для більш ефективного виробництва фруктового концентрату за допомогою багатоефектного випаровування задля регулювання та підтримки робочої температури, що дозволяє отримати густу сировину більш однорідної консистенції.

Випарник з множинним ефектом – це тип промислового процесу, який використовується для концентрації розчинів, як правило, рідин, шляхом википання розчинника (зазвичай води), щоб залишити після себе більш концентрований розчин або твердий продукт. У процесі використовується серія ємностей-випарників, кожна з яких працює при поступово нижчому тиску та температурі, щоб мінімізувати споживання енергії та підвищити ефективність. Випарники з множинним ефектом – це серія посудин, які працюють при поступово нижчому тиску та температурі для мінімізації споживання енергії та підвищення ефективності [25]. У випарнику з багаторазовим ефектом пара, що утворюється в одній посудині, використовується для нагрівання наступної посудини, зменшуючи кількість енергії, необхідної для випаровування розчинника. Це досягається шляхом пропускання пари з першої посудини через теплообмінник для нагріву рідини в другій посудині. Потім пара конденсується, а рідина повертається в першу посудину для повторення процесу.

У випарнику з множинним ефектом застосовується короткотрубчастий випарник, який складається з вертикальної циліндричної оболонки, що включає короткий вертикальний трубчастий пучок у нижній частині. Вихід пари передбачений у верхній кришці, а густе відведення концентрату знизу. Зазвичай пучок труб має висоту не більше 150 см і діаметр трубки (зовні) не більше 75 мм (від 25 мм до 75 мм). У цьому випарнику розчин, що підлягає випаровуванню, знаходиться всередині трубок, а пар витікає за межі трубок у паровій скрині. Перегородки вбудовані в парову скриню для сприяння рівномірному розподілу пари. Відбір конденсату здійснюється в будь-якій зручній точці біля нижнього трубного листа, в той час як неконденсований газ,

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

такий як повітря, виводиться в атмосферу з точки поруч з верхнім трубним листом, рис. 3.1.

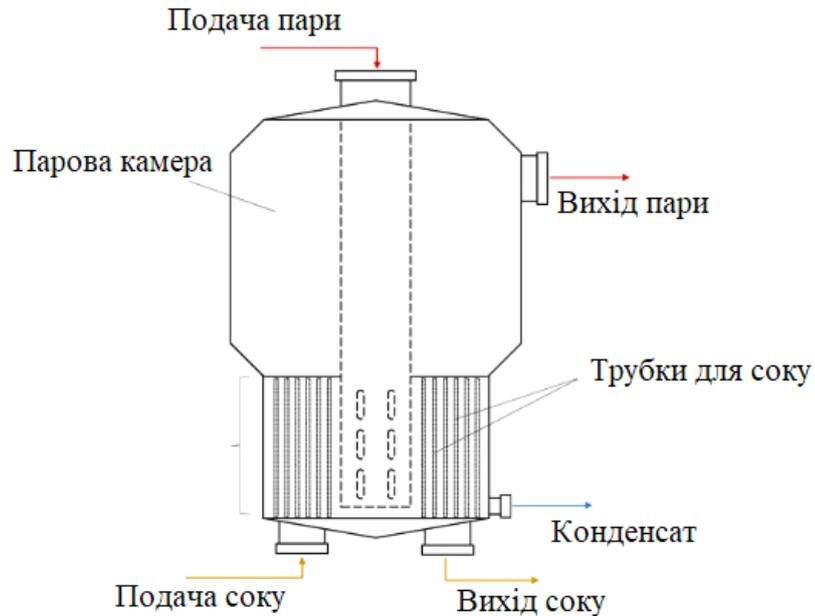


Рисунок 3.1 – Короткотрубчастий випарник

Рідкий розчин/сік вводять з боку трубки і пара потрапляє у парову скриню. Сік покриває верхню частину трубок, а передача тепла киплячої рідини всередині трубок відбувається за рахунок конденсації пари на зовнішній стороні трубок. Пара, що утворюється, піднімається по трубках, надходить на поверхню рідини, з якої відводиться в паровий простір і видаляється з отвору для виходу пари [27]. Пара подається поза трубами, а конденсат проходить через порівняльний вихід, а нещільні гази виходять через вентиляційний отвір. Рідина в бічних трубках прогривається паром і починає пузиритися. Коли рідина пузириться то вона хлине вгору по трубках і повертається через вогнищевий приймач вниз. Пара виходить через верхні випускні отвори до тих пір поки не буде досягнута необхідна концентрація сировини.

