

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 переробних і харчових
виробництв»

_____ Цвіркун Л.О.
«___» _____ 2026 року

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

на здобуття ступеня вищої освіти «Бакалавр»
зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
за освітньою програмою «Обладнання переробних і харчових виробництв»

на тему: **«УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ КРИСТАЛІЗАЦІЇ
ЦУКРУ»**

Виконав:

здобувач вищої освіти _____ **Спільняк Ігорь Євгенійович** _____
(прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Керівник:

_____ **зав.каф., к.т.н., доцент, Омельченко О.В.** _____
(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
2026

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 заочна
Ступінь бакалавр
Галузь знань Механічна інженерія
Освітня програма Обладнання переробних і харчових виробництв

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Гарант освітньої програми «Обладнання
переробних і харчових виробництв»
Цвіркун Л.О.
« » 2026 року

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

Спільняку Ігорю Євгенійовичу
(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Удосконалення обладнання для кристалізації цукру»

Керівник роботи к.т.н., доцент, Омельченко О.В.
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Затверджено: наказом ректора Криворізького національного університету від «28» січня 2026 р. № 22-с.

2. Строк подання здобувачем ВО роботи « 15 » травня 2026 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 кристалізації цукру.
3. Оптимізація обладнання для кристалізації цукру.
4. Аналіз результатів досліджень.
5. Висновки.

6. Список використаних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

Обладнання для кристалізації цукру.

Оптимізація обладнання для кристалізації цукру.

Система контролю процесу кристалізації.

6. Дата видачі завдання «30» січня 2026 р.

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи
1	Вступ	31.01.2026-15.02.2026
2	Аналіз обладнання для кристалізації цукру	16.02.2026-08.03.2026
3	Оптимізація обладнання для кристалізації цукру	09.03.2026-05.04.2026
4	Аналіз результатів досліджень	06.04.2026-26.04.2026
5	Висновки по роботі	27.05.2026-10.05.2026
6	Оформлення роботи і подання до захисту	11.05.2026-15.05.2026

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Спільняк І.Є.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Омельченко О.В.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Обсяг і структура бакалаврської роботи. Повний обсяг бакалаврської роботи – 51 сторінка, в тому числі основного тексту – 48 сторінки. Робота містить 11 рисунків, 4 таблиці. Список використаних джерел складається з 40 найменувань.

Об'єкт роботи – періодичний кристалізатор.

Предмет роботи – процес кристалізації цукру.

Мета роботи – удосконалення обладнання для кристалізації цукру.

У роботі зазначено, що в промисловості кристалізація здійснюється в системах змішувального типу, що може впливати на небажані властивості продукту. Операцію застосовують для отримання такої сировини, як солі та цукор. У виробництві цукру кристалізація є заключною фазою після екстракції та очищення, що дає напівфабрикат у твердому стані, легкий для зберігання та транспортування. Кристалізація – це процес під час якого відбувається фазовий перехід, що проходить від відносно неупорядкованої системи, якою є розчин до набагато більш впорядкованої системи, якою є кристал.

Вважається, що змішування є однією з обмежуючих умов процесу кристалізації. Ефективність змішування є критичним фактором, оскільки невідповідний вибір змішувача та швидкості змішування може негативно вплинути на формування кристалів. Тому обрано конструкцію, що базується на пасивному змішуванні. Конструкція лопатей, що складають робоче колесо дозволяє рідині переміщуватися в резервуарі радіально та тангенціально з невеликим вертикальним рухом. Змінне коливання відносно горизонтальної осі сприятиме досягненню найвищої швидкості кристалізації і, відповідно, досягнення стабільної фази за найменший час.

Одним із недоліків обладнання для кристалізації є відсутність контролю за температурою розчину та його подачею в змішувальний резервуар. Тому запропоновано удосконалену систему контролю в кристалізаторі встановивши додаткові датчики з метою кращого розуміння різних процесів, що виникають під час кристалізації: рефрактометри дозволяють вимірювати вміст розчинених твердих речовин у розчині; мікрохвильовий датчик вимірює вмісту цукру та дозволяє вимірювати вміст сухих речовин; в'язкомір вимірює в'язкість цукрового розчину; кондуктометри вимірюють здатність розчину проводити електричний струм; датчики температури та тиску; датчик витрати конденсату (конденсатометр) дозволяє вимірювати потік конденсованої пари або конденсату в замкненій паровій системі.

Досліджено процес кристалізації різних видів цукру. Для дослідження обрано наступні зразки, а саме гранульований білий цукор та коричневий цукор. Результати свідчать, що різні види цукру демонструють унікальні властивості кристалізації, що походить від їхньої молекулярної структури. Гранульований білий цукор утворює маленькі, чітко визначені кристали. Коричневий цукор утворює великі кристали на які потрібно більше часу, бо цукор містить патоку, яка додає вологи та насиченого смаку.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: кристалізація, періодичний кристалізатор, цукор, система контролю, змішування, фази кристалізації, датчики контролю.

					ННІЕТ КНУ.133.зГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ЦУКРУ	7
1.1 Кристалізація як процес розділення сумішей	7
1.2 Кінетика процесу кристалізації	11
1.3 Види кристалізаторів у промисловості	14
РОЗДІЛ 2. ОПТИМІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ЦУКРУ	23
2.1 Система змішування в кристалізаторі	23
2.2 Система періодичної кристалізації	26
2.3 Фази кристалізації в періодичному кристалізаторі	30
2.4 Система контролю процесу кристалізації	32
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	38
3.1 Дослідження процесу кристалізації різних видів цукру	38
ВИСНОВКИ	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	46
ДОДАТКИ	49

					ННІЕТ КНУ.133.зГМБ-22.2026.ПЗ							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Спільняк			Удосконалення обладнання для кристалізації цукру				Лім.	Арк.	Аркуші	
Перевір.		Омельченко									5	1
Н. Контр.		Омельченко							ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО			
Затверд.		Цвіркун										

ВСТУП

Актуальність роботи. У роботі зазначено, що в промисловості кристалізація зазвичай здійснюється в системах змішувального типу, що може впливати на небажані властивості продукту. Дуже часто операцію застосовують для отримання такої сировини, як солі та цукор. У виробництві цукру кристалізація є заключною фазою після екстракції та очищення, що дає напівфабрикат у твердому стані, легкий для зберігання та транспортування.

Мета та задачі дослідження. Удосконалення обладнання для кристалізації цукру.

Практична та наукова новизна. Кристалізація – це процес під час якого відбувається фазовий перехід, що проходить від відносно неупорядкованої системи, якою є розчин до набагато більш впорядкованої системи, якою є кристал – утворення твердих фаз у вигляді кристалів з розчинів.

Вважається, що змішування є однією з обмежуючих умов процесу кристалізації. Ефективність змішування є критичним фактором, оскільки невідповідний вибір змішувача та швидкості змішування може негативно вплинути на формування кристалів. Тому обрано конструкцію, що базується на пасивному змішуванні. Конструкція лопатей, що складають робоче колесо дозволяє рідині переміщуватися в резервуарі радіально та тангенціально з невеликим вертикальним рухом. Змінне коливання відносно горизонтальної осі сприятиме досягненню найвищої швидкості кристалізації і, відповідно, досягнення стабільної фази за найменший час.

Одним із недоліків обладнання для кристалізації є відсутність контролю за температурою розчину та його подачею в змішувальний резервуар. Тому запропоновано удосконалену систему контролю в кристалізаторі встановивши додаткові датчики з метою кращого розуміння різних процесів, що виникають під час кристалізації: рефрактометри дозволяють вимірювати вміст розчинених твердих речовин у розчині; мікрохвильовий датчик вимірює вмісту цукру та дозволяє вимірювати вміст сухих речовин; в'язкомір вимірює в'язкість цукрового розчину; кондуктометри вимірюють здатність розчину проводити електричний струм; датчики температури та тиску; датчик витрати конденсату (конденсатометр) дозволяє вимірювати потік конденсованої пари або конденсату в замкненій паровій системі.

Досліджено процес кристалізації різних видів цукру. Для дослідження обрано наступні зразки, а саме гранульований білий цукор та коричневий цукор. Результати свідчать, що різні види цукру демонструють унікальні властивості кристалізації, що походить від їхньої молекулярної структури. Гранульований білий цукор утворює маленькі, чітко визначені кристали. Коричневий цукор утворює великі кристали на які потрібно більше часу, бо цукор містить патоку, яка додає вологи та насиченого смаку.

					ННІЕТ КНУ.133.зГМБ-22.2026.ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Спільняк				Удосконалення обладнання для кристалізації цукру	Літ.	Арк.
Перевір.	Омельченко						Аркуші
							6
							1
Н. Контр.	Омельченко				ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО		
Затверд.	Цвіркун						

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ЦУКРУ

1.1 Кристалізація як процес розділення сумішей

Кристалізація – процес розділення та очищення, який використовується для виготовлення різноманітної сировини. У цьому процесі відбувається фазовий перехід під час якого отримують кристалічний продукт із розчину. В харчовій промисловості її можна визначити як процес одночасної передачі тепла та маси з великою залежністю від потоків рідини та механічних частинок. Кристалізація може здійснюватися з розчину, зазвичай в промисловості її проводять у розчинах, що включають розчинник (у рідкій фазі) та розчинену речовину (у твердій фазі). Дуже часто цю операцію застосовують для отримання таких продуктів, як солі та цукор [1-3, 5]. Причина, через яку ця операція є дуже важливою при виготовленні вищезгаданих продуктів, полягає у високому ступені чистоти, який можна отримати в них. Висока чистота у кристалічному стані зумовлена тим, що він має нижчий рівень енергії, ніж інші три фізичні стани речовини. Для досягнення цього латентне тепло видаляється з розчиненої речовини уже в кристалічному стані, а молекули продукту знаходяться у статичному положенні одна відносно одної та формують структури без необхідності, щоб розміри між кристалами були однаковими.

Кристалізація є важливою одиничною операцією, що використовується у різноманітних галузях промисловості та процесах. Загалом вона застосовується як процес розділення і хоча основною метою кристалізації є очищення речовин, на практиці вона також включає розробку матеріалів з нескінченним числом специфікацій продукту, таких як форма, розподіл розмірів частинок і морфологія, та різні застосування [6, 10]. Кристалізація – це перетворення однієї або кількох речовин з однорідної фази (газ, рідина) або з аморфного твердого стану в кристалічний стан. Кристалізація є процесом, пов'язаним із розчинністю і вона представляє один із базових процесів в харчовій промисловості. Тобто, твердий кристал або осад утворюється, коли розчинена речовина перевищує свою розчинність у розчині. Кристалізація також відноситься до відокремлення твердих кристалічних фаз із розплавів або газів. Деякі теплові процеси, що включають кристалізацію – відокремлення сумішей речовин, очищення матеріалів, відновлення розчинників або концентрація розчинів. Різноманітність процесів кристалізації пояснюється різноманітністю матеріальних систем, умов експлуатації та специфікацій продукту, таких як чистота кристалів, розподіл розмірів кристалів і форма кристалів.

У промисловому виробництві цукру кристалізація є заключною фазою екстракції та очищення, що дає напівфабрикат у твердому стані, легкий для зберігання та транспортування. Різні типи цукру демонструють унікальні

					ННІЕТ КНУ.133.зГМБ-22.2026.ПЗ		
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розроб.</i>	<i>Спільняк</i>				Удосконалення обладнання для кристалізації цукру	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>
<i>Перевір.</i>	<i>Омельченко</i>						
						7	16
<i>Н. Контр.</i>	<i>Омельченко</i>					ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО	
<i>Затверд.</i>	<i>Цвіркун</i>						

властивості кристалізації, що походить від їхньої молекулярної структури. Наприклад, гранульований цукор, який переважно є сахарозою має тенденцію утворювати більші кристали завдяки своїй чистій і організованій молекулярній структурі. Натомість цукрова пудра містить невелику кількість кукурудзяного крохмалю для запобігання злипанню, що призводить до утворення дрібніших, менш організованих кристалів, які не так легко накопичуються [1-4]. Природа цукру, швидкість охолодження під час кристалізації та наявність домішок або додаткових інгредієнтів можуть змінювати кінцеву текстуру та зовнішній вигляд цукрових кристалів. Кожен тип цукру має свій набір властивостей, які впливають на його кристалізацію. Наприклад, коричневий цукор зазвичай містить патоку, яка додає складності та може пригнічувати утворення більших кристалів, що призводить до м'якшої текстури. Тим часом мед може кристалізуватися через високий вміст фруктози та наявність глюкози, що призводить до іноді непередбачуваних результатів.

Кристалізація – це процес утворення твердих фаз у вигляді кристалів з розчинів та розплавів. Процес використовується для розділення сумішей, глибокого очищення речовин, а також для вирощування монокристалів. Під час процесу одночасне отримання великої кількості кристалів називають масовою кристалізацією. Кристалізація виникає, коли початкова рідка фаза знаходиться в умовах насичення. З твердого насиченого розчину виділяється надлишок речовини (порівняно з концентрацією насичення). Після закінчення кристалізації утворюється насичений розчин, який називають маточником. Кристали відокремлюють від маточного розчину осадженням, фільтруванням та іншими методами. Під час кристалізації виділяють два основні етапи: утворення кристалів та їх зростання. Якщо швидкість першого етапу висока, а швидкість другого низька, тоді утворюється дрібнодисперсна тверда фаза та багато кристалів. Якщо швидкість росту кристалів перевищує їх утворення, тоді утворюється мала кількість великих кристалів [1-3]. Кристали – це тверді тіла різних геометричних форм, обмежені плоскими поверхнями. Форма, внутрішня структура та склад кристалічних компонентів залежать від хімічної природи та складу розплаву або розчину. Хімічний склад кристалів відрізняється від складу розчину або розчинника, властивість кристалів використовується для розділення розчинів і розплавів речовин через їх кристалізацію. Продуктами кристалізації є маса кристалів та розведений розчин. Температура кристалізації речовини в суміші з іншими компонентами у вигляді розчину залежить від складу цієї суміші.

У процесі отримання цукру на підприємстві застосовуються наступні процеси [2, 11]:

- екстракція – сік цукрового буряка можна отримати з рослинної волокнини двома методами: екстракція шляхом пресування, коли підготовлену сировину подрібнюють у млинах та екстракція за допомогою дифузії, яка здійснюється шляхом просочення підготовленої сировини;

- очищення – сік містить велику кількість мінеральних та органічних домішок (органічні кислоти, крохмаль). Волокнисті та целюлозні речовини, а також частина домішок видаляються шляхом просіювання та нагрівання;

					ННІЕТ КНУ.133.зГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

– випаровування є передостаннім етапом виробництва цукру перед кристалізацією. Воно здійснюється за багатоступеневим процесом: прозорий сік нагрівається до різних температур у серії випарників, що живляться парою низького тиску, а вода випаровується шляхом кип'ятіння соку, а останній випарник виробляє сироп;

– кристалізація, коли сироп нагрівається під зниженим тиском у резервуарах, які живляться низькотемпературною парою. Кристалізація є останнім етапом переробки цукрового сиропу, а саме одинична операція полягає у зміні фази рідина-тверде тіло, що здійснюється за протоколом, визначеним промисловцем, та за точних термодинамічних умов. В результаті отримують сировину, що складається з твердої фази: кристалів та рідкої фази, маточного розчину;

– сушіння та центрифугування, коли цукор, який вологий після центрифугування, висушується гарячим сухим повітрям, а потім охолоджується холодним сухим повітрям.

Кристалізація – це процес під час якого відбувається фазовий перехід, що проходить від відносно неупорядкованої системи, якою є розчин до набагато більш впорядкованої системи, якою є кристал. З іншого боку, ідеальні кристалічні тверді тіла визначаються як частинки, що складаються з атомів, іонів або молекул, які ідеально впорядковані в кристалічній решітці чиє положення у просторі є характерним для природи речовини [4]. Форма кристалів, як правило є характерною для певної речовини, однак це не є необхідною умовою, оскільки та сама речовина може утворювати кристали з різними характеристиками. Більшість кристалів вважається анізотропними, оскільки їх механічні, електричні, магнітні та оптичні властивості можуть змінюватися. Сучасна прийнята теорія формування кристалів базується на тому, що вони утворюються у два основні етапи, які можуть відбуватися одночасно або незалежно. Першим з них є утворення ядер, відоме як нуклеація, другий етап відповідає росту ядер, який називається ростом кристалу.

