

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Факультет біотехнології і біотехніки
Кафедра біотехніки та інженерії

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Вікторія Мельник

(підпис)

«__» _____ 2026 р.

Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Біотехнології»
спеціальності 162 «Біотехнології та біоінженерія»
на тему: «Технологія виробництва пивного сусла. Стадія стерилізації.»

Виконала:

студентка IV курсу, групи БІ-21

Скрипник Анна Максимівна _____

Керівник:

Асистент кафедри біотехніки та інженерії

Косова Віра Петрівна _____

Консультант з проєктування:

Старший викладач кафедри промислової

біотехнології та біофармації, кандидат технічних наук

Тітова Лариса Олександрівна _____

Рецензент:

Доцент кафедри промислової біотехнології та біофармації _____

Кандидат біологічних наук, старший дослідник

Ключко Віталій Вікторович

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студентка _____

Київ – 2026 року

ВІДОМОСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт		
2	A4	ДП БІ21.11.000 ПЗ	Пояснювальна записка		
3	A1	ДП БІ21.11.001 ТС	Технологічна схема	1	
4	A1	ДП БІ21.11.002 АС	Апаратурна схема	1	
5	A1	ДП БІ21.11.003 КА	Креслення основної споруди (апарата)	1	

				<i>ДП БІ21.11. 00.000 ВДП</i>		
	<i>ПІБ</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розробн</i>	<i>Скрипник А.М.</i>			<i>Відомість Дипломного проєкту</i>	<i>Лист</i>	<i>Листів</i>
<i>Керів.</i>	<i>Косова В.П.</i>				<i>1</i>	<i>1</i>
<i>Консульт.</i>	<i>Тітова Л.О.</i>				<i>КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ФБТ гр.БІ-21</i>	
<i>Н/контр.</i>						
<i>Зав.каф.</i>	<i>Мельник В.М.</i>					

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет біотехнології і біотехніки

Кафедра біотехніки та інженерії

Рівень вищої освіти - перший (бакалаврський)

Спеціальність - 162 «Біотехнології та біоінженерія»

Освітньо-професійна програма «Біотехнології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

завідувача кафедри

_____ Вікторія МЕЛЬНИК

«___» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студентці

Скрипник Анни Максимівни

Тема проєкту «Технологія виробництва пивного сусла. Стадія стерилізації», керівник проєкту Косова Віра Петрівна, затверджені наказом по університету від «___» _____ 2026 р. №_ -с_

1. Термін подання студентом проєкту
2. Вихідні дані до проєкту: кінцевий продукт - пивне сусло; основний апарат дільниці стерилізації – розбірний пластинчастий теплообмінник продуктивністю 80 т/год; спосіб очистки та обробки – високотемпературна короткочасна термічна стерилізація з рекуперацією тепла
3. Зміст пояснювальної записки: визначити основні фізико-хімічні характеристики кінцевого продукту та біохімічні й мікробіологічні основи його обробки; провести аналіз методів термічної стерилізації пивного сусла, обґрунтувати вибір високотемпературного короткочасного (HTST) режиму; скласти матеріальний і тепловий баланси процесу, розробити технологічну та апаратурну схему дільниці стерилізації; обґрунтувати

вибір конструкції розбірного пластинчастого теплообмінника, здійснити його теплотехнічний, конструктивний та гідравлічний розрахунки; розробити принципову схему автоматизації, контролю критичних точок НАССР та безпеки процесу; сформувати комплекс заходів з охорони праці, виробничої санітарії та охорони навколишнього середовища.

4. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): апаратурно-технологічна схема ділянки стерилізації - 1 арк. А1, технологічна схема - 1 арк. А1, креслення загального вигляду розбірного пластинчастого теплообмінника - 1 арк. А1.

5. Консультанти розділів проєкту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 3	Тітова Л.О., старший викладач кафедри промислової біотехнології та біофармації, кандидат технічних наук		

6. Дата видачі завдання

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Вступ. Огляд методів термічної обробки та стерилізації пивного суслу	19.04.26-05.05.26	
2	Біохімічні та мікробіологічні основи процесу стерилізації суслу	19.04.26-05.05.26	
3	Обґрунтування високотехнологічного короткочасного (HTST) режиму обробки	05.05.26-10.05.26	

4	Технологічна частина. Розрахунок матеріального та теплого балансів дільниці	10.05.26-15.05.26	
5	Складання апаратурно- технологічної схеми та контуру автоматизації	15.05.26-20.05.26	
6	Теплотехнічний, конструктивний та гідравлічний розрахунок пластинчастого теплообмінника	20.05.26-25.05.26	
7	Оформлення розділів охорони праці, навколишнього середовища та пояснювальної записки	26.05.26-30.05.26	
8	Подання дипломного проєкту на рецензування	05.06.2026	
9	Подання дипломного проєкту та рецензії до екзаменаційної комісії	09.06.2026	

Студентка

Анна СКРИПНИК

Керівник

Віра КОСОВА

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Технологія виробництва пивного сусла. Стадія
стерилізації»

Київ – 2026 року

РЕФЕРАТ

Дипломний проєкт містить: 102 ст., 13 рис., 7 табл., 69 посилань.

Метою проєкту є розробка високоефективної та енергоощадної технології термічної обробки та стерилізації у складі виробництва пивного сусла на основі аналізу сучасних науково-технічних рішень і знань, отриманих під час проходження виробничої практики.

У якості об'єкта обробки виступає пивне охмелене сусло із початковою густиною $1,050 \text{ г/см}^3$ (12°P), одержане на основі солодового затору, пивоварної води та хмелепродукції. На основі аналізу біохімічних та мікробіологічних чинників обґрунтовано застосування високотемпературного короткочасного режиму HTST-обробки середовища (температура $92 - 98^\circ\text{C}$ з експозицією у трубчастому витримувачі протягом $20 - 60 \text{ с}$). Цей режим гарантує інактивацію ферментів солоду, п'ятилогову редукцію контамінантної мікрофлори та видалення небажаних летких сполук диметилсульфіду.

Для проведення процесу запропоновано технологію безперервної стерилізації з глибокою рекуперацією ($60 - 70 \%$) тепла між зустрічними потоками та кінцевим двоступеневим охолодженням сусла до температури засіву дріжджів ($12 - 15^\circ\text{C}$), що забезпечує ініціацію «холодного зламу» білково-поліфенольних комплексів та покращує прозорість продукту.

У роботі визначено правила та норми з охорони праці, промислової санітарії та екологічного менеджменту, включаючи реагентну нейтралізацію СІР-стоків до нормативного показника $\text{pH } 6,5 - 8,5$.

У відповідності до технологічних особливостей процесу складено апаратурно-технологічну схему дільниці та технологічну схему на базі ПЛК із захисною «петлею пастеризації». Обґрунтовано конструкцію та виконано повний комплекс теплотехнічних і гідравлічних розрахунків основного апарата –

					<i>ДП БІ/21.11. 000 ПЗ</i>		
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>РЕФЕРАТ</i>		
<i>Розроб.</i>		<i>Скрипник А.М.</i>					
<i>Консульт.</i>							
<i>Керівн.</i>		<i>Косова В.П.</i>					
<i>Затвер.</i>		<i>Мельник В. М.</i>					
					<i>Стадія</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
					<i>Д</i>	<i>7</i>	<i>101</i>
					<i>КПІ ім. Ігоря Сікарського ФБТ</i>		
					<i>Каф. БТІ</i>		
					<i>Гр.БІ-21</i>		

розбірного пластинчастого теплообмінника продуктивністю 80 т/год із площею поверхні теплообміну 12,0 м² (пакет із 20 пластин профілю chevron з високолегованої сталі AISI 316 та ущільненнями EPDM).

ПИВНЕ СУСЛО, ДІЛЬНИЦЯ СТЕРИЛІЗАЦІЇ, ПЛАСТИНЧАСТИЙ ТЕПЛООБМІННИК, НТСТ-ОБРОБКА, РЕКУПЕРАЦІЯ ТЕПЛА, ХОЛОДНИЙ ЗЛАМ, ВИСОКОЛЕГОВАНА СТАЛЬ AISI 316, СІР-МИЙКА, АВТОМАТИЗАЦІЯ.

					ДП БІ/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ABSTRACT

The diploma project contains: 102 p., 13 fig., 7 tab., 69 references.

The purpose of the project is to develop a highly efficient and energy-saving technology of heat treatment and sterilization in the production of beer wort based on the analysis of modern scientific and technical solutions and knowledge obtained during the course of production practice.

The object of treatment is hopped beer wort with an initial density of 1.050 g/cm³ (12°P), obtained on the basis of malt mash, brewing water and hop products. Based on the analysis of biochemical and microbiological factors, the use of high-temperature short-term HTST-treatment of the environment (temperature 92 - 98 °C with exposure in a tubular holding tank for 20 - 60 s) is justified. This mode guarantees the inactivation of malt enzymes, five-fold reduction of contaminating microflora and removal of undesirable volatile dimethyl sulfide compounds.

For the process, a continuous sterilization technology with deep heat recovery (60 - 70%) between counterflows and final two-stage cooling of the wort to the yeast seeding temperature (12 - 15°C) is proposed, which ensures the initiation of the "cold break" of protein-polyphenol complexes and improves product transparency.

The work defines the rules and regulations for labor protection, industrial sanitation and environmental management, including reagent neutralization of CIP effluents to the standard pH of 6.5 - 8.5.

In accordance with the technological features of the process, an equipment and technological scheme of the section and a technological scheme based on PLC with a protective "pasteurization loop" are drawn up. The design was substantiated and a full

					<i>ДП БІ/21.11. 000 ПЗ</i>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>ABSTRACT</i>	<i>Стадія</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрюшів</i>
<i>Розроб.</i>		<i>Скрипник А.М.</i>				<i>Д</i>	<i>9</i>	<i>101</i>
<i>Консульт.</i>						<i>КПІ ім. Ізгоря Сікорського ФБТ</i>		
						<i>Каф. БТІ</i>		
<i>Керівн.</i>		<i>Косова В.П.</i>				<i>Гр.БІ-21</i>		
<i>Затвер.</i>		<i>Мельник В. М.</i>						

set of thermal engineering and hydraulic calculations of the main apparatus - a collapsible plate heat exchanger with a capacity of 80 t/h and a heat exchange surface area of 12.0 m² (a package of 20 chevron profile plates made of high-alloy steel AISI 316 and EPDM seals) was performed.

BEER WORST, STERILIZATION SECTION, PLATE HEAT EXCHANGER, HTST-TREATMENT, HEAT RECOVERY, COLD BREAKING, HIGH-ALLOY STEEL AISI 316, CIP-WASHING, AUTOMATION.

					ДП БІ/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП.....	13
РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКА СИРОВИНИ, БІОЛОГІЧНОГО АГЕНТА. ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ.....	17
1.1.Характеристика сировини	17
1.2.Обґрунтування вибору технології.....	21
1.3.Характеристика біологічного агента	24
РОЗДІЛ 2. БІОХІМІЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ	29
2.1. Схема перебігу процесів.....	29
2.2. Хімічні перетворення у процесі термообробки	30
2.3. Біохімічні перетворення в суслі.....	33
2.4. Мікробіологічні процеси та параметри інактивації.....	35
2.5. Узагальнена схема перебігу процесів	37
2.6. Характеристика кінцевого продукту	37
РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	42
3.1. Матеріали основні і допоміжні	42
3.2. Контроль виробництва.....	47
3.3. Матеріальний баланс	55
3.4. Опис технологічного процесу	60
РОЗДІЛ 4. ПІДБІР ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЛАДНАННЯ.....	66
4.1. Обґрунтування вибраної конструкції. Підбір конструкційних матеріалів для окремих елементів апарату.....	66
4.2. Технологічні розрахунки	69
4.3. Конструктивний розрахунок пластинчастого теплообмінника	72
4.4.Гідравлічний розрахунок пластинчастого теплообмінника	76
4.5.Вибір загальнозаводського обладнання.....	79

					ДП БІ/21.11. 000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Скрипник А.М.			ЗМІСТ	Стадія	Арк.	Аркушів
Консульт.							11	101
						КПІ ім. Ігоря Сікорського ФБТ		
Керівн.		Косова В.П.				Каф. БТІ		
Затвер.		Мельник В. М.				Гр.БІ-21		

4.6. Технічна характеристика	81
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ОХОРОНА ДОВКІЛЛЯ.....	82
5.1. Загальні принципи безпечної експлуатації дільниці стерилізації.....	82
5.2. Безпека технологічного процесу (термічні, хімічні, механічні фактори).....	85
5.3. Організаційні заходи і навчання.	87
5.4. Охорона довкілля: джерела впливу та технічні рішення.	88
ВИСНОВКИ.....	92
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	96
Додатки.....	102

ВСТУП

На сьогоднішній день в харчовій промисловості, також і в пивоварній, спостерігається перехід та впровадження високоякісних та енергозощаджуючих процесів. Виробництво пивного суслу є фундаментом усього виробничого процесу. Це не просто один з етапів, а основа, від якої залежить багато показників, що включають в себе смак, аромат, якість та стійкість готового продукту при зберіганні. Тому термічна обробка та стерилізація суслу, є важливими для гарантії якості кінцевого продукту.

Сучасний стан проблеми та тенденції її розв'язання. На сьогодні більшість передових броварень відмовляються від застарілих та громіздких систем тривалого кип'ятіння або охолодження суслу на користь інтенсивних і контрольованих потокових методів. Провідні фахівці у сфері теплотехнічного обладнання, зокрема експерти компанії Central States Industrial, наголошують, що ефективне керування тепловими потоками є базовою умовою для успішного проведення ферментації. Сучасний підхід полягає у використанні високоефективних пластинчастих теплообмінників, які забезпечують швидкий нагрів до температур стерилізації та подальше чітко регульоване охолодження. Це дозволяє досягти швидкого виділення та осадження білково-поліфенольних сполук (гарячого та холодного утворення пластівців/трубу) і суттєво зменшити концентрацію диметилсульфіду (ДМС), який за порушення режимів надає пиву небажаного овочевого присмаку.

Ось чому великі виробники наполягають на цьому: належний контроль температури визначає не лише якість продукту, а й кінцеві властивості готового напою. У своєму дослідженні технологічний інженер Майкл Девід (з Central

					ДП БІ21.11. 000 ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВСТУП		
Розроб.	Скрипник А.М.						
Консульт.							
Керівн.	Косова В.П.						
Затвер.	Мельник В. М.				КПІ ім. Ігоря Сікарського ФБТ		
					Стадія	Арк.	Аркушів
					Д	13	101
					Каф. БТІ		
					ГрБІ-21		

States Industrial) зазначив, що «успіх процесу ферментації починається з управління теплом[3]», підкреслюючи роль теплообмінників у посиленні смаку та аромату.

Стерилізація пивного сусла - важливий етап у процесі пивоваріння. Це забезпечує видалення небажаних організмів та мікрофлори, які можуть сприяти появі сторонніх присмаків, кислотності або гіркоти в кінцевому продукті. Крім того, під час короткочасної термічної обробки відбуваються різні складні фізико-хімічні процеси, що впливають на стабільність сусла, такі як коагуляція білково-поліфенольних сполук, денатурація ферментів, розкладання диметилсульфідних сполук та колоїдна стабілізація. Правильна стерилізація дозволяє знизити рівень диметилсульфіду (ДМС), який надає небажаний овочевий присмак і є одним із головних показників чистоти сусла.

За нинішніх умов традиційні методи охолодження та термічної обробки більше не можуть гарантувати необхідний рівень біологічного контролю та енергоефективності. Недоліки та обмеження існуючих технологій. Попри автоматизацію галузі, на багатьох виробництвах досі використовуються застарілі схеми теплообміну, які мають низку критичних недоліків:

- Висока енергоємність: відсутність або низький рівень рекуперації тепла призводять до перевитрат енергоносіїв (пари, води, електроенергії).
- Інерційність систем: традиційні трубчасті чи громіздкі теплообмінники не здатні забезпечити миттєву зміну температурних режимів, що веде до тривалого перебування сусла в критичній зоні температур. Це провокує ризик розвитку термофільних мікроорганізмів та погіршує органолептику.
- Складність обслуговування: конструкції, які важко піддаються розбиранню, ускладнюють якісну CIP-мийку, підвищуючи ризик вторинного контамінаційного забруднення та утворення пригару на внутрішніх поверхнях.

Використання сучасних розбірних пластинчастих теплообмінників дозволяє нівелювати ці обмеження завдяки високому коефіцієнту теплопередачі, компактності та можливості гнучкого чищення.

					ДП БІ21.11. 000 ПЗ	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тому компанії звертаються до складних пластинчастих теплообмінників, які скорочують час перебування сусла при критичній температурі, мінімізують ризики небажаних окиснювальних процесів, зменшують контакт з повітрям та запобігають вторинному забрудненню. Завдяки високій теплопровідності та можливостям рекуперації тепла, ці теплообмінники мінімізують втрати енергії, зменшують експлуатаційні витрати та забезпечують безпеку праці відповідно до найновіших технологічних стандартів [1,2].

Актуальність теми дипломного проєкту полягає у необхідності вдосконалення саме цього етапу технології виробництва пивного сусла. Оптимізована стерилізація забезпечує стабільний хімічний та мікробіологічний стан сусла, що напряду впливає на інтенсивність і чистоту бродіння, формування смаку, прозорість та довговічність готового продукту. Сучасні підходи до проєктування теплообмінного обладнання дозволяють не лише досягти високих показників якості сусла, але й підвищити загальну енергоефективність, ресурсну ощадність та екологічну безпеку пивоваріння.

Метою дипломного проєкту є проєктування технологічної ділянки стерилізації пивного сусла з використанням сучасного розбірного пластинчастого теплообмінника, що відповідає чинним стандартам та вимогам пивоварної промисловості. Для виконання поставленої мети розроблено комплекс завдань, спрямованих на дослідження конструкції обладнання, теплотехнічних характеристик та параметрів стерилізації, а також на оцінку енергоефективності та безпеки технологічного процесу.

Для досягнення поставленої мети було заплановано виконання наступних завдань:

1. Аналіз технології виробництва пивного сусла з акцентом на стадії теплової обробки;
2. Дослідження хімічних, фізичних і мікробіологічних змін, що відбуваються під час стерилізації;
3. Обґрунтування вибору конструкції пластинчастого теплообмінника, схеми компоновки пластин та матеріалів ущільнень;

4. Виконання технологічного, гідравлічного та конструктивних розрахунків апарату;
5. Проєктування схеми автоматизації, регулювання та корекції параметрів процесу;
6. Визначення вимог з охорони праці, відповідно санітарії та екологічної безпеки виробництва;
7. Підготовка технічної та графічної документації для практичної реалізації проєкту згідно з чинними стандартами.

					ДП БІ/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКА СИРОВИНИ, БІОЛОГІЧНОГО АГЕНТА. ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ

1.1.Характеристика сировини

Технологія пивоваріння базується на використанні найбільш оптимальних видів натуральної сировини, яка на пряму визначає органолептичні та фізико-хімічні властивості готового напою. Основними інгредієнтами є ячмінний пивоварний солод (джерело вуглеводного живлення та гідролітичних ферментів), хміль (який надає характерної гіркоти, аромату та забезпечує антисептичний ефект), вода (гідратаційне середовище, що становить 90-95% маси сусла) та допоміжна речовина (дріжджі *Saccharomyces cerevisiae*).

Пивне сусло виготовляють шляхом затирання солоду водою за температури 62-68°C (під дією на крохмаль комплексу амілолітичних ферментів - α - та β -амілаз, які розщеплюють його до мальтози та декстринів), з подальшою фільтрацією, кип'ятінням з одночасним заданням хмелю при 100-105°C (протягом 1,5-2 годин для ізомеризації α -кислот), а потім охолодженням до 8-12°C. Потім зразок переноситься в пластинчастий теплообмінник для пастеризації (60-72°C, 20-30 с) з метою елімінації культуральних шкідників (молочнокислих бактерій та диких штамів дріжджів) без втрати якості [4, с. 5-18].

В Україні сировина постачається з місцевих продуктів:

- Ячмінь пивоварний: вирощується на 1,8 млн га (у Полтавській та Харківській областях), з врожайністю 9,2 млн т (у 2022 році). Щорічно на млинах «Солодарево» та «Kvilita» виробляється від 350 до 400 тис. т/рік. солодового ячменю[5, с. 42-47].
- Хміль: вітчизняний - 850 т/рік (Закарпаття, «Левоча»), імпортований – 70% (Німеччина, Чехія) [6, с. 12].

					ДП БІ/21.11. 000 ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКА СИРОВИНИ, БІОЛОГІЧНОГО АГЕНТА. ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ		
Розроб.		Скрипник А.М.					
Консульт.							
Керівн.		Косова В.П.					
Затвер.		Мельник В. М.					
					Стадія	Арк.	Аркушів
					Д	17	101
					КПІ ім. Ізбяр Сікарського ФБТ		
					Каф. БТІ		
					ГрБІ-21		

- Вода: демінералізовані ґрунтові води (показник загальної жорсткості яких становить ≤ 3 °dH за німецьким стандартом).

Для пивоварного заводу потужністю 1 млн дал/рік потрібно 15 тис. т солоду, 150 т хмелю та 10 тис. м³ води. Швидкість накопичення солоду становить 25-30 м³/год, а добовий об'єм - 700-900 м³ [4, с. 28-30].

Технічні та якісні показники сировинних компонентів повинні відповідати вимогам національних стандартів: ДСТУ 4282:2004 «Солод пивоварний ячмінний. Технічні умови» (класифікація: світлий, пілснерський, карамельний; показники: екстракт $\geq 80\%$, вологість $\leq 5\%$) [7, с. 4-8], ДСТУ 4282:2007: «Хміль для пивоваріння» (α -кислоти 4-12%) [6, с. 5-7], ДСТУ 7525:2014 «Вода питна» (рН 6,5-8,5).

Хімічний склад сировини наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Хімічний склад сировини (середні значення)

Компонент	Солод світлий, % [7, с. 23]	Хміль, % [6, с. 15]	Сусло, г/л [8, с. 67]
Крохмаль/цукри	58-65	-	100-120 (екстр.)
Білок/амінокислоти	9,0-11,5	15-20	1,5-2,0
Волога	$\leq 5,0$	8-10	88-89
Поліфеноли/ α - кислоти	0,5-1,0	4-12	0,15-0,25
Мінерали (зола)	$\leq 2,5$	5-7	0,5-1,0
рН	-	5,5-6,5	5,2-5,6

Сусло характеризується прозорим виглядом (≤ 1 ЕВС) та вмістом бродильного азоту 170-220 мг/л, що дозволяє ферментувати до вмісту алкоголю 5-6% [8, с. 68-70].

Для вибору найбільш підходящої сировини було проведено аналіз на основі таких параметрів: екстрактивність, вихід продукту, економіка та відходи.

Таблиця 1.2 - Порівняльні характеристики солодів

Показник	Світлий ячмінь	Пілснерський	Карамельний	Пшеничний
Екстрактивність, %	80-82 [7, с. 25]	79-81	75-78	78-80
Вихід спирту, дал/т	8,7-9,2 [5, с. 50]	8,8	7,6-8,0	8,2-8,5
Вартість, грн/т (2023)	27000	28500	36000	32000
Вихід, % сухих реч.	26-30	28	32-35	29
Економічна ефективність	Висока (+18% рентаб.) [9, с. 112–115]	Базова	Низька	Середня
Застосування	Лагер, світле	Лагер	Ель	Пшеничне

Таким чином, світлий ячмінний солод є найвигіднішим варіантом завдяки високому коефіцієнту екстракції (збільшення врожайності на 3-5%), доступності (до 92% в Україні) та придатності підприємницьких стиглих зерен для споживання в харчових продуктах (25% білка) або виробництва біогазу (300-350 л СН₄/кг). Його ефективність на 15-20% вища, ніж у карамельного, що сприяє зменшенню імпорту [9, с. 116-118; 10, с. 90].

Маштаби виробничого процесу та кінетика накопичення напівпродукту. Обсяги в Україні (2022-2023):

- Ячмінь: 9,2 млн т, Виробництво ячменю: 380 тис. т [5, с. 45].
 - Хміль: 850 т вітчизняного виробництва + 2 500 т імпортного [6, с. 20].
- Практична продуктивність становить 25-30 м³/цикл (6-8 годин), що дозволяє збільшити добовий виробіток до меж 800-1200 м³/день для заводу з виробничою потужністю 500 тис. дал/рік [4, с. 29].

Режими складованого зберігання сировинних матеріалів та біохімічні процеси, що в них протікають.

Солод: необхідно забезпечити сухі та вентильовані складські приміщення, за температури 8-15°C, відносної вологості повітря (R_h) $\leq 60\%$, складування здійснюється у штабелі висотою до 3 м, вага мішка 40 кг. Термін придатності 9-12 місяців. При порушенні режимів запускається механізм деградації зерна (втрата 5-8% маси протягом 6 місяців), та пліснявіння за участю мікроміцетів *Aspergillus* при підвищенні вологості ($R_h > 65\%$), що призводить до акумуляції небезпечних мікотоксинів [7, с. 34-36].

Хміль:слід утримувати у спеціальних холодильних камерах при температурі $\leq +2^\circ\text{C}$, у вигляді пресованих гранул у вакуумній упаковці при відносній вологості 6 - 8%. Загальний термін зберігання становить 18 - 24 місяці. Негативними факторами є кисневе окиснення (втрата гірких α -кислот на рівні 15 - 20% на рік) та підвищення вологості, що може викликати самонагрівання матеріалу [6, с. 56-58].

Сусло: зберігається в герметичних танках з неіржавної сталі об'ємом 100 - 200 м³ при температурі 6 - 8 °C з одночасним гідродинамічним перемішуванням з частотою 0,5 об/хв в атмосфері азоту (N_2). Граничний час перебування сусла до закладання дріжджів становить ≤ 20 годин. Під час зберігання можуть протікати процеси самоферментації (акумуляція CO_2 та зниження рН на 0,2 - 0,4), гравітаційного відстоювання (осадження холодного трубу) або бактеріального псування за участю *Pediosoccus*, що супроводжується кислотним накопиченням, тоді як доступ кисню викликає окиснення компонентів [8, с. 71-75].

Оцінка техногенного навантаження на навколишнє середовище.

Функціонування виробництва супроводжується утворенням таких відходів:

- Стічні води: утворюються в об'ємі 11-13 л/л готового сусла (показник ХСК становить 4500-5500 мг O_2 /л, вміст азоту - 800 мг/л) [10, с. 142].
- Екстраговані розчинені речовини: становлять 8-10 л/л (показник БСК досягає 6000 мг/л). Надходження таких стоків у відкриті водойми без очищення призводить до евтрофікації (збільшення концентрації фосфору в

					ДП БІ/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 - 3 рази), підвищення кислотності ґрунтів, а також викидів газу CO₂ у кількості 0,18 т на кожную тонну солоду на етапі термічної сушки [9, с. 119].

У технології передбачені такі заходи: впровадження анаеробного зброджування відходів (отримання метану в об'ємі 320 л/кг із генерацією енергії 2 кВт·год/кг), забезпечення 85-90% рециркуляції технологічної води. Використання саме світлого солоду дозволяє знизити рівень ХСК на 14% та зменшити емісію CO₂ на 10% [9, с. 120-122; 10, с. 145-148].

1.2. Обґрунтування вибору технології

Сучасний стан пивоварної галузі характеризується переходом від традиційних методів термічної обробки до високо інтенсивних та енергозберігаючих технологій, що забезпечують стабільність продукту при збереженні його природної структури. На основі аналізу літературно-патентних джерел, зокрема патенту US 6968773 B1, встановлено, що критичним фактором при підготовці пивного сусла є мінімізація термічного навантаження, яке оцінюється за накопиченням продуктів реакції Майяра (показник ТВА) та деградацією S-метилметіоніну в диметилсульфід (DMS). Традиційне кип'ятіння сусла протягом 60-90 хвилин забезпечує стерильність, проте призводить до значних енерговтрат через випаровування води (6-10% маси). На противагу цьому, альтернативні методи, такі як тонка плівкова пастеризація та термічна обробка в потоці з використанням розбірних пластинчастих теплообмінників (ПТО), дозволяють досягти необхідного ефекту стерилізації при значно менших часових витратах [11, с. 15; 94].