Важливим у процесі управління випарником з множинним ефектом є контроль основних параметрів за допомогою контрольно-вимірювальних засобів. Контроль та регулювання таких змінних як температура, тиск, швидкість потоку та рівень рідини у різних частинах випарника є ключовими показниками. Контролюючи означені змінні можна оптимізувати процес випаровування та запобігти будь-яким потенційним проблемам у процесі концентрування фруктового соку [22-24, 26]. На рисунку 3.2 представлена схема багатоефектного процесу випаровування із застосуванням контрольно-вимірювальних приладів (автоматизований контроль процесу концентрації фруктового соку). Запропоновано контроль процесу концентрації фруктового соку на основі системи управління, яке заснована на використанні датчиків контролю температури, тиску, регулювання швидкості потоку та рівня рідини.

Контроль температури (Т). Температура має вирішальне значення в процесі випаровування. Різні ефекти у випарнику працюють при різних температурах. Система управління за допомогою датчиків вимірює

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

температуру в різних точках. Наприклад, він відстежує температуру пари, що надходить на перший ефект, і температуру пари, що виходить з кожного наступного ефекту. На основі цих вимірювань система управління може регулювати витрату пари. Якщо температура в ефекті занадто низька, це може збільшити подачу пари для цього ефекту. І навпаки, якщо температура занадто висока, це може зменшити потік пари. Точний контроль допомагає підтримувати правильні умови для ефективного випаровування.

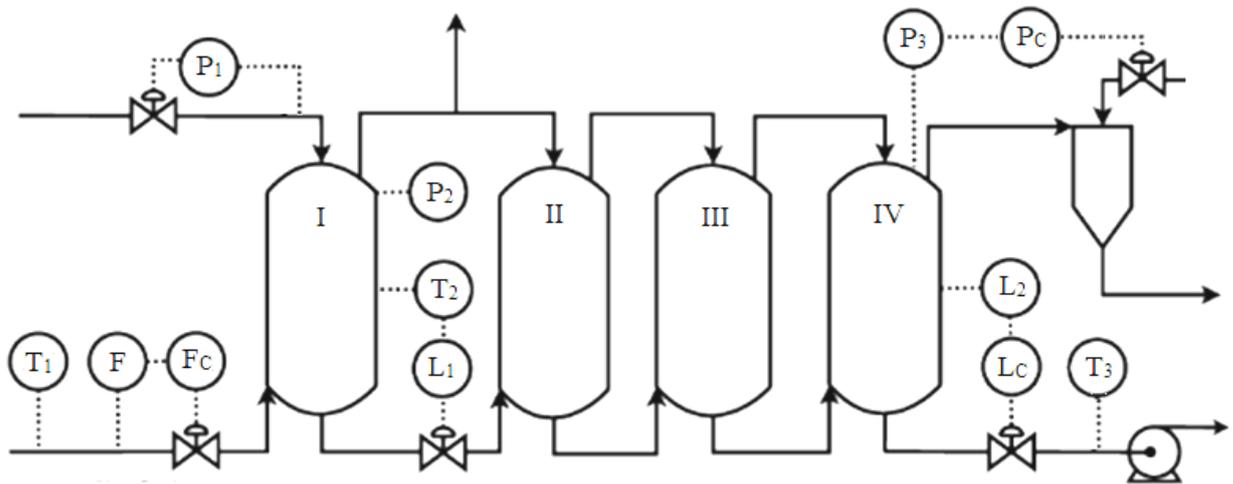


Рисунок 3.2 – Схема багатоефектного процесу випаровування із застосуванням контрольно-вимірювальних приладів

Контроль тиску (P). Тиск також відіграє важливу роль. Система управління стежить за тиском всередині кожного ефекту. Правильна різниця тиску між ефектами необхідна для того, щоб пара перетікала від одного ефекту до іншого. Датчики фіксують будь-які зміни тиску і система управління може вжити коригувальних заходів. Він може регулювати потік газів, що не конденсуються або роботу вакуумних насосів. Підтримуючи правильний тиск, система забезпечує плавне переміщення пари через випарник, підвищуючи загальну ефективність.