Нуклеація позначає початкову фазу процесу кристалізації, коли молекули цукру починають агрегуватися і формувати крихітні кластери, відомі як ядра, що представляють насіння з якого виростуть більші кристали. У насиченому розчині цукру тенденція молекул цукру до зв'язку зростає при охолодженні розчину [2, 4]. Цей процес може бути спонтанним або вимагати введення зовнішнього чинника, такого як домішка чи перемішування для початку формування. Наприклад, у виробництві цукерок дрібно подрібнений цукор або існуючі цукрові кристали часто слугують місцями нуклеації підвищуючи ефективність кристалізації. Після нуклеації баланс між концентрацією молекул цукру та доступними місцями для росту стає важливим. Якщо умови оптимальні, наприклад, перенасичений розчин і контрольована температура то можуть утворюватися кілька ядер, що відкриває шлях до міцного розвитку кристалів. Нуклеація кристалів відбувається в центрах кристалізації, які є мінімальною асоціацією молекул розчинених речовин, що утворюються під час випадкових зіткнень під час хаотичного теплового руху. Вони з'являються самостійно лише тоді, коли досягають певного рівня перенасичення. Це можуть бути механічні домішки, шорсткість поверхні пристроїв та інші випадкові

					ННІЕТ КНУ.133.зГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

фактори. Як центри кристалізації та на внутрішніх поверхнях апарата, дрібні частинки подрібнених кристалів відкладаються в розчин для зменшення або усунення осадження кристалів. Частинки дозволяють формувати великі кількості центрів кристалізації без значного насичення розчинами, що призводить до прискорення процесу.

Фаза росту кристалів цукру тісно пов'язана з різними факторами, які визначають їхній розмір і форму. Температура відіграє помітну роль: вищі температури зазвичай дозволяють молекулам рухатися вільніше, що потенційно призводить до утворення більших кристалів, тоді як швидке охолодження може сприяти утворенню менших, дрібніших кристалів. Ступінь перенасичення цукрового розчину також безпосередньо впливає на розширення утворення кристалів. Високонасичений розчин сприяє утворенню більших кристалів завдяки великій кількості молекул цукру для росту [1-4]. Перемішування та інші дії можуть порушити тонкий баланс, необхідний для стабільного росту, що призводить до утворення кристалів неправильної форми. У середовищах, де можливе повільне, контрольоване охолодження та мінімальне порушення, можна отримати кристали, які не лише більші, а й естетично привабливі. Популярні техніки, такі як виробництво «кам'яних цукерок», використовують повільний процес випаровування для формування великих, яскравих цукрових структур. Будь-які відмінності в цих параметрах можуть суттєво змінити результати, що призводить до різноманітних текстур і зовнішнього вигляду.

Температура та вологість відіграють ключову роль у визначенні якості та характеристик цукрових кристалів. Два фактори можуть або посилити зусилля щодо кристалізації цукру, або призвести до небажаних наслідків. Розуміння того, як маніпулювати цими змінними є життєво важливим для досягнення ідеальних, однорідних кристалів в промислових застосуваннях. Так, вищі температури можуть призвести до швидшого розчинення цукру, але можуть утворювати менші, менш стабільні кристали [1, 4]. Нижчі температури сприяють повільнішій кристалізації, що дозволяє отримувати більші та більш виражені кристали цукру. Висока вологість може спричиняти поглинання вологи цукром, що призводить до злипання і зниження цілісності кристалів. Низька вологість покращує процес сушіння, сприяючи більш жорсткій кристалічній текстурі.

Температура безпосередньо впливає на розчинність цукру у воді, що, у свою чергу, впливає на кристалізацію. Коли температура підвищується, цукор розчиняється легше, утворюючи перенасичений розчин. Умова є критичною для кристалізації, але керування процесом охолодження не менш важливе. Якщо дозволити розчину охолонути занадто швидко це може призвести до утворення дрібних кристалів, які можуть втратити бажану хрусткість. Підтримання поступового зниження температури дозволяє формуватися більшим кристалам, покращуючи як візуальну привабливість, так і текстуру. Високий рівень вологості в навколишньому середовищі може впливати на цукор різними способами, головним чином змушуючи його поглинати воду та злипатися разом [4, 7]. Ця гігроскопічна природа цукру порушує цілісність кристалів, ускладнюючи досягнення ідеальної, сухої текстури. Коли рівень вологості перевищує 50%, ймовірність поглинання вологи зростає, що може

					ННІЕТ КНУ.133.зГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

призвести до непривабливих згустків, які менш привабливі як на вигляд, так і на смак.

1.2 Кінетика процесу кристалізації

Кінетика кристалізації стосується вивчення швидкостей процесів кристалізації, включаючи нуклеацію та ріст кристалів. Вона передбачає розуміння факторів, що впливають на утворення кристалів і їх ріст до бажаного розміру й форми. Значення кінетики кристалізації полягає в її здатності контролювати якість кінцевого продукту, включаючи його чистоту, розподіл розмірів і морфологію. Кристалізація – це метод розділення, який передбачає утворення твердих кристалів із розчину або розплаву. Процес включає три основні етапи: нуклеацію, ріст кристалів і агломерацію. Кристалізація широко використовується в різних галузях завдяки здатності виробляти продукти високої чистоти з певними властивостями. Розуміння кінетики кристалізації є необхідним для оптимізації процесів кристалізації та отримання високоякісної продукції. Контролюючи кінетику кристалізації, виробники можуть впливати на розмір, форму та чистоту кінцевого продукту, що у свою чергу, може впливати на продуктивність, стабільність і термін зберігання продукту.

Рівновага під час кристалізації залежить від природи розчиненої речовини, розчинника, а також від температури та тиску. При підвищенні температури в більшості речовин розчинність збільшується. Для таких речовин насичені розчини при зниженні температури стають перенасиченими і залишаються в нестабільному стані до певної концентрації [1-3]. Після досягнення перенасиченої концентрації спостерігається випадання кристалів. На граничну концентрацію перенасичення впливають природа розчину та розчинника, температура, швидкість охолодження розчину, наявність домішок у ньому, а також механічні впливи. Залежно від температури розчину тип насичення та криві насичення показано на рисунку 1.1.

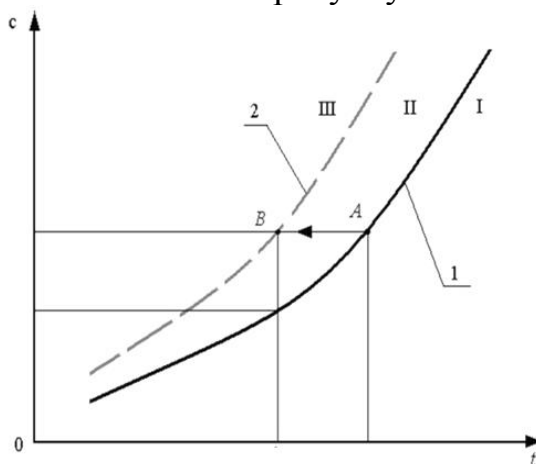


Рисунок 1.1 – Залежно від температури розчину тип насичення
I – недонасичена зона; II – метастабільна зона; III – нестабільна зона

На схемі показані дві криві, що формують межі метастабільної зони. Нижня суцільна крива представляє розчинність даної речовини, тоді як верхня пунктирна крива, також звана кривою перенасичення, показує температури та

концентрації, при яких відбувається спонтанна кристалізація. Остання не є чітко визначеною і залежить від швидкості утворення перенасичення, інтенсивності перемішування та наявності домішок. Тому діаграму можна розділити на три зони [10]:

- стабільна (недонасичена) зона, де кристалізація не може відбутися, і якщо в розчин вводяться насіннєві кристали речовини то вони розчиняються;
- метастабільна (перенасичена) зона, яка знаходиться між кривою розчинності та кривою перенасиченості, де спонтанна кристалізація малоімовірна, хоча можуть відбуватися вторинне та первинне гетерогенне нуклеювання;
- нестабільна або лабільна зона над кривою перенасиченості, де відбувається спонтанна кристалізація.

Насичення нуклеації саме по собі недостатнє для того, щоб система почала кристалізуватися. Перш ніж можуть розвинути кристали, у пересиченому розчині повинні бути деякі тверді тіла, ядра або зародки, які потім виступають центрами кристалізації. Нуклеація може відбуватися спонтанно або бути індукована штучно. Її часто можна викликати шляхом перемішування, механічного удару або тертя в розчині. Також досліджувалися деякі зовнішні впливи, такі як електричні чи магнітні поля, ультрафіолетове світло, рентгенівські промені, звукове та ультразвукове опромінення. Різні механізми нуклеації можна виділити на основі походження формуючихся ядер. Гомогенна «первинна» нуклеація може відбуватися в розчинах, де молекули впорядковуються у візерунок, характерний для кристалічного тіла, утворюючи об'єм, у який додаткові молекули відкладаються у міру росту об'єму в ядра. Для того, щоб такі ядра утворилися, потрібне дуже високе перенасичення. З іншого боку, зважені частки або дрібні бульбашки також можуть служити місцями нуклеації [8, 9-10]. Це називається гетерогенною нуклеацією. Ядра часто утворюються за наявності кристалів у розчині через тертя або зношування. Ця «вторинна» нуклеація може відбуватися у слабко перенасиченому розчині на відміну від «первинної» нуклеації. Класична теорія нуклеації базується на конденсації пари у рідину, і цю процедуру можна поширити на кристалізацію з розплавів та розчинів. Зміни вільної енергії, що пов'язані з процесом гомогенної нуклеації, можна розглядати як суму поверхневої вільної енергії (тобто енергії між поверхнею частинки та об'ємом частинки) та об'ємної надлишкової вільної енергії (тобто енергії між частинкою та розчиною речовиною в розчині).

Метастабільна зона представлена як місце станів, де розчин перенасичений, і, тим не менш, нуклеація не відбувається спонтанно. Стан термодинамічно нестабільний, система прагне повернутися до рівноваги, але з дуже повільною кінетикою. Метастабільна зона, отже, в основному зумовлена кінетичним явищем, пов'язаним із законом первинної нуклеації. Насправді існує стільки метастабільних зон, скільки існує процесів нуклеації. Найширша зона відповідає первинній гомогенній нуклеації. Метастабільна зона, що відповідає вторинній нуклеації, існує, але її розширення за звичайних умов дослідження промислових кристалізацій є обмеженим. Перемішування в досить легко запускає вторинну нуклеацію і ширина метастабільної зони, що

					ННІЕТ КНУ.133.зГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

відповідає вторинній нуклеації, враховуючи неточності, зливається зі значенням розчинності розчиненої речовини в суміші. Ширина метастабільної зони, що відповідає первинній гетерогенній нуклеації, може бути досить значною. У перенасиченому розчині утворення стабільних ядер може перетворюватися на зростання кристалів, щойно вони досягають певного критичного розміру [3, 9, 11]. Під час процесу росту кристалів перенасичення зменшується, оскільки розчинені молекули речовини осідають на поверхні кристала зі швидкістю, пропорційною різниці концентрації між поверхнею кристала та об'ємом розчину. У літературі існує багато теорій опису росту кристалів, включаючи теорію адсорбційного шару, за якою кристали ростуть шар за шаром. Теорія поверхневої енергії базується на принципі, що загальна поверхнева вільна енергія кристала в рівновазі з навколишнім середовищем при сталій температурі та тиску буде мінімальною для даного об'єму.

Кристалізація є процесом, пов'язаним із розчинністю, і вона представляє один із базових процесів у технології процесів. Тобто твердий кристал або осад утворюється, коли розчинена речовина перевищує свою розчинність у розчині. Кристалізація також стосується виділення твердих, кристалічних фаз із розплавів або газів. Деякі теплові процеси, що включають кристалізацію, включають розділення сумішей речовин, очищення матеріалів, відновлення розчинників або концентрування розчинів. Різноманітність процесів кристалізації обумовлена різноманітністю матеріальних систем, умов експлуатації та специфікацій продукту, таких як чистота кристалів, розподіл за розміром кристалів і форма кристалів [10]. Рівновага розчинності представляє термодинамічну рівновагу між рідкою та твердою фазами. Стан рівноваги відображають у фазових діаграмах. Останні описують рівновагу та показують залежність рівноваги розчинності від тиску та температури від складу. Двокомпонентна розчинена система складається з твердого компонента, що розчиняється та розчинника, переважно води. Крива на фазовій діаграмі показує залежність складу розчину даної речовини при певному тиску від температури. Діаграми мають різну форму залежно від змішуваності у рідкому або твердому стані.

Тепловий стан однокомпонентних систем повністю описується через три змінні: об'єм або густину, тиск і температуру. У двокомпонентних системах додається ще одна змінна – склад системи. Його можна виразити через молярну частку або ваговий відсоток компонентів А і В. Показані умови рівноваги на фазових діаграмах так званих діаграмах плавлення або розчинності [7-10]. Вони представляють тверду й рідку фази, які перебувають у рівновазі залежно від температури при певному тиску. У двокомпонентній системі достатньо знати молярну домішку лише одного компонента для визначення загальної молярної частки. Найважливіші двокомпонентні системи, які повністю змішуються в рідкій фазі. В такому випадку на діаграмах чисті компоненти позначені як А і В, розчин як АВ, а змішані кристали як A_xB_y або B_xA_y .

Залежно від ступеня охолодження, можуть утворюватися змішані кристали з різним складом двох компонентів. Якщо температура швидко знижується, утворюються неоднорідні кристали твердих розчинів, які мають градієнт концентрації у своїй структурі від внутрішньої частини до зовнішньої.

					ННІЕТ КНУ.133.зГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Навпаки, однорідні кристали твердих розчинів можуть утворюватися при повільному охолодженні розчину через збалансовані різниці концентрацій під час процесу охолодження. Окрім цього простого випадку, фазові діаграми можуть мати максимуми або мінімуми. Тут діаграма формально поділена на дві області. Розчин кристалізується при показаному мінімумі як змішані кристали без зміни складу [7-10]. Система, що має повну сумісність у рідкому стані та повну несумісність у твердому стані це повна ділянка сумісності створює евтектику. Характерною особливістю тут є те, що змішані кристали не утворюються, а компоненти А та В присутні у твердому стані як гетерогенна суміш. У двох областях, позначених як А та В, відповідно утворюються чисті компоненти А або В під час процесу охолодження до точки, де обидві криві розчинності перетинають евтектичну лінію. Системи, що розглядають повну нерозчинність у твердому стані, практично майже не зустрічаються. Переважно можна знайти евтектичні системи, що мають високу або низьку розчинність двох компонентів один в одному. У твердому стані система має область неповної розчинності.

1.3 Види кристалізаторів у промисловості

Кристалізація є одиничною операцією розділення двох фаз, метою якої є отримання кристалічного продукту високої чистоти з забрудненого розчину або аморфної твердої фази. Ця операція має велике значення для багатьох галузей промисловості, таких як харчова промисловість, оскільки вона дозволяє отримувати продукти з високою чистотою, які можуть легко оброблятися в наступних операціях [11]. Кристалізація на цукрових заводах суттєво складається з двох основних етапів: нуклеації та росту кристалів. Ця операція традиційно виконується на випарних кристалізаторних установках, що називаються чанами. Нуклеація індукується шляхом введення дрібних кристалів розміром від 5 до 10 мкм, зважених у суспензії, поки розчин перебуває в перенасиченому стані в метастабільній області. Другий етап відбувається через масообмін між кристалом та перенасиченим розчином, причому диференціал концентрації на межі кристалу є рушійною силою.

Кристалізація з розчинів – це процес зворотній до розчинення. Він відбувається шляхом поглинання або виділення тепла. Промислові методи кристалізації бувають ізотермічними та ізогідричними. Ізотермічна кристалізація здійснюється шляхом випаровування розчину понад його насичену концентрацію. Під час ізогідричної кристалізації насиченість розчину досягається шляхом охолодження. Ізотермічна кристалізація застосовується при обробці розчинів речовин з мало залежною від температури розчинністю. Якщо при зниженні температури розчину розчинність речовини значно зменшується, доцільна ізогідрична кристалізація. Кристалізація за режимом протікання може бути періодичною або безперервною. Технологічні стадії кристалізації [1-3]:

- підготовка розчину (повторне насичення);
- відокремлення кристалів від маточного розчину;
- промивання кристалів;

					ННІЕТ КНУ.133.зГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

– сушіння кристалів.