Пластинчасті теплообмінники використовуються на сучасних пивоварнях для стерилізації сусла перед бродінням. Цей процес дозволяє нагрівати охмелене сусло до 72-78°C протягом 20-40 секунд, знищуючи 99,9% бактерій та мікробів, зберігаючи при цьому поживні речовини, необхідні для дріжджів [5, с. 89; 3].

Унікальність цієї технології полягає в поєднанні нагрівання та охолодження; частина тепла, отриманого з пастеризованої сусла (при рекперації), використовується для нагрівання свіжого потоку, що зменшує споживання енергії на 25-30% [2, с. 41-44].

					ДП БІ21.11. 000 ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Згідно з дослідженням Brew Your Own та CSI Designs, основними методами теплопередачі є:

- Трубчасті системи (shell-and-tube) - надійні, але енергоємні;
- Пластинчасті теплообмінники - коефіцієнт теплопередачі до $4500 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$, придатне для багаторазового очищення в автоматизованих системах (CIP) та ефективно для пивоварної промисловості [2, с. 45].

На основі аналізу обладнання, що використовується для подрібнення та сушіння сусла [12; 9, с. 120-125] обрано метод почергового нагрівання та повторного нагрівання гранул ячмінного солоду.

Перевагами цієї методики є:

- Швидке нагрівання та гомогенізація ячмінного солоду;
- Енергоефективність завдяки двонаправленому теплообміну;
- Неінвазивний метод - для профілактики вторинного інфікування;
- Можливість градієнтів температури та тиску [10, с. 134].

Ключові етапи процесу: сире охмелене сусло потрапляє до секції стерилізації теплообмінника, де його нагрівають гарячою водою або пастеризованим суслим. Підтримка температури 75°C протягом 30-40 с знищує мікроорганізми та ферменти. Після цього сусло проходить етапи екстракції та охолодження до температури $7-8^\circ\text{C}$, а потім переноситься в бродильні резервуари [5, с. 90-91].

В результаті стерилізації теплообмінником було отримано такі параметри:

- Зменшення кількості живих бактерій у суслі на 3-4 порядки;
- Збереження ароматичних сполук у хмелі (ізо-альфа-кислоти, мірцен, гумулон) [12, с. 60];
- Зменшення споживання повітря на 25% порівняно з традиційним кип'ятінням [1].

Основними мікроорганізмами-продуцентами на подальшому етапі є дріжджі *Saccharomyces cerevisiae* var. *uvarum* (нижнє бродіння) та *S. elipsoideus* (верхнє бродіння). Їх промислова ефективність визначається селекцією за активністю ферментів (α -амілаза, мальтаза) та стійкістю до алкоголю [13, с. 87].

					ДП Б/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Штами зберігали у стерильному середовищі на солодовому суслі , і виконували такі кроки:

1. Мутагенез - опромінення ультрафіолетовим світлом ($\lambda=254$ нм, 60-90 с) для отримання видимих точкових мутацій;
2. Відбір високоактивних штамів (≥ 30 од./г білка);
3. Контроль росту мікроорганізмів шляхом субкультивування протягом 10 генерацій [14, с. 70-71].

Ефективність нових продуцентів оцінювали за їхніми характеристиками зброджування та виробництвом спирту (приблизно 5,5% за об.) [5, с. 112].

Для обробки пивної дробини використовуються захисні мікроорганізми, такі як *Aspergillus niger* та *Bacillus subtilis*. Ці організми перетворюють білки на пептиди та амінокислоти, що призводить до 40% зниження споживання кисню у стічних водах [15, с. 67-69].

Схематично процес отримання промислового продуцента виглядає так:

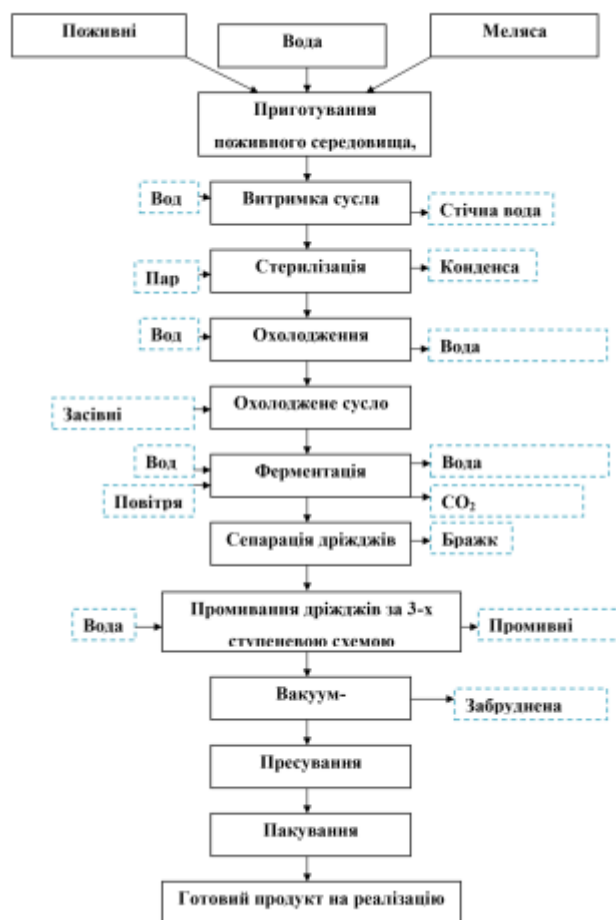


Рис.1.1. Блок-схема отримання промислового продуцента дріжджів [16].

Очищення суслу після стерилізації центрифугуванням та фільтрацією через діатомову землю, що зменшило концентрацію твердих речовин до ≤ 200 мг/дм³ та збільшило прозорість до 1 ЕВС [12]. Одночасно видаляли грубий осад, що складався з білків (50-60%), поліфенолів (20-30%) та хмелевих смол (15-20%), що покращило якість та смак пива [12, с. 62-64].

Кінцеве охолодження до 6°C перед додаванням дріжджів допомагає стабілізувати рН (5,2-5,4) та запобігає утворенню диметилсульфіду (ДМС), який утворюється під час тривалого нагрівання суслу вище 100°C [12, с. 66].

Економічне обґрунтування. Додаткова система термічної обробки дозволяє зменшити нагрівання на 35% та загальне споживання води до 10 л/дал пива. Використання біодеструкторів також може зменшити кількість використовуваного матеріалу на 25-30%. Пластинчастий стерилізатор GEA-Vitalor поєднує стерилізацію, рекуперацію та охолодження в одному контурі, що гарантує відповідність ГОСТ ISO 22000:2019 (система безпеки харчових продуктів) [1; 10, с. 130].

1.3. Характеристика біологічного агента

У технологічному виробництві пивного суслу дріжджі *Saccharomyces cerevisiae* (Meyenex Hansen) використовуються як основний продуцент бродіння для пивоваріння. Їхня біологічна активність визначає якість та стабільність кінцевого продукту [14, с. 70].

Приналежність:

Царство: Fungi;

Відділ: Ascomycota;

Клас: Saccharomycetes;

Порядок: Saccharomycetales;

Родина: Saccharomycetaceae;

Рід: *Saccharomyces*;

Вид: *S. cerevisiae* [17, с. 84].

					ДП БІ/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

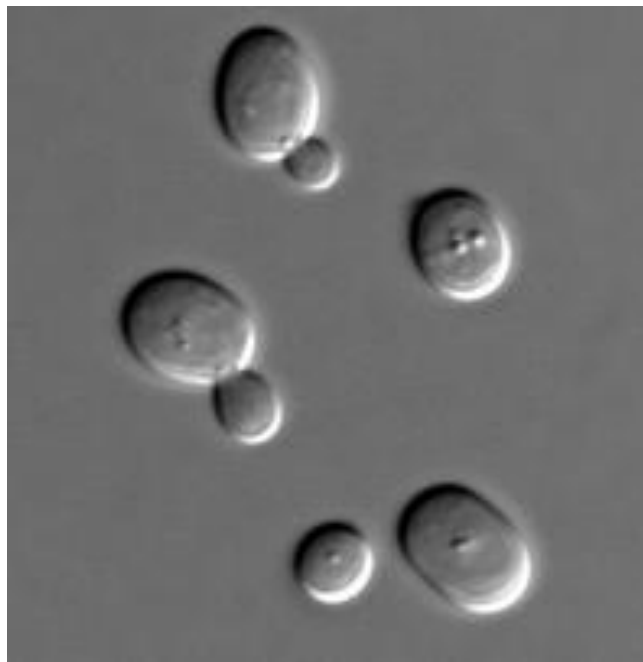


Рис.1.2. Мікрофотографія клітин дріжджів *Saccharomyces cerevisiae* (Meyen ex Hansen) під світловим мікроскопом [22].

Таксономічні профілі грибів були подані відповідно до методу, описаного в базі даних MucBank (номер MB#493975) [17, с. 85].

Морфолого-цитологічні та культуральні ознаки. Дріжджові клітини *S. cerevisiae* мають овальну або еліптичну форму, приблизні розміри $5-10^{6-12}$ мкм, і ростуть поодинокі або невеликими групами. Клітинна стінка складається з двох шарів, що складаються з β -глюканів (50-60%), манопротеїнів (30%) та хітину (1-2%) [18, с. 41]. Цитоплазма містить гранули глікогену, вакуолі та мікроскопічні ліпідні включення. Ядро добре окреслене, з добре організованою системою внутрішніх мембран.

Традиційно дріжджі ростуть на агарових чашках як гладенькі, опуклі, кремово-білі колонії з пастоподібною консистенцією. Оптимальні умови росту - $28-32^{\circ}\text{C}$ та pH 5,0-5,4. Ріст пригнічується за температури вище 40°C або за високих концентрацій етанолу ($>15\%$) [5, с. 58-59].

Поживні потреби. *Saccharomyces cerevisiae* є факультативними анаеробами. Джерелом вуглецю для них є вуглеводи - глюкоза, фруктоза, мальтоза та сахароза, що входять до складу пивного сусла. Вони можуть засвоювати та метаболізувати основні цукри глюкозу, фруктозу, сахарозу, мальтозу, мальтотріозу та галактозу, але не метаболізують лактозу [19, с. 171].

					ДП БІ/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Фосфор зустрічається у вигляді неорганічних фосфатів, найчастіше KH_2PO_4 або K_2HPO_4 . Нітроген походить із солей амонію (NH_4^+), пептонів, амінокислот та білкових сполук, що містяться в солодовій основі. Для швидкого росту необхідні такі макро- та мікроелементи: калій (K^+), магній (Mg^{2+}), кальцій (Ca^{2+}), залізо (Fe^{2+}), цинк (Zn^{2+}) та марганець (Mn^{2+}). Вітаміни групи В (тіамін, біотин та ніацин) є необхідними компонентами для функціонування дріжджів [18, с. 44].

Фізіологічні властивості та тип енергетичного метаболізму. Дріжджі *Saccharomyces cerevisiae* є факультативно-анаеробними мікроорганізмами: вони здійснюють активне дихання за наявності кисню та переходять на спиртове бродіння в анаеробних умовах (прояв ефекту Пастера). Їх основним метаболічним шляхом є гліколіз (шлях Ембдена-Мейєргофа-Парнаса), в результаті якого утворюються етанол та CO_2 :

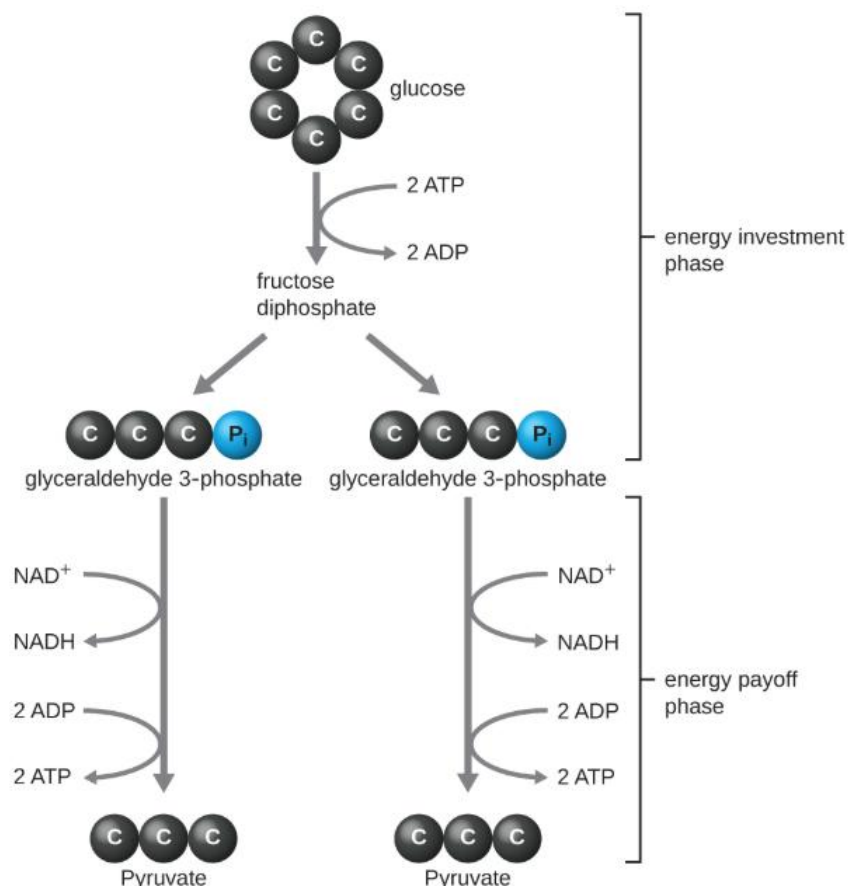
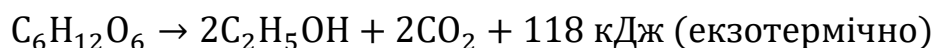


Рис.1.3. Фази енергетичних інвестицій і енергетичної віддачі шляху гліколізу Ембдена-Мейєргофа-Парнаса [23].

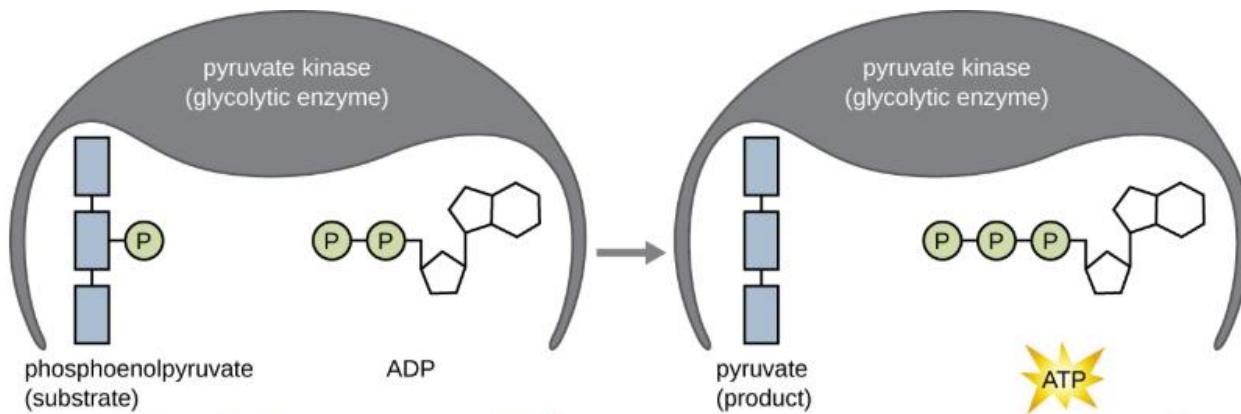


Рис.1.4. Утворення АТФ шляхом субстратного фосфорилування під час гліколізу за участю ферменту піруваткінази [23].

Таким чином, 1 моль глюкози перетворюється на 2 молі етанолу. У пивоварінні ця реакція визначає процес бродіння, ступінь насичення вуглекислим газом та смакову складову пива, що утворюється в результаті похідних сполук - ефірів, альдегідів та вищих спиртів [5, с. 57; 10, с. 92].

Оптимальна температура бродіння коливається від 8 до 12°C (для пивних дріжджів нижнього бродіння) та від 18 до 22°C (для пивних дріжджів гверхнього бродіння). рН нижче 4,5 уповільнює ріст мікробів, тоді як рН нижче 3,8 повністю пригнічує ріст дріжджових клітин [19, с. 176].

Спосіб розмноження. Основним способом розмноження є брунькування, хоча псевдоміцелії часто спостерігаються за умов обмеженої кількості поживних речовин. За ідеальних умов одна клітина може давати до 10-12 бруньок за свій життєвий цикл. Окрім вегетативного розмноження, статеве розмноження може відбуватися через утворення аскоспор (4 спори в аску) - важлива ознака при генетичній стабілізації промислових штамів [14, с. 73; 13, с. 69].

Стійкість до стресових факторів та інгібіторів. Дріжджі *Saccharomyces cerevisiae* адаптовані до середовища з високим осмотичним тиском (15-18% цукрів) та високим вмістом етилового спирту (14-15%). Вони також багаті на антиоксидантні ферменти - каталазу та супероксиддисмутази, - які забезпечують їм стійкість до окиснювального стресу [5, с. 60].

Термічна стійкість цих клітин дозволяє надійно інтенсифікувати процес стерилізації сусле, при цьому самі дріжджі повністю інактивуються при температурі 75°C протягом однієї хвилини без помітної втрати життєздатності

[10, с. 95]. Антиоксиданти, присутні в суслі (ненасичені жирні кислоти C₈-C₁₂ та фенольні сполуки в хмелі), пригнічують розмноження бактеріальних контамінантів. Ці антиоксиданти також підвищують активність ацил-КоА-синтетази, яка пригнічує ці процеси [20, с. 44-46].

Поширення в природі. *Saccharomyces cerevisiae* присутній у фруктах, овочах та органічних ґрунтах, і є репрезентативним видом у середовищах, багатих на цукор. Це один із найдавніших людських запасів, який використовувався у Стародавньому Єгипті для виготовлення хліба та напоїв ще 6000 років тому [21, с. 36]. Наразі його використовують не лише для виробництва алкоголю, але й для виробництва біоетанолу, як харчові дріжджі та як модельний об'єкт у біотехнології та генетиці [19, с. 180].

Утилізація надлишкової біомаси. Під час бродіння щодня виробляється велика кількість дріжджів (20-25 кг на 1 м³ зброженого сусла) [10, с. 101]. Надлишок дріжджів піддається термічній обробці ($t = 85-90\text{ }^{\circ}\text{C}$, 20 хв), а потім використовується:

- У виробництві харчових продуктів як білкова добавка (45-48% білка) [9, с. 74];
- Для екстракції вітамінів та мінералів (*Autolysati Saccharomycetum*);
- Як основа для виробництва біогазу.

Біологічне очищення запобігає біорозкладу та допомагає стабілізувати біологічні процеси.

РОЗДІЛ 2. БІОХІМІЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

2.1. Схема перебігу процесів

Термічна обробка та стерилізація пивного сусла є завершальним та ключовим етапом гарячого циклу в броварстві, що безпосередньо визначає мікробіологічну чистоту та фізико-хімічну стабільність органічного матриця. Цей процес включає фізичні, хімічні, колоїдні та біохімічні реакції, що відбуваються під контролем температури, тиску та часу. Пластинчасті теплообмінники дозволяють робити цей процес протитечійно, забезпечуючи високу теплопровідність ($2500-4500 \text{ Вт} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}^{-1}$), хорошу рекуперацію тепла та рівномірний розподіл тепла в усьому об'ємі потоку [24, с. 446].

У сучасній пивоварній промисловості, інактивація сулових шкідників здійснюється шляхом короткочасної високотемпературної обробки в потоці (HTST) - пивне сусло нагрівають до $90-105^\circ\text{C}$ протягом 20-60 секунд, а потім швидко охолоджують до температури нижче 10°C . Цей процес:

- Пригнічує ферменти солоду;
- Усуває патогени та мікроорганізми;
- Концентрує сполуки в суслі перед бродінням;
- Зменшує втрати ароматичних сполук порівняно з традиційним кип'ятінням.

					ДП БІ21.11. 000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Скрипник А.М.			РОЗДІЛ 2. БІОХІМІЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ	Стадія	Арк.	Аркушів
Консульт.						Д	29	101
						КПІ ім. Ізгоря Сікарського ФБТ		
Керівн.		Косова В.П.				Каф. БП		
Затвер.		Мельник В. М.				Гр.БІ-21		

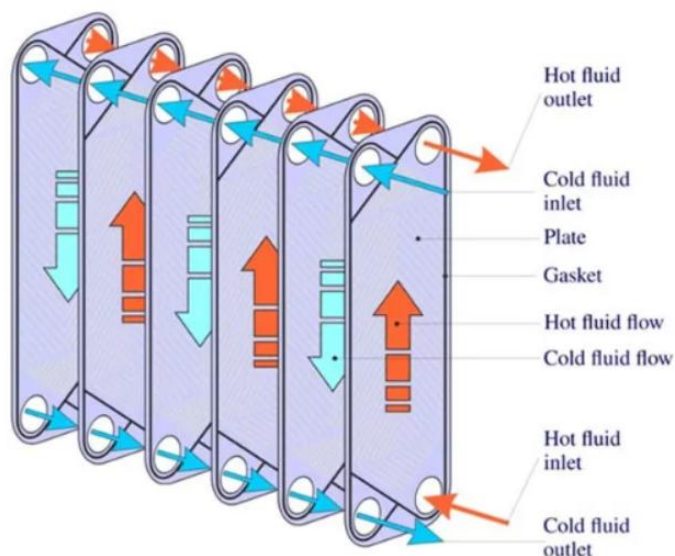


Рис.2.1. Схема організації потоків у пластинчастому теплообміннику [29].

Конструктивна перевага сучасних плат пластинчастого теплообмінника полягає в організації регенеративної протитечії гідравлічних потоків, що гарантує м'який теплообмін без локальних перегрівів біополімерних молекул суслу. Це запобігає тепловому стресу для органічних компонентів і підтримує їхню харчову цінність [25, с. 3].

2.2. Хімічні перетворення у процесі термообробки

Термічна ізомеризація хмелевих α -кислот. Альфа-кислоти хмелю (гумулон, когумулон та адхумулон) зазнають термічних змін за температури вище 85°C , утворюючи розчинні ізо- α -кислоти, які сприяють гіркоті пива. Вода бере участь як каталізатор, а ступінь перетворення визначається рівнянням першого порядку.

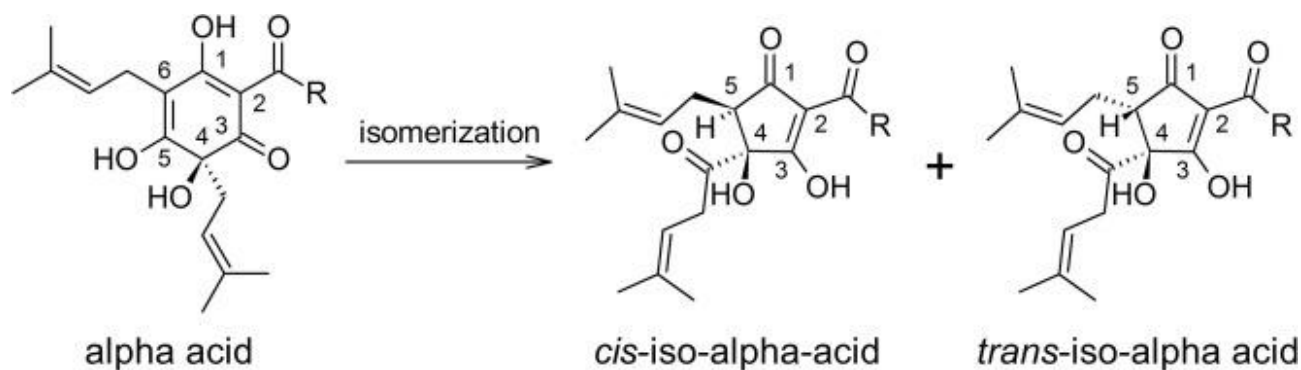


Рис.2.2. Схема ізомеризації α -кислот хмелю при термічній обробці суслу [38].

Фіксується також незначне зниження величини рН оброблюваного суслу з меж 5,6 до рівня 5,2, що стимулює накопичення ізомеризованих форм.

Підвищення температури вище 100°C завдає меншої шкоди, тому температурний вплив у теплообміннику становить від 100 до 102°C [26, с. 4434].

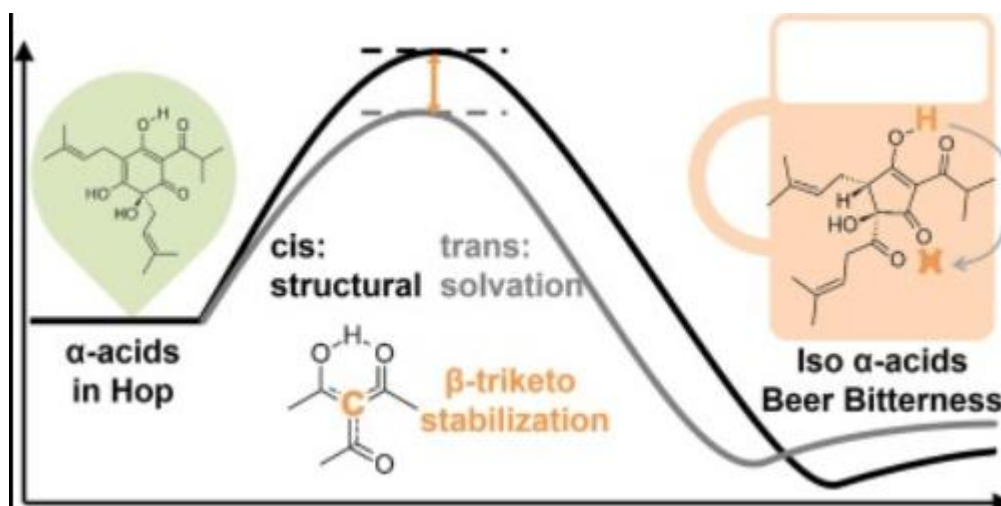
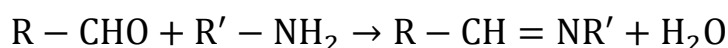


Рис.2.3. Схема ізомеризації α -кислот хмелю в ізо- α -кислоти під час кип'ятіння суслу [38].

Реакції неферментативного потемніння (Майяра). Під час термічної обробки відновлювальні цукри (глюкоза, мальтоза) реагують з вільними аміногрупами в білках та амінокислотах, спочатку утворюючи основи Шиффа, а потім меланоїдини, які змінюють колір, аромат та антиоксидантні властивості пивного суслу. Послідовність подій така:

1. Основна конфігурація Шиффа:



2. Амадоріївське перегрупування з подальшим деградаційним утворенням карбонільних сполук (кетонів та альдегідів);
3. Полімеризація меланоїдинів.

Діапазон температур 70-95°C є важливим, оскільки реакція в цьому діапазоні відбувається швидко. Щоб зменшити колір суслу, термічну обробку застосовують протягом короткого часу та контролюють рН (ідеально $5,3 \pm 0,1$) [27, с. 197].