Регулювання швидкості потоку (F). Швидкість потоку соку і пари потрібно ретельно регулювати. Система управління керує потоком у випарник і рівномірно розподіляє їх між різними ефектами, а також контролює швидкість потоку пари для кожного ефекту. Для відведення рідини використовуються насоси і клапани. Якщо швидкість потоку занадто низька, система може збільшити швидкість насоса. Якщо швидкість занадто висока то вона може дроселювати у клапани. Аналогічно для пари регулючі клапани, які керують подачею пари для кожного ефекту, стежачи за тим, щоб для випаровування використовувалася потрібна кількість пари.

Контроль рівня (L). Підтримка правильного рівня рідини в кожному ефекті має важливе значення. Якщо рівень буде занадто високим це може стати причиною затоплення і порушити процес випаровування. Якщо рівень занадто низький це може призвести до сухих умов. Система управління використовує датчики рівня для вимірювання рівня рідини в кожному ефекті. Виходячи з цих

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

показань він може відкривати або закривати клапани, щоб додавати або видаляти рідину в міру необхідності. Таким чином він підтримує рівень рідини в оптимальному діапазоні для ефективної роботи.

У процесі багатоефектного випаровування різні секції у випарнику працюють за різних температур. Система керування використовує датчики для вимірювання температури в різних точках, які контролюють температуру пари, що надходить у перший ефект і температуру пари, що виходить з кожного наступного ефекту. Датчик температури розміщено на вході пари для вимірювання температури пари T_1 . Інший датчик температури розміщено всередині розчину безпосередньо під його поверхнею для вимірювання температури кипіння T_2 , а також в останньому багатосекційному випарнику T_3 . Датчики тиску P пропонується використовувати в першому і останньому випарниках. Система управління стежитиме за тиском всередині кожного ефекту. Правильна різниця тиску між ефектами необхідна для того, щоб пара перетікала від одного ефекту до іншого. Датчики фіксують будь-які зміни тиску і система управління може вжити коригувальних заходів. Швидкість потоку соку і пари пропонується контролювати на вході F . Підтримка правильного рівня рідини в кожному ефекті має важливе значення. Датчик рівня L пропонується використовувати в першому і останньому випарниках.

Включення контролю основних параметрів багатосекційного випаровування забезпечує швидкі та плавні зміни під час коливань тих чи інших параметрів у процесі концентрування шляхом ефективною координації різних робочих параметрів (тобто потоків або підвищення температури кипіння) для забезпечення мінімального порушення системи. Рівень резервуарів для напоїв також підтримується в межах бажаних рівнів, щоб забезпечити оптимальний рівень запасів і плавні переходи під час збурень і розладів процесу. Ефективність керування не погіршуватиметься з часом завдяки постійному моніторингу.

Управління багатоефектними випарниками відрізняється від управління одиночним випарником. Це пояснюється тим, що у багатоефектних випарниках вихід одного випарника використовується як вхід для наступного. Таким чином, поведінка кожного випарника залежить від того, що він отримує від попереднього. Управління випарником з множинним ефектом може забезпечити ефективний загальний контроль багатоефектних випарників, оскільки він враховує взаємодію між послідовними випарниками. Управління багатоефектним випарником включає два контури управління, кожен із яких контролюється окремим PID-регулятором. Один регулятор називається первинним, а інший – вторинним [20]. Перший контролює керовану змінну, тоді як другий контролює керовану змінну для маніпулювання. Первинному регулятору задається встановлене значення на основі бажаного виходу керованої змінної, тоді як вихід первинного регулятора використовується як встановлене значення для вторинного регулятора. Контрольованою змінною є концентрація твердих речовин у розчині, тоді, як змінною на яку впливають, є витрата пари, що використовується для випаровування – це встановлене значення концентрації у первинному PID-регуляторі (бажане значення концентрації твердих речовин), тоді як фактична концентрація твердих речовин

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

у вихідному розчині застосовується як зворотний зв'язок. Вихід первинного регулятора – це бажана витрата пари, яка служить встановленим значенням для вторинного PID-регулятора. Фактичне значення витрати пари, що подається до випарника I, використовується як зворотний зв'язок для вторинного регулятора.