Відповідно до принципу роботи промислові кристалізатори поділяються на такі класи:

- кристалізатори, що видаляють частину розчинника;
- кристалізатори, що охолоджують розчин;
- вакуумні кристалізатори;
- кристалізатори з псевдорозрідженим шаром.

Через велику кількість кристалічних продуктів, що отримуються в малих та середніх кількостях, кристалізатори періодичної дії частіше використовуються в промисловості, ніж безперервні. Операції в резервуарах пропонують значні переваги, такі як простота обладнання, що потребує меншого капітального вкладення, мінімізація нальоту, легкість очищення після кожної партії та гнучкість, необхідна, коли потрібно виконати багато кроків із змінами у виробничих технологіях. Саме тому цьому типу кристалізації віддають перевагу у харчовій промисловості та загалом для виробництва кристалів з особливими умовами продукту [6, 11]. Основною метою кристалізації в цукроварних чанах є виробництво рафінованого цукру зі середнім розміром кристалів від 550 до 600 мкм.

Процес кристалізації є унікальною можливістю контролювати розмір, форму, чистоту та вихід вироблених частинок, надаючи можливість розробляти продукти з відповідним розміром частинок для досягнення бажаних властивостей. Форма кристалів і розподіл розмірів кристалів залежать від перенасичення, яке є рушійною силою цього явища і в кристалізації за охолодженням воно досягається шляхом охолодження розчину. Профіль охолодження є домінуючим елементом з оперативної точки зору, а швидкість охолодження під час процесу визначає величину досягнутого перенасичення, що характеризує масштаб кінетичних механізмів. Цей профіль залежатиме від режиму роботи, який, у свою чергу, буде підпорядковуватися параметрам системи та умовам експлуатації процесу, що забезпечують роботу обладнання.

У природному процесі охолодження вміст кристалізатора охолоджується до постійної температури охолодження, що призводить до експоненційного зниження температури з часом. Зазвичай температура входу охолодження є постійною і різниця з виходом дуже мала. Внаслідок цього профіль перенасичення проходить через високий пік на початку, що призводить до низької якості продукту [3, 7, 9]. У випадку постійної швидкості охолодження, швидкість зміни температури підтримується постійною шляхом регулювання температури охолоджуючої рідини для збереження постійного рівня видаленого тепла. Щоб отримати продукт відповідної якості з однорідним розміром частинок, кристалізатор повинен працювати за контрольованих умов, які дозволяють підтримувати постійний рівень перенасичення і по можливості, у метастабільній області, при цьому ідеально – контроль охолодження, підібраний до оптимального розміру частинок.

Вибір методу кристалізації та правильне проектування кристалізатора залежать від типу перенасичення, яке має бути створене (охолодженням, випаровуванням), режим роботи (безперервний або періодичний), бажаний розподіл розмірів кристалів, а також чистота продукту. Охолоджувальна

					ННІЕТ КНУ.133.зГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

кристалізація зазвичай застосовується для розчинів, у яких розчинність сильно залежить від температури. Лише охолодження може досягти бажаного ступеня кристалізації, коли розчинність достатньо низька наприкінці процесу охолодження. Висока частка промислового кристалізації здійснюється у періодичних процесах [2, 7, 10]. Цей процес в основному використовується при виробництві менших кількостей, коли продукт часто змінюється або потрібні високі чистоти продукту. За допомогою періодичного процесу можна забезпечити якість так і контроль якості кінцевого продукту. У порівнянні з пакетним процесом, безперервна кристалізація використовується, коли потрібно виробляти більші обсяги продукту. У обох варіантах процесу, представлених нижче, перенасичення створюється за допомогою охолодження.

Періодична кристалізація. В періодичних кристалізаторах підтримання постійного перенасичення розчину в кристалізаторі може бути складним. Якщо перенасичення змінюється під час процесу, це може призвести до зниження якості продукту та розширення розподілу розмірів кристалів. Щоб забезпечити постійну якість продукту, необхідно, щоб умови процесу були однаковими на початку кристалізації. Щоб розчин був однорідно перемішаним у періодичному кристалізаторі, використовують змішувач, що може призводити до вторинної нуклеації через руйнування кристалів. Більша швидкість обертання змішувача забезпечує вищу енергію удару і, таким чином, підвищує ймовірність зіткнення кристалів [7-10]. У випадку однокомпонентної системи в кристалізатор наливається насичений розчин компонента і охолоджується до утворення ядер через виникле перенасичення. Однорідність розчину забезпечується змішувачем тоді як температуру в кристалізаторі забезпечує термостат. Наприкінці процесу кристалічна суспензія через клапан подається у пристрій для розділення твердого і рідкого (наприклад, фільтр-всмоктувач, центрифуга), де кристали продукту відділяються від маточного розчину. Це досить просте обладнання та легке регулювання параметрів процесу роблять процеси пакетної кристалізації цікавими для промисловості.

Безперервна кристалізація. Процес кристалізації проводиться безперервно, коли кристалізатор інтегрований у великий виробничий цех, який також працює безперервно. Однак також важливо, щоб процес кристалізації відбувався в метастабільній області, щоб уникнути небажаної нуклеації. Зменшення перенасичення відбувається головним чином через ріст кристалів. Загалом бажано мати велику поверхню кристала, а отже, велику кількість частинок. Процеси безперервної кристалізації можуть мати різні варіанти реалізації. Бак для подачі заповнюється насиченим розчином речовини, що підлягає кристалізації. Він не повинен містити твердих частинок, щоб уникнути нуклеації та забруднення під час транспортування розчину до кристалізатора.

За потреби між баком і кристалізатором можна встановити фільтр. Кристалізатор працює ізотермічно при нижчій температурі, ніж бак для подачі. Тому розчин охолоджується і стає пересиченим [7, 10]. Через пересичення розчину кристали речовини можуть рости, і з часом частина з них збирається з дна кристалізатора та відділяється від маточного розчину за допомогою фільтру. Потім маточний розчин зливається назад у бак для подачі, а отримані кристали продукту можуть бути видалені. Постійний надхід свіжого розчину з

					ННІЕТ КНУ.133.зГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

бака для подачі та постійне виведення суспензії кристалів з дна кристалізатора забезпечує майже постійний рівень пересичення, і, таким чином, може встановлюватися «квазістаціонарний стан».

Кристалізатори для охолодження. Велика кількість різних кристалізаторів для промислових розчинів можна класифікувати за кількома загальними категоріями. Найпростіший тип кристалізатора є охолоджувальний. Тут гарячий розчин завантажується у відкритий резервуар в якому його залишають охолоджуватися, часто протягом кількох днів і переважно за рахунок природної конвекції. У розчин можна підвішувати металеві стержні, таким чином на них можуть рости великі кристали і зменшувати кількість продукту, що опускається на дно кристалізатора. Продукт видаляється вручну, а через те, що охолодження проходить повільно, зазвичай отримують великі переплетені кристали і утримання маточного розчину неминуче. В результаті сухі кристали зазвичай є забрудненими. Неконтрольований характер процесу призводить до того, що розміри кристалів варіюються від тонкого порошку до великих агрегатів [7-9]. Встановлення змішувача в кристалізаторі відкритого резервуара зазвичай призводить до утворення менших і більш однорідних кристалів та скорочення часу процесу. Кінцевий продукт зазвичай має вищу чистоту, оскільки менша кількість маточного розчину затримується кристалами після фільтрації і можливе більш ефективне промивання. Монтаж вертикальних дефлекторів можливий всередині бака для забезпечення кращого змішування, але вони повинні закінчуватися нижче рівня розчину, щоб уникнути надмірного налипання. Змішаний охолоджувач дорожчий в експлуатації, ніж простий кристалізаторний резервуар але має значно вищу продуктивність. Витрати на робочу силу для обробки продукту можуть залишатися досить високими. Конструкція кристалізаційних баків варіюється від неглибоких судин до великих циліндричних баків.

Промислові кристалізатори пересичення розчину здійснюють шляхом охолодження. Він складається з каналу, що оточує установку у якому присутній охолоджувальний кожух. У цьому розчині холодна вода рухається в протилежних напрямках. Він містить відкриту ванну, яка є просторою, а водяний кожух приварений до зовнішньої частини ванни. Також він містить спіральний змішувач низької швидкості, який розташований якомога ближче до дна ванни. Змішувач допомагає уникнути відкладення кристалів на стінках. Кілька таких одиниць можна об'єднати між собою для збільшення потужності. Гарячий концентрований розчин, який має кристалізуватися, подається на один кінець ванни, а охолоджувальна вода зазвичай протікає через сорочку протитечії розчину. Для контролю розміру кристалів іноді бажано вводити додаткову кількість води в певні секції сорочки. Кристали ростуть, коли вони вільно перебувають у рідині і тому мають однорідний розмір і не містять включень [5]. На кінці кристалізатора може бути переливний люк, через який кристали та матковий розчин переливаються у зливну коробку, звідки матковий розчин повертається у процес, а вологі кристали подаються на центрифугу для видалення цього розчину. Інший вид промислового кристалізатора має характеристики, подібні до попереднього кристалізатора і дає більш однорідні кристали. Складається з набору неглибокого каналу, змонтованого на роликах,

					ННІЕТ КНУ.133.зГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

так що його можна струшувати з боку в бік. Повільна швидкість охолодження цього кристалізатора призводить до низької здатності кристалізації, але дає однорідні кристали. Однією з переваг цього типу кристалізатора є повна відсутність рухливих частин у зоні кристалізації. Декілька одиниць можна з'єднати між собою, і були встановлені комплекти довжиною до 30 метрів загальної довжини. Зовнішнє охолодження не використовується, а тепло втрачається за рахунок природної конвекції в атмосферу.

Типовими представниками класу кристалізаторів, що охолоджують розчин є роликові та коливальні. Дизайн роликового кристалізатора показаний на рисунку 1.2. Вал кристалізатора охолоджується водою, що подається всередину, а розчин у ванні нагрівається парою, яка подається на теплообмінник. Кристали утворюються в результаті охолодження розчину на поверхні ролика, розташованої зовні ванни. Під час обертання ролика твердий матеріал знімається з його поверхні.

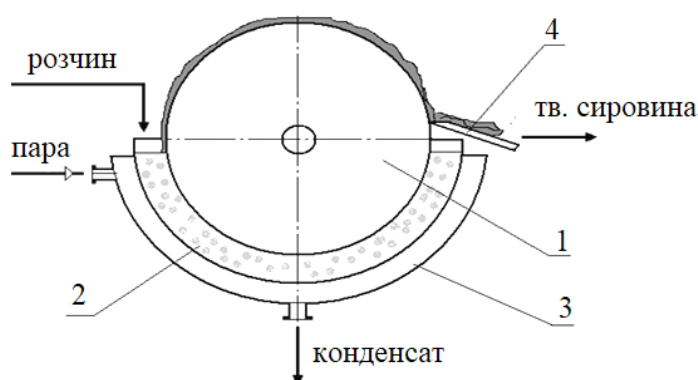


Рисунок 1.2 – Валковий охолоджувальний кристалізатор
1 – вал, 2 – виїмка, 3 – термообгортка, 4 – ніж

Кристалізатор шляхом охолодження при прямому контакті. У таких системах іноді малопрактично використовувати обладнання, охолоджуване через його поверхню, через те, що допустима різниця температур дуже мала (менше 3°C), що призводить до надмірної площі теплообміну, або через те, що в'язкість настільки висока, що механічна енергія від системи циркуляції вимагає швидкості видалення тепла, більшої, ніж можна досягти за розумних різниць температур [5, 8]. У таких системах доцільно змішувати холодоагент із суспензією, охолодженою в кристалізаторі, так що теплота випаровування холодоагенту охолоджує суспензію прямим контактом. Використання прямого контакту для охолодження також зменшує загальні вимоги до енергії у процесі, оскільки в процесі охолодження, що включає два флюїди, потрібна більша різниця температур на глобальній основі, коли охолоджувач повинен спочатку охолодити якусь проміжну розчин, таку як розчин хлориду кальцію, а цей розчин, у свою чергу, охолоджує маточний розчин у кристалізаторі.

Охолоджувальний коливальний кристалізатор має неглибоку ванну, яка здійснює коливальні рухи за допомогою спеціального приводу (рис. 1.3). Ущільнювачі закріплені на зовнішній поверхні резервуару, який спирається на опорні ролики [7-9]. Коли кристалізатор працює до нього подається гарячий насичений розчин, який насичується через контакт із навколишнім

середовищем та випаровування частини розчинника. В результаті отримується суспензія утворених кристалів і залишкового розчину. Перевага кристалізатора полягає в тому, що кристали піддаються мінімальному механічному напруженню і не розподіляються повторно.

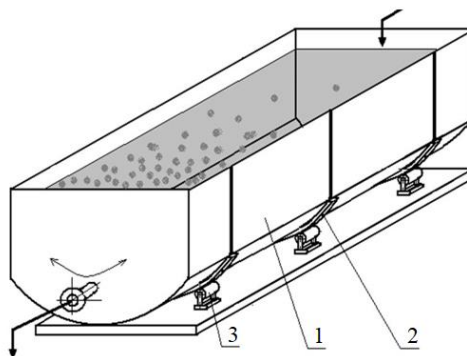


Рисунок 1.3 – Кристалізатор з охолодженням випарником
1 – резервуар, 2 – привід, 3 – опорний ролик

Стрічковий кристалізатор має ведучий та натяжний барабани, а до кристалізатора подається три конвеєрні стрічки (рис. 1.4). Між нижньою та верхньою гілками стрічки встановлені п'ять зрошувальних пристроїв для охолоджувальної води. Крім того, у кристалізаторі є чотири пристрої для подачі розчину та шість ножів для відбору твердого матеріалу, сім бункерів для збору твердого матеріалу. Коли кристалізатор працює, тверду фазу охолоджують і таким чином досягають насичення розчину.

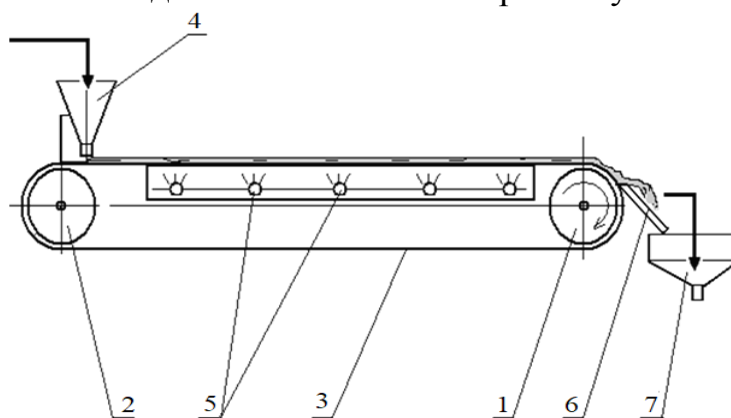


Рисунок 1.4 – Стрічковий кристалізатор
1 – ведучий барабан, 2 – натяжний барабан, 3 – конвеєрна стрічка,
4 – пристрій для подачі розчину, 5 – зволожувачі, 6 – ніж, 7 – бункер для збору твердого матеріалу

Кристалізатори для випаровування. Коли розчинність розчиненої речовини в розчиннику не зменшується під дією зниження температури, перенасичення розчину може бути досягнуте шляхом видалення певної кількості розчинника. Існують деякі методи випаровування для досягнення цієї мети. Кристалізатори, що видаляють частину розчинника – це випарні апарати, у яких початковий розчин випаровується до рівня, коли концентрація розчину в них значно перевищує насичену концентрацію і переходить за межі насичення.