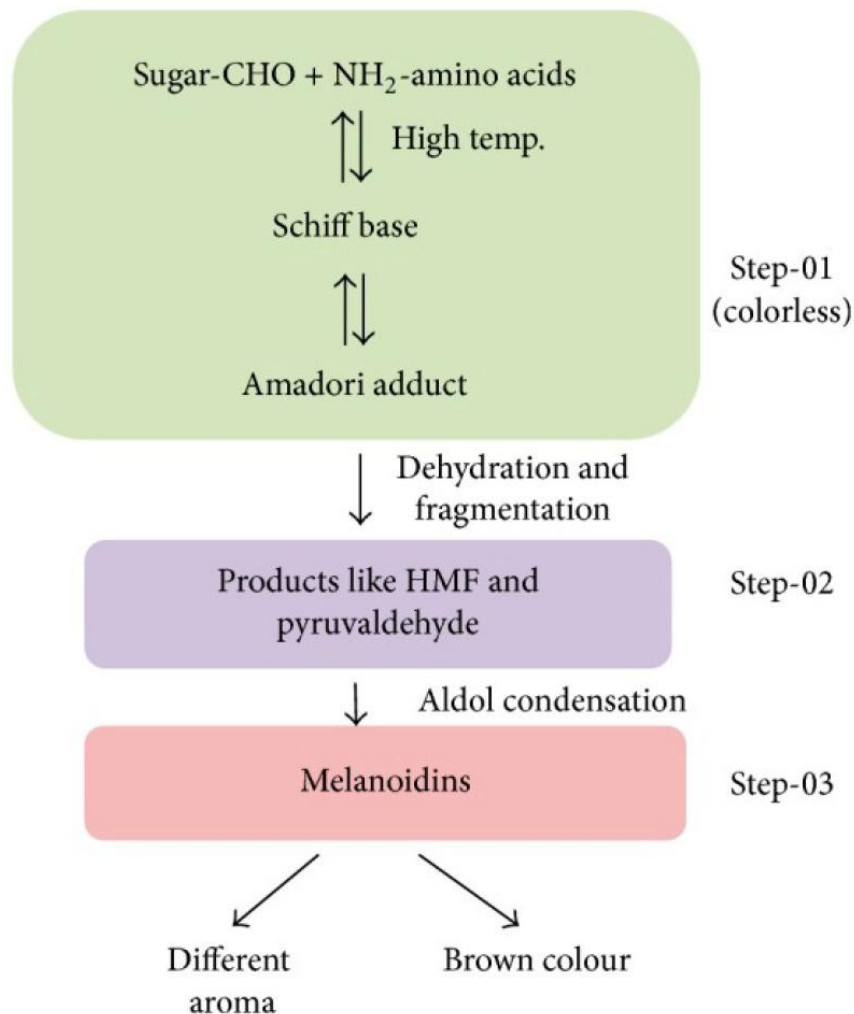


Рис.2.4. Схема реакції Майяра під час виробництва пивного сусла [40].

Розклад S-метилметіоніну і утворення диметилсульфіду. S-метилметіонін (SMM), компонент ячмінного солоду, розкладається при нагріванні з утворенням диметилсульфіду (DMS) - речовини з неприємним запахом, схожим на запах вареної кукурудзи.

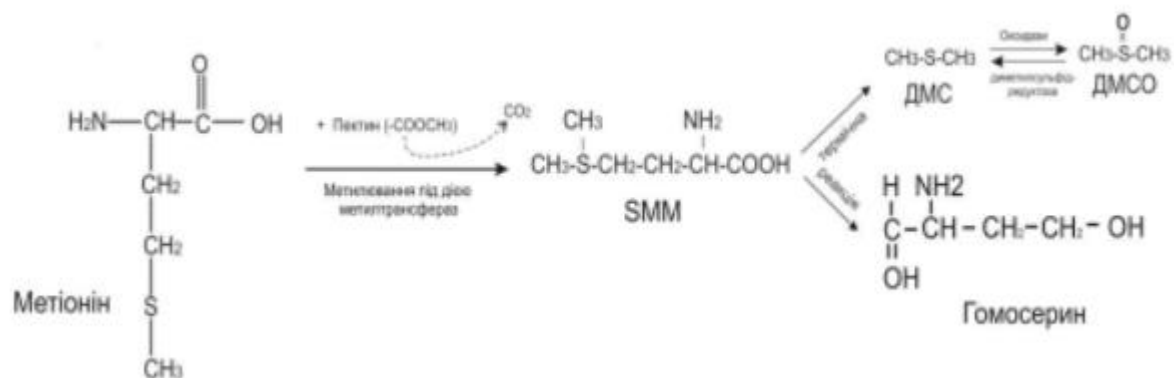


Рис.2.5. Схема утворення S-метилметіоніну (SMM) та його термічного розкладу з утворенням диметилсульфіду (DMS) [28].

Якщо динаміка кінцевого охолодження буде кінетично повільною, то синтезований диметилсульфід не евакуюється з потоку та залишиться в рідині, погіршуючи органолептику. Тому пластинчастий теплообмінник оснащений секцією охолодження конденсатора для видалення летких компонентів із замкнутого контуру [29, с. 118–119].

$$C_{\text{DMS}} = C_0^{-kt}$$

де:

C_{DMS} — концентрація диметилсульфіду;

C_0 — початкова концентрація;

k — коефіцієнт швидкості видалення DMS;

t — час охолодження.

Денатурація та коагуляція білків. Фракції середньої молекулярної маси (40–80 кДа) піддаються термічній деструкції та агрегації при нагріванні вище 70°C, утворюючи сполуки, зв'язані з поліфенолами. Цей процес дозволяє проводити тривале нагрівання, що допомагає покращити якість сусла. Коли білки піддаються впливу високих температур протягом тривалого часу, вони можуть утворювати нерозчинні молекули, які негативно впливають на піноутворення, тому необхідний ретельний контроль [29, с. 118–119].

2.3. Біохімічні перетворення в суслі

Інактивація ферментів. При 65°C активність β -амілази починає стрімко знижуватися та повністю нівелюється при досягненні 70°C. Роль α -амілази, яка володіє вищим рівнем термостабільності, зберігається до температурної позначки 75°C, після чого фермент необоротно денатурує. Потокова термічна обробка при 90–100 °C одночасно інактивує обидва гідролітичні ферменти, що дозволяє стабілізувати цукровий профіль екстракту (вміст мальтози, мальтотріози та декстринів) [24, с. 287].

Переваги стабілізації ферментів:

- Запобігання падольшому гідролізу крохмалю під час охолодження;
- Збереження складу азотистих речовин;

- Консервація фізико-хімічних і колорективних характеристик отриманої проби.

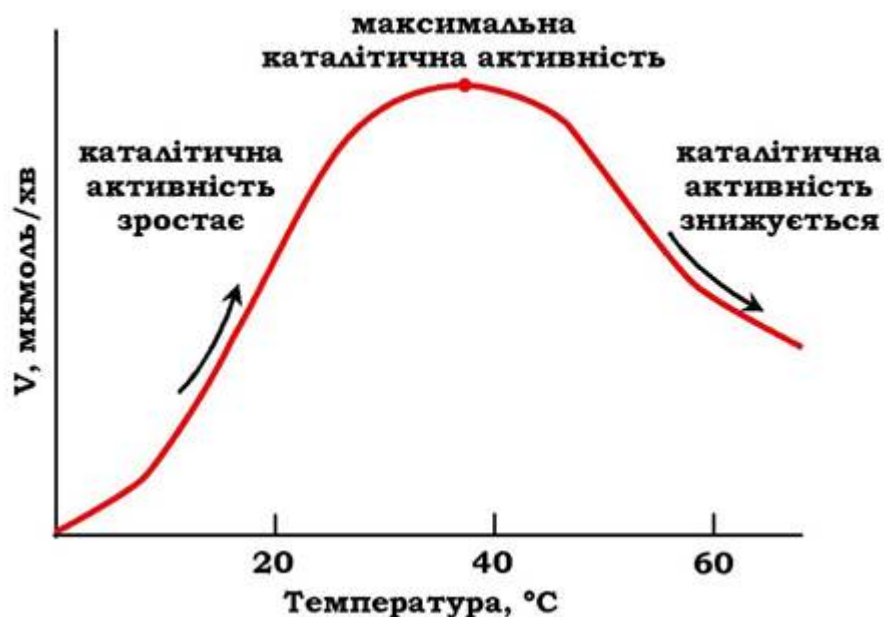


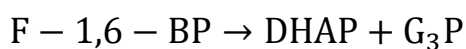
Рис.2.6.Залежність швидкості ферментативної реакції (V) від температури [39].

Ферментативні реакції дріжджів. Після охолодження до 8-12°C сусло засівають дріжджами *Saccharomyces cerevisiae* (верхнє бродіння), або *S. pastorianus* (нижнє бродіння). Основним метаболічним шляхом є гліколіз (шлях Емдена-Мейєргофа-Парнаса):

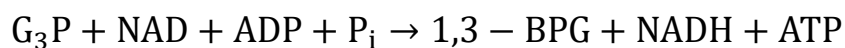
1. Фосфорилування глюкози:



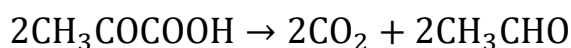
2. Розщеплення фруктозо - 1,6 - дифосфату:



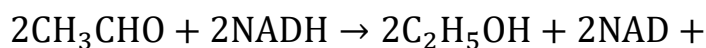
3. Окислення гліцеральдегід-3-фосфату:



4. Декарбоксилювання пірувату:



5. Відновлення ацетальдегіду:



Продукти дріжджової реакції включають естери (ізоамілацетат, етилацетат), альдегіди (ацетальдегід) та вищі спирти (ізобутанол, пропанол). Правильна температура ферментації допомагає підтримувати належну консистенцію цих речовин [30, с. 172].

2.4. Мікробіологічні процеси та параметри інактивації

Найпоширенішими забруднювачами пивного сусла є *Lactobacillus brevis*, *Pediosoccus damnosus* та *Megasfera cerevisiae*. Їх активність знижувалася за температури вище 75°C, а значення D за 90°C не перевищувало 0,5 секунди [31, с. 88].. Іншими словами, протягом періоду стерилізації (20-30 секунд за 90-95°C) коефіцієнт інактивації мікроорганізмів досяг 99,999%.

Порядок виконання:

- Температура: 90-100°C
- Тиск: 0,25-0,35 МПа
- рН: $5,2 \pm 0,1$
- Режим: турбулентний потік ($Re \approx 5000-8000$) для підвищення ефективності теплообміну.

Таким чином, після проходження через теплообмінник сусло виходить стерильним та придатним для аерації та бродіння без необхідності подальшої обробки .

Колоїдно-хімічні процеси: «гарячий» та «холодний злам». При нагріванні білки та частинки поліфенолів денатурують, утворюючи пластівці – гарячий злам - який залишається зовні під час фільтрації або седиментації. Під час охолодження у вторинній секції відбувається формування холодного зламу, через зміни розчинності білків та поліфенолів при зниженні температури. Обидва ці фактори корисні, оскільки вони очищають солодовий вміст, зменшують каламутність та сприяють бродінню, що підвищує стабільність готового виробу [8, с. 10].

Побічні реакції та мінімізація ризиків:

1. Окислення фенолів та жирних кислот. Недостатнє видалення кисню призводить до утворення хінонів та пероксидів, які надають пиву терпкого

					ДП Б/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

смаку. Конструкція теплообмінника включає рідину, яка видаляє повітря та азот, замінюючи їх киснем.

2. Підвищений вміст меланоїдину. Тривале перебування в гарячій зоні призводить до потемніння сусла та накопичення гірких сполук.
3. Висока температура. Температури вище 105°C викликають карамелізацію цукру та утворення фурфуролу, що призводить до появи неприємних присмаків.
4. Надмірне розкладання білка. Це стабілізує піну і надає насиченіший смак та аромат .

Щоб уникнути цих проблем, використовують точне автоматичне регулювання теплового потоку, контролери температури та тиску, а також рециркуляційна система регенерації [27, с. 199].

Біотехнологічне значення стерилізації. Контроль температури забезпечує:

- Чистоту пивного сусла;
- Якість продукту;
- Підвищену стійкість до окислення;
- Підготовку сусла до додавання дріжджів без подальшої обробки.

Після охолодження до кімнатної температури теплообмінник забезпечує вирішальну умову - найкоротший можливий час регенерації в діапазоні температур 40-60°C. Це запобігає подальшому псуванню.

2.5. Узагальнена схема перебігу процесів

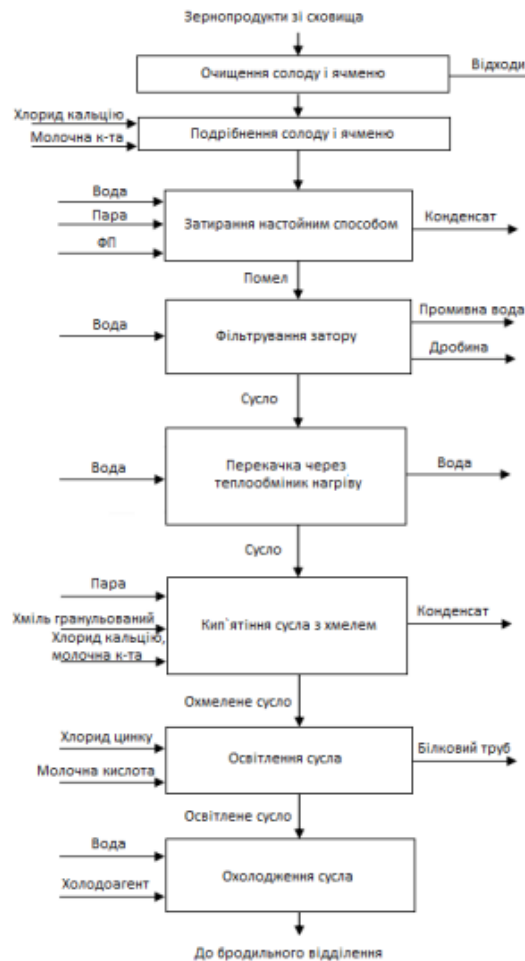


Рис.2.7. Блок-схема технологічного процесу виробництва пивного сусла з урахуванням термічних і біохімічних перетворень [32]

Режимна термічна стерилізація в пластинчастому теплообміннику являє собою збалансований інженерний комплекс, що оптимізує фізико-хімічні та біохімічні характеристики сусла. Вплив високих температур протягом коротких періодів часу в турбулентних умовах дозволяє продукту знезаразитися та зберегти його смак. Таким чином, створюється чисте, стабільне та компактне середовище, ідеальне для перетворення цукрів на спирти та ароматичні сполуки під час бродіння.

2.6. Характеристика кінцевого продукту

Світле пиво з 11% ступенем екстракції є одним з найпоширеніших продуктів у пивоварній промисловості. Воно є результатом низки хімічних, колоїдних, мікробіологічних та фізико-хімічних процесів, що відбуваються на стадіях бродіння, стерилізації сусла, попереднього бродіння та фільтрації.

					ДП БІ21.11. 000 ПЗ	Арк.
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Готовий напій синтезується шляхом життєдіяльності чистих культур дріжджів *Saccharomyces pastorianus* (або *Saccharomyces cerevisiae*). Ці мікроорганізми здійснюють глибоке зброджування вуглеводного субстрату, утворюючи спирт, вуглекислий газ, леткі сполуки та різні ароматичні сполуки.

Згідно з ДСТУ 3888:2015 «Пиво. Загальні технічні умови», світле пиво повинно бути прозорим, однорідним, зі стійкою піною, мати виражений хмелево-солодовий аромат, збалансовану гіркоту та характеризуватися відсутністю сторонніх присмаків та високою стабільністю при зберіганні [33, с. 4 - 6]. Основні характеристики продукту включають : вміст етилового спирту 3,8 - 4,8% об., кінцева екстрактивність 1,8 - 3,0%, частка вуглекислого газу 0,45 - 0,55%, кислотність 1,6 - 2,4 ммоль/100 см³ та рН 4,1 - 4,6. Ці значення визначають збалансованість смаку, стабільність піни та мікробіологічну безпеку.

Світле пиво 11 % - це колоїдна система, в якій взаємодіють розчинні білки, пептиди, поліфеноли, органічні кислоти, низькомолекулярні вуглеводи, спирти, альдегіди, ефіри, мінерали та вуглекислий газ. Хімічний склад готового пива визначається характеристиками стерилізованого суслу, оскільки температура обробки впливає на активність ферментів, швидкість синтезу меланоїдинів, стабільність поліфенольних сполук та наявність S-подібних летких попередників сірковмісних сполук в напої після обробки [24, с. 287–294].

Хімічний склад світлого лагєру. У кінцевому продукті основними компонентами є етанол, вуглекислий газ, залишкові цукри, декстрини, азотисті сполуки, поліфеноли, мінерали та леткі ароматичні речовини. Етанол утворюється в результаті процесу гліколізу в дріжджах, під час якого глюкоза та мальтоза перетворюються на спирт та вуглекислий газ у співвідношеннях, що визначаються класичним рівнянням Ембдена-Мейєрґофа-Парнаса. За даними Л. Нарцісса, у лагєрах низького бродіння при температурі 8-12°C, формується смак чистого спиртового профілю з меншим вмістом вищих спиртів, ніж у елів, що забезпечує більш м'який смак [30, с. 173].

					ДП БІ/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Декстрин, який дріжджі не засвоюють, є основним компонентом «тілом» пива, надаючи йому повноту та впливаючи на його стабільність піни. Низькомолекулярні пептиди (15-40 кДа) надають пиву піноутворюючі властивості, тоді як поліфеноли, що містяться в солоді та хмелі, сприяють гіркоті, кольору та стійкості до окиснення. Згідно Briggs, оптимальна концентрація повинна становити 120 - 200 мг/л, щоб уникнути надмірної терпкості та небажаної колоїдної нестабільності [34, с. 129].

Аромат складається з естерів, альдегідів та вищих спиртів. Ізоамілацетат надає фруктовий смак, тоді як етилгексаноат - солодкого, винного. Утворення ароматичних сполук найсильніше відбувається на початку бродіння та залежить від наявності азоту та температури, як зазначав Стюарт у своєму дослідженні метаболізму дріжджів [19, с. 87-90].

Основні фізико-хімічні показники світлого пива продемонстровані в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Основні фізико-хімічні показники світлого пива 11 %

Показник	Норма для світлого пива 11 %	Джерело
Екстракт початкового сусла	11,0 ± 0,3 % мас.	ДСТУ 3888:2015 [33, с. 5]
Екстракт у готовому пиві	1,8 - 3,0 % мас.	Kunze [24, с. 330]
Об'ємна частка етилового спирту	3,8 – 4,8 % об.	ДСТУ 3888:2015 [33, с. 5]
Масова частка CO ₂	0,45 - 0,55 %	Narziß [30, с. 174]
Кислотність	1,6 - 2,4 ммоль/100 см ³	Briggs [34, с. 128]
pH	4,1 – 4,6	Kunze [24, с. 332]
Колір	6 - 12 EBC	Bamforth [36, с. 118]

Продовження таблиці 2.1

Гіркота	18 - 24 IBU	МЕБАК (Sensory Analysis), 2019
Стійкість піни	≥ 2 хвилини	Goiris [35, с. 172]
Розчинений кисень	$\leq 0,06$ мг/л	Goiris [35, с. 172]
Поліфеноли	120 - 200 мг/л	Briggs [34, с. 129]
Ароматичні ефіри	0,6 - 2,0 мг/л	Stewart [19, с. 87]

Органолептичні властивості світлого пива. Органолептичний показник є одним з найважливіших аналітичних методів. Корлір світлого лагєру за шкалою ЕВС коливається від 6 до 12 одиниць, що відповідає кольору соломи. Фактори бродіння, особливо час підготовки сусла та концентрація меланоїдинів, впливають на колір. За Kunze, яскравий колір світлого пива формується не лише під час затирання та кип'ятіння, але й під час бродіння та дозрівання, що сприяє частковому освітленню напою [24, с. 331].

Світле пиво повинно мати чистий та збалансований смак, з легким ароматом хмелю та натяком на солодовий смак. Надлишок альдегідів, таких як ацетальдегід, призводить до появи сторонніх присмаків (таких, як присмак «зелені»), тоді вищі сірковмісні сполуки можуть надавати сторонніх присмаків. Тому стерилізація сусла є важливим кроком для запобігання передчасному утворенню диметилсульфіду (ДМС), який, за Janish, може відбуватися навіть при низьких концентраціях, якщо процес охолодження сусла не є достатньо інтенсивним [29, с. 118-119].

Піна є ще одним важливим фактором. Згідно з методом МЕБАК, час стійкості піни має становити дві хвилини. Цей час залежить від вмісту білково - поліфенольних сполук, гомологічних хмелевих кислот та вуглекислого газу. Дослідження продуктів Goiris показали, що високий вміст жирних кислот або низький рівень поліфенолів може впливати на структуру піни [35, с. 171-175].

					ДП Б/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Мікробіологічні характеристики. Кінцевий продукт має бути мікробіологічно стабільним. Світле пиво не допускає наявності молочнокислих бактерій (таких як *Lactobacillus brevis* та *Pediococcus damnosus*), оцтовокислих бактерій та диких дріжджів *Brettanomyces*. Дослідження Bamforth показало, що навіть велика кількість активних бактерій може змінювати кислотність та аромат, що призводить до непомітного помутніння у світлому лагері [36, с. 118].

Пастеризація або асептична фільтрація перед розливом гарантує, що продукт залишається безпечним протягом усього його життєвого циклу. Пастеризований лагер зазвичай зберігається від 3 до 6 місяців, тоді як непастеризований може зберігатися до 30 днів.

Вимоги до маркування та зберігання. Згідно з українським законодавством, етикетки алкогольних напоїв повинні містити інформацію про склад, походження, назву виробника, дату виробництва та серійний номер, умови зберігання та об'єм. Рекомендується зберігати пиво за температури від +2 до +20°C, уникаючи прямих сонячних променів, які можуть спричинити реакції фотоокислення та неприємний запах через утворення 3 - метил - 2 – бутен - 1 - тіолу. За даними Lima , ця реакція може відбутися всього за 30 хвилин під впливом ультрафіолетового світла [37, с. 4].

Узагальнююча характеристика. Коротко кажучи, світле пиво 11% - це високоякісна, харчовий продукт який отримується шляхом комплексної взаємодії органічних, мікробних та технологічних інгредієнтів. Якість визначається відповідністю обладнання для стерилізації, ферментації та обробки сусла. Завдяки своєму унікальному смаковому та ароматичному профілю, світле пиво визнано популярним напоєм у всьому світі, що пропагує свій унікальний смак та відповідає національним та міжнародним тенденціям.

					ДП БІ/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

3.1. Матеріали основні і допоміжні

Для забезпечення оптимального перебігу стерилізації пивного суслу виникає необхідність у застосуванні широкого спектру хімічних агентів, сировинних компонентів та допоміжних матеріалів, кожен з яких виконує чітко визначену функцію у формуванні якості кінцевого напою. Раціональний підбір цих субстанцій та перманентний моніторинг їхніх фізико-хімічних властивостей дозволяють суттєво інтенсифікувати роботу теплообмінної апаратури, гарантувати стабільність колоїдної системи та підготувати середовище до подальших біотехнологічних стадій.

Головне призначення основних сировинних компонентів полягає у формуванні поживного субстрату, який надалі буде підданий ферментації та слугуватиме середовищем для життєдіяльності дріжджових культур. До зазначеної групи належать автентичні види ячмінного солоду, хмелепродукти, підготовлена технологічна вода та чисті культури дріжджів. Кожен із цих інгредієнтів повинен суворо відповідати чинній нормативній документації, оскільки найменші варіації їхніх параметрів здатні спровокувати деструкцію біокомпонентів, дефекти смакового профілю або порушення регламенту деконтамінації [24, с. 15-18].

Ячмінний солод є джерелом бродіння та вуглеводів у пивному суслі. Згідно з ДСТУ 4282:2004, використаний солод повинен мати ефективність екстракції щонайменше 80%, вміст вологи не більше 5% та хороший рівень ферментів α -амілази та β -амілази для забезпечення належного перетравлення крохмалю [7, 2, 23]. Паралельно контролюється рівень накопичення S-метилметіоніну, внаслідок термічної деградації якого під час стерилізації виділяється диметилсульфід, що безпосередньо формує специфічний аромат готового продукту [29, с. 119].

					ДП БІ/21.11. 000 ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА		
Розроб.		Скрипник А.М.					
Консульт.		Тітова Л. О.					
Керівн.		Косова В.П.					
Затвер.		Мельник В. М.					
					Стадія	Арк.	Аркушів
					Д	42	101
					КПІ ім. Ігоря Сікорського ФБТ		
					Каф. БТІ		
					Гр.БІ-21		

Хміль надає пивному суслу гіркоти, зберігає конзервуючі властивості та унікальний смак. Згідно з ДСТУ 4698:2007, хміль повинен містити від 4% до 12% α -кислот, залежно від сорту, враховуючи стабільність цих сполук під час нагрівання [41, с. 15]. Дослідження Kunze показало, що ефективна ізомеризація α -кислот відбувається в діапазоні температур 90 - 100°C, що є важливим етапом у процесі очищення [24, с. 287 - 294].

Технологічно підготовлена вода становить близько 90 - 95% від загальної маси готового сусла та повинна відповідати вимогам ДСТУ 7525:2014. Важливими є показники жорсткості (не вище 3 °dH), вмісту хлоридів та сульфатів, рН (6,5 - 8,5), а також відсутність органічних забруднювачів [42, с. 12]. Мінімізація вмісту розчиненого кисню на етапі стерилізації охмеленого сусла є пріоритетною, оскільки надлишкова аерація спричиняє необоротне окиснення купажу та погіршення смакових властивостей [43, с. 102].

Допоміжні компоненти - це компоненти, що покращують функціональність існуючої системи, але безпосередньо не інтегровані в продукт. До них належать системи нагрівання та охолодження, системи очищення та стерилізації, а також системи кондиціонування та сушіння. Для нагрівання сусла в пластинчастому теплообміннику використовується технологічна пара, яка повинна відповідати необхідним санітарним умовам, а потрапляння конденсату в систему не допускається [30, с. 45].

Холодоагент (холодна вода або пропіленгліколь) допомагає охолодити стерилізоване сусло до потрібної температури для додавання дріжджів. Кінетика охолодження визначає інтенсивність евакуації диметилсульфіду та характер осадження денатурованого білкового конгломерату («холодного зламу»), що безпосередньо впливає на прозорість напівпродукту [35, с. 171 - 175].

					ДП Б/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.1.Характеристика сировини, матеріалів та напівпродуктів

Найменування	Категорія і номер НТД, згідно якого перевіряється сировина	Показники, що обов'язкові для перевірки та їх нормативне значення	Примітка
1	2	3	4
1.Основна сировина:			
1.1.Солод ячмінний світлий	ДСТУ 4282:2004	Екстрактивність $\geq 80\%$, вологість $\leq 5\%$, білок 9 - 11,5%, здатність до розсахарювання ≥ 20 хв	Щотижневий контроль за методом МЕВАК
1.2.Хміль гранульований	ДСТУ 4698:2007	α -кислоти 4 - 12%, вологість 8 - 10%, зола $\leq 12\%$, відсутність пліснявих грибів	Контроль перед завантаженням партії
1.3.Вода технологічна	ДСТУ 7525:2014	pH 6,5 - 8,5, жорсткість $\leq 3^\circ \text{dH}$, розчинений $\text{O}_2 \leq 0,1$ мг/л, відсутність E.coli	Щоденний контроль

Продовження таблиці 3.1

2.Допоміжна сировина:			
2.1.Пара технологічна	ТУ У 24.2-14307251-068:2005	Тиск 0,3 - 0,6 МПа, температура 130 - 160°C, відсутність конденсату	Постійний моніторинг
2.2.Засоби СІР-мийки	ТУ У 24.5-33062570-001:2008	NaOH 2 - 4%, HNO ₃ 1 - 3%, температура розчину 65 - 80°C	Перед кожним циклом
2.3.Азот технічний	ДСТУ 4.2.1:2005	Чистота $\geq 99,9\%$, вологість $\leq 0,01\%$, відсутність CO ₂	Контроль при заміні балонів
3.Матеріали:			
3.1.Ущільнювачі NBR	ГОСТ 18832-73	Стійкість до температур до 120°C, харчова безпечність	При заміні обладнання
3.2.Фідьтрувальна вода	ТУ У 26.5-30965639-002:2009	Проникність 1 - 5 дарсі, вміст SiO ₂ $\geq 85\%$	Кожна партія
4.Напівпродукти:			
4.1.Сушло охмелене	Власні ТУ підприємства	Екстрактивність 11 - 14°Р, рН 5,2 - 5,6, прозорість	Контроль перед стерилізацією

Продовження таблиці 3.1

4.2.Суздо стерилізоване	Власні ТУ підприємства	Відсутність життєздатних мікроорганізмів, температура 8 - 12°C	Після кожного циклу
----------------------------	---------------------------	--	------------------------

Функціонування сучасних систем безрозбірної санобробки (CIP) виступає фундаментальним фактором підтримки асептичного стану лінії стерилізації. Дезінфікуючі агенти на основі гідроксиду натрію (2 - 4 %) ефективно омилують та деструктують органічні забруднення, тоді як розчини азотної кислоти (1 - 3 %) забезпечують нейтралізацію мінеральних відкладень та пивного каменю [44, с. 67 - 70]. Раціональна комбінація гідродинамічного тиску, швидкості потоку та температурних режимів мийки гарантує повне видалення біодеструктивних залишків попереднього циклу, виключаючи ризики крос-контамінації.