На основі вище зазначеного можна вважати, що випарник з множинним ефектом – це тип промислового процесу, який використовується для концентрації розчинів, як правило, рідин, шляхом википання розчинника (зазвичай води), щоб залишити після себе більш концентрований розчин або твердий продукт. У процесі використовується серія ємностей-випарників, кожна з яких працює при поступово нижчому тиску та температурі, щоб мінімізувати споживання енергії та підвищити ефективність.

Зазначено, що важливим у процесі управління випарником з множинним ефектом є контроль основних параметрів за допомогою контрольно-вимірювальних засобів. Контроль та регулювання таких змінних як температура, тиск, швидкість потоку та рівень рідини у різних частинах випарника є ключовими показниками. Контролюючи означені змінні можна оптимізувати процес випаровування та запобігти будь-яким потенційним проблемам у процесі концентрування фруктового соку.

Запропоновано контроль процесу концентрації фруктового соку на основі системи управління, яка заснована на використанні датчиків контролю температури, тиску, регулювання швидкості потоку та рівня рідини. Система керування використовує датчики для вимірювання температури в різних точках, які контролюють температуру пари, що надходить у перший ефект і температуру пари, що виходить з кожного наступного ефекту. Датчик температури розміщено на вході пари для вимірювання температури пари T_1 . Інший датчик температури розміщено всередині розчину безпосередньо під його поверхнею для вимірювання температури кипіння T_2 , а також в останньому багатосекційному випарнику T_3 . Датчики тиску P пропонується використовувати в першому і останньому випарниках. Система управління стежитиме за тиском всередині кожного ефекту. Правильна різниця тиску між ефектами необхідна для того, щоб пара перетікала від одного ефекту до іншого. Датчики фіксують будь-які зміни тиску і система управління може взяти коригувальних заходів. Швидкість потоку соку і пари пропонується контролювати на вході F . Підтримка правильного рівня рідини в кожному ефекті має важливе значення. Датчик рівня L пропонується використовувати в першому і останньому випарниках.

Вважається, що включення контролю основних параметрів багатосекційного випаровування забезпечує швидкі та плавні зміни під час коливань тих чи інших параметрів у процесі концентрування шляхом ефективної координації різних робочих параметрів (тобто потоків або підвищення температури кипіння) для забезпечення мінімального порушення системи. Рівень резервуарів для напоїв також підтримується в межах бажаних рівнів, щоб забезпечити оптимальний рівень запасів і плавні переходи під час збурень і розладів процесу. Ефективність керування не погіршуватиметься з часом завдяки постійному моніторингу.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ	Арк.
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Магістерська робота присвячена оптимізації робочих енергетичних характеристик обладнання з виробництва харчоконцентратів. У роботі зазначено, що концентрати – це речовини з яких були видалені надлишки води або інші розріджувачі. В результаті цього процесу виходить більш щільний і сильнодіючий продукт. Концентрати можуть бути рідкими, твердими або напівтвердими залежно від їх застосування та способу виробництва. Наприклад, концентрат апельсинового соку є рідкою формою, тоді як сухе молоко є твердим концентратом. Процес концентрації дозволяє виробникам транспортувати та зберігати продукцію більш ефективно, тоді як споживачі отримують вигоду від більш тривалого терміну зберігання та стабільної якості.

У першому розділі здійснено аналіз обладнання для виготовлення харчоконцентратів. Зазначено, що сокові концентрати виготовляються шляхом видалення води зі свіжого фруктового або овочевого соку, перетворюючи на густий сироп з високим вмістом розчинних сухих речовин. Поширені методи концентрації включають вакуумну концентрацію, концентрацію заморожуванням та концентрацію мембрани. Кожен з цих методів зберігає смак і поживні речовини. Одним з поширених методів отримання сокових концентратів є вакуумна концентрація. При цьому процесі сік нагрівається під низьким тиском, дозволяючи воді випаровуватися без шкоди для якості соку. Метод не тільки допомагає ефективно видаляти воду, але й відіграє вирішальну роль у збереженні смаку, гарантуючи, що кінцевий концентрат дуже нагадує свіжий сік, з якого він походить. Працюючи в умовах вакууму, сік можна концентрувати при нижчих температурах, що мінімізує теплове пошкодження ніжних смаків і поживних речовин.