Для цього найбільш підходящими є випарники з примусовою циркуляцією розчину [3, 8, 9]. Кристалізатори методом випаровування за допомогою нагрітої пари. Більшість випарних установок живляться гарячою водяною парою і містять випарний корпус, який для цього типу кристалізаторів є короткою трубою, розташованою вертикально у якій пара конденсується назовні труб. Парова камера зі стоячи розташованою трубою дозволяє циркулювати через трубки. Під час роботи верхня частина труб покрита материнським розчином. Щоб підвищити швидкість теплопередачі, особливо для в'язких розчинів, можна здійснити примусову циркуляцію материнського розчину, встановивши змішувач у трубку.

Кристалізатори шляхом випаровування при примусовій циркуляції. Розчин, що виходить з резервуара перекачується через циркуляційний трубопровід і через теплообмінник, де його температура підвищується приблизно на 2-6°C. Оскільки це нагрівання здійснюється без випаровування, матеріали звичайної розчинності не повинні утворювати відкладень на трубах. Розчин нагрівається, повертається в резервуар через лінію рециркуляції, змішується з суспензією частинок розчину і локально підвищує його температуру поблизу точки входу, що спричинює кипіння на поверхні рідини. Під час наступного охолодження та випаровування для досягнення рівноваги між рідиною та парою створювана перенасиченість призводить до утворення відкладень кристалів, що підвішені в обертовому корпусі, доки вони знову не вийдуть через трубопровід циркуляції [5]. Кількість і швидкість рециркуляції, розмір корпусу та тип і швидкість циркуляційного насоса є критичними елементами конструкції, якщо необхідно досягти передбачуваних результатів. Якщо кристалізатор не є випарним типом, а лише заснований на охолодженні за рахунок адіабатичного випаровування для досягнення продуктивності то елемент нагрівання відсутній. Подача допускається в лінію циркуляції після видалення суспензії, у точці, достатньо нижче вільної поверхні рідини, щоб уникнути спалаху під час процесу змішування.

Кристалізатор шляхом випаровування. У цьому типі кристалізатора розчин, що виходить із камери випаровування трохи пересичений у так що нові ядра не утворюються. Сироп, що контактує зі шаром зменшує своє пересичення на рослих кристалах і виходить через циркуляційну трубу. Якщо потрібне більше випаровування для створення рушійної сили, між циркуляційним насосом і випарним теплообмінником встановлюють теплообмінник для забезпечення теплом необхідної швидкості випаровування. Перенесення пересиченого сиропу з випарника часто викликає накопичення солей у трубопроводі та зменшення циклу роботи у такого типу обладнанні. Швидкість накопичення можна зменшити пропускаючи через камеру випаровування тонку суспензію твердих частинок.

Вакуумні кристалізатори. Термін «вакуум» для кристалізаторів можна інтерпретувати по-різному. Будь-який кристалізатор, який працює під зниженим тиском можна назвати «вакуумним». Установки можуть працювати періодичними та безперервними [5, 9]. Резервуар для живлення завантажуються до певного рівня концентрованим та гарячим розчином. Коли тиск у резервуарі зменшується, розчин починає кипіти і охолоджується до моменту поки

					ННІЕТ КНУ.133.зГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

установка не досягне свого конденсаційного обмеження. Щоб збільшити продуктивність конденсатора, а отже, збільшити вихід кристалів, пара, що виходить з резервуара, може бути стиснутий перед конденсацією за допомогою парових струменів.

Кристалізатор за допомогою механічної циркуляції значною мірою впливає на рівень нуклеації всередині кристалізатора. Було розроблено низку конструкцій із використанням циркуляційних насосів, розташованих всередині корпусу кристалізатора, що зменшує тиск, проти якого повинен працювати циркуляційний насос. Технологія зменшує швидкість входу потужності та циркуляції, а отже, і швидкість нуклеації. Типовим прикладом є випарний кристалізатор з циркуляційною трубою та дефлекторами. Суспензія кристалів продукту підтримується великою, повільно обертовою гвинтовим змішувачем, оточеною циркуляційною трубою всередині корпусу [1, 5, 8]. Гвинт направляє суспензію до поверхні рідини, щоб уникнути прямого контакту твердих часток із зоною найбільшої пересиченості. Охолоджений маточний розчин у суспензії повертається на дно посудини та рециркулюється через гвинт. У гвинті нагрітий розчин змішується із рециркулюючою суспензією. Нагрівальний елемент забезпечує достатнє тепло для випаровування та підвищення температури розчину, що відводиться з відстійника з метою знищення будь-яких видалених дрібних кристалічних частинок.

Тип обладнання може використовуватися для застосувань у яких єдиним видаленим теплом є тепло, необхідне для адіабатичного охолодження надходячого живильного розчину. Коли це робиться і планується використовувати характеристику руйнування дрібнодисперсних частинок, потік рідини повинен бути видалений із зони відстоювання кристалізатора, а дрібні кристали повинні бути відокремлені або зруйновані іншими засобами, окрім додавання тепла, наприклад, шляхом розведення або згущення та фізичного відокремлення [5]. У деяких застосуваннях кристалізації бажано збільшити вміст твердих речовин у суспензії всередині тіла вище за її природну консистенцію, яка формується в результаті рівноваги охолодження розчину подачі до кінцевої температури, що можна зробити шляхом відведення потоку маточного розчину з зони дефлектора, таким чином ущільнюючи суспензію всередині зростаючої зони кристалізатора. Маточний розчин також доступний для видалення дрібних кристалів з метою контролю розміру продукту.

Кристалізатори з циркуляційною трубою може використовуватися в системах, де не потрібне або не бажане руйнування дрібних частинок. У таких випадках дефлектор опускається, а внутрішній циркуляційний насос розраховується таким чином, щоб вплив нуклеації на суспензію був мінімальним. У таких кристалізаторах досяжна швидкість циркуляції зазвичай значно перевищує ту, що доступна в кристалізаторі з примусовою циркуляцією. Таке обладнання застосовується, коли необхідно забезпечити циркуляцію великих обсягів суспензії для мінімізації рівнів перенасичення всередині апарату. Для отримання тривалих робочих циклів із матеріалом, здатним зростати на стінках кристалізатора, потрібен цей підхід.

На основі вище зазначеного можна вважати, що кристалізація – процес розділення та очищення, який використовується для виготовлення

					ННІЕТ КНУ.133.зГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

різноманітної сировини. У цьому процесі відбувається фазовий перехід під час якого отримують кристалічний продукт із розчину. В харчовій промисловості її можна визначити як процес одночасної передачі тепла та маси з великою залежністю від потоків рідини та механічних частинок. Кристалізація може здійснюватися з розчину, зазвичай в промисловості її проводять у розчинах, що включають розчинник (у рідкій фазі) та розчинену речовину (у твердій фазі). Дуже часто цю операцію застосовують для отримання таких продуктів, як солі та цукор. У промисловому виробництві цукру кристалізація є заключною фазою екстракції та очищення, що дає напівфабрикат у твердому стані, легкий для зберігання та транспортування.

Зазначено, що кристалізація – це фундаментальний процес, який відбувається, коли атоми, іони або молекули речовини розташовуються у високопорядкований, повторюваний тривимірний візерунок, відомий як кристалічна решітка. Процес може відбуватися за допомогою двох основних методів: охолодження та випаровування. Ефективність процесу кристалізації залежить як від швидкості, так і від кількості ядер, що утворюються під час первинного зародження, а також від швидкості росту кристалів під час вторинного зародження.

Аналіз наукових джерел дав змогу узагальнити, що основний робочий принцип кристалізаторів полягає у створенні умов, що сприяють утворенню кристалів шляхом охолодження або випаровування. Вибір методу залежить від конкретних вимог процесу та характеристик розчиненої речовини. Охолоджувальні кристалізатори регулюють процес охолодження так, що температура розчину падає нижче насичення. Розчинена речовина стає менш розчинною при нижчих температурах, що призводить до осадження надлишку. Поступове зниження температури сприяє добре організованому розташуванню частинок, що призводить до утворення дискретних кристалічних утворень. Випаровування розчинником починається у випарних кристалізаторах шляхом додавання тепла до розчину. Концентрація розчиненої речовини поступово зростає у міру випаровування розчинника, наближаючись до насичення. Тверді кристали починають утворюватися в розчині, коли кристалізація починається при цій критичній концентрації.

					ННІЕТ КНУ.133.зГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

РОЗДІЛ 2

ОПТИМІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ЦУКРУ

2.1 Система змішування в кристалізаторі

На сьогодні кристалізація вважається мистецтвом, що пояснюється переходом рідкої фази в тверду, що відбувається під час кристалізації. У промисловості кристалізація зазвичай здійснюється в системах змішувального типу, що може впливати на небажані властивості продукту. Змішування є однією з обмежуючих умов процесу кристалізації. Перемішування є частиною ефективного дизайну кристалізаторів, оскільки воно значно впливає на гідродинамічну поведінку системи, сприяючи або обмежуючи належний розвиток кристалів. Нерівності, такі як утворення дуже малих розмірів кристалів зменшує ефективність процесу та якість продукту, тому наразі прагнуть зменшити ці ефекти. Відомо, що перемішування має значний вплив на агрегацію кристалів тому звичайною практикою для зменшення ступеня агрегації є збільшення швидкості перемішування рідини, проте при кристалізації ця дія має два протилежні ефекти [11]:

- з одного боку, збільшення режиму змішування дозволяє кращий розподіл фаз, які присутні у системі;

- з іншого боку, збільшення зіткнень частинок призводить до руйнування частинок більшого розміру, впливаючи на природний ріст кристалів, сприяючи утворенню частинок малого розміру, що може призвести до втрат матеріалу у вигляді пилу.

Ефективність змішування є критичним фактором, оскільки недостатнє перемішування може вплинути на якість кінцевого продукту, знизити продуктивність процесу та вплинути на загальну операційну ефективність. Механічне перемішування, яке зазвичай реалізується за допомогою резервуарів зі змішувачами є стратегією, яка широко використовується для сприяння ефективній змішувальності в промислових процесах [29]. Системи механічного змішування дозволяють покращити однорідність розподілу концентрації та температури всередині системи, що оптимізує тепло- та масоперенесення і прискорює хімічні реакції, особливо в системах пов'язаних з кристалізацією. Швидкість обертання змішувача є ключовим параметром, оскільки він регулює енергію, передану рідині, а отже, ефективність змішування. Правильне проектування та експлуатація системи змішування є необхідними для забезпечення оптимальної роботи у процесах, що включають рідкі, тверді або газоподібні фази.

Невідповідний вибір швидкості змішування може спричинити негативні наслідки, бо занадто високі швидкості можуть негативно вплинути на процес

					ННІЕТ КНУ.133.зГМБ-22.2026.ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Спільняк			Удосконалення обладнання для кристалізації цукру			Літ.	Арк.	Аркуші	
Перевір.		Омельченко								23	15
Н. Контр.		Омельченко						ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО			
Затверд.		Цвіркун									

кристалізації. Інтенсивне та тривале змішування може змінити структуру кристалів, впливаючи на його кінцеві властивості і, отже, на якість отриманого продукту. Механічно змішані резервуари зазвичай мають циліндричну форму і обладнані вертикальним валом (вертикальна вісь), розташованим по центру ємності [12-15]. Залежно від конструкції та застосування верхня частина бака може бути герметично закрыта або залишатися відкритою для навколишнього середовища. Геометричні пропорції механічно змішаного бака зазвичай трохи змінюються залежно від його призначення. Висота рідини приблизно дорівнює діаметру резервуара, діаметр робочого колеса зазвичай становить одну третину діаметра бака. Рух вала забезпечується мотором, розташованим зверху, з'єднаним з редуктором швидкості.

Коли режим потоку є турбулентним, наявність або відсутність дефлекторів значно впливає на ефективність перемішування. За відсутності дефлекторів рідина рухається по коловій траєкторії з низькою радіальною швидкістю, що спричиняє погане осьове перемішування та утворення вихору. Встановлення дефлекторів запобігає круговому руху рідини, стримує утворення вихору та покращує швидкість перемішування шляхом збільшення осьового потоку. Однак у високов'язких рідинах наявність дефлекторів може створювати мертві зони, що впливає на ефективність процесу [13-15, 29]. У процесах, де вводять частинки, утворення вихору може бути корисним, оскільки воно допомагає переміщати частинки до зони лопаті, де перемішування є більш інтенсивним, що полегшує їх диспергування в рідині. Ефективність системи змішування також залежить від конструкції та правильного вибору лопатей. Існує безліч конструкцій у промисловості, і вибір лопаті залежить від типу процесу, властивостей рідини (особливо в'язкості), пропускної здатності та необхідної швидкості зсуву.

Кожна лопать генерує специфічний потік всередині резервуара, що дозволяє рециркуляцію рідини до робочого колеса. Робочі колеса класифікують головним чином на два типи залежно від їхнього характеру потоку: осьові та радіальні. В осьових робочих колесах рідина рухається паралельно осі робочого колеса, тоді як у радіальних робочих колесах рідина виштовхується перпендикулярно осі спрямовуючись до стінок резервуара. Проте класифікація та характер потоку повинні розглядатися гнучко, оскільки такі фактори, як розміри робочого колеса, його положення в резервуарі та в'язкість рідини, можуть впливати на комбінацію або переважання того чи іншого характеру потоку.

У процесі змішування в кристалізаторах застосовуються активні та пасивні змішувачі. Активні змішувачі базуються на зовнішній силі або полі. Пасивні покладаються на рух рідини над нерухомими структурами. З одного боку, розподіл вхідного потоку та об'єднання у точках впорскування чи змішування можуть спричинити пасивне змішування. З іншого боку, геометрія апарату може порушувати потік, наприклад, за допомогою гребенів, жолобів, вигинів або конструкцій типу «риб'ячий хребет». Активні змішувачі ефективні складні в експлуатації та більш схильні до помилок, ніж пасивні [12]. Тому пасивні змішувачі є вигідними, за умови, що збільшена площа поверхні не

					ННІЕТ КНУ.133.зГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

призведе до проблем із забрудненнями. Залежно від концепції змішування, виникають різні гідродинамічні профілі, які можна охарактеризувати за рівнем просторових неоднорідностей та змінюваними швидкостями під час зіткнень кристалів, наприклад, зі змішувачем. Тип зіткнень кристалів зазвичай характеризується високою енергетичною інтенсивністю, а відповідне змішування дає однорідний профіль змінних стану. Змішування впливає на всі явища кристалізації, зокрема на руйнування, агрегування та нуклеацію. нуклеація, ріст та розчинення також можуть впливати на локальні відмінності у перенасиченні.

Система змішування має забезпечувати [17, 18]:

- у збовтаній суспензії розглядалася лише гетерогенна система з двох фаз: відповідна розчину в рідкому стані, яку називають рідкою фазою, і відповідна утворенню кристалічних твердих частинок, яку називають дискретною фазою;
- зміна швидкості в коливальній системі присутня як в осьовому, так і в радіальному напрямку;
- розглядається ізотермічна система;
- розглядається сталий об'єм суміші протягом часу;
- умови роботи є періодичними;
- розглядається система повного змішування;
- аналізу підлягає лише стадія росту кристала, оскільки стадія нуклеації вважається дуже малою в порівнянні зі стадією росту;
- передбачається, що генерація або втрата речовини між фазами всередині диференційного елемента системи відбувається через ріст дискретної фази;
- вважається, що густина кристала є сталою;
- утворені кристали мають правильну кубічну геометрію при якій зміна розмірів граней відбувається лінійно;
- розглядається лише масоперенос від рідкої фази до дискретної фази.

Змішування є елементом надзвичайної важливості, оскільки воно впливає на швидкість реакції та на розмір кінцевих кристалів. Швидкість змішування та тип використаного змішувача визначають варіації в розподілі розмірів кристалів. Важливо підтримувати рідину в підвішеному стані під час кристалізації, бо змішування виконує більш складну роль, ніж просто змішування фаз. Змішування впливає не лише на розподіл, а й на механізми нуклеації.