Азот використовується в процесі стерилізації для дегазації теплообмінника та запобігання окислювальним реакціям. Вміст кисню в азоті не повинен перевищувати 0,01%, що є обов'язковою умовою для запобігання окисненню летких сполук та стабілізації лабільних компонентів пивного сусла [45, с. 23].

Категорія конструкційних та комплектуючих елементів включає еластичні міжпластинчасті прокладки, фільтрувальні елементи та первинні КВП-датчики. Матеріал на основі нітрил-бутадієнового каучуку (NBR) повинен стабільно працювати в умовах тривалого температурного навантаження до 120 °C та гідравлічного тиску до 1,0 МПа, демонструючи абсолютну хімічну та токсикологічну інертність щодо пивного сусла [46, с. 89].

До групи напівпродуктів відносять гаряче охмелене сусло, що транспортується на блок стерилізації, та деконтамінований субстрат на виході з установки. Вихідне сусло характеризується густиною в межах 11 - 14 % за

					ДП БІ/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

шкалою Плато (°P), початковим показником рН 5,2 - 5,6 та насиченістю нативними сполуками, зокрема хмелевими гіркими смолами, що трансформуються під час потокової термообробки. Стерилізований напівфабрикат має бути абсолютно очищеним від контамінантів, мати температуру 8 - 12 °C та повноцінний комплекс екстрактивних речовин для росту дріжджів.

Контроль якості на всіх стадіях здійснюється в суворій відповідності до затверджених інструкцій, з обов'язковим веденням журналів та лабораторних протоколів. Особливий акцент робиться на мікробіологічному моніторингу та відповідності параметрів системі управління безпечністю харчових продуктів (НАССР), що гарантує стабільну безпеку випущених партій.

3.2. Контроль виробництва

Організація технологічного контролю на дільниці стерилізації пивного сусла є сукупністю взаємопов'язаних методів, спрямованих на стабілізацію якісних показників та забезпечення відповідності технічним умовам. Оптимізація контрольних операцій дозволяє мінімізувати деструкцію термолабільних нутрієнтів, пролонгувати мікробіологічну стійкість та забезпечити оптимальний фізіологічний стан посівних дріжджів.

Сучасна концепція контролю якості в пивоварній промисловості базується на принципах аналізу ризиків та критичних контрольних точок (НАССР), що передбачає ідентифікацію контрольних точок, встановлення критичних значень для кожного процесу, впровадження плану контролю та впровадження коригувальних заходів у разі виявлення відхилень [44, с. 156 - 159]. Згідно з дослідженням Бамфорта, впровадження цілісної системи моніторингу під час процесу виробництва пивного сусла може знизити ризик мікробіологічного забруднення на 95% та збільшити точність біомаркерів на 18 - 22% [36, с. 287 - 294].

Контрольний регламент на блоці стерилізації сертифікований за трьома базовими напрямками: хімічний моніторинг (компонентний склад, концентрація

					ДП Б/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сухих речовин, активна кислотність), технологічний (температурні градієнти, тиск, швидкість потоку, час експозиції) та біологічний (асептичність сусла, санітарний стан обладнання). Кожна категорія має свою методологію, підтримку, обладнання та процедури тестування, які визначені відповідними правовими документами та міжнародними стандартами [47, с. 67 - 70].

Хімічний контроль сировини та напівпродуктів є першочерговим завданням системи якості. Вхідна перевірка ячмінного солоду включає визначення екстрактивності за МЕВАК, контроль вмісту білкових речовин за Кьельдалем, а також оцінювання ферментативної активності α -амілази та β -амілази [7, с. 23 - 28]. Підвищена увага приділяється моніторингу суислового попередника - S-метилметіоніну; його концентраційний ліміт у сухій речовині солоду обмежується межами 50 - 70 мг/кг з метою запобігання надмірному синтезу небажаного диметилсульфіду під час термообробки [29, с. 119 - 122].

Моніторинг якості хмелю включає аналіз вмісту α -кислот за допомогою кондуктометричного титрування або високоефективної рідинної хроматографії (ВЕРХ). Стабільність α -кислот під час зберігання має вирішальне значення, оскільки їх окислення призводить до втрати смаку та розвитку небажаних ароматів. Згідно з дослідженням Малавіцкі, при правильному зберіганні хмелю при температурі -2°C втрати α -кислот не перевищують 10 - 12% протягом 24 місяців [26, с. 4434 - 4441].

Технологічну воду контролюють за рН, загальною жорсткістю, концентрацією заліза та розчиненим киснем. Високі концентрації кисню (більше 0,1 мг/л) можуть спричиняти окислювальні реакції під час стерилізації та впливати на смак пива [43, с. 102-106]. Мікробіологічний контроль води проводять згідно з показником КМАФАнМ (кількість мезофільних аеробних та факультативно - анаеробних мікроорганізмів), який не повинен перевищувати 100 КУО/мл.

					ДП БІ21.11. 000 ПЗ	Арк.
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.2. Точки і параметри контролю виробництва

№ п/п	Найменуван ня стадії процесу, місце зміру параметра або відбору проби	Параметр, що контролюєть ся	Частота контролю	Норми технологічно го режиму та допустимі відхилення	Метод контролю параметра, тип приладу
1	Вхідний контроль сировини				
1.1	Склад сировини (солод ячмінний світлий)	Екстрактивні сть, %	Кожна партія (1 - 2 рази/тижден ь)	80,0±1,0	Кх - за МЕВАК, рефрактомет р ATAGO
1.2	Склад сировини (хміль гранульован ий)	α-кислоти, %	Кожна партія	4,0 - 12,0 залежно від сорту	Кх - кондуктомет ричне титрування, аналізатор Anton Paar
1.3	Технологічн а вода (основна лінія)	pH, жорсткість °dH, розчинений O ₂	Щоденно о 8:00	pH 6,5 - 8,5; ≤3,0 °dH; O ₂ ≤0,1 мг/л	Кх – pH - метр Hanna HI - 2020, O ₂ - метр Hach LDO

Продовження таблиці 3.2

2	Подача сусла на ділянку стерилізації				
2.1	Трубопровід Ø159×4 перед ПТО	Температура, °C	Безперервно (кожні 30 с)	75±3	Кт - термометр опору Pt100, контролер Siemens
2.2	Трубопровід подачі сусла	Екстрактивність, °P	Кожну зміну (3 рази/добу)	11,0 - 14,0	Кх - рефрактометр цифровий Schmidt+Haeensch
2.3	Пробовідбірний кран DN25	pH сусла	Кожні 2 години	5,2 - 5,6	Кх - онлайн pH - метр Endress+Hauser
3	Пластинчастий теплообмінник (секція нагрівання)				
3.1	Секція нагрівання ПТО, вихід	Температура сусла, °C	Безперервно (запис кожні 10 с)	95±2	Кт - термopар К - типу, логгер Testo 176
3.2	Колектор подачі пари	Тиск пари, МПа	Безперервно	0,25 - 0,35	Кт - манометр цифровий Wika A-10

Продовження таблиці 3.2

3.3	Лінія продукту ПТО	Витрата суслу, м ³ /год	Безперервно	25±2	Кт - витратомір Endress+Hauser Proline
4	Зона витримки (стерилізація)				
4.1	Трубопровід витримки L=20 м	Температура, °C	Безперервно (сигналізація при відхиленні)	92 - 98	Кт - термометр цифровий з сигналізацією
4.2	Система керування ПТО	Розрахунковий час витримки, с	Кожну годину (автоматичний розрахунок)	20 - 40	Кт - ПЛК з таймером
5	Охолодження стерилізованого суслу				
5.1	Секція охолодження ПТО, вихід	Температура готового суслу, °C	Безперервно	10±2	Кт - термометр опору Pt100 з сигналізацією
5.2	Секція охолодження (розрахункова)	Швидкість охолодження, °C/хв	Кожні 2 години	≥15	Кт - розрахунок на базі ПЛК

Продовження таблиці 3.2

6	Готове стерилізоване сусло				
6.1	Збірник сусла V=50 м³	Температура, °C	Безперервн о	8 - 12	Кт - термометр з реєстрацією
6.2	Кран відбору проб збірника	Стерильність	Кожен цикл (кожні 6 - 8 годин)	Відсутність росту за 5 діб при 30°C	Кмб - посів на МПА, інкубація в термостаті
6.3	Кран контролю якості	Екстрактивні сть, °P	Кожен цикл	Збереження вихідної ±0,2	Кх - рефрактомет р лабораторни й
6.4	Лабораторн а проба 100 мл	pH готового сусла	Кожен цикл	5,1 - 5,5	Кх - pH - метр лабораторни й з компенсацією температури
7	Допоміжні системи				

Кінець таблиці 3.2

7.1	Бак СІР-мийки 5 м ³	Концентрація NaOH, %	Перед кожною мийкою	2,0 - 4,0	Кх - кондуктометричний датчик з температурною компенсацією
7.2	Лінія циркуляції СІР	Температура мийного розчину, °С	Під час мийки (кожні 5 хв)	65 - 80	Кт - термopара з індикацією
7.3	Паропровід Ø89×4	Тиск насиченої пари, МПа	Безперервно	0,3 - 0,6	Кт - манометр показуючий клас точності 1,5
8	Санітарно-гігієнічний контроль				
8.1	Внутрішні поверхні ПТО після СІР	Мікробіологічна чистота	Після кожної планової мийки	<10 КУО/см ²	Кмб - змиви стерильними тампонами, посів на МПА
8.2	Повітря виробничого приміщення	КМАФАнМ, КУО/м ³	Щотижня (понеділок, 9:00)	<50	Кмб - седиментаційний метод, чашки Петрі

Інженерно-технічні режими теплової обробки виступають ключовим інструментом формування стабільної культури сусла. Температурний межовий показник у пластинчастому теплообміннику підтримується на позначці $95 \pm 2^\circ\text{C}$, оскільки падіння температури нижче 93°C призводить до неповної денатурації ферментного комплексу та часткового збереження активності α -амілази, що спричиняє неконтрольований гідроліз декстринів [24, с. 445 - 448]. З іншого боку, підвищення температури вище 98°C призводить до карамелізації та деградації білка, що негативно впливає на якість готового пива [35, с. 171 - 175].

Час експозиції продукту в зоні температурної витримки розраховується на основі об'ємної витрати та геометричних характеристик трубного контуру. Для гарантованого знищення контамінантів потрібно забезпечити проходження потоку при 92°C не менше 20 секунд, що забезпечує інактивацію 99,99 % суислової мікрофлори, зокрема родів *Lactobacillus brevis* та *Pediococcus damnosus* [31, с. 89 - 92]. Підтримання стабільного надлишкового тиску в каналах (0,25–0,35 МПа) запобігає локальному закипанню та евакуації цінних ароматичних фракцій хмелю.

Мікробіологічний контроль включав перевірку стерилізації сировини та якості обладнання. Стерильність сусла оцінюється шляхом його культивування на м'ясо-пептонному агарі (МПА) та інкубації при 30°C протягом 5 днів. Відсутність видимого мікробного росту свідчить про ефективність системи стерилізації. Крім того, аналітичні методи використовують для селективного виявлення молочнокислих та оцтовокислих бактерій, які є найбільш термостійкими забруднювачами пивного сусла [48, с. 118 - 121].

Санітарно-гігієнічний контроль поверхонь обладнання після СІР - мийки здійснюється методом змивів стерильними тампонами з подальшим посівом на поживні середовища. Нормативний показник - менше 10 КУО/см² на внутрішніх поверхнях, що контактують з продуктом. Перевищення цього показника свідчить про недостатню ефективність мийно - дезінфекційних процедур та потребує корегування режимів СІР [49, с. 67 - 70].

					ДП БІ/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сучасні системи автоматизації та СКАДА-пакети забезпечують неперервну візуалізацію технологічних параметрів з можливістю динамічного корегування сигналів управління та активацією світло-звукової сигналізації при виході за критичні межі. Всі тренди та дані реєструються в електронних базах даних для аналізу ефективності, що дозволяє своєчасно виявляти передумови для виникнення браку та впроваджувати превентивні заходи.

3.3. Матеріальний баланс

Матеріальний баланс дільниці стерилізації пивного сусла є важливим завданням, що базується на принципі збереження маси. Це дозволяє вимірювати всі вхідні та вихідні дані технологічного ланцюга. Цей аналіз важливий для проєктування обладнання, вдосконалення процесу, контролю використання сировини та забезпечення якості.

Специфіка матеріального балансу на даній стадії полягає в тому, що глибокі хімічні та біохімічні перетворення відбуваються на тлі часткових фазових переходів, видалення летких сульфідів та агрегації білкових молекул. За даними Kunze, при нагріванні сусла до 95 - 100 °С для випаровування та видалення диметилсульфіду відбувалася втрата ваги від 0,8% до 1,2% [24, с. 445 - 448]. Ці втрати необхідно враховувати при розробці точного матеріального балансу.

Математичне моделювання балансу виконано для одиничного технологічного циклу переробки 1000 кг гарячого охмеленого сусла з масовою часткою сухих речовин 12 °Р, що цілковито відповідає промисловим регламентам крафтових та середніх броварень. Умови початку бродіння: температура 75°С, густина 1048 кг/м³, рН 5,4, суха речовина 120 кг/м³ [36, с. 287 - 294]. Стерилізацію проводять в пластинчастому теплообміннику при 96°С протягом 30 секунд з подальшим охолодженням до 10°С.

Основними компонентами системи є охмелене сусло, технологічна пара для нагрівання та хаолодоносій (охолоджена вода або пропіленгліколь) для охолодження. Як теплоносій використовується стиснене повітря зі швидкістю, розрахованою виходячи з робочої температури. Для нагрівання 1000 кг ячмінного

					ДП БІ/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сусла від 75°C до 96°C з теплоємністю 4,1 кДж/кг·К потрібно приблизно 86 МДж теплової енергії [50, с. 156 - 159]. Якщо насичена пара використовується під тиском 0,4 МПа (ентальпія пароутворення 2133 кДж/кг), необхідна кількість пари становитиме орієнтовно 40 кг.

В проєкті я використовується пластинчастий теплообмінник, він працює в безперервному режимі, тому об'єм сусли з матеріального балансу 953,8 дм³, це той об'єм, який безперервно прокачується через апарат. А сам апарат становить приблизно 40 дм³ в той момент коли сусло перебуває в каналах апарата між 20 пластин.

Таблиця 3.3. Матеріальний баланс дільниці стерилізації пивного сусли

Використано					Отримано				
Стадія	Назва сировини, матеріалів та напівпродуктів	Кількість			Стадія	Назва кінцевого продукту або напівпродукту, відходів та втрат	Кількість		
		кг	шт	дм ³			кг	шт	дм ³

Продовження таблиці 3.3

Нагрівання сусла	Сусло охмелене (вхід ПТО)	1000,0	-	953,8	Нагрівання сусла	Сусло нагріте до 96°C	997,5	-	951,2
	Пара технологічна (0,4 МПа)	40,0	-	66,7		Конденсат відпрацьований	40,0	-	40,0
						Втрати з випаровуванням	2,5	-	4,2
Витримка при стерилізації	Сусло нагріте до 96°C	997,5	-	951,2	Витримка при стерилізації	Сусло стерилізоване	995,0	-	949,0
						Втрати летких сполук (DMS, H ₂ O)	2,5	-	2,2

Продовження таблиці 3.3

Охолодження	Сусло стерилізоване	995,0	-	949,0	Охолодження	Сусло охолоджене (10°C)	992,0	-	946,7
	Вода охолоджувальна (5°C)	800,0	-	800,0		Вода нагріта (45°C)	800,0	-	800,0
						Втрати теплопровідністю	3,0	-	2,3
Освітлення	Сусло охолоджене	992,0	-	946,7	Освітлення	Сусло освітлене	977,5	-	932,2
						Гарячий злам (коагулят)	12,5	-	11,9
						Холодний злам	2,0	-	2,6
Всього:		2832,5	-	2766,2	Всього:		2832,5	-	2766,2

Під час нагрівання відбувається втрата маси через випаровування води та твердих речовин. Згідно з дослідженням Narziß, ця втрата становила 0,2 - 0,3% від маси сусла під час короткочасної термічної обробки [30, с. 171 - 175]. У данних розрахунках ми припустили втрату 2,5 кг, що еквівалентно 0,25% від початкової маси сусла.

На стадії витримки при температурі стерилізації продовжується видалення летких сполук, зокрема диметилсульфіду, що утворюється внаслідок термічного розкладу S-метилметіоніну. Концентрація DMS у стерилізованому суслі не повинна перевищувати 50 - 70 мкг/л для забезпечення відсутності небажаних

					ДП БІ21.11. 000 ПЗ	Арк.
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

присмаків у готовому пиві [29, с. 119 - 122]. Втрати на цій стадії становлять додатково 2,5 кг.

Цей процес охолодження супроводжується утворенням «холодного зламу», який містить поліфенольні білкові сполуки. За даними Goiris, кількість доданого холодного зламу коливається від 0,8 до 1,5 г/дм³ сусла, залежно від його складу та швидкості охолодження [35, с. 171 - 175]. При швидкості охолодження від 15 до 20 °С/хв, поміщеного в пластинчастий теплообмінник, утворюється близько 2 кг холодного зламу.

Паралельно під дією високих температур на попередніх етапах відбувалася необоротна коагуляція високомолекулярних протеїнів з формуванням пластівців «гарячого зламу». Його вихід прямо корелює з якістю солодової сировини та складає близько 1,0–1,5 % від загальної маси напівфабрикату [51, с. 67 - 70]. Розрахунок передбачає 12,5 кг гарячого коагуляту, що становить 1,25% від початкової маси.

Охолоджувальна вода проходить через закриті канали та не контактує з продуктом. Її кількість визначається з теплового балансу процесу охолодження. Для відведення тепла від 995 кг сусла (охолодження його з 96°С до 10°С) з одночасним нагріванням води з 5°С до 45°С потрібно приблизно 800 кг охолоджувальної води.

Загальний вихід готового стерилізованого сусла становить 977,5 кг з 1000 кг вихідного продукту, що відповідає виходу 97,75%. Цей показник узгоджується з даними промислової практики, де втрати на ділянці стерилізації зазвичай не перевищують 2 - 3% [48, с. 445 - 448].

Масовий убуток сухих речовин у ході теплової обробки є незначним та обмежений видаленням летких сульфідів і осадженням нерозчинних білкових преципітатів. Величина екстрактивності охолодженого сусла стабільно становить 12°Р ±0,1°Р, що підтверджує високу ефективність апаратурної схеми та збереження повноцінного поживного профілю середовища.

Складений матеріальний баланс дозволяє точно розрахувати потреби в сировині, оптимізувати використання допоміжних матеріалів та спрогнозувати

					ДП БІ21.11. 000 ПЗ	Арк.
						59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

економічні показники роботи дільниці стерилізації. Ці дані є основою для проектування обладнання, складання технологічних регламентів та контролю ефективності виробничого процесу.

3.4. Опис технологічного процесу

Технологічний цикл потокової стерилізації пивного суслу є складним теплофізичним процесом, спрямованим на забезпечення повної деконтамінації середовища, необоротну інактивацію гідролітичних ферментів та збереження цільового хімічного складу перед структурним бродінням. Цей процес відбувається в пластинчастому теплообміннику та включає підготовку сировини, її нагрівання, витримку при температурі стерилізації, охолодження та освітлення готового продукту.

Допоміжні роботи

ДР.1 Санітарна підготовка виробництва

Санітарно-гігієнічна обробка апаратурного комплексу є першочерговим заходом, який гарантує мікробіологічну асептичність та унеможливорює розвиток суслених шкідників. Згідно з методологією НАССР, підготовка передбачає регламентоване очищення всіх внутрішніх поверхонь теплообмінників та трубопроводів за допомогою автоматизованої системи СІР (Clean-in-Place) [44].

ДР.1.1. Підготовка працівників

Перед допуском до виконання технологічних операцій персонал дільниці проходить обов'язковий комплекс підготовчих заходів. Він включає регламентований медичний огляд та санітарний мінімум, проходження інструктажів з охорони праці, техніки безпеки й асептичних правил роботи, а також переодягання у комплект санітарного одягу (халат, шапочка, спецвзуття) та застосування засобів індивідуального захисту.

ДР.1.2. Підготовка миючих та дезінфікуючих засобів

Для забезпечення санітарної обробки обладнання та приміщень з концентратів та питної води ($t = 1 - 35^{\circ}\text{C}$) готують робочі хімічні розчини. Процес включає приготування дезінфікуючих розчинів для обробки поверхонь апаратів (робочі концентрації 0,5%, 1% та 2%), приготування харчового лужного розчину

					ДП БІ/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

гідроксиду натрію для системи СІР-мийки (концентрація 4%), приготування робочого розчину азотної кислоти для видалення мінерального каменю (концентрація 5–7%), а також забезпечення спиртовими асептичними засобами для антисептики рук персоналу (70% розчин).

Система СІР пройшла такі етапи очищення: перше очищення водою при температурі 40 - 45°C протягом 10 - 15 хвилин; промивання 2 - 4% розчином гідроксиду натрію (NaOH) при температурі 70 - 80°C протягом 30 - 40 хвилин; для гідролізу та омилення органічних осадів та біоплівки; проміжне промивання водою. Циркуляція 1 - 3% розчином азотної кислоти (HNO₃) при температурі 50 - 60°C протягом 20 - 30 хвилин; для декструкції мінерального каменю та сольових відкладень. Фінішна промивка демінералізованою водою до нейтрального показника змивної води рН 6,5 - 7,5. Лінійна швидкість руху мийних розчинів у каналах підтримується на рівні 2,0 - 2,5 м/с для створення високого турбулентного фактора, що гарантує якісне механічне очищення пластин [52].

Після промивання зразки стерилізують гарячою водою при температурі 85 - 90 °C протягом 15 - 20 хвилин або гарячою парою під тиском 0,15 - 0,20 МПа. Ефективність санітарної обробки контролюється відбором змивів з поверхонь обладнання (Кмб.1) з подальшим мікробіологічним аналізом. Нормативний показник - менше 10 КУО/см² [48].

ДР.2 Підготовка теплоносіїв та холодоносіїв

Процес включає нагрівання технологічної пари (тиск 0,3 - 0,6 МПа, температура 130 - 160 °C) та охолодження води або пропіленгліколю до 2 - 5 °C. Якість пари підтримується з використанням індексу сухості ($\geq 97\%$) та не містить конденсату та механічних домішок (Кт.1). Температура охолоджувальної води повинна становити 2 - 5 °C та відповідати вимогам до питної води за мікробіологічними показниками [24].

ДР.3 Контроль параметрів сировини

Перед направленням на лінію стерилізації гаряче охмелене сусло піддають вхідному лабораторному аудиту за показниками масової частки екстракту (11,0 - 14,0 °Р), температури (70 - 80 °C), активної кислотності (рН 5,2 - 5,6),

					ДП Б/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мікробіологічної організації (КМАФАнМ $\leq 10^4$ КУО/мл) та візуальної прозорості [36].

Основний технологічний процес

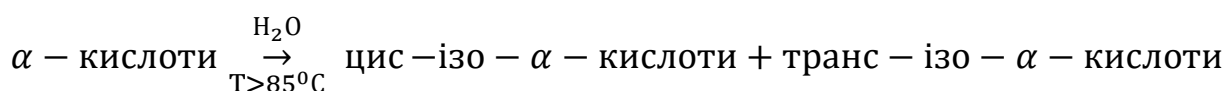
ТП.1 Нагрівання сусла до температури стерилізації

Охмелене сусло, нагріте до 75 ± 3 °С, переміщують до пластинчастого теплообмінника продуктивністю 25 м³/год за допомогою відцентрового насоса. Нагрівання відбувається в секції екстракції за допомогою тепла від стерилізованого сусла та на етапі нагрівання технологічною парою.

Пластинчастий теплообмінник складається зі 120 титанових пластин товщиною 0,6 мм з гофрованою поверхнею, призначеною для теплопередачі. Загальна площа теплопередачі становить 95 м². Кришка оснащена ущільнювальним кільцем з нітрилбутадієнового каучуку (NBR), яке витримує температуру до 120 °С. Коефіцієнт теплопередачі в секції становить приблизно 3500 - 4200 Вт/м²·К [35].

Сусло нагрівається до 95 ± 2 °С у секції нагрівання протягом 45 - 60 секунд. Температура контролюється за допомогою термопари типу К з точністю $\pm 0,5$ °С (Кт.2). Тиск у системі підтримується на рівні 0,25 - 0,35 МПа, щоб запобігти кипінню сусла.

На цій стадії відбуваються початкові стадії ізомеризації α -кислот хмелю:



Ступінь перетворення під час нагрівання становить 15 - 25% від загальної кількості [26].

ТП.2 Витримка при температурі стерилізації

Нагріте сусло потрапляє в трубопровід для витримки довжиною 20 метрів та діаметром 159 мм, де його нагрівають до температури від 92 до 98°С протягом 30 ± 5 секунд. Періоди витримки розраховуються автоматично на основі швидкості потоку та геометричних параметрів трубопроводу.

Трубопровід для витримки виготовлена з нержавіючої сталі AISI 316L та ізольовано мінеральною ватою товщиною 100 мм для запобігання розсіюванню

					ДП БІ/21.11. 000 ПЗ	Арх.
Зм.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		62

тепла. Температуру контролюють у трьох точках трубопроводу (Кт.3, Кт.4, Кт.5), а показники записуються автоматично.

На цьому етапі завершуються процеси інактивації ферментних систем та досягається висока ефективність деструкції вегетативних клітин контамінантів:

- α -амілаза була інактивована на 99,9% при 95°C протягом 30 секунд.
- β -амілаза була інактивована при 70°C через 5 хвилин.
- Вегетативні клітини молочнокислих бактерій (*Lactobacillus brevis*) піддаються глибокій деструкції з ефективністю 99,999 % (при питомому індексі $D_{95}=0,3$ с).

Продовжується ізомеризація α -кислот хмелю з досягненням загального ступеня перетворення 40-60% [29].

ТП.3 Охолодження стерилізованого сусла

Деконтамінований напівфабрикат піддають двоступеневому зниженню температури: спочатку в секції рекуперації (віддаючи тепло вхідному холодному потоку) до меж 40 - 50 °C, а потім у секції крижаного холодоагенту - до регламентних °C. Динаміка охолодження становить 15 - 20 °C/хв, що виступає обов'язковою технологічною умовою для стимуляції виділення диметилсульфіду та генерації холодного білкового зламу [43].

Холодоносій (охолоджена вода або 30% розчин пропіленгліколю) циркулює протитечією до сусла зі швидкістю 3,0 м/с. Температура холодоносія на вході становить 2 - 5°C, на виході - 35 - 45°C. Контроль температури охолодженого сусла здійснюється безперервно (Кт.6).

На цій стадії відбувається коагуляція білково-поліфенольних комплексів:



Кількість утвореного холодного зламу становить 1,5 - 3,0 г/л сусла [31].

ТП.4 Освітлення та стабілізація сусла

Охолоджене сусло надходить у відстійник об'ємом 50 м³ для відділення утвореного коагуляту та стабілізації перед подачею на бродіння. Час відстоювання становить 2 - 4 години при температурі 8 - 12°C.

					ДП Б/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Резервуар виготовлений із корозійностійкої сталі з конічною формою днища, що спрощує періодичне дренування щільного осадового зламу. Для забезпечення повної однорідності та гомогенізації об'єму на початковому етапі застосовують ротаційне нагнітання потоку протягом перших 30 хвилин без руйнування коагуляційних конгломератів.

Контроль якості освітленого сусла включає визначення прозорості (≤ 3 ЕВС), стерильності (відсутність росту мікроорганізмів), екстрактивності (збереження початкових показників $\pm 0,2^\circ\text{P}$) та pH (5,1 - 5,5). Відбір проб здійснюється з нижньої, середньої та верхньої частини відстійника (Кх.2, Кх.3, Кмб.3).

ТП.5 Подача готового сусла на бродіння

Освітлене стерилізоване сусло подається на бродільне відділення за допомогою відцентрового насоса через стерилізований трубопровід. Перед подачею здійснюється аерація стерильним повітрям для забезпечення початкового вмісту розчиненого кисню 8 - 12 мг/л, необхідного для нормального розмноження дріжджів.