Аналіз літературних джерел дав змогу виокремити основні типи випарників, які використовуються: з природною циркуляцією, з примусовою циркуляцією та плівкові випарники. Випарник – це пристрій, який концентрує розчин шляхом видалення частини його розчинника (зазвичай води) у вигляді пари. Вважається, що дизайн випарника є ключовим фактором у всьому процесі, оскільки енергоефективність залежить від теплообмінника. Покращення поверхні теплообміну може означати значне зниження витрат.

Задля оптимізації робочих енергетичних характеристик обладнання з виробництва харчоконцентратів запропоновано включення енергоефективних компонентів, таких як багатоефективні системи та теплова рекомпресія пари, щоб мінімізувати споживання енергії під час роботи. Пар низького тиску, що утворюється в випарнику, може бути використаний в іншому випарнику. Парову економічність випарника з кількома ефектами можна підвищити, повторно використовуючи пар з одного ефекту, підключаючи його до парової камери іншого ефекту. Термічна рекомпресія пари може бути застосована до

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Ревенко			Оптимізація робочих енергетичних характеристик обладнання з виробництва харчоконцентратів	Лім.	Арк.	Аркушіє
Перевір.		Хорольський					44	2
Н. Контр.		Омельченко			ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО			
Затверд.		Хорольський						

системи випарника для покращення економії пари. Термокомпресор забезпечує економію енергії при використанні живої пари в процесах випаровування. Пара низького тиску, що надходить з випарника, надходить у термокомпресор з ефектом вакууму, а потім з'єднується з живою парою та використовується в теплообміннику, який використовується як джерело тепла для нагрівання розчину всередині випарника. Щоб зменшити споживання енергії, термокомпресор зазвичай використовується на першому ступені випарника з подвійним або потрійним ефектом.

Вважається за необхідне при оптимізації робочих енергетичних характеристик випарника враховувати такі основні параметри, як тиск, температура та швидкість потоку. На основі розрахунків здійснено моделювання багатоефектного випарника в програмному забезпеченні SolidWorks. Початковими умовами в процесі моделювання є термодинамічні параметри з температурою 50°C. Щоб досягти необхідної різниці температур для теплообміну від конденсованої пари до соку, другий етап повинен проводитися під нижчим тиском і, отже, при нижчій температурі випаровування. Цей принцип можна повторювати для кількох подальших етапів. Можлива кількість етапів обмежена максимально дозволеною температурою продукту на першому етапі та необхідною різницею температур між етапами. Пар від першої секції стає джерелом нагріву для другої секції. Це можливо завдяки тому, що температура кипіння другого ефекту була знижена до 60°C (при 29 кПа), що менше, ніж температура насиченості першого ефекту – 70°C (при 51,8 кПа). Прихована теплота знову використовується і стає джерелом тепла третього ефекту, де температура температури кипіння знижена до 50°C (при 17,5 кПа). Повторне використання енергії підвищує коефіцієнт корисної дії та, відповідно, енергоефективність усієї системи.

У третьому розділі запропоновано контроль процесу концентрації фруктового соку на основі системи управління, яка заснована на використанні датчиків контролю температури, тиску, регулювання швидкості потоку та рівня рідини. Система керування використовує датчики для вимірювання температури в різних точках, які контролюють температуру пари, що надходить у перший ефект і температуру пари, що виходить з кожного наступного ефекту. Датчики тиску P пропонується використовувати в першому і останньому випарниках. Швидкість потоку соку і пари пропонується контролювати на вході F. Датчик рівня L пропонується використовувати в першому і останньому випарниках.