Обрано конструкцію, що базується на пасивному змішуванні (рис. 2.1). Конструкція лопатей, що складають робоче колесо дозволяє рідині текти в резервуарі радіально та тангенціально з невеликим вертикальним рухом до змішувача. Струми, які воно створює, рухаються назовні до стінки резервуара і потім течуть вгору або вниз. В'язкість кристалізованої суспензії є характерною для умов температури та перемішування за яких виконують процес, оскільки саме ці змінні визначають концентрацію та розподіл зважених твердих речовин. Умови перемішування зі змінною швидкістю можуть прискорити швидкість кристалізації на початку процесу і проявляти в кінетиці кристалізації розподілену поведінку у стабільній фазі порівняно з умовами перемішування з постійною швидкістю. Змінне коливання відносно горизонтальної осі

					ННІЕТ КНУ.133.зГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

сприятиме досягненню найвищої швидкості кристалізації і, відповідно, досягнення стабільної фази за найменший час. Специфікації лопатей змішувача наведено в таблиці 2.1.

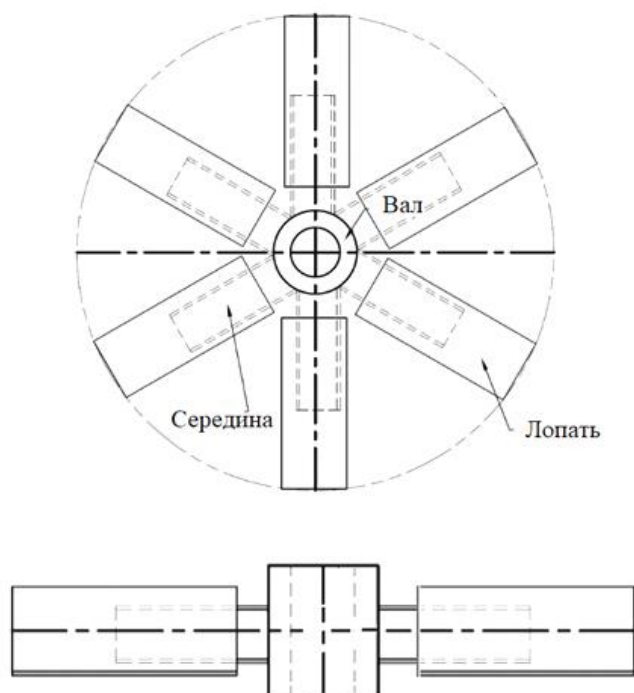


Рисунок 2.1 – Система змішування в кристалізаторі

Таблиця 2.1 – Характеристика лопатей змішувача

Параметри	Значення
Висота лопаті	0,018 м
Довжина лопаті	0,023 м
Висока вузька частина лопаті	0,005 м
Довжина вузької частини лопаті	0,013
Щільність матеріалу	2700 кг см ⁻³

2.2 Система періодичної кристалізації

Тип кристалізатора, який було обрано – періодичний кристалізатор зі механічним змішуванням. Кристалізатор такого типу дає змогу отримати дрібніші та більш однорідні кристали і скоротити час процесу. Система обрана через легкість її експлуатації та конструкції порівняно з іншими кристалізаторами, які використовують більше обладнання та потребують більше витратних матеріалів. Одним із недоліків цього обладнання є відсутність контролю за температурою розчину та його подачею в змішувальний резервуар. Цикл кристалізації починається із формування кристалів у цукровому розчині і завершується розділенням твердої та рідкої фаз. Кожен цикл проходить у три етапи [11]:

- кристалізація сахарози в рідкому стані у розчині за допомогою процесу кристалізації;
- перемішування, що дозволяє максимально вичерпати маточний сироп

шляхом застосування процесу кристалізації за охолодженням;

– центрифугування, що є етапом розділення кристалів, які містяться у розчині.

Кристалізація методом випарювання здійснюється під зниженим тиском. Кристалізація методом охолодження проводиться при атмосферному тиску у відкритих напівциліндричних резервуарах, механічно змішаних за допомогою лопатей (рис. 2.2). Випаровування здійснюється у кристалізаторах, які можуть бути як безперервними так і періодичними. В ньому виконуються всі етапи повної кристалізації: виготовлення основи варіння до кристалічного росту. Тому буде обладнано періодичний кристалізатор необхідними датчиками контролю для оптимізації процесу кристалізації. Кристалізатор даного типу – це резервуар з нержавіючої сталі, що складається з циліндричного корпусу, закритого куполом і конічним круглим дном. Особлива геометрія днища кристалізатора полегшує витікання дуже в'язкого суспензійного розчину, а саме масового сиропу наприкінці кристалізації [19-21]. Кристалізатор оснащений у нижній частині пучком 1, який служить для циркуляції теплоносія, а саме пари. Висота цього пучка становить близько однієї третини загальної висоти. Кристалізатор має в центрі резервуар 2, який забезпечує рециркуляцію розчину. Лопаті механічного змішувача 3 розташовані всередині цього резервуару. Вхідний отвір 4 для теплоносія передбачений на бічній стінці апарата. Вихід 5 передбачено для відведення неконденсованих газів. Також присутні виходи 6, які дозволяють відводити конденсовану воду, що міститься в кристалізаторі. Вихідний отвір 7 для отриманої проміжного розчину в кінці випаровування розташований у найнижчій точці кристалізатора.

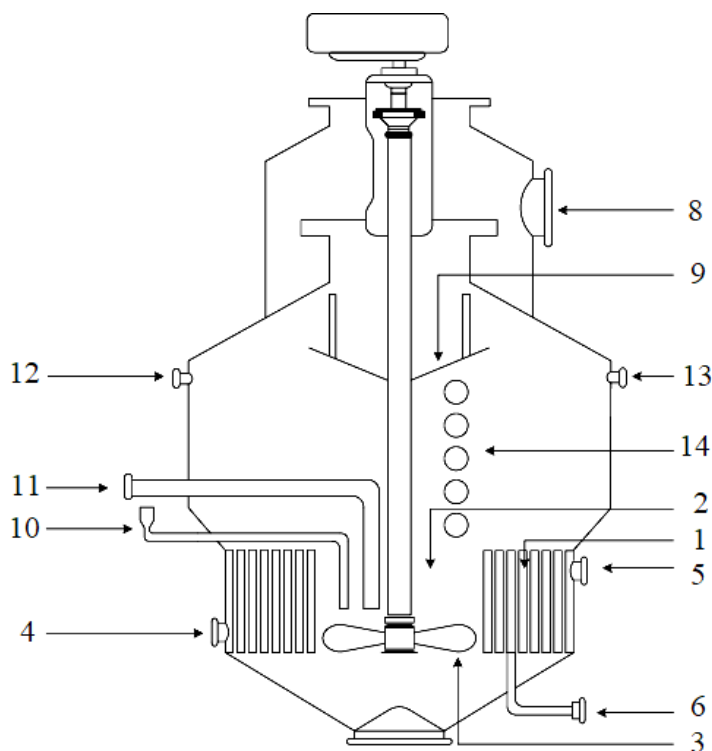


Рисунок 2.2 – Періодичний кристалізатор

Вихід 8 дозволяє здійснювати виділення водяної пари під час концентрації розчину. Під отвором для виходу пари розташований деглюкозатор 9. Водяна пара, що виділяється під час кристалізації, забирає з собою дрібні частинки суспензії, включаючи сахарозу в рідкому стані. Деглюкозатор має велику пористу металеву поверхню, яка призначена для забезпечення видалення водяної пари. Краплі води, що містять сахарозу в рідкому стані злипаються на поверхні деглюкозатора, а потім зповзають під дією гравітаційного поля. Кристалізація шляхом випаровування ініціюється розчином, що містить мікрокристали цукру, що вводять в суміш у пересиченому стані через трубку, що виходить у центральний резервуар кристалізатора, який розташований прямо над лопатями змішувача 10. Ріст кристалів сахарози вимагає подачі речовини, що містить сахарозу в рідкому стані [19-21]. Механічне змішування розподіляє живильні розчини в суспензії. Безперервне змішування забезпечує однорідність пересичення розчину та дозволяє припустити, що швидкість кристалізації також є однорідною. Після кристалізації здійснюється відкриття вентиляційного отвору 12, розташованого прямо під куполом, що дозволяє повернутися до атмосферного тиску. Подавач пари 13 розташований у верхній частині циліндричного корпусу ємності. Використовують пару під тиском для промивки пристрою між двома кристалізаціями. Скляні вікна 14 розташовані на бічній поверхні циліндричного корпусу, дозволяють оператору спостерігати за внутрішнім простором апарату під час кристалізації.

Площа та об'єм камери кристалізатора, площа циліндра [16, 20]

$$AT = AL + 2 * \pi * r^2$$

$$AL = 2 * \pi * r * h$$

Отримаємо

$$AL = 2 * 3,1416 * 22.5\text{cm} * 50\text{ cm}$$

$$AT = (2 * 3,1416 * 22.5\text{cm} * 50\text{ cm}) + 2 * 3,1416 * (22.5\text{cm})^2$$

$$AT = 1002483\text{ cm}^2 = 100,2483\text{ m}^2$$

Об'єм циліндра

$$V = \pi * r^2 * h$$

$$V = 3,1416 * (22.5\text{cm})^2 * 50\text{cm}$$

$$V = 79521,75\text{ cm}^3 = 0,0795\text{ m}^3$$

Площа та об'єм, що мають форму усіченого конуса [16, 20]

$$AT = \pi * G * (r_1 + r_2) + \pi(r_1^2 + r_2^2)$$

$$AT = 3,1416 * 25\text{cm} * (22,5 + 1,588) + 3,1416((22,5)^2 + (1,588)^2)$$

$$AT = 3490,22\text{cm}^2 = 0,3490\text{ m}^2$$

					ННІЕТ КНУ.133.зГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Об'єм конуса [16, 20]

$$V = \frac{\pi}{12} * h(D^2 + (D * d) + d^2)$$
$$V = \frac{3,1416}{12} * 10(45^2 + (45 * 3,175) + (3,175)^2)$$
$$V = 5701,89 \text{ cm}^3 = 0,0057 \text{ m}^3$$

Об'єм сопла

$$V = \frac{\pi}{4} * h * (D^2 - d^2)$$
$$V = \frac{3,1416}{4} * 3\text{cm} * ((4,22)^2 - (2,1)^2)$$
$$V = 31,173\text{cm}^3 = 0,00003\text{m}^3$$

Об'єм осі

$$\varnothing = 1,9 \text{ cm}; r = 0,95 \text{ cm}; h = 47 \text{ cm}$$
$$V = 3,1416 * (0,95\text{cm})^2 * 47\text{cm}$$
$$V = 133,26\text{cm}^3 = 1,3326\text{m}^3$$

Обсяг лопатевого змішувача

$$V = \frac{\pi}{4} * h * (D^2 - d^2)$$
$$V = \frac{3,1416}{4} * 2,4\text{cm} * ((3,8\text{cm})^2 - (19,9\text{cm})^2)$$
$$V = 20,414 \text{ cm}^3 = 0,00002\text{m}^3$$

Обсяг лопатей [16, 20]

$$V = \left[\frac{(b * h)}{2} \right] * e$$
$$V = \left[\frac{(8,6\text{cm} * 8,4\text{cm})}{2} \right] * 0,3\text{cm}$$
$$V = 10,836 \text{ cm}^3 = 0,1084 \text{ m}^3$$

Об'єм трикутної області

$$V = \frac{(\pi * r^2 * h)}{2}$$
$$V = \frac{(3,1416 * (4,32\text{cm})^2 * 0,3\text{cm})}{2}$$
$$V = 8,713\text{cm}^3 = 8,713 + 10^{-6}\text{m}^3$$

					ННІЕТ КНУ.133.зГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

2.3 Фази кристалізації в періодичному кристалізаторі

Кристалізація – це природний процес, який відбувається, коли тверде тіло осаджується з рідини або газу. Процес кристалізації відбувається внаслідок зміни фізичних властивостей рідини, наприклад, зміни температури, зміни її кислотності. Процес кристалізації здійснюється на основі розміру та форми залучених молекул, а також їхніх хімічних властивостей. Кристали можуть складатися з одного виду атомів, різних видів іонів або навіть величезних молекул, таких як білки. Елементарна комірка є найменшою одиницею кристалу. Це базова форма атомів або молекул, до якої можна прикріпити більше одиниць [31]. Кристалізація є термічним розділенням, а отже, і процесом очищення, який дає твердий продукт із розчину або пари. Як і для всіх термічних розділень, необхідні умови нерівноваги як рушійна сила процесу. Тут випаровування розчинника або зниження температури (охолодження) є найпоширенішими способами, що застосовуються для створення необхідних умов нерівноваги. Тиск також можна використовувати для забезпечення стану нерівноваги, необхідного для фазового переходу. Проте у промислових застосуваннях цей параметр найчастіше підтримується постійним.

Головною особливістю, яка відрізняє кристалізацію від інших теплових процесів розділення, є те, що вона призводить до утворення твердого продукту. Кристалізація є високоселективним процесом і відбувається при нижчих температурах у порівнянні з розділенням дистиляцією для того ж матеріалу. Кристалізація з розплаву має додаткову перевагу у тому, що не потребує розчинника, хоча цей метод не підходить для всіх матеріалів [30]. Існує багато причин зростаючого значення кристалізації як промислового процесу розділення. Можливість маніпулювати макроскопічними властивостями кристалів, такими як форма та розмір, шляхом обдуманого вибору умов кристалізації робить цю технологію дуже привабливим варіантом у харчовій промисловості, де надзвичайно важливі відтворювана якість продукту з чітко визначеними властивостями (текучість, колір, характеристики розчинення, поліморфна форма тощо).

Розчин – це однорідна суміш двох або більше видів. Для рідкого розчину насичення досягається тоді, коли рідка фаза, яка перебуває в контакті з твердою фазою, більше не змінює свій склад. Насичений розчин, отже, має постійний склад, який не змінюється при додаванні подальшої кількості розчиненої речовини. У системі з двох компонентів розчинність одного компонента в іншому залежить від температури та тиску. Для систем з трьох і більше компонентів розчинність одного компонента також залежить від відносної кількості інших наявних компонентів [30]. Однак залежність розчинності від температури може бути значною, тому важливо вказувати температуру, для якої наводять розчинність навіть за нормальних умов. Зазвичай для розчинів твердих речовин у рідинах використовують терміни, що позначають рідкий компонент як розчинник, а твердий компонент як розчинену речовину, навіть якщо кількість розчиненої речовини в розчині перевищує кількість розчинника.

					ННІЕТ КНУ.133.зГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для подання розчинностей використовуються різні заходи складу і вибір певного набору одиниць слід ретельно підбирати відповідно до мети, для якої потрібні дані.

Процес кристалізації складається з двох основних подій. Одна – це нуклеація, а інша – ріст кристалів, які також зумовлені термодинамічними властивостями та хімічними властивостями. Нуклеація – це основний етап, коли молекули розчинених речовин або атоми, розсіяні в розчиннику, починають збиратися у кластери, які стають стабільними за поточних умов роботи. Ці стабільні кластери утворюють ядра. Тому кластери мали досягти критичного розміру, щоб стати стабільними ядрами. Саме на стадії нуклеації атоми або молекули розташовані у визначений і періодичний спосіб, що визначає кристалічну структуру [31]. Повний процес кристалізації зазвичай здійснюється наступним чином: у кристалізатор вводять певну кількість розчинника та стандартного розчину, суміш концентрують шляхом випаровування води. Коли електропровідність розчину досягає відповідного значення, вважають, що він перебуває в стані перенасичення, сприятливому для зароджування кристалів. Тому відбувається зародження кристалів у розчині. Коли кристали у розчині зростають, перенасичення середовища зменшується. Додавання сировини у поєднанні з випаровуванням дозволяє підтримувати перенасичення розчину. Перенасичення є важливим параметром і його нестабільність може призвести до шкідливих ефектів [11]:

- спонтанна поява кристалів при занадто високому перенасиченні;
- розчинення кристалів через надто низьку перенасиченість.

Фази кристалізації в періодичному кристалізаторі наведено на рисунку 2.3. Підйом 1 (фаза 13) триває до заповнення резервуара на 90%–95%. Після завершення цієї фази резервуар наполовину спорожнюють, щоб провести ще один підйом: підйом 2. Цей новий підйом використовується для подальшого зростання кристалів. Зазвичай часи варіння для підйомів 1 і підйомів 2 порівнянні (приблизно 120–130 хвилин). Повний цикл неперервної кристалізації здійснюється у сім етапів, протягом яких контроль кристалізації здійснюється шляхом відстеження відповідного профілю.