Система аерації включає компресор, систему очищення повітря (фільтри НЕРА) та стерилізації при температурі 140 - 160°C. Інтенсивність аерації становить 0,5 - 1,0 л повітря на 1 л сусла при тиску 0,1 - 0,15 МПа [53].

Переробка відходів та побічних продуктів

ПВ.1 Переробка коагуляту (гарячого та холодного зламу)

Утворений коагулят (12 - 15 кг на тонну сусла) відділяється від основного потоку та подається на переробку. Гарячий злам використовується як компонент кормів для тварин після термічної обробки при температурі 80 - 85°C протягом 30 хвилин. Холодний злам може використовуватися для виробництва харчових добавок після відповідної підготовки [54].

ПВ.2 Знешкодження відпрацьованих мийних розчинів

Відпрацьовані лужні та кислотні розчини СІР-мийки нейтралізуються до pH 6,5 - 8,5 та подаються на станцію біологічного очищення стічних вод. BOD_5 відпрацьованих розчинів не перевищує 500 мг O_2 /л після нейтралізації.

					ДП Б/21.11. 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

Описана автоматизована технологічна схема забезпечує одержання абсолютно стерильного поживного субстрату з максимальним виходом на рівні 97,5 - 98,0 %, гарантує повне збереження цільових розчинних азотистих та вуглеводних нутрієнтів та характеризується низьким питомим споживанням енергоресурсів за рахунок оптимальної рекуперації тепла. Складена схема повністю готова до інтеграції у графічну та конструкторську частини дипломного проекту.

					ДП БІ21.11. 000 ПЗ	Арк.
						65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4. ПІДБІР ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЛАДНАННЯ

4.1. Обґрунтування вибраної конструкції. Підбір конструкційних матеріалів для окремих елементів апарату

Розроблення та впровадження блока термічної обробки пивного сусла є одним із найбільш відповідальних етапів проектування сучасної технологічної лінії, оскільки саме цей процес визначає біологічну стабільність, органолептичні стандарти та кінцеву якість готового продукту. Охмелене сусло, одержане після стадій затирання та фільтрації, містить значну кількість екстрактивних поживних речовин, що робить його сприятливим середовищем для розвитку сторонньої та патогенної мікрофлори. Тому перед направленням науково обґрунтованого об'єму в секцію ферментації, необхідно забезпечити його глибоку деконтамінацію із повним збереженням первинних смакових властивостей. Для реалізації цього завдання у промисловій практиці найбільш ефективним і поширеним рішенням є застосування пластинчастих теплообмінних апаратів. Вони дозволяють здійснювати високошвидкісний, точно регульований та щадний термічний вплив на середовище без деструкції його цільових компонентів. [24].

Пластинчастий теплообмінник у цій системі виконує одночасно кілька важливих функцій: нагрівання сусла до потрібної температури для стерилізації, витримувannya його до потрібної температури, незначне зниження температури та охолодження продукту до відповідної температури для введення дріжджів. Така конструкція знижує витрати енергії на процес рекуперації тепла, що є критично важливим для сучасних пивоварних підприємств. Такий підхід також забезпечує стабільність параметрів, що є важливим для виробництва пива з прогнозованими органолептичними характеристиками [34].

Вибір на користь саме пластинчастих конструкцій обумовлений їхньою високою тепловою інтенсивністю та здатністю стабільно функціонувати в

					ДП БІ/21.11. 000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Скрипник А.М.			РОЗДІЛ 4. ПІДБІР ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЛАДНАННЯ	Стадія	Арк.	Аркушів
Консульт.						Д	66	101
						КПІ ім. Ізгоря Сікарського ФБТ		
Керівн.		Косова В.П.				Каф. БТІ		
Затвер.		Мельник В. М.				ГрБІ-21		

жорстких режимах HTST (High Temperature Short Time). Цей метод передбачає короткочасний нагрів суслу до критичних температур з наступним миттєвим його охолодженням. При цьому мінімізується негативний тепловий вплив на органічну матрицю продукту, оскільки час перебування в стресовій температурній зоні є мінімальним. Науково доведено, що така схема обробки дозволяє в повній мірі зберегти тендітні ароматичні сегменти суслу та заблокувати проходження небажаних реакцій меланоїдиноутворення (реакцій Майяра), які здатні привнести сторонні відтінки у смаковий профіль хмільного напою [55].

З технічної точки зору апарат складається із жорсткої опорної станини, всередині якої в пакет стиснуті гофровані пластини, що утворюють ізольовані канали для протидіючого руху суслу та теплоносія. Хвиляста текстура пластин організує спрямований турбулентний режим руху рідинних середовищ. Це збільшує кінцевий коефіцієнт теплопередачі в кілька разів порівняно з кожухотрубними аналогами. Рама обладнана потужними натяжними болтами для надійної фіксації пакета та забезпечення повної герметичності. Особлива увага приділяється підбору матеріалу поверхонь теплообміну. Для безпосередньої взаємодії з харчовим середовищем використовують високолеговані хромонікелеві сталі AISI 304 та AISI 316, які відповідають найсуворішим санітарно-епідеміологічним стандартам. Марка сталі AISI 316 за рахунок легування молібденом має виключну стійкість до точкової корозії, дії органічних кислот суслу, а також до агресивних хімічних реагентів під час виконання безрозбірної санобробки в системі CIP [56].

Герметизуючі еластомери між робочими елементами синтезуються з високостійких термополімерів. Найбільшої ефективності набуло використання прокладок типу EPDM (етилен-пропілен-дієновий каучук), який не деформується при екстремальних температурах та є інертним до органічної структури продукту. У разі використання більш концентрованих мийних розчинів можуть впроваджуватися сегменти на основі NBR (бутадієн-

					ДП БІ21.11. 000 ПЗ	Арк.
						67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нітрильного каучуку), що мають стабільність до дії лугів та ліпідних компонентів. Раціональний вибір полімерного складу є ключовим чинником, оскільки ущільнення повинні витримувати багатократні термічні удари та хімічну експрес-обробку [69].

Технологічний алгоритм роботи апарата полягає в регламентованому послідовному проходженні сусла через розділені температурні зони. У рекуперативній секції гарячий стерилізований потік віддає свою теплову енергію направленому навстріч холодному суслу. Це доречно оптимізує енергоресурси, забезпечуючи до 60 - 70 % заощадження тепла. Наступний блок організує стрімкий нагрів до температури стерилізації. Залежно від специфіки рецептури, робочий показник становить 95 - 110 °С, при часі утримання від 20 до 60 секунд. Температурна стабілізація на цьому етапі відбувається у зовнішньому трубчастому витримувачі, що інтегрований одразу за теплообмінником. Після цього деконтаміноване сусло входить назад в апарат, де охолоджується до температури внесення дріжджової культури, яка для більшості технологій становить 6 - 12 °С [57].

Для безперебійного функціонування теплообмінної установки необхідно передбачити комплекс допоміжних технічних засобів. Найсуттєвішими є насосні станції, що формують стабільний гідродинамічний тиск у каналах. Також задіюється лінія подачі перегрітої води або парогенераторна установка, яка постачає гріюче середовище. Буферні резервуари згладжують пульсації потоку, а модуль СІР-мийки забезпечує видалення білково-поліфенольних відкладень з поверхонь пластин. Додатково схема оснащується контуром автоматизації з датчиками температури та тиску, що виключає ризик термічної деструкції сусла та гідравлічних збоїв.

Прив'язка пластинчастого теплообмінника до загальної технологічної схеми виконується так, щоб після стадії фільтрації сусло без контакту з атмосферним повітрям одразу подавалося на стерилізацію. Такий принцип повністю виключає ризик вторинного біологічного забруднення. Після

					ДП БІ/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

охолодження потік направляється в циліндро-конічні танки (ЦКТ) для проведення головного бродіння.

Таким чином, пластинчастий апарат є ядром стерилізаційного комплексу. Він поєднує високі показники тепловіддачі, компактність, гнучкість та можливість повної автоматизації. Організація такого процесу повністю відповідає завданням сучасного харчового машинобудування щодо зниження енергоємності та підвищення безпеки продукції [34;56].

4.2. Технологічні розрахунки

Розрахунок технологічних параметрів процесу стерилізації даного середовища дозволяє визначити теплове навантаження на установку, обчислити середньологарифмічний температурний напір та оцінити зміну теплофізичних характеристик потоків при теплообміні [69; 57].

Вихідні дані:

Витрати пивного сусла: 80 т/год;

Температура сусла після кип'ятіння: $t_1' = 97\text{ }^{\circ}\text{C}$;

Температура після охолодження: $t_1'' = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$;

Температура потоку, що подається як холодний теплоносіє: $t_2' = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$;

Схема руху теплоносіїв - протитік;

Тип апарата: пластинчастий, розбірний;

Матеріал пластин: AISI 316

Матеріал прокладок: EPDM еквівалентний діаметр каналу $d_{\text{екв}} = 0,0083\text{ м}$;

Площа поперечного перерізу каналу: $0,00245\text{ м}^2$;

Приведена довжина каналу: 1,01 м.

Визначаємо середню температуру гарячого теплоносія:

$$t_{\text{ср1}} = \frac{t_1' + t_1''}{2} = \frac{97 + 85}{2} = 91\text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (1)$$

де

t_1' – температура сусла на вході,

t_1'' – температура після охолодження.

					ДП Б/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для пивного суслу з екстрактом 11% мас. теплоємність визначається за емпіричною залежністю для суслу (Kunze, Briggs) [24; 34]:

$$c_1 = 4,186 - 0,0009 \cdot P - 0,0012 \cdot (t_{\text{ср1}} - 20) = 4,186 - 0,0009 \cdot 11 - 0,0012 \cdot (91 - 20) \approx 3,98 \text{ кДж/кг} \cdot \text{K}, \quad (2)$$

де

P – екстракт суслу у %,

$t_{\text{ср1}}$ – середня температура.

Для інженерних розрахунків приймаємо такі усереднені властивості суслу (гарячий злам 85 - 97 °С; холодний 23 - 35 °С), узгоджені з довідковими даними [24; 34; 57]:

Таблиця 4.1. Теплофізичні параметри пивного суслу (11 %)

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці виміру
Густина (гарячий)	ρ_1	1040	кг/м ³
Густина (холодний)	ρ_2	1060	кг/м ³
В'язкість (гарячий)	μ_1	$0,75 \cdot 10^{-3}$	Па·с
В'язкість (холодний)	μ_2	$1,50 \cdot 10^{-3}$	Па·с
Теплопровідність (гарячий)	λ_1	0,62	Вт/(м·К)
Теплопровідність (холодний)	λ_2	0,58	Вт/(м·К)
Теплоємність (гарячий)	c_1	3,98	кДж/(кг·К)
Теплоємність (холодний)	c_2	4,05	кДж/(кг·К)

Критерій Прандтля (для гарячого потоку):

$$Pr = \frac{(\mu \cdot c)}{\lambda} = \frac{(0.75 \cdot 10^{-3} \cdot 3980)}{0.62} \approx 4,8 \quad (3)$$

Масова витрата сусла в кг/с:

$$G_1 = \frac{80000}{3600} = 22,22 \text{ кг/с} \quad (4)$$

Теплове навантаження теплообмінника визначаємо за рівнянням теплового балансу:

$$Q = G_1 \cdot c_1 \cdot (t_1' - t_1'') = 22,22 \cdot 3,98 \cdot 1000 \cdot (97-85) = 1,06 \cdot 10^6 \text{ Вт} \quad (5)$$

Оскільки холодним потоком є той самий продукт (сусло), що подається у протитічному напрямі, його кінцева температура визначається з рівняння теплового балансу:

$$t_2'' = t_2' + (t_1' - t_1'') = 23 + (97-85) = 35^\circ\text{C} \quad (6)$$

що відповідає регенеративній роботі пластинчастого теплообмінника.

Середня температура холодного потоку:

$$t_{cp2} = \frac{t_2' + t_2''}{2} = \frac{23 + 35}{2} = 29^\circ\text{C} \quad (7)$$

Середня логарифмічна різниця температур для протитоку визначається за формулою:

$$\Delta t_{cp} = \frac{(t_1' - t_2'') - (t_1'' - t_2')}{\ln\left(\frac{t_1' - t_2''}{t_1'' - t_2'}\right)} = \frac{(97-35) - (85-23)}{\ln\left(\frac{97-35}{85-23}\right)} = 62^\circ\text{C} \quad (8)$$

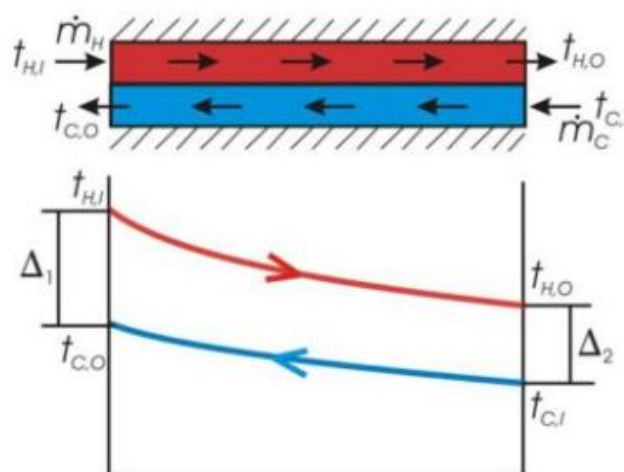


Рис.4.1. Принципова тепла схема теплообмінника при протитечії [67].

					ДП Б/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Одержаний результат температурного напору є стандартним для рекуперативних блоків сулоохолоджувальних установок на пивоварних підприємствах [57; 58].

Таким чином, у даному розділі обчислено основні параметри теплового балансу, які служать вихідним підґрунтям для виконання конструктивного проектування апарата.

4.3. Конструктивний розрахунок пластинчастого теплообмінника

Метою проведення конструктивного розрахунку є визначення робочої площі поверхні теплообміну, геометричних характеристик і кількості пластин, а також оптимальної топології каналів для забезпечення заданих режимів. Для обробки пивного сула використовують пластинчасті елементи з особливим профілем гофрування, що створює оптимальні умови для інтенсивного перемішування рідини [24; 57].

Інтенсифікація теплових потоків у таких апаратах досягається за рахунок руху середовищ у вузьких міжпластинних зазорах величиною 2,5 - 4,0 мм по складній звивистій траєкторії. Це стимулює розвиток локальних вихрів та забезпечує високі значення тепловіддачі. За інженерною оцінкою, це дозволяє суттєво скоротити габарити установки порівняно з трубчастими теплообмінниками аналогічної потужності [34].

Необхідна площа теплообміну визначається за класичним рівнянням теплопередачі:

$$F_p = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{cp}} = \frac{1,06 \cdot 10^6}{2100 \cdot 62} = 8,1 \text{ м}^2 \quad (9)$$

де

Q - тепловий потік, Вт;

K - коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К);

Δt_{cp} - логарифмічна середня різниця температур, °С.

На попередньому етапі визначено:

$$Q = 1,06 \cdot 10^6 \text{ Вт},$$

$$\Delta t_{cp} = 62 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Коефіцієнт теплопередачі для пластинчастих теплообмінників у процесах рідина - рідина з турбулентним режимом руху приймається:

$$K = 1500 - 3000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) [24; 58].$$

Для стерилізації пивного сусла з в'язкістю 1,7 - 2,0 мПа·с при 90 - 100 °С приймається значення: $K = 2100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Однак у промислових апаратах площа збільшується на 25 - 30% через:

- забруднення поверхні (коефіцієнт запасу 1,2 - 1,3);
- нерівномірність потокорозподілу;
- допуски на регулювання навантаження.

Таким чином:

$$F_{\text{необх}} = 8,1 \cdot 1,25 = 10,1 \text{ м}^2 \quad (10)$$

Для проєкту приймається тепловий апарат із площею $\approx 12 - 15 \text{ м}^2$, що відповідає стандартним пластинчастим теплообмінникам типу TP, APV, Alfa Laval або GEA.

Підбір пластин і визначення їх кількості. Площа однієї пластини стандартних теплообмінників становить 0,5 - 0,65 м². Для типорозміру, близького до промислових апаратів середньої продуктивності, приймаємо площу однієї пластини: $f = 0,6 \text{ м}^2$.

Тоді кількість пластин:

$$N = \frac{F_{\text{необх}}}{f} = \frac{10,1}{0,6} = 16,8 \quad (11)$$

Оскільки кількість пластин має бути парною (через канално - пакетну конструкцію), округлюємо: $N = 18$ пластин.

Кількість каналів дорівнює:

$$m = N - 1 = 17 \text{ каналів} \quad (12)$$

Оскільки робота ведеться в протитоку, канали розподіляються так:

- 9 каналів - для гарячого потоку (сусло після кип'ятіння);
- 8 каналів - для холодного потоку (сусло, що надходить).

					ДП Б/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Геометричні параметри каналів. Для типових пластин з глибоким гофром приймаємо:

- еквівалентний діаметр каналу $d_{\text{екв}} = 0,008 - 0,010$ м;
- гідравлічний перетин $S = 0,0020 - 0,0030$ м²;
- приведена довжина каналу $L = 1,0 - 1,2$ м.

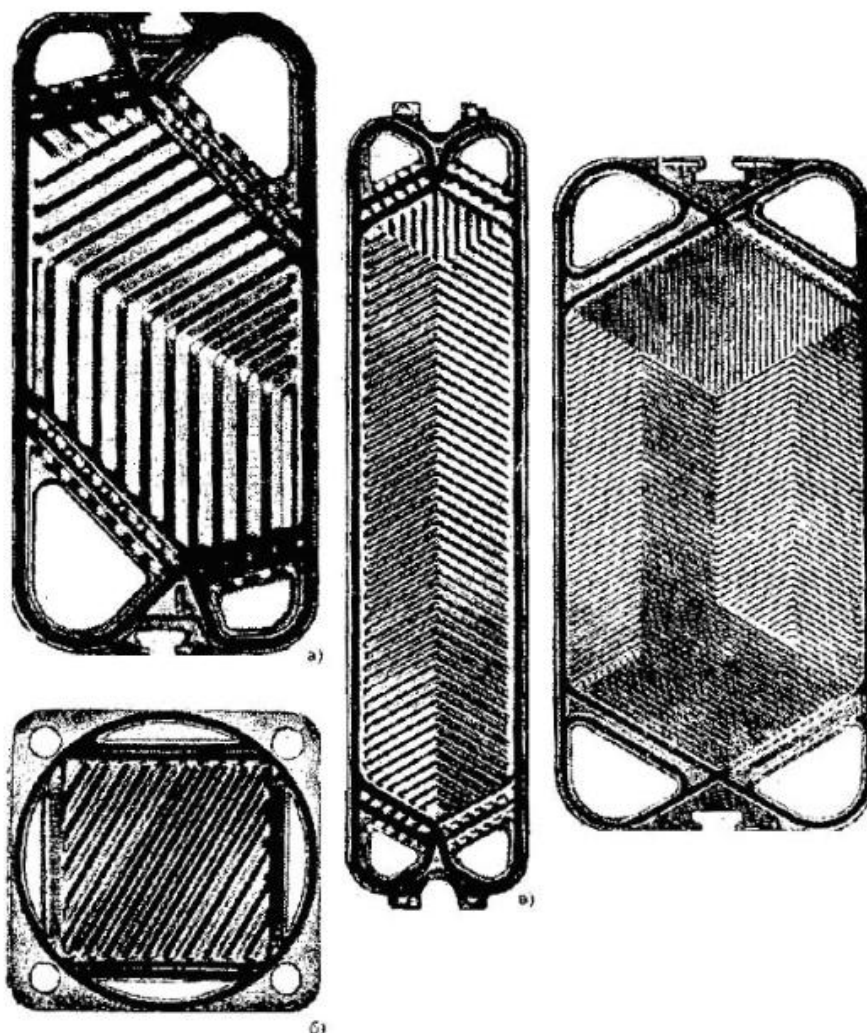


Рис.4.2. Гофровані пластини пластинчастого теплообмінника [62].

Для проєкту приймаємо:

$$d_{\text{екв}} = 0,0083 \text{ м};$$

$$S = 0,00245 \text{ м}^2;$$

$$L = 1,01 \text{ м}.$$

Ці значення відповідають стандартним промисловим пластинам ТПР (виконання II) [59].

Розрахунок кількості пакетів. Гідравлічні умови роботи апарата визначають максимальну кількість послідовно з'єднаних каналів. За методикою [24]:

$$z \leq 0,01 \left(\frac{\Delta P \cdot S^2}{V^2} \right)^{\frac{1}{3}} = 0,01 \left(\frac{20\,000 \cdot 0,00245^2}{0,0214^2} \right)^{\frac{1}{3}} \approx 2,9 \quad (13)$$

де

z - кількість пакетів,

ΔP - допустимий гідравлічний опір (20 000 Па),

V - об'ємна витрата теплоносія.

Об'ємна витрата:

$$V = \frac{G_1}{\rho_1} = \frac{22,22}{1040} = 0,0214 \text{ м}^3/\text{с} \quad (14)$$

де густина сусли ρ_1 при 11% екстракту й 90 °С становить $\approx 1040 \text{ кг/м}^3$ [34].

Отже: $z = 2$ пакети.

Це стандартне значення для теплообмінників середньої площі (10 - 30 м²).
Остаточна компоновка пластин. Оскільки кількість каналів $m = 17$, а кількість пакетів - 2, маємо:

у кожному пакеті: $\frac{m}{z} \approx 8 - 9$ каналів.

Таким чином компоновка:

8 каналів для гарячого потоку + 9 каналів для холодного (або навпаки).

У промислових умовах це реалізується гофрованими пластинами з чергуванням напрямку (right – left - right), що забезпечує високу турбулізацію потоків.

Для дипломного проєкту приймаємо:

Пластинчастий розбірний теплообмінник ТПР (виконання II):

- площа - 12 м²;
- кількість пластин - 20 шт;
- матеріал пластин - нержавіюча сталь AISI 316;
- матеріал прокладок - EPDM (стійкі до температур 140 °С, СІР-лужних миючих розчинів);

					ДП Б/21.11. 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

- товщина пластини - 0,7 - 1,0 мм;
- оребрення - гофр типу «chevron» 60°;
- номінальний тиск - 0,6 - 1,0 МПа;
- маса апарата – 420 - 480 кг.

Вибір AISI 316 пов'язаний із корозійною стійкістю до органічних кислот та солей, що містяться у пивному суслі, відповідно до вимог EHEDG та стандартів харчового машинобудування [57; 6].

4.4. Гідравлічний розрахунок пластинчастого теплообмінника

Прогнозування гідравлічних втрат є неодмінною стадією проектування, оскільки воно декларує необхідний напір насосів, визначає енергетичні витрати та перевіряє стабільність швидкостей потоків у каналах [24; 58].

Через складний хвилястий рельєф міжпластинного простору вихрові явища виникають навіть при відносно невеликих швидкостях. Це збільшує гідравлічний опір порівняно з гладкими трубами [34]. Обчислення втрат тиску проводимо за критеріальними рівняннями гідродинаміки.

Визначення швидкості руху теплоносіїв у каналах. Швидкість потоку визначається за формулою:

$$w = \frac{G}{\rho \cdot S \cdot n}$$

де

G - масова витрата теплоносія, кг/с;

ρ - густина теплоносія, кг/м³;

S - площа поперечного перерізу каналу, м²;

n - кількість каналів, задіяних для відповідного теплоносія.

Для гарячого сусли:

$$G_1 = 22,22 \text{ кг/с}$$

$$\rho_1 (\text{при } 11\% \text{ екстракту і } 90 \text{ }^\circ\text{C}) = 1040 \text{ кг/м}^3$$

$$S = 0,00245 \text{ м}^2$$

$$n = 8 \text{ каналів}$$

					ДП БІ/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						76
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$w_1 = \frac{22,22}{1040 \cdot 0,00245 \cdot 8} = 0,55 \text{ м/с} \quad (15)$$

Для холодного потоку (сусло 23 - 35 °C):

$$\rho_2 \approx 1060 \text{ кг/м}^3$$

n = 9 каналів

$$w_2 = \frac{22,22}{1060 \cdot 0,00245 \cdot 9} = 0,43 \text{ м/с} \quad (16)$$

Обидва значення знаходяться у рекомендованому діапазоні для пластинчастих теплообмінників: 0,3 - 1,2 м/с (GEA, Alfa Laval).

Визначення критерію Рейнольдса. Критерій Рейнольдса:

$$Re = \frac{w \cdot d_{\text{екв}} \cdot \rho}{\mu}$$

де

μ - динамічна в'язкість теплоносія.

В'язкість сусла при 11%:

- при 90 °C - $\mu_1 \approx 0,75 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$;
- при 30 °C - $\mu_2 \approx 1,50 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ [57].

Для гарячого потоку:

$$Re_1 = \frac{0,55 \cdot 0,0083 \cdot 1040}{0,75 \cdot 10^{-3}} \approx 6300 \quad (17)$$

Для холодного потоку:

$$Re_2 = \frac{0,43 \cdot 0,0083 \cdot 1060}{1,50 \cdot 10^{-3}} \approx 2500 \quad (18)$$

Таким чином:

- гарячий потік - переходно-турбулентний режим;
- холодний потік - близький до турбулентного.

Обидва режими відповідають вимогам до пластинчастих апаратів.

Визначення коефіцієнтів гідравлічного опору. У пластинчастих теплообмінниках коефіцієнт тертя визначають за критеріальним рівнянням:

$$\xi = 15 \cdot Re^{-0,25}$$

Для гарячого потоку:

$$\xi_1 = 15 \cdot 6300^{-0,25} = 1,60 \quad (19)$$

					ДП Б/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						77
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для холодного потоку:

$$\xi_2 = 15 \cdot 2500^{-0,25} = 1,95 \quad (20)$$

Розрахунок втрат тиску в каналах. Втрата тиску визначається за формулою:

$$\Delta P = \xi \cdot \frac{L}{d_{\text{екв}}} \cdot \frac{\rho w^2}{2} \cdot x$$

де

L - довжина каналу, м;

x - кількість послідовних пакетів (x = 2).

Для гарячого потоку:

$$\Delta P_1 = 1,60 \cdot \frac{1,01}{0,0083} \cdot \frac{1040 \cdot 0,55^2}{2} \cdot 2 = 61300 \text{ Па} \quad (21)$$

Для холодного потоку:

$$\Delta P_2 = 1,95 \cdot \frac{1,01}{0,0083} \cdot \frac{1060 \cdot 0,43^2}{2} \cdot 2 = 46300 \text{ Па} \quad (22)$$

Повні втрати тиску з урахуванням:

- опору каналів;
- опору входу/виходу ($\approx 5\%$ від ΔP);
- додаткових місцевих втрат.

Для гарячого потоку:

$$\Delta P_{1\text{заг}} = 61,3 \text{ кПа} \cdot 1,05 = 64,4 \text{ кПа} \quad (23)$$

Для холодного:

$$\Delta P_{2\text{заг}} = 46,3 \text{ кПа} \cdot 1,05 = 48,6 \text{ кПа} \quad (24)$$

Отримані значення:

- $\Delta P_1 = 64,4 \text{ кПа}$;
- $\Delta P_2 = 48,6 \text{ кПа}$

повністю відповідають допустимому діапазону до 150 кПа, встановленому виробниками пластинчастих теплообмінників Alfa Laval, GEA, API Schmidt-Brewing [24; 6].

					ДП Б/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						78
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Це означає, що обрана схема компоновки (18 пластин, 2 пакети, гофрований профіль «chevron») забезпечує:

- стабільний турбулентний режим;
- ефективне перемішування потоку;
- достатній запас по гідравлічних характеристиках;
- можливість роботи з суслом різної екстрактивності.

4.5. Вибір загальнозаводського обладнання

Щоб забезпечити подачу пивного сусла до теплообмінника та його відведення, необхідно встановити відцентрові насоси. Для вибору відповідної моделі насоса виконується спрощений розрахунок, який включає визначення його напору, продуктивності та потужності. На основі цих параметрів і здійснюється підбір обладнання.