Включення контролю основних параметрів багатосекційного випаровування забезпечує швидкі та плавні зміни під час коливань тих чи інших параметрів у процесі концентрування шляхом ефективною координації різних робочих параметрів (потоків або підвищення температури кипіння) для забезпечення мінімального порушення системи. Рівень резервуарів для напоїв також підтримується в межах бажаних рівнів, щоб забезпечити оптимальний рівень запасів і плавні переходи під час збурень і розладів процесу. Ефективність керування не погіршуватиметься з часом завдяки постійному моніторингу.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Process intensification in concentration of fruit juice by rotating packed bed
URL: <http://20.198.91.3:8080/jspui/bitstream/123456789/5284/2/PhD%20Thesis%28Chemical%20Engineering%29Moumita%20Sharma.pdf>.
2. Different types of concentrates explained: food, fragrance, and industrial use cases. URL: <https://fuelyourdigital.com/post/different-types-of-concentrates-explained-food-fragrance-and-industrial-use-cases/>.
3. How to make fruit juice concentrate? URL: <https://www.juicemakingmachine.com/faq/fruit-juice-concentrate.html>.
4. Харчові концентрати. Режим доступу: https://studwood.net/2143615/tovarovedenie/harchovi_kontsentrati.
5. Концентрація соку. Режим доступу: <https://applications.bucherunipektin.com/uk/juice-concentration>.
6. Посібник з обладнання для виробництва соку. Режим доступу: <https://www.weishumachinery.com/uk/blog/complete-guide-juice-equipment>.
7. Food concentrates – what are they and where do we find them? URL: <https://foodcom.pl/en/food-concentrates-what-are-they-and-where-do-we-find-them/>.
8. Investigating concentrates: types, benefits, and top picks. URL: <https://kourosfoods.com/articles/best-concentrates/>.
9. Evaporator handbook. URL: https://userpages.umbc.edu/~dfrey1/ench445/apv_evap.pdf.
10. Випарні апарати з механічною рекомпресією пару. Режим доступу: <https://tte.com.ua/випарні-апарати-з-механічною-рекомпресією>.
11. Енергетична ефективність роботи багатокорпусних випарних установок. Режим доступу: <https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/11518/>.
12. Випарні апарати з термореконпресією пару. Режим доступу: <https://tte.com.ua/випарні-апарати-з-термореконпресією>.
13. Energetically optimized concentration of fruit juices. URL: <https://www.bucherunipektin.com/sites/default/files/2022-06.14>.
14. The essentials of continuous evaporation. URL: <https://www.aische.org/resources/publications/cep/2018/may/essentials-continuous-evaporation>.
15. Evaporation compilation of lectures and solved problems. URL: <https://pdfcoffee.com/evaporation-chemical-engineering-series-2-pdf-free.html>.
16. Багатокорпусні випарні установки. Режим доступу: <https://studfile.net/preview/10002555/page:27/>.
17. Однокорпусні випарні установки. Режим доступу: <https://studfile.net/preview/10002555/page:25/>.
18. Аналіз конструкції багатокорпусних випарних установок. Режим доступу: https://vuzlit.com/2134980/analiz_konstruktsiyi_bagatokorpusnih_ustanovok.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

19. Modelling and control of an evaporation process. URL: <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=7471261&fileId=7471277>.

20. Novel control system for multi-effect evaporator incorporating cascade and feed-forward controls. URL: <http://ijlemr.com/papers/volume3-issue2/13-IJLEMR-33055.pdf>.

21. Multi effect evaporator design calculation for brown sugar production using computational fluid dynamics. URL:

22. Автоматизація процесу випарювання. Режим доступу: https://studwood.net/1627624/meditsina/avtomatizatsiya_protsestu_viparyuvannya.

23. Автоматизація процесу випаровування соків на базі чотирьохкорпусної випарної установки на основі контролера tsx mirco 3721 фірми shneider electric. Режим доступу: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/12706/2/Conf_2015v1.

24. Автоматизоване керування випарною установкою на основі інтелектуальних регуляторів. Режим доступу: https://uacademic.info/ua/document/0823U101499#google_vignette.

25. Багатокорпусна випарна установка для концентрації дифузійного соку у виробництві цукру з буряка. Режим доступу: <https://essuir.sumdu.edu.ua/items/f442e3cd-5b7a-4f0b-ba31-035c7ddd4ac0>.

26. Digital twin for monitoring of industrial multi-effect evaporation. URL: <https://www.mdpi.com/2227-9717/7/8/537>.

27. Випарні апарати. Режим доступу: <https://studfile.net/preview/7206761/page:3/>.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		