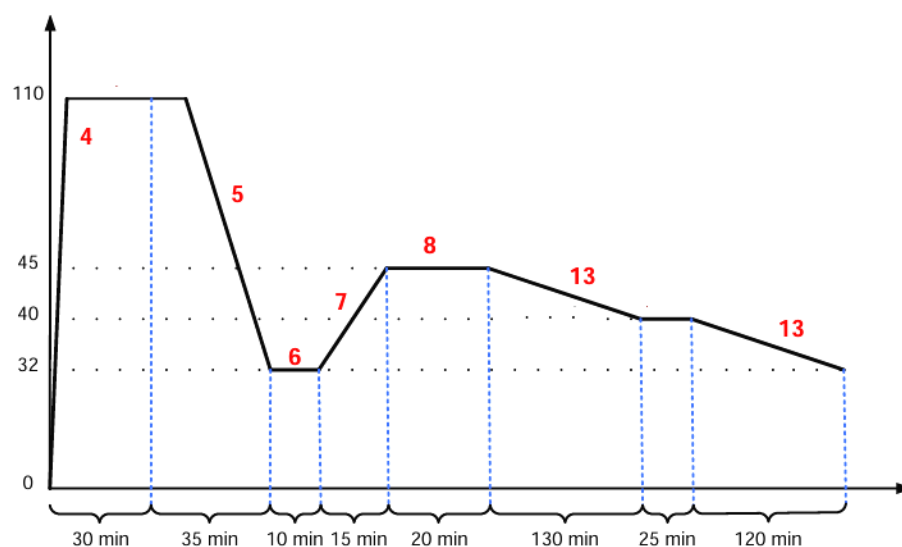


Рисунок 2.3 – Фази кристалізації в періодичному кристалізаторі [11]

- 4 – фаза введення цукрового розчину та змішування;
- 5 – фаза концентрування суміші шляхом випаровування води;
- 6 – фаза гранування для росту кристалів;
- 7 – фаза промивання суміші;
- 8 – фаза стабілізація;
- 13 – фаза першого підйому: кристалічне зростання;
- 13 – фаза другого підйому: кристалічне зростання.

Оскільки перенасичення технічних розчинів на цукрових заводах не є фізичною величиною, яку можна виміряти в реальному часі, зазвичай працюють з іншими величинами, що дають уявлення про це перенасичення в середовищі. Для цього використовують вимірювання електричної провідності розчину як відображення перенасичення середовища. Щоб зберегти певну узгодженість подання тому доцільно пронумерували фази так само, як на підприємстві.

2.4 Система контролю процесу кристалізації

Щоб досягти сталого режиму роботи необхідна стратегія контролю, яка дозволяти маніпулювати певними змінними, такими як, наприклад, потік сировини, температура, тиск. Одним з головних параметрів є температура за якої експлуатується кристалізатор, оскільки температура кристалізатора впливає на ступінь перенасичення та швидкість нуклеації і росту. Одним із недоліків обладнання для кристалізації є відсутність контролю за температурою розчину та його подачею в змішувальний резервуар. Основні змінні, які повинні контролюватися в процесі кристалізації – це перенасичення розчину, поверхнева площа кристала доступна для росту і швидкість нуклеації [32]. На них впливають численні вторинні змінні, які можна розділити на дві категорії – змінні конструкції обладнання та динамічні змінні, що впливають на кристалізацію. Маніпулювання змінними, що впливають на температуру кристалізатора, може бути використане для моніторингу, контроль швидкості перемішування є важливий, оскільки ця змінна безпосередньо впливає на швидкості нуклеації та росту. Маніпулювання швидкістю перемішування запобігає локальним перенасиченням та сприяє більш однорідному продукту. Тому запропоновано встановити додаткові датчики з метою кращого розуміння різних процесів, що виникають під час кристалізації (рис. 2.4).

1. Рефрактометри дозволяють вимірювати вміст розчинених твердих речовин у розчині. Датчик забезпечує можливість онлайн-вимірювання розчинів сахарози, які не містять кристалів цукру. Вважається за доцільне встановили два онлайн-рефрактометри: перший розташований на подачі, а другий у кристалізаторі прямо над пучками, забезпечує доступ до розчину. Рефрактометри широко використовуються для вимірювання кількості розчинених речовин у розчинах, що містять переважно сахарозу [17, 26]. Взаємозв'язок між показником заломлення та кількістю сухої речовини добре відомий для сахарози і є основою шкали датчика, яка визначає кількість грамів сахарози на 100 грамів водного цукрового розчину. Тобто 50 буде означати 50

					ННІЕТ КНУ.133.зГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

грамів твердого матеріалу на 100 грамів розчину. Цей зв'язок застосовується для великої кількості подібних речовин, тому шкала широко використовується в харчовій промисловості. Проте показник заломлення цукрового розчину змінюється залежно від температури, тоді як його твердий вміст залишається незмінним. Рефрактометри вимірюють критичний кут заломлення через зразок. Критичний кут заломлення змінюється залежно від концентрації. Зазвичай він зростає зі збільшенням концентрації. Колір, газ і розчинені частинки не впливають на результати вимірювання. Рефрактометри можуть бути розроблені як для безперервного так і для моніторингу зразків.

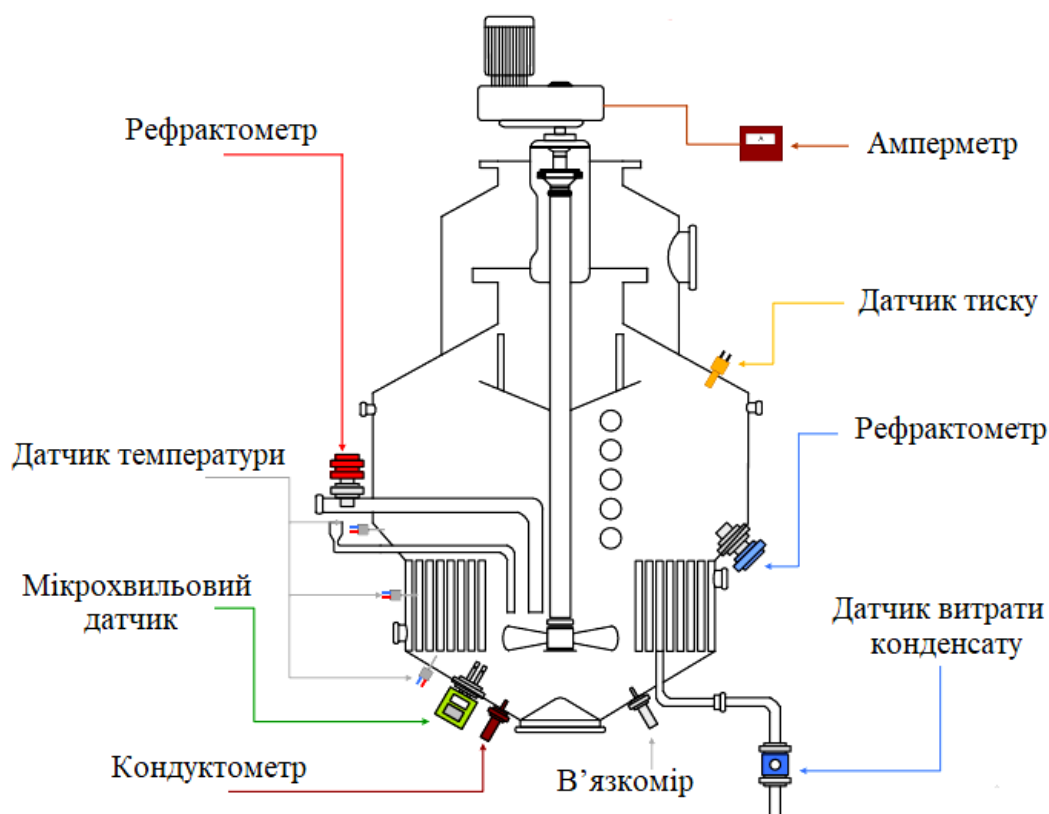


Рисунок 2.4 – Система контролю процесу кристалізації

2. Мікрохвильовий датчик вимірює вмісту цукру та дозволяє вимірювати вміст сухих речовин, які додані до вмісту твердих частинок у розчині. На цукрових заводах цей прилад дає можливість онлайн-вимірювання кристалів цукру та сухих речовин в суспензії. Точне визначення вмісту сухої речовини та/або щільності має велике значення в різних відділах цукрового заводу. Для всіх цих вимірювальних завдань технологія мікрохвиль пропонує ефективне рішення. Залежно від типу процесу датчик повинен відповідати спеціальним вимогам, наприклад, повинен бути оснащений пристроєм для очищення у процесах безперервної кристалізації, щоб забезпечити надійне вимірювання протягом усього часу роботи. Постійне вимірювання сухої речовини необхідне на всьому протязі процесу кристалізації чого неможливо досягти лише за допомогою рефрактометрів, таким чином неможливо зробити вимірювання на стадії кристалізації [18, 27]. Під час виробництва цукру є й інші процеси в яких дуже важливе визначення сухої речовини.

Характеристики мікрохвиль дозволяють точне визначення концентрації

					ННІЕТ КНУ.133.зГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

твердих речовин, наприклад, вимірювання вологості у кристалізованому цукрі. Вимірювання у рідких речовинах, таких як сирий сік, розведений сік, медові сиропи, здійснюється за допомогою техніки вимірювання за допомогою мікрохвиль, яка вимірює концентрацію кристалів цукру подібним чином, як вимірюють суху речовину у розчині. Для її калібрування мікрохвильові хвилі (фаза та загасання) орієнтуються на значення аналізованої проби в лабораторії; якщо у пробі присутні кристали то вони повинні бути спочатку розчинені (шляхом розведення) і таким чином визначається загальний вміст твердих речовин у розчині.

3. В'язкомір для вимірювання динамічної в'язкості. Сьогодні існує широкий спектр технологій в'язкометрів, кожна з яких базується на різних фізичних принципах і оптимізована для конкретних застосувань, типів рідин і вимірювальних умов. Розуміння принципів експлуатації, переваг і обмежень кожного основного типу є ключовим для вибору відповідного інструмента для конкретного завдання. Ротаційні в'язкометри є найпоширенішими інструментами для вимірювання динамічної в'язкості [19]. Основний принцип полягає у зануренні геометрично визначеного елемента, відомого як шпindel, у рідину та його обертанні з постійною, відомою швидкістю. Внутрішнє тертя рідини створює в'язкий опір на шпindel, створюючи опір обертанню. Двигун приладу повинен застосувати певну силу або крутний момент, щоб подолати цей опір і підтримувати постійну швидкість. Необхідний крутний момент вимірюється датчиком і прямо пропорційний динамічній в'язкості рідини. Ключовою перевагою є можливість змінювати швидкість обертання, що змінює швидкість зсуву, дозволяючи характеризувати рідини, залежні від зсуву.

4. Кондуктометри вимірюють здатність розчину проводити електричний струм – характеристика, безпосередньо пов'язана з концентрацією іонів у розчині. Вимірювач провідності працює за простим але ефективним принципом: подає напругу між двома електродами, які занурені в розчин. Отриманий струм, що проходить через розчин є прямо пропорційний провідності розчину. Вимірювач вимірює цей струм і розраховує провідність. На точність показників датчика може впливати кілька факторів [22, 28]. Одним із основних чинників є температура. Оскільки провідність зростає з температурою то більшість сучасних приладів мають функцію компенсації температури для забезпечення точних показників у діапазоні температур. Також наявність певних іонів може непропорційно впливати на провідність. Вимірювачі провідності працюють за принципом: електропровідний розчин містить заряджені частинки (іони), які дозволяють протікати електричний струм. Чим більше іонів у розчині, тим вища його провідність. Лічильник подає змінну електричну напругу до розчину і вимірює отриманий струм, який перетворюється на значення провідності.

5. Датчики температури – це пристрій, який вимірює температуру маси цукрового розчину. У цих датчиках використовуються елементи такі як детектор температури опору для вимірювання температури, яка створюється шляхом обмотування тонкого дроту навколо кераміки або скла. Термопара також використовується в датчиках температури, які виготовляються з двох

різних матеріалів і генерують напругу при зміні температури. Напруги прямо пропорційні температурі, тобто при підвищенні температури напруга також зростає. Аналогічно, коли температура знижується то напруга також знижується. Основним параметром, який вимірюють електронні системи та системи моніторингу й діагностики є температура, ключовий фактор, що впливає на якість і ефективність промислового обладнання. Вимірювання температури присутнє як у невеликих, простих системах і пристроях так і в передових промислових системах [23, 33, 34]:

Датчики термостійкості. Робота датчиків термостійкості базується на зміні опору залежно від температури. Зі зростанням температури опір датчика може зменшуватися або збільшуватися, зазвичай нелінійно. Кожен датчик має власну термоелектричну характеристику, яка регулюється відповідно до матеріалу. На основі цього ми можемо визначити природу змін опору як функцію температури.

Термоелектричні датчики (термопари). Робота термопар базується на створенні різниці потенціалів у точці контакту між двома різними металами, пропорційної різниці температур між ними. Кожна термопара має різні властивості, які залежать від типів використаних металів. Існують певні типи термопар, які описані в стандартах щодо температурних датчиків. Кожна термопара має різні температурні характеристики тому їх правильна робота вимагає спеціальних систем керування, які за допомогою інтегрованих компонентів лінеаризації дозволяють точно вимірювати виміряну температуру. Крім того, системи на основі термопари невеликі, не потребують додаткової енергії та є надійними. Напівпровідникові датчики працюють так само, як і датчики термостійкості. Єдина різниця – це знак коефіцієнта опору, який можуть мати термістори.

Інтегровані датчики. Принцип роботи інтегрованих датчиків полягає у вимірюванні температури за допомогою вимірювального елемента, а потім обробці її за допомогою схем, розміщених у одному корпусі інтегральної схеми. Зі зростанням температури напруга відповідно знижується. Датчики найчастіше зустрічаються в електронних пристроях, захищаючи їхню схему від перегріву, що може призвести до незворотних пошкоджень.

6. Датчик тиску – це пристрій, який може виявляти сигнал тиску і перетворювати його на придатний вихідний електричний сигнал, вимірює тиск в кристалізаторі. Датчик тиску зазвичай складається з чутливого до тиску елемента та пристрою обробки сигналів. Залежно від різних типів тиску, датчики тиску можна поділити на датчики манометра, датчики диференціального тиску та датчики абсолютного тиску. Датчик тиску виявляє силу, що чиниться рідиною (рідиною або газом) на поверхню і перетворює цю силу на електричний сигнал. Сигнал можна виміряти, відобразити або використовувати для керування зворотним зв'язком в автоматизованих системах. Датчики тиску часто називають передавачами або перемикачами залежно від конструкції та продуктивності.

Датчик тиску перетворює механічні зміни тиску в газах або рідинах на електричні сигнали [24, 35, 38]. Найпоширеніші типи датчиків тиску базуються

					ННІЕТ КНУ.133.зГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

на п'єзореzystивному, ємнісному або п'єзоелектричному принципі. Датчик тиску вимірює тиск, що виникає внаслідок деформації мембрани під тиском та перетворює це навантаження на електричний сигнал за допомогою різних технологій для обробки та передачі зовнішнім пристроям, які контролюють і контролюють процеси на основі тиску. Вимірювання тиску є однією з найважливіших і найпоширеніших технологій для моніторингу та керування машинами і системами в технологічних технологіях. В основному, існують різні типи датчиків тиску, засновані на різних принципах [24, 38, 39]:

- резистивні датчики тиску вимірюють тиск, змінюючи електричний опір під час механічного навантаження на матеріал;
- п'єзоелектричні датчики тиску генерують електричну напругу, зміщуючи навантаження на п'єзоелектричний матеріал під час прикладання тиску;
- ємнісні датчики тиску виявляють зміну ємності конденсатора, спричинену деформацією мембрани;
- індуктивні датчики тиску вимірюють тиск на основі зміни індуктивності котушки при переміщенні магнітного сердечника або мембрани;
- датчики тиску використовують мікромеханічні структури на кремнієвому чіпі для вимірювання тиску.