1. Необхідний напір насоса

Формула для визначення необхідного напору має вигляд:

$$H_i = \frac{\Delta P_i}{\rho_i \cdot g} + H_r + h_n$$

де:

ΔP_i - повні втрати тиску в апараті, Па;

ρ_i - густина відповідного потоку сусла, кг/м³;

g - прискорення вільного падіння (9,81 м/с²);

H_r - геометрична висота підйому рідини (згідно з розмірами прийнятого теплообмінника приймаємо $H_r = 1,5$ м);

h_n - втрати напору на місцеві опори та трубопроводи.

Втрати напору приймаємо як 10% від сумарного напору $\frac{\Delta P_i}{\rho_i \cdot g} + H_r$, тоді робоча розрахункова формула матиме вигляд:

$$H_i = 1,1 \cdot \left(\frac{\Delta P_i}{\rho_i \cdot g} + H_r \right)$$

$$H_1 = 1,1 \cdot \left(\frac{64400}{1040 \cdot 9,81} + 1,5 \right) = 8,6 \text{ м}$$

$$H_2 = 1,1 \cdot \left(\frac{48600}{1060 \cdot 9,81} + 1,5 \right) = 6,8 \text{ м}$$

					ДП Б/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						79
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Об'ємна секундна та годинна витрата

Витрата пивного суслу для обох потоків за масою становить $80 \text{ т/год} = 22,22 \text{ кг/с}$.

Переведемо її в об'ємну витрату ($Q = \frac{G}{\rho}$):

Для гарячого потоку:

$$Q_1 = \frac{22,22}{1040} = 77 \text{ м}^3/\text{год}$$

Для холодного потоку:

$$Q_2 = \frac{22,22}{1060} = 75,6 \text{ м}^3/\text{год}$$

3. Корисна потужність, що витрачається на переміщення середовища

Розраховуємо корисну потужність за формулою:

$$N_{\text{кор.і}} = \rho_i \cdot g \cdot H_i \cdot Q_i$$

Для гарячого потоку (Насос 1):

$$N_{\text{кор.1}} = 1040 \cdot 9,81 \cdot 8,6 \cdot 0,0214 = 1,876 \text{ кВт}$$

Для холодного потоку (Насос 2):

$$N_{\text{кор.2}} = 1060 \cdot 9,81 \cdot 6,8 \cdot 0,0210 = 1,485 \text{ кВт}$$

4. Номінальна (встановлена) потужність насоса

Формула розрахунку електричної номінальної потужності з урахуванням ККД насоса (η):

$$N_i = \frac{N_{\text{кор.і}}}{\eta}$$

Для відцентрових харчових насосів рекомендовані значення ККД варіюються від 0,7 до 0,8. Приймаємо $\eta = 0,7$:

Для гарячого потоку (Насос 1):

$$N_1 = \frac{1,876}{0,7} = 2,68 \text{ кВт}$$

Для холодного потоку (Насос 2):

$$N_2 = \frac{1,485}{0,7} = 2,12 \text{ кВт}$$

За отриманими значеннями напору ($H = 7 - 9 \text{ м}$), значної продуктивності ($Q = 75 - 77 \text{ м}^3/\text{год}$) та потужності електродвигуна, для лінії обираються два

					ДП БІ/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						80
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

спеціалізовані харчові (санітарні) відцентрові насоси.

Оскільки це виробництво пива, насоси мають бути у гігієнічному виконанні з нержавіючої сталі (наприклад, серії Г2-ОПБ або імпортовані аналоги типу Alfa Laval LKH чи Wilo Helix-V з відповідними робочими характеристиками: $Q = 80 \text{ м}^3/\text{год}$, $H = 10 \text{ м}$, потужність двигуна порядку 3,0 кВт для забезпечення технологічного запасу).

4.6. Технічна характеристика

1. Апарат призначений для нагрівання пивного сусла, що надходить на стерилізацію, та охолодження сусла, що пройшло стерилізацію.
2. Середовище в апараті: пивне сусло 11% (гріючий агент), пивне сусло 11% (охолоджуючий агент). Середовища не токсичні, не вибухонебезпечні, корозійні (через наявність органічних кислот та pH 5,0 - 5,6).
3. Поверхня теплообміну: 12 м^2 .
4. Тиск в апараті: 0,6 - 1,0 МПа.
5. Температура теплоносіїв:
 - гарячого теплоносія: початкова - 97°C , кінцева - 85°C ;
 - холодного теплоносія: початкова - 23°C , кінцева - 35°C .
6. Кількість пластин: 20 шт.
7. Тип пластин: ТПР (виконання II), оребрення гофр типу «chevron» 60°C .
8. Площа пластини: $0,6 \text{ м}^2$.
9. Матеріал пластин: нержавіюча сталь AISI 316.
10. Товщина пластин: 0,7 - 1,0 мм.
11. Габаритні розміри апарату:
 - висота - 1150 мм;
 - ширина - 450 мм;
 - довжина - 850 мм.
12. Маса апарату: 420 - 480 кг.

					ДП Б/21.11. 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ОХОРОНА ДОВКІЛЛЯ

5.1. Загальні принципи безпечної експлуатації дільниці стерилізації.

Функціонування дільниці, де здійснюється термічна обробка пивного сусла, пов'язане з підвищеним рівнем термомеханічної небезпеки. Це обумовлено наявністю високотемпературних поверхонь, гарячої води, пари, агресивних хімічних сполук для СІР-санобробки, рухомих елементів насосного обладнання, запірної арматури, а також експлуатацією електроустановок у сприятливому для накопичення вологи середовищі.

Організація безпеки праці базується на чіткій ієрархії захисних заходів: проектно-конструкторських рішеннях (створенні інженерних бар'єрів), технічних та організаційних діях, систематичному навчанні робітників та забезпеченні їх засобами індивідуального захисту (ЗІЗ). Під час розроблення дипломного проекту нормативні вимоги та правила застосовано як вихідні критерії для обґрунтування просторового розташування обладнання, підбору конструкційних матеріалів, вентиляційних систем, засобів автоматичного пожежного сповіщення, а також належних санітарно-побутових умов [24, с. 41 - 49; 34, с. 12 - 21].

До комплексу інженерно-технічних рішень, передбачених на етапі проектування, належать:

- герметична та ізольована схема стерилізаційної установки із закритими колекторами пластинчастого теплообмінника (ПТО), мінімізацією відкритих технологічних об'ємів та впровадженням асептичних з'єднань типу Clamp/DIN. Це дозволяє запобігти контакту розігрітого робочого середовища з атмосферним повітрям і звести до мінімуму ризик отримання термічних опіків [60, с. 128 - 131];

					<i>ДП БІ/21.11. 000 ПЗ</i>		
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ОХОРОНА ДОВКІЛЛЯ</i>		
<i>Розроб.</i>		<i>Скрипник А.М.</i>					
<i>Консульт.</i>							
<i>Керівн.</i>		<i>Косова В.П.</i>					
<i>Затвер.</i>		<i>Мельник В. М.</i>					
					<i>Стадія</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
					<i>Д</i>	<i>82</i>	<i>101</i>
					<i>КПІ ім. Ігоря Сікорського ФБТ</i>		
					<i>Каф. БТІ</i>		
					<i>Гр.БІ-21</i>		

- гідравлічна обв'язка ПТО із влаштуванням обхідних (байпасних) ліній, зворотних клапанів, системи захисту від роботи насосів без рідини («сухого ходу»), а також інтеграцією первинних перетворювачів тиску й температури з контуром аварійного блокування - задля запобігання виникненню гідродинамічних ударів чи критичного перегріву системи [61, с. 66 - 72];
- обґрунтований вибір матеріалів, що контактують із пивним суслом (високолегована сталь марки AISI 316 та еластомери EPDM), які характеризуються високою резистентністю до термічних чинників та хімічних агентів СІР-миття. Це нівелює імовірність виникнення аварійних витоків. Ущільнювальні елементи оснащені спеціальними фіксаторами для запобігання їх зміщенню чи виштовхуванню під дією імпульсних коливань тиску [62, с. 205 - 212];
- екранування та теплова ізоляція вертикальних та горизонтальних поверхонь, патрубків і високотемпературних зон ПТО за допомогою мінеральної вати із зовнішнім захисним кожухом з алюмінію (температура на поверхні не повинна перевищувати 45 °С за умови температури у цеху на рівні 20 - 22 °С). Додатково передбачено нанесення сигнального маркування на трубопроводи відповідно до державного стандарту колористичного позначення середовищ [63, с. 37 - 39];
- улаштування підлоги з протиковзким ефектом, обладнання дренажних трапів для відведення стоків із нахилом поверхні 1,5 - 2 % у напрямку лінійних зливних каналів, а також спорудження локальних захисних бортиків навколо елементів СІР-модуля для унеможливлення розтікання рідин та запобігання травмуванню персоналу [34, с. 28 - 30].

Виробнича санітарія, параметри мікроклімату, акустичне навантаження та освітленість. Параметри мікрокліматичних умов у робочій зоні ПТО підлягають нормуванню за показниками температури, відносної вологості та швидкості руху повітряних мас. Для виробничих приміщень харчової індустрії з високим рівнем

					ДП БІ21.11. 000 ПЗ	Арк.
						83
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тепловиділення рекомендовано локалізувати теплові надлишки шляхом встановлення місцевих витяжних парасолей над кожухами гарячих секцій ПТО у поєднанні із загальнообмінною припливно-витяжною вентиляцією. Розрахунок повітрообміну виконується за ентальпійним методом. Для діляниць термічної обробки нормативна кратність становить від 5 до 7 обмінів на годину із додатковим забезпеченням місцевого відсмоктування в об'ємі 300 - 500 м³/год на кожен локальний вузол [24, с. 91 - 96].

Шумове навантаження, що генерується насосними агрегатами та швидкісними потоками рідини в каналах теплообмінника, знижується шляхом монтажу насосів на віброізолюючі опори, використання гнучких вставок (віброгавників) та встановлення звукопоглинальних екранів (гранично допустимий еквівалентний рівень звуку на робочих місцях становить $L_{Aeq} \leq 80$ дБА) [65, с. 184 - 188]. Для забезпечення належних умов зорової роботи запроєктовано комбіновану систему освітлення: загальне робоче освітлення має становити не менше 300 лк, а місцеве на пультах операторів - до 500 лк. Світлотехнічне обладнання приймається у вологозахищеному виконанні (ступінь захисту IP65) із розсіювачами, що мають високу стійкість до санітарної обробки струменем води під тиском [68, с. 24 - 27].

Електробезпека та засоби автоматизації. Оскільки технологічний простір характеризується підвищеним рівнем вологості та періодичним проведенням вологого прибирання, ступінь захисту оболонки електрообладнання має бути не нижчим за IP55 для електродвигунів насосів та IP65 для контрольно-вимірювальних приладів і датчиків, виконаних із корозійностійких матеріалів. Усі металеві конструктивні елементи та корпуси апаратів обов'язково під'єднують до захисного земляного контуру. Лінії живлення сервісних розеткових груп оснащуються пристроями диференційного захисту (дифавтоматами) зі струмом спрацьовування $I_{\Delta n} = 30$ мА. Кабельні мережі прокладаються всередині герметичних лотків або захисних рукавів, стійких до корозійного впливу, а проходи крізь стіни виконуються за допомогою герметичних кабельних вводів.

					ДП Б/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						84
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Автоматизована система керування на базі програмованого логічного контролера (ПЛК) має двоканальну аварійну архітектуру: у разі виходу технологічних параметрів температури або тиску за встановлені критичні межі, система миттєво блокує подачу теплоносія (пари/гарячої води), зупиняє роботу насосних агрегатів, активує світлозвукову сигналізацію та реєструє подію в електронному протоколі журналу аварій [24, с. 102 - 107; 61, с. 93 - 99].

5.2. Безпека технологічного процесу (термічні, хімічні, механічні фактори).

- Термічні небезпечні фактори: зумовлені роботою з високотемпературними вузлами ПТО, паропроводами, конденсатопроводами та безпосередньо конденсатом. Для нейтралізації ризиків впроваджено суцільну теплоізоляцію, захисні бар'єри та колірне маркування елементів; відведення конденсату реалізовано через надійні конденсатовідвідники, які обладнані запобіжними пристроями та відсічною арматурою, а на лініях дренажу передбачено барботування у гідравлічні затвори для запобігання неконтрольованому розбризкуванню гарячої фази [63, с. 43 - 46].
- Хімічні небезпечні фактори: пов'язані із застосуванням концентрованих розчинів лугів (NaOH з робочою концентрацією 1 - 2 %) та кислот (HNO₃ з концентрацією 0,5 - 1 %) під час СІР-санобробки. Проєктом передбачено відокремлений СІР-модуль, встановлений на спеціальний захисний піддон-лоток, який обладнаний давачами рівня, контуром рециркуляції та системою направлено відведення стоків на станцію нейтралізації. Подача та дозування реагентів здійснюється повністю закритим способом через інжекторні вузли. Персонал забезпечується повним комплектом ЗІЗ: захисними окулярами або прозорими щитками, нітриловими рукавицями зі стійкістю до хімічних речовин, прогумованими фартухами та спецвзуттям. На ділянці обов'язково розміщують знаки безпеки «Хімічна небезпека» [62, с. 238 - 245].

					ДП БІ/21.11. 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		85

- Механічні та гідравлічні небезпечні фактори: пов'язані з коливаннями тиску в системі, виникненням гідродинамічних ударів та ризиком сухих пусків обладнання. Для їх усунення інтегровано ПД-регулювання витрати теплоносія, системи плавного пуску насосів, обвідні колектори та гідравлічні демпфери. Додатково на стискній плиті ПТО монтують кінцеві вимикачі, які унеможливають запуск процесу, якщо пакет пластин затягнутий неналежним чином або зафіксований не повністю [63, с. 76 - 81].

Просторово-планувальні рішення, шляхи евакуації та протипожежний захист. Будівля, де розташована технологічна дільниця, розміщується на території промислового майданчика з урахуванням рози вітрів, природної аерації та інсоляційних характеристик. Автомобільні під'їзні шляхи запроєктовані за кільцевою схемою із шириною проїжджої частини не менше 4,5 м та радіусами заокруглення повороту від 12 м, що забезпечує безперешкодний рух технологічного автотранспорту та автоцистерн. Виробничі об'єми приміщень повністю відповідають чинним санітарно-гігієнічним нормативам: питомий повітряний об'єм на одного працюючого становить щонайменше 15 м³, а площа - не менше 4,5 м² [34, с. 18 - 22].

Компонування обладнання виконане з дотриманням нормативних технологічних проходів: ширина поздовжніх проходів становить не менше 1,5 м, поперечних - не менше 1,2 м. У зоні обслуговування рознімних вузлів ПТО передбачено вільні сервісні зони шириною один метр, що необхідно для безпечного проведення монтажних робіт і розбирання пакета пластин. Кількість евакуаційних виходів становить не менше двох, двері відчиняються у напрямку виходу з приміщення та мають ширину від 1,2 м. Шляхи евакуації оснащуються світловими покажчиками «Вихід» та системою аварійного евакуаційного освітлення, яка забезпечує освітленість підлоги по маршруту руху не менше 1 лк.

Протипожежний комплекс об'єкта включає систему адресної пожежної сигналізації, ручні пожежні сповіщувачі та автоматичні спринклерні установки

					ДП БІ21.11. 000 ПЗ	Арк.
						86
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

класу «Ordinary Hazard». Внутрішня мережа протипожежного водопроводу обладнується пожежними кранами (Ду50) із довжиною рукавів 20 м. Для локалізації первинних осередків займання приміщення комплектується переносними вогнегасниками: порошковими типами ВП-6 у місцях розташування електрообладнання та вуглекислотними ВВК-5 безпосередньо біля силових електрошаф. За вибухопожежною небезпекою приміщення дільниці віднесено до категорії В (через наявність горючих елементів теплоізоляції та пакувальних матеріалів за відсутності легкозаймистих рідин). Будівельні конструкції мають ступінь вогнестійкості не нижче ІІ, а межа вогнестійкості внутрішніх перегородок становить EI 45 [63, с. 19 - 27; 65, с. 201 - 206].

5.3. Організаційні заходи і навчання.

На підприємстві впроваджується сувора система допуску персоналу до виконання функціональних обов'язків, що передбачає обов'язкове проведення інструктажів (вступного, первинного на робочому місці, періодичних повторних, а також позапланових у разі зміни умов праці), проходження стажування под наглядом досвідчених фахівців та щорічну регулярну перевірку знань з питань охорони праці (один раз на 12 місяців). Розробляються та затверджуються окремі інструкції з безпеки під час експлуатації СІР-модуля, проведення планово-попереджувальних ремонтів та декомпозиції ПТО. На дільниці діє міжнародна система безпечного блокування обладнання LOTO (Lockout/Tagout) під час сервісних робіт.

Організовано ведення журналів обліку стану ЗІЗ та справності захисних огорожень. Застережено суворий графік технічного обслуговування установки: щоденно проводиться візуальний моніторинг герметичності контурів, щотижня перевіряється зусилля затяжки пакета пластин та стан еластомерних прокладок, щоквартально контролюється цілісність контуру заземлення, а один раз на рік здійснюються інструментальні випробування пристроїв захисного вимкнення (УЗО) та опору ізоляції кабельних ліній [24, с. 118 - 125].

					ДП БІ21.11. 000 ПЗ	Арк.
						87
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5.4. Охорона довкілля: джерела впливу та технічні рішення.

Основними чинниками техногенного впливу ділянки на навколишнє природне середовище є утворення хімічно забруднених стічних вод після циклів СІР-миття, теплове забруднення (скидання відпрацьованої води з високим температурним потенціалом), опосередковані викиди парникових газів через споживання електричної та теплової енергії, акустичне випромінювання, а також формування твердих промислових відходів (відпрацьованих полімерних прокладок, елементів фільтрів).

Технологічні стічні води та системи їх локального очищення. Стічні води підрозділу диференціюють на три основні категорії:

- слабколужні та лужні розчини (вміст NaOH 1 - 2 %), що формуються після основного етапу СІР-очищення;
- слабокислі розчини (вміст HNO_3 0,5 - 1 %), які утворюються після стадії кислотної нейтралізації;
- промивні (ополіскувальні) води.

Запроєктована технологічна схема обробки стоків передбачає направлене збирання рідин у буферні резервуари-усереднювачі з розділенням потоків, процес взаємної або реагентної нейтралізації до досягнення нормативного показника рН 6,5 - 8,5, осадження завислих часток, напірне фільтрування крізь двошарові піщано-вугільні фільтрувальні завантаження, а також виведення очищеної фази через контрольні-вимірювальні колодязі. Контроль параметрів гранично допустимих концентрацій (ГДК) сполук амонійного азоту, нітрат-іонів, фосфатів та поверхнево-активних речовин (ПАР) здійснюється відповідно до діючих місцевих правил приймання стічних вод у міську каналізаційну мережу [64, с. 32 - 44; 66, с. 56 - 65].

Поводження з хімічними реагентами. Зберігання концентрованих кислот та лугів організовано у хімічно стійких ємностях, які обов'язково встановлюються всередині захисних піддонів, чий корисний об'єм становить не менше 110 % від місткості найбільшого резервуара в групі. Хімічні шафи та складські приміщення

					ДП БІ21.11. 000 ПЗ	Арк.
						88
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

під'єднують до автономної витяжної вентиляційної системи. Складено детальні інструкції щодо дій персоналу у разі виникнення проливів реагентів (для нейтралізації кислотних залишків застосовують карбонат натрію або вапно; для лужних - слабкі розчини мінеральних або органічних кислот). У безпосередньому доступі постійно знаходяться спеціалізовані адсорбуючі матеріали (вермикуліт) та сертифіковані комплекти ліквідації проливів («антипролив») [62, с. 242 - 248].

Енергетична ефективність та мінімізація теплового забруднення. Інтеграція рекуперативної секції у структуру пластинчастого теплообмінника забезпечує повернення до 60 - 70 % теплової енергії гарячого суслу безпосередньо в технологічний потік, що суттєво зменшує загальне навантаження на парогенеруючу установку підприємства [60, с. 142 - 145]. Відпрацьовану гарячу воду після циклів теплообміну направляють у загальнозаводську систему гарячого водопостачання (ГВП) або використовують для підігріву технологічної води на початкових стадіях варіння суслу. Енергетичні втрати в навколишнє середовище мінімізують шляхом покриття трубопроводів високоякісними ізоляційними матеріалами з коефіцієнтом теплопровідності $\leq 0,040$ Вт/(м·К) та постійним інструментальним контролем цілісності металевих захисних кожухів.

Атмосферні викиди та локалізація запахів. Технологічний процес на ділянці стерилізації не пов'язаний із процесами горіння чи використанням летких органічних сполук. Основним джерелом атмосферного впливу є пара власне пивного суслу та води, яка може виділятися під час дренажування або розгерметизації контурів. Функціонування місцевої витяжної вентиляції над відкритими елементами СІР-модуля та лініями відведення конденсату дозволяє ефективно локалізувати вологовиділення та запобігти інфільтрації специфічних запахів у робочий простір цеху [65, с. 211 - 214].

Зниження акустичного тиску. Обмеження рівнів звукової потужності досягається за рахунок підбору низькошумних насосних агрегатів, встановлення їх на антивібраційні платформи, використання звукопоглинальних екрануючих

конструкцій, а також оптимізації швидкісних режимів руху рідин у продуктопроводах (швидкість потоку не повинна перевищувати 2 - 2,5 м/с). Додатково виконується акустичне облицювання технічних ніш і каналів [65, с. 184 - 190].

Менеджмент промислових відходів. Відпрачені полімерні ущільнювачі ПТО (з матеріалу EPDM), які вилучаються після закінчення їх експлуатаційного ресурсу, підлягають передачі спеціалізованим ліцензованим підприємствам для подальшої утилізації. Зношені металеві пластини теплообмінника після обов'язкового проведення санітарної дезінфекції направляються на пункти збору металобрухту для вторинної переробки. Використані фільтрувальні елементи класифікуються як промислові відходи класу не вище «III» і підлягають захороненню або знешкодженню відповідно до типу затриманого забруднювача.

План аварійного реагування та локалізації наслідків. На дільниці діє затверджений план локалізації та ліквідації аварійних ситуацій (ЛАРН), який регламентує алгоритми дій у таких випадках:

- у разі розриву прокладок або виникнення значних витоків із ПТО - передбачено негайне перекриття магістралі подачі гріючого теплоносія, зупинку насосів, повне зливання залишків продукту в дренажний колектор та встановлення ремонтних ізолюючих заглушок;
- у разі хімічного проливу реагентів СІР - виконується негайна локалізація плями за допомогою адсорбуючих валиків, проведення хімічної нейтралізації, змивання залишків у нейтралізаційний контур та сповіщення інженера з охорони праці;
- у разі отримання персоналом травм або хімічного опіку - застосовуються затверджені медичні алгоритми першої допомоги, використовуються аптечки зі спеціальними нейтралізуючими розчинами, а також задіюються аварійні душі та фонтанчики для промивання очей, розташовані в радіусі не більше 10 метрів від зони СІР-модуля;

					ДП БІ/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						90
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- у разі виникнення пожежі - проводиться екстрена евакуація робітників, активуються автоматичні спринклерні установки, використовуються первинні засоби пожежогасіння (ВП-6, ВВК-5) відповідно до класу пожежі, та здійснюється повне знеструмлення дільниці з центрального пожежного щита.

Санітарно-побутове забезпечення та гігієна персоналу. Проєктом передбачено облаштування роздільних гардеробних кімнат за принципом «чистої» та «брудної» зон, душових кабін (із розрахунку не менше однієї сітки на 10 працівників), умивальників та санвузлів. Безпосередньо біля входу до виробничої зони монтуються автоматичні станції гігієни рук з антисептичними засобами. Виділено окремі шафи для зберігання ЗІЗ, обладнані примусовою сушкою. Точки відбору технологічних проб суслу суміщаються з рукомийниками. Графіки руху персоналу повністю розведені для унеможливлення перетину «брудних» та «чистих» потоків, а на підлозі нанесене чітке лінійне маркування зон. Регламент проведення санітарного очищення та дезінфекції приміщень координується та затверджується службою контролю якості та інженером з охорони праці [34, с. 31 - 36].

Закладені у проєкті інженерно-технічні та організаційні рішення мінімізують імовірність виробничого травматизму, повністю виключають ризики отримання термічних та хімічних опіків під час СІР-миття, гарантують належний рівень електробезпеки у вологому цеху, забезпечують нормативні параметри мікроклімату, шуму та освітленості. Екологічна безпека об'єкта досягається шляхом глибокої рекуперації теплових потоків, локальної нейтралізації хімічних стоків та чіткого поводження з промисловими відходами. Усі запропоновані заходи інтегровані у загальну технологічну схему та креслення планування дільниці відповідно до вимог чинних нормативних документів.

					ДП БІ/21.11. 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		91

ВИСНОВКИ

У рамках дипломного проекту успішно реалізовано поставлену мету - розроблено проект сучасної промислової дільниці термічної обробки та стерилізації у структурі варильного цеху з виробництва пивного суслу. Впровадження вискоєфективного розбірного пластинчастого теплообмінного апарата дозволило забезпечити стабільні мікробіологічні показники напівпродукту, високий рівень енергоощадності та повну безпеку технологічного процесу. Сформульовані у вступі завдання вирішено у повному обсязі, а отримані результати повністю корелюють із діючими галузевими стандартами броварного виробництва.

За результатами проведеного інженерно-технологічного проєктування сформульовано такі науково-практичні висновки:

1. Обґрунтування технологічного режиму. На основі детального аналізу теплових стадій виготовлення пивного суслу науково обґрунтовано доцільність застосування вискотемпературної короткочасної HTST-обробки середовища (температурний діапазон 92 - 98 °C із тривалістю експозиції 20 - 60 с). Встановлено, що даний режим є оптимальним для радикального зниження біологічного навантаження без деградації делікатних смако-ароматичних властивостей суслу. Запропонована схема передбачає глибоку рекуперацію теплової енергії між зустрічними матеріальними потоками та фінальне охолодження суслу до температури внесення насіннєвих дріжджів, що гарантує повторюваність якісних характеристик та експлуатаційну надійність лінії.
2. Аналіз біохімічних та мікробіологічних перетворень. Доведено, що підібрана температурно-часова доза забезпечує гарантовану інактивацію термолабільних ферментних комплексів солоду, п'ятилогову редукцію (

					ДП БІ/21.11. 000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВИСНОВКИ	Стадія	Арк.	Аркушів
Розроб.		Скрипник А.М.				Д	92	101
Консульт.						КПІ ім. Ігоря Сікарського ФБТ		
Керівн.		Косова В.П.				Каф. БТІ		
Затвер.		Мельник В. М.				ГрБІ-21		

reduction) чисельності контамінуючої мікрофлори, а також ефективну десорбцію небажаних летких компонентів (зокрема, прекурсорів диметилсульфіду - ДМС). Одночасно з цим, інтенсивне зниження температури на виході стимулює утворення «холодного зламу» білково-поліфенольних сполук, що суттєво підвищує прозорість та фільтраційні властивості сусла перед стадією головного бродіння.

3. Обґрунтування вибору та матеріального виконання обладнання. Аргументовано вибір пластинчастого теплообмінника (ПТО) розбірного типу у спеціальному санітарному виконанні для харчової індустрії. Для комплектації пакета прийнято плоскі гофровані пластини з профілем chevron (матеріал - високолегована сталь марки AISI 316) та термостійкі еластомірні ущільнення EPDM. Це забезпечує високу корозійну стійкість в агресивному середовищі гарячого сусла та сумісність із безрозбірною SIP-мийкою. Розбірна архітектура апарата дозволяє гнучко масштабувати потужність та проводити сервісне обслуговування без зупинки суміжних ліній цеху.
4. Результати теплотехнічних та гідравлічних розрахунків. Розрахунки виконано для номінальної продуктивності установки 80 т/год. Визначено, що теплове навантаження в секції рекуперації становить приблизно 1,06 МВт, а значення середньологарифмічної різниці температур дорівнює 62 К. З урахуванням розрахованого коефіцієнта теплопередачі $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ та коефіцієнта запасу, необхідна площа теплообміну склала 10,1 м^2 . Для практичної реалізації прийнято серійний апарат площею 12,0 м^2 (пакет із 20 пластин), що створює оптимальний технологічний резерв. Швидкість руху рідини в міжпластинних каналах (0,86 - 0,96 м/с) забезпечує стабільний турбулентний режим потоку. Загальні гідравлічні втрати тиску по трактах становлять близько 180 кПа, що повністю відповідає робочим характеристикам обраного харчового відцентрового насоса з потужністю привода 7,5 кВт.

