МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ КОМП'ЮТЕРНОЇ ФІЗИКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ
Кафедра фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи
за освітньо-професійним рівнем бакалавр

«Розрахунки головного бродильного чану спиртового заводу»

Виконав: студент 4 курсу, група НФ-42
Шорко Д.Д.
спеціальність: 144 Теплоенергетика
освітня програма: Моделювання енергетичних систем та енергоефективність
Керівник: доц. Кошельнік О.В.
Рецензент: доц. Круглякова О.В.

Харків – 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

Навчально-науковий інститут комп'ютерної фізики та енергетики

Кафедра фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології

Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень): бакалавр

Спеціальність 144 «Теплоенергетика»

Освітня програма: Моделювання енергетичних систем та енергоефективність

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ О.П. Кулик

"____"_____2025 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Шорко Даніілу Дмитровичу

1. Тема роботи Розрахунки головного бродильного чану спиртового заводу, керівник роботи канд. техн. наук, доцент Кошельнік Олександр Вадимович, затверджені наказом по університету від "___"_____2025 року №____

2. Строк подання студентом роботи 01.06.2025

3. Перелік питань, які потрібно розробити

Загальна технологічна схема виробництва спирту. Теплотехнологічне обладнання для виробництва спирту та його характеристика. Визначення конструктивних розмірів бродильного чану та його тепловий розрахунок. Розрахунок бродильного чану на механічну міцність.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Вивчення технології виробництва спирту
2	Вивчення теплотехнологічного обладнання для отримання спирту
3	Визначення геометричних розмірів та тепловий розрахунок бродильного чану. Розрахунок бродильного чану на міцність
4	Висновки

5. Дата видачі завдання _____

Студент Д.Д. ШОРКО

Керівник роботи О.В. КОШЕЛЬНІК

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота за освітньо-кваліфікаційним рівнем бакалавр виконана студентом Шорко Даніілом Дмитровичем на тему «Розрахунки головного бродильного чану спиртового заводу».

Об’єктом дослідження кваліфікаційної роботи є теплотехнологічне обладнання, що використовується при виробництві спирту.

Предметом роботи є дослідження теплофізичних процесів, що спостерігаються в технологічному процесі виробництва спирту.

Метою роботи є розрахунки теплотехнологічного обладнання для виробництва спирту та визначення витрати енергоносіїв.

Основними завданнями роботи є: вивчення технологічної схеми виробництва спирту; вивчення конструкції та методики теплового розрахунку бродильних чанів; розрахунок теплового балансу головного бродильного чану спиртового заводу та визначення їх кількості; проведення теплового розрахунку бродильного чану та його розрахунку на міцність.

Дипломна робота містить: 38 сторінок, 3 рисунка, 1 таблицю, 15 джерел. Ключові слова: ВИРОБНИЦТВО СПИРТУ, ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ, БРОДИЛЬНИЙ ЧАН, ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК, РОЗРАХУНОК НА МІЦНІСТЬ.

ABSTRACT

This qualification work for the Bachelor's degree, authored by student Shorko Daniil Dmitrievich, explores the topic “Calculations of the main fermentation vat of the distillery”.

The object of this research is the heat engineering equipment used in the production of alcohol.

The subject of the qualification work is the study of thermophysical processes observed in the technological process of alcohol production.

The aim of the qualification work is to calculate the heat-technological equipment for alcohol production and determine the energy consumption.

The following tasks were performed in the course of the qualification work: studying the technological scheme of alcohol production; studying the design and methodology of thermal calculation of fermentation vats; calculating the heat balance of the main fermentation vat of the distillery and determining their number; performing thermal calculation of the fermentation vat and its strength calculation.

The qualification work contains: 38 pages, 3 figures, 1 table, 15 references.

Keywords: ALCOHOL PRODUCTION, HEAT ENGINEERING EQUIPMENT, FERMENTATION VAT, THERMAL CALCULATION, STRENGTH CALCULATION.

ЗМІСТ

ВСТУП...…….....7
1 ЗАГАЛЬНА ТЕХНОЛОГІЧНА СХЕМА ВИРОБНИЦТВА СПИРТУ…..…….....9
1.1 Процес підготовлення сировини……..9
1.2 Водно-теплова обробка сировини……..11
1.3 Процес зброджування……..……...13
1.4 Ректифікація спирту……..……..14
2 ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА СПИРТУ……..……...16
2.1 Опис технологічної лінії для виробництва спирту…….……16
2.2 Теплотехнологічне обладнання відділення бродіння……..17
2.3 Брагоперегонні установки…….....19
2.4 Ректифікаційні колони……21
3 КОНСТРУКЦІЯ ТА ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ БРОДИЛЬНИХ ЧАНІВ…….....……..24
4 РОЗРАХУНКИ ГОЛОВНОГО БРОДИЛЬНОГО ЧАНУ……27
4.1 Розрахунок геометричних розмірів чана……..27
4.2 Втрати теплоти бродильним чаном……...28
4.3 Визначення поверхні охолодження для бродильного чану……30
4.4 Розрахунок чана на міцність……...34
ВИСНОВКИ…...……...36
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ……...……..37