7. Датчик витрати конденсату (конденсатометр) – це спеціалізований витратомір, призначений для вимірювання потоку конденсованої пари або конденсату в замкненій паровій системі. Найбільш розповсюдженні [25, 40]:

Турбінні конденсатометри мають обертовий ротор всередині труби. Коли конденсат проходить крізь нього то він обертає ротор. Швидкість ротора пропорційна швидкості потоку. Лічильники прості та доступні але рухомі частини з часом зношуються, тому обслуговування стає важливим фактором.

Ультразвукові конденсатометри використовують звукові хвилі для вимірювання потоку. Перетворювачі надсилають і приймають ультразвукові імпульси через трубу. Час, який необхідний для проходження імпульсу показує швидкість потоку.

Магнітні витратоміри генерують магнітне поле і вимірюють напругу, що виникає при проходженні провідного конденсату. Знову ж таки, відсутність рухомих частин означає менше обслуговування. Однак провідність конденсату та матеріалів труб може впливати на результати.

На основі вище зазначеного можна вважати, що на сьогодні кристалізація вважається мистецтвом, що пояснюється переходом рідкої фази в тверду, що відбувається під час кристалізації. У промисловості кристалізація зазвичай здійснюється в системах змішувального типу, що може впливати на небажані властивості продукту. Перемішування є частиною ефективного дизайну кристалізаторів, оскільки значно впливає на гідродинамічну поведінку системи, сприяючи або обмежуючи належний розвиток кристалів. Проте змішування є однією з обмежуючих умов процесу кристалізації. Ефективність змішування є критичним фактором, оскільки недостатнє перемішування може вплинути на якість кінцевого продукту, знизити продуктивність процесу та вплинути на загальну операційну ефективність. Невідповідний вибір швидкості змішування може спричинити негативні наслідки, бо занадто високі швидкості можуть

					ННІЕТ КНУ.133.зГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

негативно вплинути на процес кристалізації. Інтенсивне та тривале змішування може змінити структуру кристалів, впливаючи на його кінцеві властивості та на якість отриманого продукту.

Обрано конструкцію, що базується на пасивному змішуванні. Конструкція лопатей, що складають робоче колесо дозволяє рідині переміщуватися в резервуарі радіально та тангенціально з невеликим вертикальним рухом. В'язкість кристалізованої суспензії є характерною для умов температури та перемішування за яких виконують процес, оскільки саме ці змінні визначають концентрацію та розподіл зважених твердих речовин. Умови перемішування зі змінною швидкістю можуть прискорити швидкість кристалізації на початку процесу і проявляти в кінетиці кристалізації розподілену поведінку у стабільній фазі порівняно з умовами перемішування з постійною швидкістю. Змінне коливання відносно горизонтальної осі сприятиме досягненню найвищої швидкості кристалізації і, відповідно, досягнення стабільної фази за найменший час.

Одним із недоліків обладнання для кристалізації є відсутність контролю за температурою розчину та його подачею в змішувальний резервуар. Тому запропоновано удосконалити систему контролю в кристалізаторі встановивши додаткові датчики з метою кращого розуміння різних процесів, що виникають під час кристалізації:

1. Рефрактометри дозволяють вимірювати вміст розчинених твердих речовин у розчині. Датчик забезпечує можливість онлайн-вимірювання розчинів сахарози, які не містять кристалів цукру. Вважається за доцільне встановили два онлайн-рефрактометри: перший розташований на подачі, а другий у кристалізаторі прямо над пучками, забезпечує доступ до розчину.

2. Мікрохвильовий датчик вимірює вмісту цукру та дозволяє вимірювати вміст сухих речовин, які додані до вмісту твердих частинок у розчині. На цукрових заводах цей прилад дає можливість онлайн-вимірювання кристалів цукру та сухих речовин в суспензії. Точне визначення вмісту сухої речовини та/або щільності має велике значення в різних відділах цукрового заводу.

3. В'язкомір вимірює в'язкість цукрового розчину. Основний принцип полягає у зануренні геометрично визначеного елемента, відомого як шпindel, у рідину та його обертанні з постійною, відомою швидкістю.

4. Кондуктометри вимірюють здатність розчину проводити електричний струм – характеристика, безпосередньо пов'язана з концентрацією іонів у розчині.

5. Датчики температури – це пристрій, який вимірює температуру маси цукрового розчину.

6. Датчик тиску – це пристрій, який може виявляти сигнал тиску і перетворювати його на придатний вихідний електричний сигнал, вимірює тиск в кристалізаторі. Датчик тиску зазвичай складається з чутливого до тиску елемента та пристрою обробки сигналів.

7. Датчик витрати конденсату (конденсатометр) – це спеціалізований витратомір, який призначений для вимірювання потоку конденсованої пари або конденсату в замкненій паровій системі.

					ННІЕТ КНУ.133.зГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Дослідження процесу кристалізації різних видів цукру

Кристалізація цукру відіграє важливу роль у текстурі, структурі та загальній якості сировини. Кристалізація означає утворення кристалів твердого цукру з рідкого розчину. Коли цукор розчиняється у воді або іншій рідині, молекули розпадаються і рівномірно розподіляються по всьому розчину. Однак, коли суміш нагрівається і охолоджується то молекули цукру починають знову збиратися, утворюючи тверді кристали, тобто кристалізуватися. Тепло є важливим фактором кристалізації цукру, бо коли цукор змішується з рідиною і нагрівається то молекули набирають енергію і рухаються швидше, що призводить до розчинення цукру. Коли розчин охолоджується, молекули починають сповільнюватися і знову з'єднуються, утворюючи кристали.

Коли цукор нагрівається то він спочатку повністю розчиняється в рідині. Однак, якщо розчин перегріти і швидко охолонути, цукор може передчасно кристалізуватися, що призведе до небажаної зернистої текстури, що особливо актуально у виробництві цукерок, де точний контроль температури є критично важливим. Температура при якій цукор починає кристалізуватися, відома як «точка кристалізації». Зазвичай, чим вища температура, тим важче цукру кристалізуватися і тим довше утворюється кристали. Фактори, що впливають на кристалізацію цукру [36]:

1. Температура при якій нагрівається цукор впливає на його поведінку під час кристалізації. Цукор слід нагрівати до певної температури залежно від рецепту, наприклад, карамель потребує нагрівання до високої температури, тоді як цукор для безе потрібно нагрівати менше, щоб забезпечити гладку, стабільну текстуру.

2. Концентрація цукру в рідкій суміші також впливає на кристалізацію. Висококонцентрований цукровий розчин частіше утворює великі кристали, тоді як нижча концентрація може призвести до менших і більш однорідних кристалів.

3. Вплив інших інгредієнтів, наприклад, у виробництві цукерок часто використовують кукурудзяний сироп, оскільки він містить глюкозу, яка заважає кристалізації сахарози (столового цукру), що дає гладку, блискучу текстуру замість зернистої.

4. Швидкість охолодження цукру після нагрівання також відіграє роль у кристалізації. Якщо цукор охолоджується надто швидко то він може утворювати великі кристали, тоді як повільніший процес охолодження може дати менші, дрібніші кристали. Тому важливо контролювати температуру під час приготування сиропів або карамелі.

					ННІЕТ КНУ.133.зГМБ-22.2026.ПЗ							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Спільняк			Удосконалення обладнання для кристалізації цукру			Літ.	Арк.	Аркушів		
Перевір.		Омельченко								38	6	
								ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО				
Н. Контр.		Омельченко										
Затверд.		Цвіркун										

5. Рівень вологості в навколишньому середовищі може впливати на кристалізацію цукру. У дуже сухому середовищі цукор може кристалізуватися легше, тоді як висока вологість запобігає кристалізації залишаючи цукровий розчин надто вологим. Саме тому цукор часто зберігають у герметичних контейнерах, щоб запобігти небажаній кристалізації.

Процес кристалізації можна розбити на такі ключові етапи [37]:

- розпуск (розчинення): молекули цукру розчиняються у воді, руйнуючи міжмолекулярні сили, що утримують кристали твердого цукру разом. Підвищення температури підвищує розчинність сахарози у воді, дозволяючи розчиняти більшу концентрацію цукру;

- перенасичення: розчин нагрівають для підвищення розчинності сахарози. Потім їй дають охолонути, створюючи перенасичений стан. Процес охолодження має бути ретельно контрольований, бо швидке охолодження може призвести до утворення численних дрібних кристалів, тоді як повільне охолодження сприяє росту більших, більш чітко визначених кристалів;

- нуклеація: критичний етап, коли формуються початкові кристалічні «насіння». Нуклеація може відбуватися спонтанно через випадкові коливання концентрації розчиненої речовини в перенасиченому розчині;

- ріст кристалів: після утворення ядер молекули сахарози з перенасиченого розчину дифундують до поверхні кристала і прикріплюються до структури ґратки. Процес включає складні взаємодії між молекулами розчинених речовин і існуючою кристалічною решіткою, керованими мінімізацією поверхневої енергії та загальною термодинамічною стабільністю кристалічного стану.

У роботі буде проводитися дослідження процесу кристалізації різних видів цукру, задля виявлення як різні види цукру поведуться під впливом тепла та рідини. Для дослідження обрано наступні зразки, а саме гранульований білий цукор та коричневий цукор (рис. 3.1). Коли говоримо про кристали цукру, розчинена речовина – це тверда речовина, а розчинник – це рідина, яка може розчиняти розчинену речовину.



Рисунок 3.1 – Зразки цукру для кристалізації

Можна отримати три типи розчинів із цих складників:

- ненасичений розчин, який не досяг своєї максимальної здатності розчиняти тверду речовину;

- насичений розчин, який має максимальну кількість розчиненої речовини, яку він може розчинити за певної температури;

- пересичений розчин означає, що більше розчиненої речовини

					ННІЕТ КНУ.133.зГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

розчиняється шляхом нагрівання розчину.

Для отримання кристалів цукру потрібен пересичений розчин. Можна налаштувати кілька параметрів для оптимізації розміру, форми та якості кристалів цукру [37]:

1. Контроль температури. Підтримка стабільної температури під час росту кристалів є критично важливою для досягнення однорідного розміру та морфології кристалів. Коливання температури можуть призводити до циклів розчинення та рекристалізації, що призводить до утворення менших і менш чітко визначених кристалів. Для підтримки постійної температури можна використовувати водяну баню або інкубатор із контрольованою температурою.

2. Рівень перенасичення. Ступінь перенасичення є ключовим визначником швидкості росту кристалів та розподілу розміру кристалів. Вищі рівні перенасичення сприяють швидшому зародженню та швидкості росту, але також можуть призвести до утворення менших, більш численних кристалів. Нижчі рівні перенасичення сприяють росту більших, меншої кількості кристалів.

3. Чистота розчину. Домішки в розчині цукру можуть заважати росту кристалів порушуючи структуру кристалічної решітки або діючи як інгібітори нуклеації. Використання високочистого цукру та дистильованої води, а також фільтрація розчину можуть мінімізувати ці ефекти.

4. Якість кристалів насіння. Якість і розмір кристалу насіння також можуть впливати на результат. Використання добре сформованого однокристалічного насіння сприятиме росту одного великого кристала.

5. Змішування. Хоча надмірне перемішування може порушувати ріст кристалів, м'яке перемішування допомагає покращити транспортування розчинених речовин і запобігти утворенню градієнтів концентрації в розчині.

У процесі дослідження виникли деякі проблеми, які доцільно розглянути в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Проблеми у процесі кристалізації цукру

Проблема	Можлива причина	Усунення
Відсутність кристалічного росту	Недостатня перенасичення, розчин не засіяний, наявність домішок.	Необхідно збільшити концентрацію цукру, додати кристал насіння, профільтрувати розчин, переконавшись, що використовується дистильована вода та чистий цукор.
Багато малих кристалів	Надмірне насичення, швидке охолодження.	Необхідно зменшити концентрацію цукру, охолоджувати розчин повільніше, використовувати водяну ванну з контрольованою температурою.
Каламутні або знебарвлені кристали	Присутні домішки, карамелізація цукру.	Необхідно використовувати високочистий цукор і дистильовану воду, фільтрувати розчин, уникати перегріву цукрового розчину.
Кристали, що ростуть на боках контейнера	Розчин не чистий, шорстка поверхня на контейнері.	Необхідно переконавшись, що контейнер ретельно чистий, використовувати гладкостінне скло.

Результати свідчать, що різні види цукру демонструють унікальні властивості кристалізації, що походить від їхньої молекулярної структури. Наприклад, гранульований цукор, який переважно є сахарозою, має тенденцію утворювати більші кристали завдяки своїй чистій і організованій молекулярній структурі. Натомість цукрова пудра містить невелику кількість кукурудзяного крохмалю для запобігання злипанню, що призводить до утворення дрібніших, менш організованих кристалів, які не так легко накопичуються. Природа цукру, швидкість охолодження під час кристалізації та наявність домішок або додаткових інгредієнтів можуть змінювати кінцеву текстуру та зовнішній вигляд цукрових кристалів (рис. 3.2, табл. 3.2). Різні види цукру поведуться трохи по-різному під впливом тепла та рідини:



Рисунок 3.2 – Утворення кристалів різного виду цукру

Таблиця 3.2 – Утворення кристалів

Тип цукру	Кристалізація	Головний вплив на кристалізацію
Гранульований цукор	Утворює маленькі, чітко визначені кристали	Чистий і організований для найкращих результатів
Коричневий цукор	Утворює великі кристали тільки для цього потрібно більше часу	Волога впливає на ріст кристалів
Цукрова пудра	Утворює дрібніші, менш організовані кристали	Додавання кукурудзяного крохмалю змінює текстуру і запобігає утворенню злипання

Гранульований білий цукор утворює маленькі, чітко визначені кристали. Його кристали рівномірні, що дозволяє легко розчинити та включити їх в іншу сировину. Коли гранульований цукор розчиняють у рідині, а потім охолоджують то він може утворювати дрібніші кристали, які створюють гладку текстуру у продуктах, таких як торти, печиво та глазури.

Коричневий цукор містить патоку, яка додає вологи та насиченого смаку. Наявність патоки не дозволяє цукру кристалізуватися так легко, як гранульованому цукру, що призводить до щільнішої текстури.

Коричневий цукор утворює великі кристали тільки для цього потрібно більше часу.

Цукрова пудра (цукор для кондитерів) містить цукор дрібно подрібнений і зазвичай містить невелику кількість кукурудзяного крохмалю для запобігання злипанню. Завдяки своїй дрібній текстурі цукрова пудра не кристалізується так само, як цукровий цукор. Він ідеально підходить для глазури та глазури, де потрібна гладка, кремова консистенція.

Кожен тип цукру має свій набір властивостей, які впливають на його кристалізацію. Температура та вологість відіграють ключову роль у визначенні якості та характеристик цукрових кристалів. Ці два фактори можуть або посилити ваші зусилля щодо кристалізації цукру або призвести до небажаних наслідків. Розуміння того, як маніпулювати цими змінними є важливим для досягнення ідеальних, однорідних кристалів.

Температура безпосередньо впливає на розчинність цукру у воді, що, у свою чергу, впливає на кристалізацію. Коли температура підвищується то цукор розчиняється легше, утворюючи перенасичений розчин. Умова є критичною для кристалізації але керування процесом охолодження не менш важливе. Якщо дозволити розчину охолонути занадто швидко це може призвести до утворення дрібних кристалів, які можуть втратити бажану хрусткість [4]. Підтримання поступового зниження температури дозволяє формуватися більшим кристалам, покращуючи як візуальну привабливість так і текстуру. Вологість часто ігнорується у процесі кристалізації. Високий рівень вологості в навколишньому середовищі може впливати на цукор різними способами, головним чином змушуючи його поглинати воду та злипатися разом. Гігроскопічна природа цукру може порушити цілісність кристалів, ускладнюючи досягнення ідеальної, сухої текстури. Коли рівень вологості перевищує 50% то ймовірність поглинання вологи зростає, що може призвести до непривабливих згустків, які менш привабливі як на вигляд так і на смак.