					ДП БІ/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						93
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. Розробка контуру автоматизації та безпеки. Змонтовано принципову схему автоматичного керування із фіксацією критичних точок контролю (вимоги системи НАССР). Передбачено безперервний моніторинг температури на виході з гарячої секції, тривалості перебування продукту в трубчастому витримувачі, кінцевої температури сусла та параметрів СІР-санобробки. Інтегрована «петля пастеризації» забезпечує автоматичне повернення недовідвареного потоку на повторну обробку, а блокування «сухого ходу» та аварійне відсікання теплоносія унеможливають потрапляння нестабільного продукту в стерильний контур.
6. Екологічний менеджмент та охорона праці. Сформовано комплекс інженерних рішень, що включає суцільну теплоізоляцію високотемпературних ділянок, протиковзкі покриття підлоги, припливно-витяжну вентиляцію з локальними відсмоктувачами та електрообладнання зі ступенем захисту IP55 - IP65. Екологічність ділянки досягається за рахунок регенерації 60 - 70 % тепла, роздільного збирання та реагентної нейтралізації хімічних стоків СІР-модуля, а також передачі зношених еластомерів ліцензованим підприємствам та вторинної переробки металобрухту пластин після дезінфекції.
7. Аналіз графічної документації. Розроблено повний комплект креслень: загальний вигляд ПТО, апаратурно-технологічну схему, схему автоматизації, технологічна схема, а також конструктивні ескізи теплообмінної пластини та трубчастого витримувача.
8. Доказові конкурентні переваги. Запропоноване рішення відрізняється від традиційних аналогів кращою енергоефективністю завдяки глибокому ступеню рекуперації; скороченням тривалості теплового впливу на сусло (мінімізація термічного стресу та збереження хмелевого аромату); герметичністю контурів із санітарними Clamp/DIN-з'єднаннями, що нівелює ризики вторинної контамінації; а також простотою сервісу розбірної конструкції. Для підприємства це забезпечує зниження собівартості, стабільну якість пива та безпеку персоналу.

					ДП БІ/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						94
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. Перспективи подальшої інтенсифікації. Визначено напрямки розвитку дільниці, серед яких: перехід на двоступеневе кінцеве охолодження з використанням пропіленгліколю та рекуперацією залишкового тепла на потреби гарячого водопостачання; інтеграція ін-лайн давачів щільності (°P) та розчиненого кисню для точного дозування повітря перед завданням дріжджів; оптимізація кута гофрування пластин під фактичні показники в'язкості; впровадження цифрового енергомоніторингу, а також розширення програми експрес-валідації SIP-процесів (АТФ-метрія) для скорочення тривалості простоїв лінії.

Підсумкові результати проєктування підтверджують, що спроектована дільниця стерилізації є технічно виправданим, економічно вигідним та екологічно безпечним рішенням, яке має суттєвий резерв для подальшої модернізації і може бути успішно реалізоване як при будівництві нових, так і при реконструкції діючих browарних заводів.

					ДП БІ/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						95
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Heat exchangers for breweries [Електронний ресурс] / CSI Designs. - Режим доступу: csidesigns.com
2. Wort chilling [Електронний ресурс] / Brew Your Own. - Режим доступу: byo.com
3. Девід М. Heat Exchangers in Brewing: Essential Equipment for Modern Breweries. CSI (Central States Industrial). 2025. 12 Aug. URL: <https://www.csidesigns.com/blog/articles/heat-exchangers-for-breweries>
4. Бабійчук М. В. Проектування пивоварного обладнання : квал. робота. Київ : НУХТ, 2022. 85 с. URL: dspace.nuft.edu.ua
5. Технологія пива і слабоалкогольних напоїв : монографія / за ред. В. М. Бойка. Харків : ХНУ, 2021. 210 с. URL: dspace.nuft.edu.ua
6. ДСТУ 4730:2007. Хміль для пивоваріння. Технічні умови. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2007. 8 с.
7. ДСТУ 4282:2004. Солод пивоварний ячмінний. Технічні умови. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2004. 12 с.
8. Самойчук К. О. Технологічні параметри пивного сусла // Наук. вісн. ТДАТУ. 2022. Т. 12, № 2. С. 65–75. URL: oj.tsatu.edu.ua
9. Коваленко О. П. Екологічні аспекти пивоваріння : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.06. Суми : СНАУ, 2020. 180 с. URL: enpuir.npu.edu.ua
10. Біотехнологія пивоваріння : підручник / О. В. Бондаренко. Тернопіль : ТНТУ, 2019. 200 с. URL: ir.polissiauniver.edu.ua
11. Patent US 6968773 B1. Vessel and method for thermally treating wort. - 2005.
12. Основи технології пивоваріння / Самойчук К. О., Пупинін А. А., Феофанов М. О. - Мелітополь : ТДАТУ, 2021. Розд. 1.4: Кип'ятіння сусла з хмелем. С. 54-67. URL: elib.tsatu.edu.ua.

					ДП БІ21.11. 000 ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Скрипник А.М.			ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		
Консульт.							
Керівн.		Косова В.П.					
Затвер.		Мельник В. М.					
					Стадія	Арк.	Аркушів
					Д	96	101
					КПІ ім. Ігоря Сікарського ФБТ		
					Каф. БТІ		
					Гр.БІ-21		

- 13.Ткаченко О. І., Мельник Г. А. Біохімічна активність дріжджів роду *Saccharomyces* у виробництві пива // Харчова промисловість. - 2020. - №3. - С. 84 - 90.
- 14.Вербицька Л. В. Генетичні методи створення продуцентів дріжджів для пивоваріння // Вісн. НУХТ. - 2021. - Т. 27, №4. - С. 68 - 75.
- 15.Кінетичні закономірності фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини // Журнал хімічних технологій та промисловості. - 2024. - №18(1). - С. 66 - 75. - URL: science.lpnu.ua.
- 16.Іваненко О. В. Характеристика виробничої діяльності дріжджових заводів. Характеристика стічних вод дріжджового виробництва [Електронний ресурс] // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. - 2020. - Т. 84, № 2. - С. 40 - 48. - Режим доступу: journal.onaft.edu.ua
- 17.Міронов О. О., Лісова І. М. Морфологічні особливості *S. cerevisiae* // Біологічні студії. - 2019. - Т. 13, № 2. - С. 83 - 88.
- 18.Нікітюк Г. І., Шиян П. М. Фізіологія мікроорганізмів. - Київ : НУХТ, 2018. - 156 с. - С. 40 - 45.
- 19.Stewart G. G. Yeast Physiology and Biotechnology. - London : Wiley - Blackwell, 2017. - 340 p. - P. 171 - 180.
- 20.Куценко Л. М. Вплив фенольних сполук на активність промислових дріжджів // Наук. вісник НУХТ. - 2022. - № 2. - С. 42 - 47.
- 21.Lodolo E. J., Kock J. L., Axcell B. C. The Yeasts of Beer Brewing // FEMS Yeast Research. - 2008. - Vol. 8(7). - P. 31 - 37.
- 22.Об'єкти біотехнологічних досліджень : навчальний матеріал / Національний університет біоресурсів і природокористування України. - Київ : НУБіП, 2020. - 49 с. - Режим доступу: nubip.edu.ua
- 23.Катаболізм вуглеводів [Електронний ресурс] // Мікробіологія (OpenStax) - LibreTexts українською. - Розд. 8.02. - Режим доступу: ukrayinska.libretexts.org
24. Kunze W. Technology Brewing and Malting. - Berlin: VLB, 2010. - 912 с.

					ДП БІ/21.11. 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		97

25. Guta J. A. W., Pinto J. M. Optimal Design of Continuous Sterilization Processes with Plate Heat Exchangers. - Amsterdam: Elsevier, 2005. - C. 3 - 6. - URL: skoge.folk.ntnu.no.
26. Malowicki M. G. Kinetics of α -Acid Isomerization and Degradation in Model Systems. - J. Agric. Food Chem., 2005. - 53 (17). - P. 4434 - 4441.
27. Jaskula B., Goiris K. Maillard Reaction in Brewing. - Food Chemistry, 2018. - 268. - P. 193 - 203.
28. Розробка конструкції розбірного пластинчастого теплообмінника для охолодження пивного сусла [Електронний ресурс] : дипломний проєкт / Національний університет харчових технологій. - Київ : НУХТ, 2024. - Режим доступу: <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/594d5db5-5ebb-43f2-84c5-38aa1da333fe/content>
29. Janish S. How to Prevent DMS in Beer. - Craft Beer Science Blog, 2023. - P. 118–120.
30. Narziß L. Abriss der Bierbrauerei. - Beierlorzer Verlag, 2016. - S. 171 - 174.
31. Duh Y. H. Thermal Inactivation Kinetics of Lactobacillus plantarum in Wort. - J. Food Prot., 2016. - 79 (1). - P. 86 - 90.
32. Блок-схема технологічного процесу виробництва пивного сусла [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/70418113-dae1-42b5-9cdd-facef158f3b6/content>
33. ДСТУ 3888:2015. Пиво. Загальні технічні умови. - Київ: Мінекономіки України, 2015. - 21 с.
34. Briggs D. Brewing: Science and Practice. - Woodhead Publishing, 2004. - 900 p.
35. Goiris K. Protein - polyphenol interactions in beer. - Food Chemistry, 2014. - P. 171 - 180.
36. Bamforth C. Beer Quality and Safety. - Springer, 2015. - P. 110 - 120.
37. Lima M. Photooxidative deterioration of beer. - Food Research Intl., 2021. - Vol. 141.

					ДП Б/21.11. 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		98

- 38.ScienceDirect [Електронний ресурс]. - Режим доступу: [ScienceDirect](#)
- 39.Основи біохімії Ленінджера [Електронний ресурс]. - Режим доступу: [Lifelib](#)
- 40.Maillard Reaction: Mechanism, Influencing Parameters, Advantages, Disadvantages, and Food Industrial Applications [Електронний ресурс]. - Режим доступу: [PMC](#)
- 41.ДСТУ 4698:2007. *Хміль для пивоваріння. Технічні умови.* - К.: Держспоживстандарт України, 2007. - 18 с.
- 42.ДСТУ 7525:2014. *Вода питна. Вимоги та методи контролю якості.* - К.: Мінекономрозвитку України, 2014. - 25 с.
- 43.Vanderhaegen B. *Beer polyphenol oxidation and flavor stability.* - Food Chemistry, 2006. - Vol. 94. - P. 98 - 106.
- 44.Безпека харчових продуктів у пивоварінні / За ред. О.П. Ломейко. - К.: НУХТ, 2022. - 156 с.
- 45.Технологічні гази в харчовій промисловості: довідник / В.М. Зайцев та ін. - К.: Техніка, 2021. - 89 с.
- 46.Матеріали для харчового обладнання / М.П. Головкин, А.В. Семенов. - Х.: ХДУХТ, 2020. - 134 с.
- 47.Технологічний контроль у пивоварінні / В.М. Зайцев, А.І. Українець, М.П. Сичевський. - К.: Техніка, 2021. - 134 с.
- 48.Priest F. G., Stewart G. G. *Handbook of Brewing: Microbiology and Quality Control.* - 3rd ed. - CRC Press, 2017. - 872 p.
- 49.Мийно - дезінфекційні системи харчових виробництв / М.В. Гулич та ін. - Х.: ХДУХТ, 2020. - 98 с.
- 50.Технологічні розрахунки в пивоварінні / За ред. О.П. Ломейко. - К.: НУХТ, 2022. - 186 с.
- 51.Матеріальні баланси харчових виробництв / В.М. Зайцев та ін. - К.: Техніка, 2021. - 134 с.
- 52.Технології СІР-мийки у харчовій промисловості / В.М. Зайцев та ін. - К.: Техніка, 2021. - 134 с.

					ДП Б/21.11. 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		99

- 53.Технологічне обладнання пивоварних заводів / М.П. Головка та ін. - Х.: ХДУХТ, 2020. - 186 с.
- 54.Утилізація відходів пивоварної промисловості / А.В. Семенов, К.О. Самойчук. - К.: Аграрна наука, 2021. - 98 с.
- 55.Wolf M., Back W. Beer Production Technologies. VLB Berlin, 2012. 412 p.
- 56.Адаменко О.М. Обладнання бродильних виробництв. Київ: НУХТ, 2018. 365 с.
- 57.Narziss L., Back W. Die Technologie der Würzebereitung. Wiley-VCH, 2002. 280 p.
- 58.Back W. Beer Production Technology. - Berlin : VLB Berlin, 2012. - 412 p.
- 59.Fox G., Jackman R., Ford C. An Introduction to the Science of Brewing. - Cambridge : The Royal Society of Chemistry, 2020. - 350 p.
- 60.EHEDG. Hygienic Equipment Design Criteria: Guideline Doc. 8. 3rd ed. Frankfurt/Main: EHEDG, 2018. 56 p.
- 61.Alfa Laval. Plate Heat Exchangers: Technical Reference Manual. Lund: Alfa Laval AB, 2018. 220 p.
- 62.GEA Brewery Systems. Equipment for the Brewing Industry: Technical Catalogue. Oelde: GEA, 2019. 148 p.
- 63.NFPA 30: Flammable and Combustible Liquids Code. Quincy, MA: NFPA, 2021. 182 p.
- 64.EBC (European Brewery Convention). Manual of Good Practice - Wastewater and Waste. Brussels: The Brewers of Europe, 2016. 74 p. - Типові схеми локальної очистки стоків пивоварень, ГДК та методи нейтралізації.
- 65.WHO/ILO. Occupational Noise: Assessing the Burden of Disease. Geneva: WHO, 2018. 52 p.
- 66.Metcalf & Eddy; Tchobanoglous G. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2014. 2048 p. - Нейтралізація, відстоювання, фільтрація промислових стоків.
- 67.Counter-current and co-current arrangement [Електронний ресурс] // Unilab - HVAC/R Software. - Режим доступу: unilab.eu

					ДП Б/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						100
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

68. Устаткування виробництв галузі. Курсовий проєкт : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Біотехнології» спец. 162 Біотехнології та біоінженерія / уклад.: М. Ф. Калініна, С. І. Костик, С. В. Фесенко, Ж. І. Остапенко. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. 138 с.
69. Сучасні матеріали та обладнання для пакування лікарських форм. Практикум : навч. посіб. для здобувачів ступеня магістр за освіт. програмою «Біотехнології» спец. 162 «Біотехнології та біоінженерія» / уклад.: Ж. І. Остапенко, М. В. Шафаренко, В. П. Косова ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. – 72 с.

					ДП БІ/21.11. 000 ПЗ	Арк.
						101
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додатки

					ДП БІ/21.11. 000 ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДОДАТКИ		
Розроб.	Скрипник А.М.						
Консульт.							
Керівн.	Косова В.П.						
Затвер.	Мельник В. М.						
					Стадія	Арк.	Акрушів
					Д	102	101
					КПІ ім. Ігоря Сікорського ФБТ		
					Каф. БТІ		
					Гр.БІ-21		

Додаток А

Додаток Б



INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE

DEVELOPMENT OF SCIENCE, EDUCATION AND TECHNOLOGY AS THE BASIS OF SOCIO-ECONOMIC CHANGES: PROBLEMS AND PROSPECTS

Book of abstracts



March 5, 2026

**Austin,
USA**



Шафаренко М.

асистент

Скрипник А.

Студент

Київ, Україна

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

Київ, Україна

ОСОБЛИВОСТІ АКТИВОВАНОГО ШЛАМУ ТА БІОПЛІВКИ В ПРОЦЕСАХ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ

Виробництво біогазу відбувається під час біологічної трансформації концентрованих органічних субстратів у процесі анаеробного бродіння, яке здійснюється комплексом мікроорганізмів у вигляді складних мікробних консорціумів [1, с. 92–95]. Цей процес здійснюється двома основними типами мікробних спільнот: активним мулом та біоплівкою. Для створення математичної моделі, що описує параметри тепло та масообміну в біореакторі, необхідні дані про структурні особливості активного мулу та біоплівки. Активний мул – це агрегати мікроорганізмів у вигляді пластівців, утворених з клітин бактерій, архей, найпростіших та неорганічних частинок. Розмір таких пластівців може сягати кількох сотень мікрометрів, а їхня структура визначається наявністю позаклітинних полімерних речовин, що забезпечують агрегацію клітин [2, с. 133–136].

Ці пластівці утворені великою кількістю клітин, розташованих у багат шаровому вигляді або у вигляді флокул. Мікроорганізми, прикріплені до поверхні твердого носія, утворюють зооглею, специфічну форму агрегації бактерій, занурених у слизову оболонку екзополісахаридну матрицю. Така структура підвищує стійкість мікробних спільнот до змін умов навколишнього середовища та сприяє ефективному очищенню стічних вод [3, с. 214–218]. Причини утворення пластівців активного мулу різноманітні; зооглеї можуть

утворюватися в результаті агрегації клітин (флокуляції) або їх прикріплення (адгезії) до поверхні носія. Зооглеї мають різноманітну форму: вони можуть бути сферичними, кластероподібними, деревоподібними (з широкими виступами) або утворювати вузькі, щільні нитки.

Їх розвиток та характеристики залежать від складу стічних вод, що надходять, а також від умов очищення. Зооглеї – це желеподібна аморфна колоїдна маса, що містить екзополісахаридний гель з включеннями сферичних (розміром 0,5–1,0 мкм) або паличкоподібних (довжиною 1–5 мкм) бактеріальних клітин. Біоплівка утворюється на поверхні сировини або стінок реактора та складається з мікроорганізмів, їх метаболітів та полімерних речовин клітинного походження [3, с. 219]. Процеси масопереносу під час біологічного розкладу органічних забруднювачів. Факторами, що формують мікробну спільноту (біоценоз) активного мулу очисних споруд, є склад стічних вод та рівень навантаження на мул (або біоплівку).

Для визначення характеру процесу розкладу необхідно класифікувати мікроорганізми, присутні в біоценозі. Стічні води (наприклад, побутові) характеризуються високою концентрацією органічних речовин та бактеріальних забруднювачів. Концентрація бактерій у неочищених стічних водах може досягати десятків мільйонів на мілілітр. Характеристики активного мулу включають аналіз фенотипових властивостей, зокрема: морфологічних; фізіологічних та біохімічних; культуральних. Вплив інших факторів, таких як температура, інтенсивність перемішування та концентрація розчиненого кисню, практично не змінює якісний склад осаду, але впливає на кількісне співвідношення різних груп мікроорганізмів.

Незважаючи на невеликий розмір мікроорганізмів, їх висока концентрація (до десятків мільйонів в 1 мл неочищених побутових стічних вод) означає, що бактеріальна популяція займає значний об'єм у стічних водах. Невеликий розмір бактерій визначає велику питому поверхню, що сприяє високій інтенсивності споживання субстрату. Один кілограм біомаси має площу поверхні близько 4000 м². Імобілізовані мікроорганізми поглинають субстрат, що містить поживні компоненти, зі стічних вод, які змивають кормовий матеріал. У процесі

метаболізму вони каталізують гідроліз складних сполук до простіших форм, молекули яких менші за розмір бактерій. Продукти гідролізу проникають у клітину шляхом дифузії, де за участю ендоферментів вони далі окислюються з утворенням енергії та простіших сполук, що служать будівельним матеріалом для клітинної речовини.

Склад продуктів окислення визначається як складом субстрату, так і видовим різноманіттям бактерій, що утворюють біоплівку. До обов'язкових продуктів належать вуглекислий газ і вода; сульфати, фосфати, амонійний та нітратний азот, а також продукти неповного розкладання - різні органічні кислоти - також можуть утворюватися в різних кількостях. Продукти метаболізму, які не були використані як будівельний матеріал, виділяються в очищену воду. У процесі метаболізму мікроорганізмів товщина біоорганомінерального комплексу збільшується. З часом частина мікроорганізмів біоплівки гине та втрачає свої адсорбційні властивості.

Мертві мікроорганізми, а також живі, що змиваються потоком рідини з поверхні біофільтра, видаляються разом з очищеною водою з сировини, коли досягається критична товщина біоплівки (3-7 мм). Процес утворення метану складається з двох основних стадій: кислотної та лужної (або газифікації). Ці дві стадії відбуваються одночасно в одному реакторі. На заключній стадії метаногенні археї перетворюють ацетат, водень та вуглекислий газ на метан та воду, які утворюють основну частину біогазу [4, с. 36–40].

Для формування гранул та розвитку гранульованого осаду велике значення має гідродинамічний режим всередині реактора, який залежить від швидкості потоку очищених стічних вод. Контроль швидкості потоку особливо важливий під час пускової фази реактора, коли відбувається формування та накопичення гранульованої біомаси. Численні спостереження за запуском лабораторних реакторів, інокульованих дисперсним осадом, виявили загальну закономірність у зміні маси осаду. На початку маса може зменшитися на 25-75% через вимивання дрібних частинок та клітин (Alphenaar, 1994; Hulshof Pol. 1989), тому швидкість потоку не слід значно збільшувати на цьому початковому етапі запуску. Як правило, протягом першого місяця час перебування рідини в реакторі становить

близько 24 годин. Зі збільшенням концентрації біомаси в реакторі швидкість потоку та органічне навантаження поступово збільшуються.

Питома активність осаду щодо утворення метану поступово зростає та досягає стабільного рівня після формування стабільної спільноти метаногенних мікроорганізмів. Важливою умовою для інтенсивного анаеробного перетворення є достатній метаболізм всередині реактора. Це необхідно для ефективного транспортування поживних речовин до мікроорганізмів, запобігання локальному накопиченню проміжних продуктів та швидкого розподілу свіжої порції стічних вод по всьому об'єму.

Процеси утворення метану можуть відбуватися за різних температур. Існує три основні температурні режими: психрофільний (що відбувається за температури нижче 20°C), мезофільний (за температури 20-45°C) та термофільний (за температури 45-70°C). Температурний режим впливає на швидкість процесу, але не змінює кінцевий склад утворених продуктів. Чим вища температура, тим швидше відбуваються біохімічні реакції. Тому термофільні процеси зазвичай у 2-3 рази інтенсивніші, ніж мезофільні (Mkinerney and Bryant, 1990; Tanala et al., 1984).

Однак, незважаючи на високу швидкість процесів у термофільних реакторах, отримана перевага часто недостатньо значна, щоб виправдати вартість додаткових енергетичних витрат, необхідних для підтримки цих високих температур. Зі збільшенням температури швидкість біохімічних реакцій збільшується, що сприяє підвищенню продуктивності біогазових установок [5, с. 124–128].

Було показано, що ефективність утворення метану визначається поєднанням технологічних факторів, зокрема, гідродинамічного режиму в реакторі, швидкості потоку стічних вод, концентрації біомаси та температурного режиму процесу. Особливо важливо контролювати умови на початковому етапі запуску реактора, коли відбувається утворення гранульованого осаду та стабілізація метаногенної мікробної спільноти. Тому оптимізація параметрів тепло- та масообміну в анаеробних біореакторах, а також врахування біологічних характеристик активного мулу та біоплівки є важливими умовами для

підвищення ефективності біогазових технологій та процесів біологічного очищення стічних вод.

Список літератури

1. Metcalf & Eddy. Wastewater engineering: treatment and resource recovery. 5th ed. New York : McGraw-Hill Education, 2014. 1819 p.
2. Bitton G. Wastewater microbiology. 4th ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2011. 746 p.
3. Flemming H.-C., Wingender J. The biofilm matrix. Nature Reviews Microbiology. 2010. Vol. 8, № 9. P. 623–633.
4. Deublein D., Steinhauser A. Biogas from waste and renewable resources. 2nd ed. Weinheim : Wiley-VCH, 2011. 578 p.
5. Appels L., Baeyens J., Degrève J., Dewil R. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. Progress in Energy and Combustion Science. 2008. Vol. 34, № 6. P. 755–781.

Формат	Знак	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітки
				<u>Документація</u>		
A 1			ДП БІ 21.11.003 КА	Креслення апарату	1	
				<u>Складальні одиниці</u>		
Б / К	1		ДП БІ 21.11.003.01	Пластина	20	Сталь AISI 316
Б / К	2		ДП БІ 21.11.003.02	Нерухома плита	1	Сталь AISI 316
Б / К	3		ДП БІ 21.11.003.03	Зажимна плита	1	Сталь AISI 316
Б / К	4		ДП БІ 21.11.003.04	Направляюча штанга	2	Сталь AISI 316
Б / К	5		ДП БІ 21.11.003.05	Ролик рухомої плити	1	
Б / К	6		ДП БІ 21.11.003.06	Опора	1	Сталь AISI 316
Б / К	7		ДП БІ 21.11.003.07	Стягуюча шпилька	10	Сталь 40X
				<u>Деталі</u>		
	8		ДП БІ 21.11.003.08	Прокладка резинова	19	Гума 4326 ТУ
				<u>Стандартні вироби</u>		
	9		ДП БІ 21.11.003.09	Гайка М 20 ДОСТ 1 ДОСТ 5927-70	10	Сталь 35X
	10		ДП БІ 21.11.003.10	Гайка М 22 ДОСТ 15526-70	10	Сталь 35X

					ДП БІ 21.11.000 ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Специфікація КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. БТІ Гр. БІ-21		
Розроб.	Скрипник А. М.						
Конс.							
Керівн.	Косова В. П.						
Затв.	Мельник В. М.						
					Стадія	Арк.	Аркушів
					Д	1	2

ДР 1. Санітарна підготовка виробництва

ДР 11. Підготовка працівників

ДР 11.1 Км	Медичне обстеження персоналу
ДР 11.2 Км	Навчання персоналу
ДР 11.3 Км, Км	Забезпечення санітарної безпеки персоналу

ДР 12. Підготовка миючих та дезінфікуючих засадів

Концентрований СМЗ Вода питна t=35°C	ДР 12.1 Км, Кх	Підготовка миючих та дезінфікуючих засадів для поверхонь	Розчин PANPRO 0.5%, t = 30°C до ДР 13.1 Розчин PANPRO 1%, t = 30°C до ДР 13.2 Розчин Біомой 1%, t = 30°C до ДР 13.1, ПВ 2 Розчин Біомой 2%, t = 30°C до ДР 13.2, ДР 14.13.
C _{PANPRO} = 0,5%, 1%, C _{Біомой} = 1%, 2%			
NaOH зі складу Вода питна t=35°C	ДР 12.2 Км, Кх	Підготовка миючого розчину для миття обладнання	Миючий розчин до ДР 14.12 t=35°C
C _{каустична сода} 4%, n=150 од / хв.			
Концентрована HNO Вода питна t=35°C	ДР 12.2 Км, Кх	Підготовка розчину HNO для дезструкції	Миючий розчин до ДР 14.14 t=35°C
C _{HNO} = 1-3%,			
96% Етиловий спирт Вода питна t=35°C	ДР 12.3 Км, Кх	Підготовка дезінфікуючого розчину для обробки рук персоналу	Дезінфікуючий розчин до ДР 11.3
C _{етиловий спирт} 70%, t=20°C			

ДР 13. Підготовка виробничих приміщень

розчин PANPRO 0.5%, t = 30°C від ДР 12.1 розчин Біомой 1%, t = 30°C від ДР 12.1	ДР 13.1 Км, Км, Кх	Щоденне прибирання	Рідкі відходи до ПВ 6.2
t _{чф.обр} = 60 хв.			
розчин PANPRO 1%, t = 30°C від ДР 12.1 розчин Біомой 2%, t = 30°C від ДР 12.1	ДР 13.2 Км, Км, Кх	Генеральне прибирання	Рідкі відходи до ПВ 6.2