Таблиця 3.3 – Вплив температури та вологості на процес кристалізації

Температура	Вологість
Вищі температури можуть призвести до швидшого розчинення цукру але можуть утворювати менші, менш стабільні кристали.	Висока вологість може спричиняти поглинання вологи цукром, що призводить до злипання і зниження цілісності кристалів.
Нижчі температури сприяють повільнішій кристалізації, що дозволяє отримувати більші та більш виражені кристали цукру.	Низька вологість покращує процес сушіння, сприяючи більш жорсткій кристалічній текстурі

Домішки, які часто містяться у сировині для виробництва цукру можуть суттєво порушувати процеси кристалізації. Коли вводяться чужорідні речовини, такі як мінерали чи органічні сполуки то вони порушують впорядкований організацію молекул цукру. Порушення може призвести до менших, більш нерегулярних кристалів, що впливає на загальну текстуру та

смак кінцевого продукту [4]. Наприклад, наявність іонів кальцію або магнію створює конкуруючий зв'язок, який може пригнічувати здатність цукру ефективно кристалізуватися, що призводить до сиропоподібної або аморфної консистенції замість чітко визначених кристалів. Взаємозв'язок між домішками та кристалізацією не обмежується лише розміром і формою. Він також впливає на чистоту цукру. Високий рівень домішок може призвести до того, що продукт має небажані смаки або небажані кольори, що особливо шкідливо, де зовнішній вигляд і смак мають вирішальне значення, наприклад, у виробництві кондитерських виробів або напоїв.

На основі вище зазначеного можна вважати, що кристалізація цукру відіграє важливу роль у текстурі, структурі та загальній якості сировини. Кристалізація означає утворення кристалів твердого цукру з рідкого розчину. Коли цукор розчиняється у воді або іншій рідині, молекули розпадаються і рівномірно розподіляються по всьому розчину. Однак, коли суміш нагрівається і охолоджується то молекули цукру починають знову збиратися, утворюючи тверді кристали, тобто кристалізуватися. Тепло є важливим фактором кристалізації цукру, бо коли цукор змішується з рідиною і нагрівається то молекули набирають енергію і рухаються швидше. Коли розчин охолоджується, молекули починають сповільнюватися і знову з'єднуються утворюючи кристали.

У роботі досліджено процес кристалізації різних видів цукру, задля виявлення як різні види цукру поведуться під впливом тепла та рідини. Для дослідження обрано наступні зразки, а саме гранульований білий цукор та коричневий цукор. Результати свідчать, що різні види цукру демонструють унікальні властивості кристалізації, що походить від їхньої молекулярної структури. Наприклад, гранульований цукор має тенденцію утворювати більші кристали завдяки своїй чистій і організованій молекулярній структурі. Натомість цукрова пудра містить невелику кількість кукурудзяного крохмалю для запобігання злипанню, що призводить до утворення дрібніших, менш організованих кристалів, які не так легко накопичуються. Природа цукру, швидкість охолодження під час кристалізації та наявність домішок або додаткових інгредієнтів можуть змінювати кінцеву текстуру та зовнішній вигляд цукрових кристалів. Різні види цукру поведуться трохи по-різному під впливом тепла та рідини. Гранульований білий цукор утворює маленькі, чітко визначені кристали. Коли гранульований цукор розчиняють у рідині, а потім охолоджують то він може утворювати дрібніші кристали, які створюють гладку текстуру у продуктах таких як торти, печиво та глазурі. Коричневий цукор містить патоку, яка додає вологи та насиченого смаку. Наявність патоки не дозволяє цукру кристалізуватися так легко, як гранульованому цукру, що призводить до щільнішої текстури. Коричневий цукор утворює великі кристали тільки для цього потрібно більше часу.

					ННІЕТ КНУ.133.зГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

ВИСНОВКИ

Бакалаврська робота присвячена удосконаленню обладнання для кристалізації цукру. У роботі зазначено, що кристалізація вважається мистецтвом, що пояснюється переходом рідкої фази в тверду, яка відбувається під час кристалізації. В промисловості кристалізація зазвичай здійснюється в системах змішувального типу, що може впливати на небажані властивості продукту. Дуже часто операцію застосовують для отримання такої сировини, як солі та цукор. У виробництві цукру кристалізація є заключною фазою після екстракції та очищення, що дає напівфабрикат у твердому стані, легкий для зберігання та транспортування.

У першому розділі здійснено аналіз обладнання для кристалізації цукру. Зазначено, що кристалізація – процес розділення та очищення, який використовується для виготовлення різноманітної сировини. У цьому процесі відбувається фазовий перехід під час якого отримують кристалічний продукт із розчину. Кристалізація може здійснюватися з розчину, що включають розчинник (у рідкій фазі) та розчинену речовину (у твердій фазі). Процес може відбуватися за допомогою двох основних методів: охолодження та випаровування.

Аналіз наукових джерел дав змогу узагальнити, що основний робочий принцип кристалізаторів полягає у створенні умов, що сприяють утворенню кристалів шляхом охолодження або випаровування. Вибір методу залежить від конкретних вимог процесу та характеристик розчиненої речовини. Охолоджувальні кристалізатори регулюють процес охолодження так, що температура розчину падає нижче насичення. Розчинена речовина стає менш розчинною при нижчих температурах, що призводить до осадження надлишку. Поступове зниження температури сприяє добре організованому розташуванню частинок, що призводить до утворення дискретних кристалічних утворень. Випаровування розчинником починається у випарних кристалізаторах шляхом додавання тепла до розчину. Концентрація розчиненої речовини поступово зростає у міру випаровування розчинника, наближаючись до насичення. Тверді кристали починають утворюватися в розчині, коли кристалізація починається при цій критичній концентрації.

Другий розділ присвячено оптимізації обладнання для кристалізації цукру. Вважається, що змішування є однією з обмежуючих умов процесу кристалізації. Ефективність змішування є критичним фактором, оскільки недостатнє перемішування може вплинути на якість кінцевого продукту, знизити продуктивність процесу та вплинути на загальну операційну ефективність. Невідповідний вибір швидкості змішування може спричинити негативні наслідки, бо занадто високі швидкості можуть негативно вплинути на процес кристалізації. Інтенсивне та тривале змішування може змінити

					ННІЕТ КНУ.133.зГМБ-22.2026.ПЗ							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Спільняк			Удосконалення обладнання для кристалізації цукру				Літ.		Арк.	Аркуші
Перевір.		Омельченко									44	2
Н. Контр.		Омельченко										
Затверд.		Цвіркун			ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО							

структуру кристалів, впливаючи на його кінцеві властивості та на якість отриманого продукту.

Обрано конструкцію, що базується на пасивному змішуванні. Конструкція лопатей, що складають робоче колесо дозволяє рідині переміщуватися в резервуарі радіально та тангенціально з невеликим вертикальним рухом. В'язкість кристалізованої суспензії є характерною для умов температури та перемішування за яких виконують процес, оскільки саме ці змінні визначають концентрацію та розподіл зважених твердих речовин. Умови перемішування зі змінною швидкістю можуть прискорити швидкість кристалізації на початку процесу і проявляти в кінетиці кристалізації розподілену поведінку у стабільній фазі порівняно з умовами перемішування з постійною швидкістю. Змінне коливання відносно горизонтальної осі сприятиме досягненню найвищої швидкості кристалізації і, відповідно, досягнення стабільної фази за найменший час.

Одним із недоліків обладнання для кристалізації є відсутність контролю за температурою розчину та його подачею в змішувальний резервуар. Тому запропоновано удосконалену систему контролю в кристалізаторі встановивши додаткові датчики з метою кращого розуміння різних процесів, що виникають під час кристалізації:

- рефрактометри дозволяють вимірювати вміст розчинених твердих речовин у розчині. Вважається за доцільне встановили два онлайн-рефрактометри: перший розташований на подачі, а другий у кристалізаторі прямо над пучками, забезпечує доступ до розчину;

- мікрохвильовий датчик вимірює вмісту цукру та дозволяє вимірювати вміст сухих речовин, які додані до вмісту твердих частинок у розчині;

- в'язкомір вимірює в'язкість цукрового розчину;

- кондуктометри вимірюють здатність розчину проводити електричний струм – характеристика, безпосередньо пов'язана з концентрацією іонів у розчині;

- датчики температури – це пристрій, який вимірює температуру маси цукрового розчину;

- датчик тиску – це пристрій, який може виявляти сигнал тиску і перетворювати його на придатний вихідний електричний сигнал, вимірює тиск в кристалізаторі;

- датчик витрати конденсату (конденсатометр) – це спеціалізований витратомір, який призначений для вимірювання потоку конденсованої пари або конденсату в замкненій паровій системі.

Третій розділ присвячено дослідженню процесу кристалізації різних видів цукру. Для дослідження обрано наступні зразки, а саме гранульований білий цукор та коричневий цукор. Результати свідчать, що різні види цукру демонструють унікальні властивості кристалізації, що походить від їхньої молекулярної структури. Гранульований білий цукор утворює маленькі, чітко визначені кристали. Коричневий цукор містить патоку, яка додає вологи та насиченого смаку. Наявність патоки не дозволяє цукру кристалізуватися так легко, як гранульованому цукру, що призводить до щільнішої текстури. Коричневий цукор утворює великі кристали на які потрібно більше часу.

					ННІЕТ КНУ.133.зГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Мирончук, В.Г. Методика моделювання процесу промислової кристалізації цукрози / В.Г. Мирончук, О.А. Єщенко // Харчова промисловість. – К.: НУХТ. 2009. № 8. С.87 – 90.
2. Як виробляють цукор: повний процес. Режим доступу: <https://iporokids.ua/yak-vyroblayut-czukur-povnyj-proczes/>.
3. Кристалізація і розчинення. Режим доступу: <https://ulanovskyi.blogspot.com/2020/04/23-56.html>.
4. The fascinating science behind sugar crystallization. URL: <https://candiesandsweets.com/the-fascinating-science-behind-sugar-crystallization>.
5. Diseño, construcción e instalación de una unidad de cristalización batch, para el laboratorio de operaciones unitarias de la espol. URL: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/51798/1/T-107173%20MORCHO%20RONALD.pdf>.
6. Puesta en marcha de una planta piloto de cristalización por lotes y análisis de su dinámica de enfriamiento. URL: <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/5c0302f5-22c6-4d24-acd6-6279591488c4/content>.
7. Берник П.С. Механічні процеси і обладнання переробного та харчового виробництва. Львів: Вид-во НУЛП, 2004. 336 с.
8. Мирончук В.Г. Обладнання підприємств переробної та харчової промисловості. Вінниця: Нова книга, 2010. 720 с.
9. Мирончук В.Г. Розрахунки обладнання підприємств переробної і харчової промисловості. Вінниця: Нова книга, 2004. 288 с.
10. Continuous fluidized bed crystallization. URL: https://opendata.uni-halle.de/bitstream/1981185920/11916/1/PhD_Daniel_Binev_unverschl.pdf.
11. Modèles de connaissance de la cristallisation de troisième jet en sucrerie de cannes expérimentations et simulations. URL: <https://theses.hal.science/tel-00462334/document>.
12. Continuous crystallization in a helically coiled flow tube crystallizer. URL: https://opendata.uni-halle.de/bitstream/1981185920/34129/1/Wiedmeyer_Viktoria_Dissertation_2020.pdf.
13. Змішувачі для сипких матеріалів і методи оцінювання якості суміші. Режим доступу: <https://ir.stu.cn.ua/server/api/core/bitstreams/1a214f94-41b5-485e-af32-e634775c3b62/content>.
14. Бакалов В.Г. Аналіз існуючих теорій змішування сипучих матеріалів і методів оцінки якості суміші / В. Г. Бакалов // Вісник Черніг. держ. технолог. ун-ту. Серія «Технічні науки». Чернігів, 2008. № 34. С. 152–160.
15. Вплив параметрів змішувача на однорідності суміші при змішуванні компонентів у хлібопекарській галузі. Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/382344695>.
16. Diseño y construcción de un critsalizador. URL: <https://repositorio.unica.edu.pe/server/api/core/bitstreams/83d23dd5-b078-42aa-847d-812c2d6853d3/content>.

					ННІЕТ КНУ.133.зГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

17. Refractometers information. URL: https://www.globalspec.com/learnmore/labware_scientific_instruments/spectrometers_analytical_photometers/refractometers.
18. La tecnología de medición con microondas en la industria azucarera microwave measuring technology for sugar industry. URL: https://www.berthold.com/fileadmin/DownloadsUnprotected/brochures/Uso_de_las_microondas_en_el_control_de_procesos_del_azucar.pdf.
19. Черевко О. І., Поперечний А. М. Процеси і апарати харчових виробництв. Х.: Світ Книг, 2015. 496 с.
20. Процеси і апарати харчових виробництв / За редакцією А.М. Поперечного. К. Центр учбової літератури. 2007. 301 с.
21. Шалугін В.С. Процеси та апарати промислових технологій. К.: Центр учбової літератури. 2008. 392 с.
22. Conductivity meters. URL: <https://www.electricity-magnetism.org/conductivity-meters/#>.
23. Cómo funcionan los sensores de temperatura. URL: <https://www.dacpol.eu/es/blog/post/como-funcionan-los-sensores-de-temperatura.html>.
24. Qué es un sensor de presión. URL: https://www.baumer.com/int/es/service-support/funcionamiento/funcionamiento-y-tecnologia-de-sensores-de-presion/a/Know-how_Function_Pressure-sensors.
25. How condensate meters work: a straightforward guide for energy professionals. URL: <https://www.cadillacmeter.com/condensate-meter/how-condensate-meters-work-a-straightforward-guide-for-energy-professionals/#:~:text=>
26. Як працює рефрактометр. Режим доступу: <https://analit-pribor.com.ua/uk/developments/yak-praczuuye-refraktometr/>.
27. Мікрохвильовий аналізатор концентрації для вимірювання в цукровій промисловості Режим доступу: <https://www.diamantsugar.com.ua/ua/articles/mkrohvilovij-analzator-kontsentrats-harrererkassen-dlya-vimryuvannya-v-tsykrovj-promislovost>.
28. Кондуктометри. Режим доступу: <https://www.systopt.com.ua/article-konduktometry>.
29. Estudio CFD de la hidrodinámica generada por impulsores de alto corte para su aplicación en procesos de polimerización. URL: https://rinacional.tecnm.mx/bitstream/TecNM/10855/2/Tesis_Parra%20Reyes%20Jose%20Alfredo_%20MCIQ%20%282025%29.pdf.
30. Heat and mass transfer operations – crystallization. URL: <https://www.eolss.net/Sample-Chapters/C06/E6-34-03-02.pdf>.
31. Crystallization. URL: <https://www.geeksforgEEKS.org/chemistry/crystallization/>.
32. Control del proceso de cristalización continuo-no-isotérmico empleando lógica difusa. URL: <https://www.amazon.ca/Control-proceso-cristalizaci%C3%B3n-continuo-no-isot%C3%A9rmico/dp/3639647246>.
33. Датчики температури і вологості: види, принцип роботи та

застосування. Режим доступу: <https://tribun.com.ua/uk/118071-datchiki-temperaturi-i-vologosti-vidi-printsip-roboti-ta-zastosuvannja>.

34. Датчики температури. Режим доступу: <https://ukrayinska.libretexts.org/>.

35. Вичерпний посібник із датчиків тиску: типи, застосування та вибір. Режим доступу: <https://uk.winsen-sensor.com/knowledge/comprehensive-guide-to-pressure-sensors.html>.

36. The science behind sugar crystallization in baking. URL: <https://palospublishing.com/the-science-behind-sugar-crystallization-in-baking/>.

37. How do you make sugar crystals for a science project. URL: https://www.clrn.org/how-do-you-make-sugar-crystals-for-a-science-project/#google_vignette.

38. Що таке датчик тиску? Режим доступу: <https://anwit.com.ua/articles/preasure-sensors-hbk/>.

39. Принцип роботи датчиків тиску: основні принципи роботи та їх застосування. Режим доступу: <https://info.vcf.vn.ua/pryntsypr-roboty-datchykyiv-tysku-osnovni-pryntsypr-roboty-ta-yih-zastosuvannya/>.

40. Як вибрати відповідний витратомір конденсату? Режим доступу: <https://uk.silverinstruments.com/blog/how-to-choose-suitable-condensate-water-flow-meter.html>.

					ННІЕТ КНУ.133.зГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48