ДР 14. Підготовка виробничого обладнання

ДР 14.1		Підготовка виробничого обладнання та комунікацій	
Вода технічна $t=40-45^{\circ}\text{C}$	ДР 14.11 Кт, Кх	Первинне очищення обладнання та комунікацій	Рідкі відходи до ПВ 6.2
		$p=0,5-1\text{ МПа}, t= 5-10\text{ хв}$	
Дезінфікуючі засоби від ДР 12.2	ДР 14.12 Кт, Кх	Миття обладнання та комунікацій	Рідкі відходи до ПВ 6.2
		$p=0,5-1\text{ МПа}$	Над
Вода технічна $t=40-45^{\circ}\text{C}$	ДР 14.13 Кт, Кх	Проміжне промивання водою	Рідкі відходи до ПВ 6.2
		$p=0,5-1\text{ МПа}, t= 5-10\text{ хв}$	
HNO_3 від 12.3	ДР 14.14 Кт, Кх	Декструкція мінерального каменю та солевих відкладень	Рідкі відходи до ПВ 6.2
		$t=50-60^{\circ}\text{C}, t=20-30\text{ хв}$	
Деміралізована вода	ДР 14.15 Кт, Кх	Промивка деміралізованою водою	Рідкі відходи до ПВ 6.2
		$p=0,5-1\text{ МПа}, t= 5-10\text{ хв}, \text{pH} = 6,5-7,5, v = 2,0-2,5\text{ м/с}$	

Гостра водяна пара, t=136°C, P=0,15 - 0,2 МПа	ДР 14.2 Км, Кх, Км	Стерилізація обладнання та комунікацій	Конденсат до ПВ 6.2
p=0,15-0,2 МПа, t=15-20 хв, t =85-90°C,			

ДР 2. Підготовка теплоносіїв та холодоносіїв

Гостра водяна пара	ДР 2.1 Км	Нагрівання технологічної пари	Технологічна пара до ТП 1
p=0,3-0,6 МПа, t =130-160°C, індекс сухості > 97%			
Вода питна t=35°C	ДР 2.2 Км, Км	Охолодження води	Охолоджена вода до ТП 3
t _{води} =-2-5°C, відсутність мікробіоти			

ДР 3 Км, Кх, Км	Контроль параметрів сировини
Індексракт _т = 11-14 °Р, t= 70-80°C, рН= 5.2-5.6, КМАФАнМ ≤ 10	

ДР 4. Підготовка повітря

ДР 4.		Підготовка вентиляційного повітря	
Повітря з атмосфери	ДР 4.11 Км	Забір повітря з атмосфери	Відпрацьовані фільтри до ПВ 6.3
Фільтри зі складу	T = 20 °C , W = 60-90 %		
Фільтри зі складу	ДР 4.12 Км	Попередня очистка повітря від механічних контамінантів	Відпрацьовані фільтри до ПВ 6.3
	T = 20 °C , W = 60-90 % , d > 5 мкм , E = 60%		
	ДР 4.13 Км	Стиснення повітря	
	T = 100-120 °C , p = 0,03 МПа		
	ДР 4.14 Км	Виділення сконденсованої вологи та охолодження повітря	Конденсат до ПВ 6.2
	T = 18-20 °C , W = 60%		
Фільтри зі складу	ДР 4.15 Км	Очистка повітря на повітряному фільтрі	Відпрацьовані фільтри до ПВ 6.3
	d > 1,5-3 мкм , E = 95%		
	ДР 4.16	Рециркуляція відпрацьованого повітря	

Охмелене сусло t=75±3°C	ТП 1 Км, Кх, Км	Нагрівання сусла до температури стерилізації	Конденсат до ПВ 6.2
Технологічна пара від ДР 2.1	p=0,25-0,35 МПа, t=45-60 с, t=95±2°C, ступінь перетворення - 15-25%, відсутність контамінантів		Нагріте сусло до ТП 2
		Гарячий злам до ПВ 6.1	

Нагріте сусло від ТП 1	ТП 2 Км, Кх, Км	Витримка при температурі стерилізації	Стерилізоване сусло до ТП 3
		Гарячий злам до ПВ 6.1	
		p=0,25-0,35 МПа, t=30±5 с, t=92-98°C, інактивація α-амілаза = 99,9%, t=95°C,t=30 с, інактивація β-амілаза = 99,9%, t=70°C,t= 5 хв, ступінь перетворення - 40-60% деструкція Lactobacillus brevis = 99,999%	

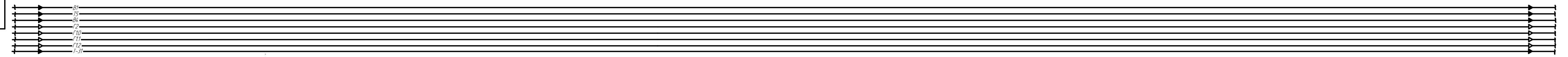
Стерилізоване сусло від ТП 2	ТП 3 Км, Кх	Охолодження стерилізованого сусла	Охолоджене стерилізоване сусло до ТП 4
Охолоджена вода від ДР 2.2	t _{сусла} t=40-50°C, v _{охолодження} = 15-20°C, t _{охолодження на воді} =-2-5°C, t _{охолодження на воді} =-35-45°C, v _{струм} коагуляції = 3 м/с, рН= 5.1-5.5, T < 15°C, c коагулянт = 15-3 г/л		Нагрітий холодоносій до ПВ 2
		Осад холодноного зламу до ПВ 6.1	

Охолоджене сусло від ТП 3	ТП 4 Км, Кх, Км	Освітлення та стабілізація сусла	Освітлене сусло до ТП 5
рН=5.1-5.5, t=2-4 год., t =8-12°C, прозорість = ≤ 3 ЕВС відсутність сторонньої мікрофлори		Осад холодноного зламу до ПВ 6.1	

Освітлене сусло від ТП 4	ТП 5 Км, Кх, Км	Подача готового сусла на бродіння	Аероване сусло до ТП 4
Стерильне повітря від ТП 5	DO = 8-12 мг / л, α0,5-1 л повітря / л сусла, p = 0,1-0,15 МПа		

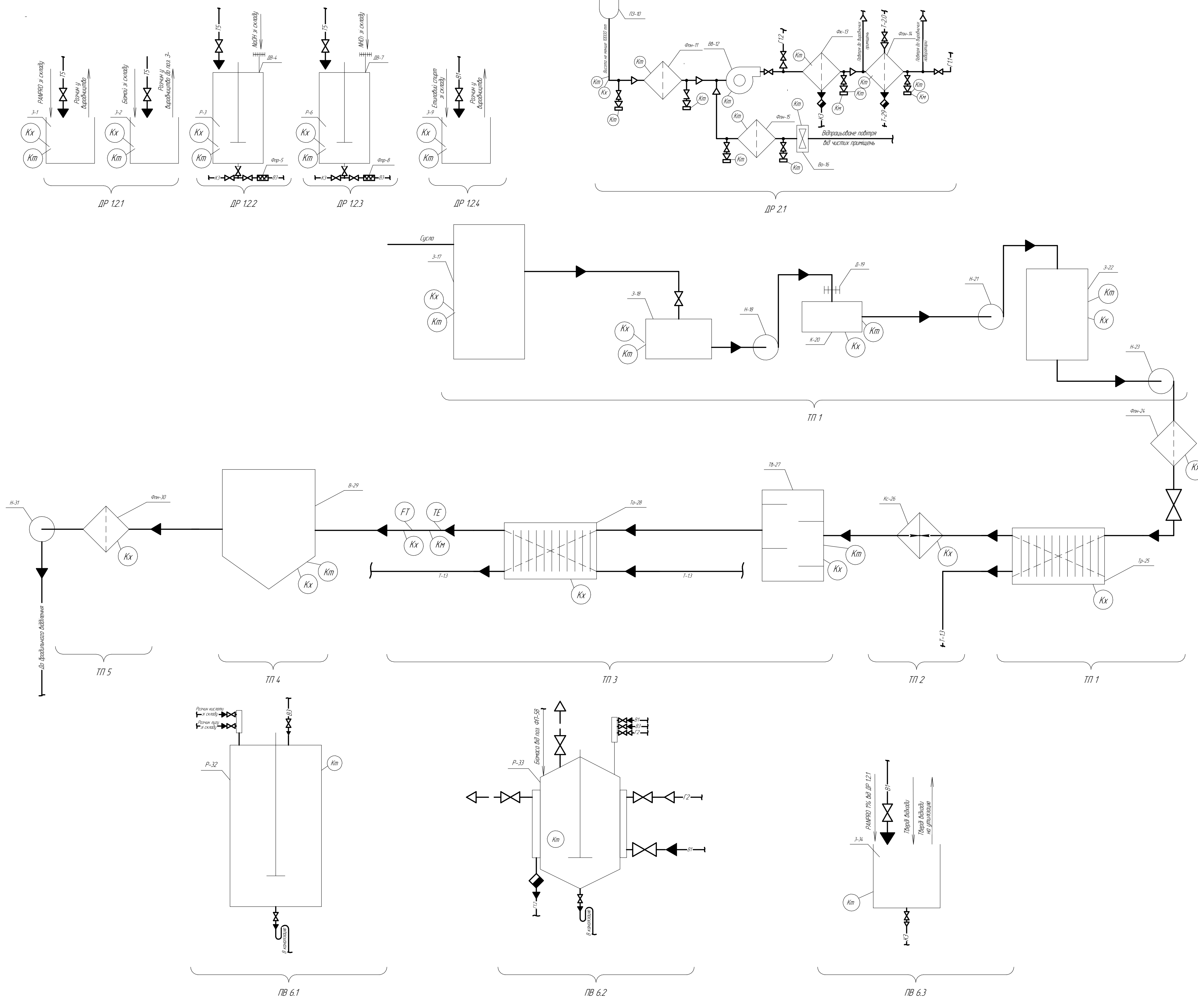
ПВ 6. Знешкодження відходів та викидів

Гарячий злам від ТП 1, ТП 2	ПВ 6.1 Км, Кх	Переробка коагуляту	Оброблений злам для подальшого використання
Холодний злам від ТП 3, ТП 4	t=80-85°C, t=30 хв		
Розчин лузгу та кислоти зі складу	ПВ 6.2 Км, Кх	Знешкодження рідких відходів	До каналізації
Рідкі відходи від ДР 14.1, ТП 3	рН = 6,5-8,5		
Конденсат від ДР 14.2, ДР 4.14, ТП 1			
розчин PANPRO від ДР 12.1 C=1% відпрацьовані фільтри від ДР 4	ПВ 6.3 Км, Кх	Знешкодження твердих відходів	На переробку сміття
		t=120 хв	

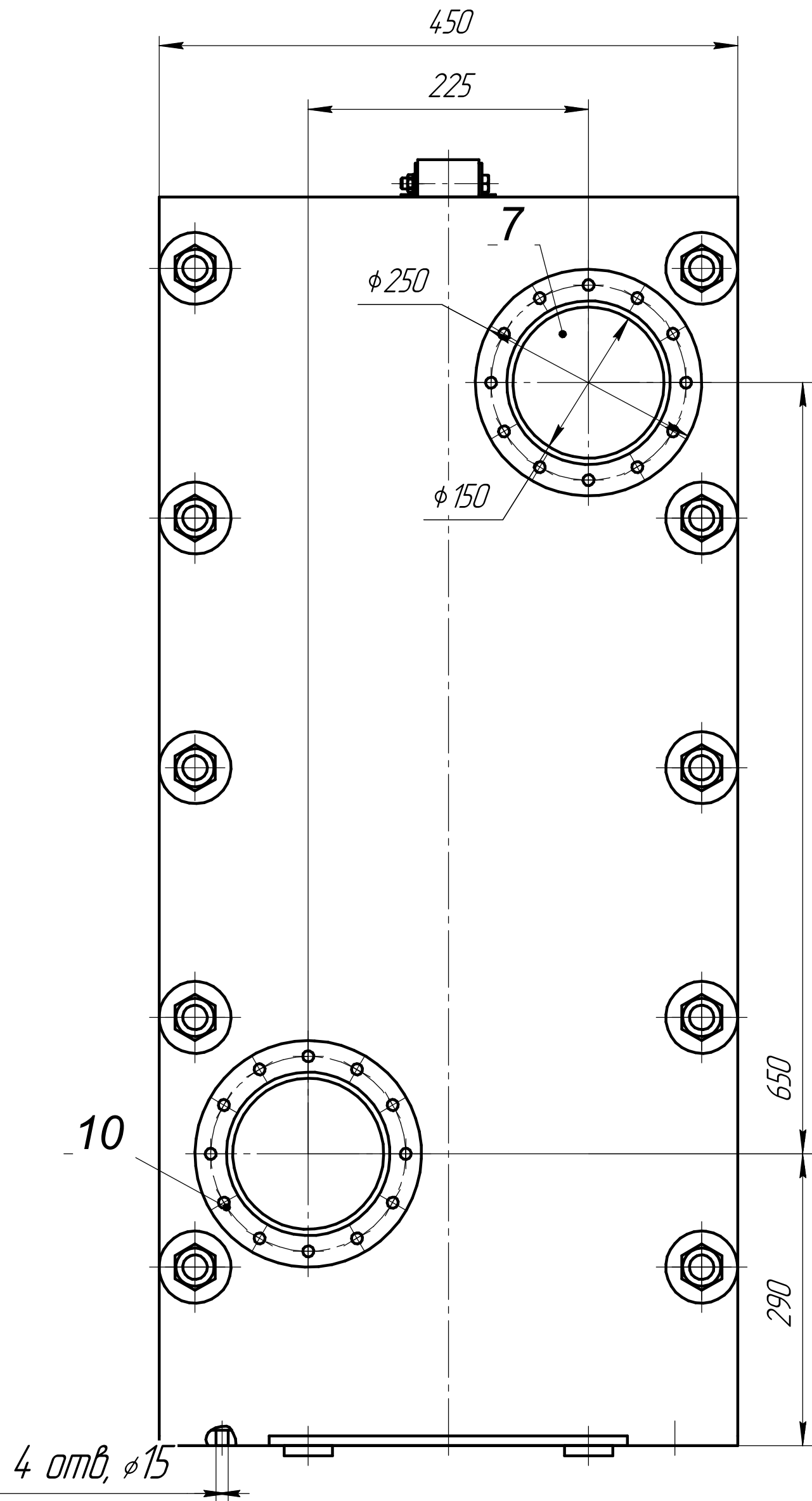
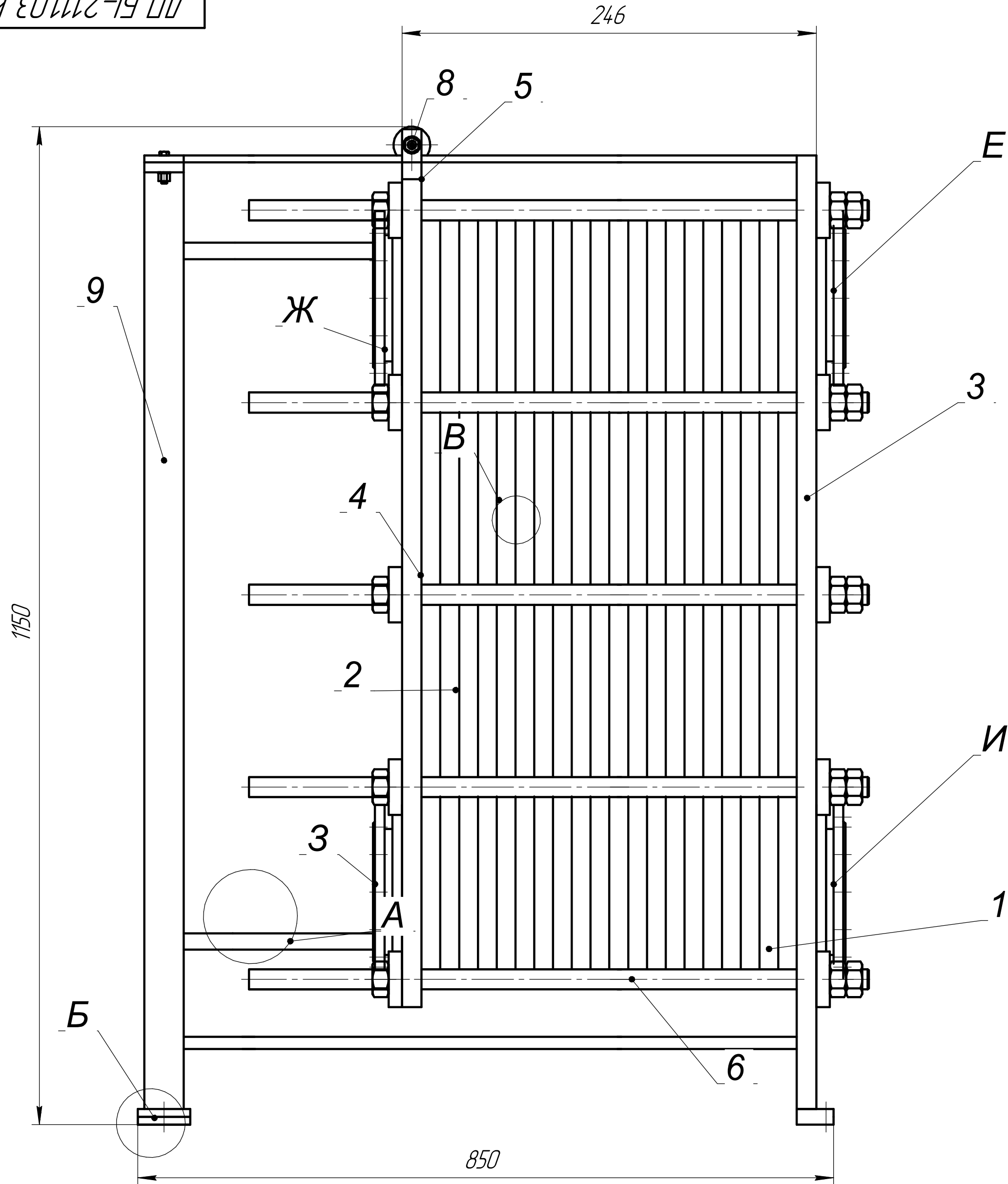


Удобні позначення		Найменування середовища в трубопроводі
Літерне	Графічне	
В1		Вода господарська-питна
Т5		Трубопровід для гарячої води
В4		Водопровід для холодної води
Г2		Насичена водяна пара
Г10		Повітря технологічне
Г11		Повітря стерильне
Г12		Повітря відтрацьоване
Т13		Вода одаратна
К3		Відходи рідкі
Т31		Мийний розчин

Позначення	Найменування	Кількість	Примітки
ПЗ	Подітроздірник	1	
ФПН	Фільтр панельний	5	
ФК	Фільтр кишеньковий	1	
ВВ	Вентилятор відцентровий	1	
Ва	Вентилятор осьовий	1	
Д	Дозатор од'ємно-ваговий	3	
Р	Реактор	4	
З	Збірник	7	
Н	Насос	4	
К	Котел	1	
Тр	Теплообмінник-рекуператор	1	
Кс	Колона стерилізаційна	1	
Тв	Теплообмінник-витримувач	1	
То	Теплообмінник-охолоджувач	1	
В	Відстійник	1	



ДП БІ-21102 АС			
Технологія виробництва пивного сусла. Стадія стерилізації.			
Лист	Прозвище	Підпис	Дата
Розроб.	Скорич А.М.		
Конс.			
Керівник	Косова В.П.		
Затв.			
Апаратна схема		Лист	Аркш
		1	2
		КПІ ім. Ігоря Сікорського ФБТ	
		Формат А1	



Таблиця штуцерів

Позн.	Найменування	Кіл.	Прохід умовний D _y , мм	Тиск умовний Р _y , мм
Е	Вхід гарячого агенту	1	150	1
Ж	Вхід холодного агенту	1	150	1
З	Вихід гарячого агенту	1	150	1
И	Вихід холодного агенту	1	150	1

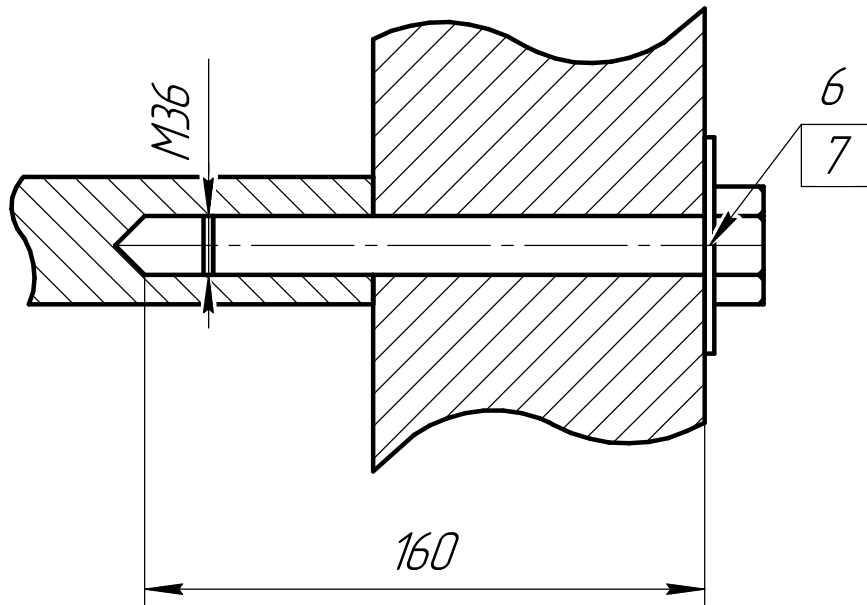
Технічна характеристика

1. Апарат призначено для нагрівання пивного сусла, що поступає на стерилізацію, та охолодження сусла, що поступає на стерилізацію.
2. Поверхня теплообміну 12 м²
3. Робочий тиск в апараті 1 МПа
4. Середовище в апараті - пивне сусло 11% - нетоксичне, корозійне, невидухонебезпечне.
5. Температура теплоносіїв
- Гарячого теплоносія початкова - 97 °С, кінцева - 85 °С
- Холодного початкова - 23 °С, кінцева - 35 °С
6. Кількість пластин 20 шт.
7. Тип пластин ТПР (виконання ІІ).
8. Площа пластин 0,6 м²
9. Матеріал пластин сталь Сталь AISI 316
10. Товщина пластин 1 мм.
11. Габаритні розміри апарату
- Висота 1150 мм.
- Довжина 850 мм.
- Ширина 450 мм.
12. Маса апарату 450 кг.

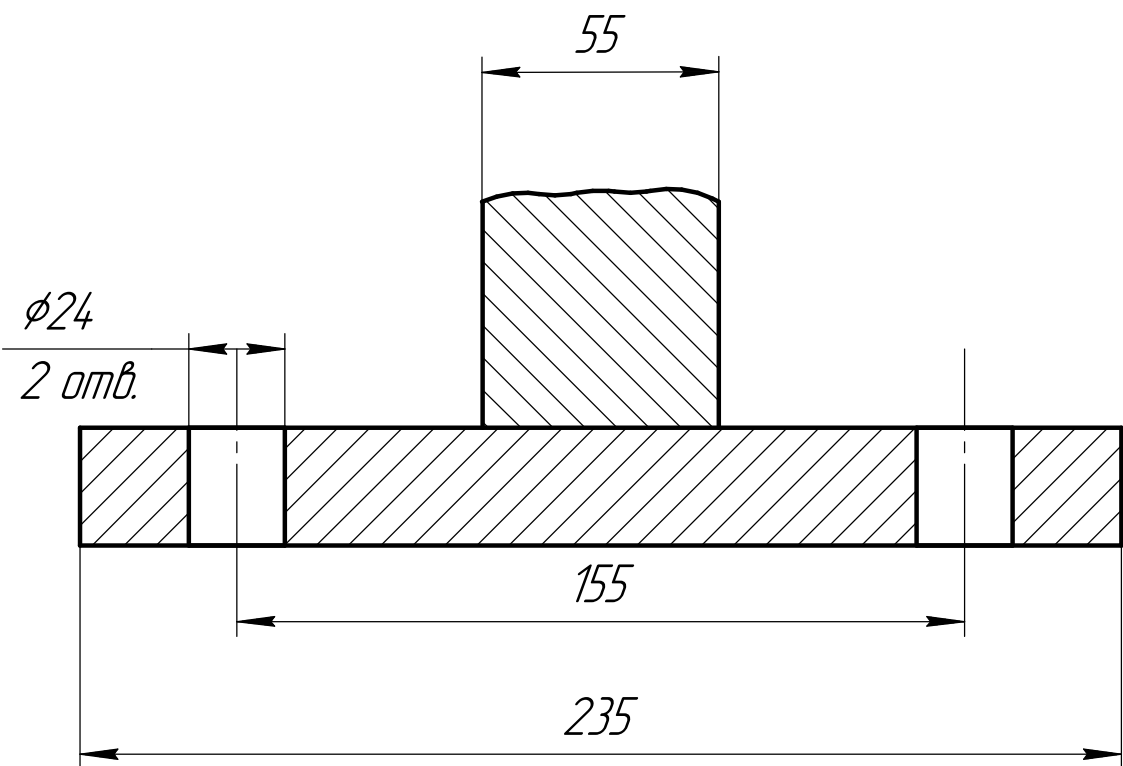
Технічні вимоги

- Апарат випробовують на міцність і щільність гідравлічним тиском 0,8 МПа. Зварні шви в об'ємі 100% контролювати рентгенівським методом.
3. Зварні шви повинні відповідати вимогам ГОСТ 76-01-82-77 "Зварювання в хімічному машинобудуванні".
4. Тиск в теплообміннику потрібно змінювати плавно. Швидкість підняття або опускання тиску не повинна перевищувати 0,1 МПа за хвилину.
5. Апарат не призначений для роботи з видухонебезпечними середовищами групи 1 за ГОСТ 12.1.007-76.

А-А

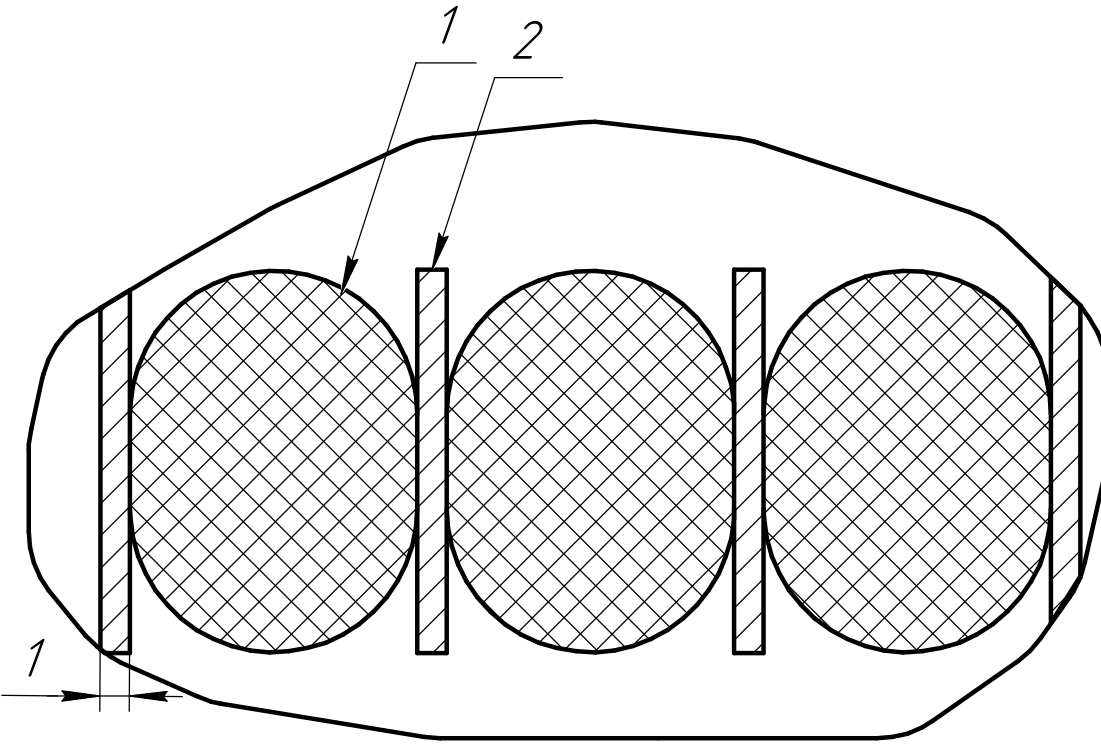


Б-Б



В-В

10:1



				ДП БІ-21103 КА		
				Технологія виготовлення пивного сусла. Стадія стерилізації		
Лист	Виробище	Підпис	Дата	Лист	Аркш	Аркш
Розроб.	Скорняк А.М.			1	1	2
Конс.				Теплообмінник пластинчастий Загальний вид		
Керівник	Косова В.П.					
Затв.	Мельник В.М.			КПІ ім. Ігоря Сікарського ФБТ		
				Формат А1		