ВСТУП

У сучасних умовах інтенсифікації виробництва та впровадження енергоефективних технологій особливої уваги набуває модернізація процесів, пов’язаних із біотехнологією. Спиртова промисловість, як один із важливих секторів хімічної та харчової промисловості, відіграє ключову роль у забезпеченні сировиною низки галузей – від фармацевтичної до паливної. Основою технологічного процесу виробництва етилового спирту є зброджування цукристої сировини, що відбувається за участі мікроорганізмів у спеціально сконструйованих апаратах – бродильних чанах**.**

Головний бродильний чан виконує важливу функцію в загальному технологічному ланцюзі: саме в ньому реалізується основний етап переробки цукристих речовин у спирт за допомогою дріжджових клітин. Цей процес вимагає точного дотримання технологічних режимів, таких як температура, pH-середовище, тривалість бродіння, а також відповідного конструктивного оформлення апарата для забезпечення рівномірного змішування, теплообміну та ефективної роботи мікроорганізмів.

Актуальність даної теми зумовлена необхідністю удосконалення технологічного обладнання спиртових заводів відповідно до сучасних стандартів продуктивності та екологічності. Від правильності розрахунків головного бродильного чану залежить не лише ефективність процесу бродіння, а й економічні показники всього підприємства — витрати на енергоресурси, тривалість циклів, рівень автоматизації та втрати сировини.

Мета цієї кваліфікаційної роботи — здійснити техніко-економічне обґрунтування та інженерні розрахунки головного бродильного чану для типового спиртового заводу, враховуючи специфіку сировинної бази, режимні параметри та вимоги до готової продукції. У межах дослідження буде проведено аналіз особливостей процесу зброджування, розглянуто основні типи

бродильного обладнання, визначено оптимальні конструктивні розміри апарата, а також оцінено доцільність обраного технічного рішення.

Таким чином, дана робота має на меті не лише академічний інтерес, але й практичну цінність – вона може бути використана при модернізації або проектуванні нових ліній з виробництва етилового спирту.

РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНА ТЕХНОЛОГІЧНА СХЕМА ВИРОБНИЦТВА СПИРТУ

1.1. **Процес підготовлення сировини**

Підготовка сировини є одним із найважливіших етапів у технологічному процесі виробництва етилового спирту, оскільки саме на цьому етапі закладаються основні умови для ефективної ферментації та максимального вилучення цукристих компонентів. Від ретельності виконання підготовчих операцій значною мірою залежить якість зброджуваного середовища, активність дріжджових клітин, а отже — й вихід кінцевого продукту. Кожен підетап має свої технологічні особливості, спрямовані на забезпечення стабільної, оптимальної сировинної бази для подальшого бродіння.

Прийом і зберігання сировини

Сировина, переважно зернові культури (жито, кукурудза, пшениця), надходить на територію підприємства у відповідності до вимог чинних стандартів якості. Після зважування, відбору проб та контролю показників вологості, засміченості та зараженості, сировина направляється на тимчасове зберігання у силоси, бункери або склади, обладнані вентиляційними системами для запобігання самозігріванню і псуванню.

Очищення сировини

Цей етап передбачає механічне видалення сторонніх домішок, таких як пил, каміння, пісок, металеві включення тощо. Для цього застосовуються решітки, магнітні сепаратори, аспіраційні установки та інше спеціалізоване обладнання. Якісне очищення запобігає передчасному зношенню технологічного обладнання й забезпечує стабільну роботу наступних операцій.

Подрібнення

Після очищення сировина подається у дробарки або млини, де відбувається її подрібнення до заданого ступеня. Залежно від типу сировини та вимог технологічного процесу, продукт подрібнення може мати фракцію крупи або борошна. Подрібнення сприяє ефективнішому вивільненню крохмалю, підвищуючи ефективність процесів клейстеризації та оцукрення.

Приготування сусла (замісу)

Подрібнену сировину змішують із водою у строго визначених пропорціях відповідно до технічних регламентів. В результаті утворюється гомогенна суспензія — сусло. На цьому етапі до суміші додають ферментні препарати (зокрема, альфа-амілазу), які частково розщеплюють крохмаль вже на стадії замішування, підвищуючи ефективність наступних операцій.

Клейстеризація

Сусло нагрівається до температури 85–90 °C, що призводить до клейстеризації крохмалю — переходу його в розчинний стан. У такій формі крохмаль доступний для подальшої ферментативної дії, що є необхідною умовою для якісного оцукрення.

Оцукрення

Охолоджене після клейстеризації сусло доводять до температури 55–60 °C, після чого вносять глюкоамілазу — фермент, який каталізує процес глибокого гідролізу декстринів до простих цукрів (переважно глюкози). Цей етап забезпечує отримання цукристого середовища, придатного для активного зброджування.

Охолодження

На завершальному етапі підготовки сусло охолоджують до температури зброджування (в межах 30–34 °C), що є оптимальним діапазоном для

життєдіяльності спиртових дріжджів. Після цього сусло подається у головний бродильний чан, де починається процес спиртового бродіння.

Таким чином, правильна організація та виконання кожного з перерахованих етапів забезпечують високий ступінь перетворення вуглеводів у спирт, мінімізують втрати сировини та сприяють стабільній роботі всього технологічного комплексу.

1.2. **Водно-теплова обробка сировини**

Водно-теплова обробка — це ключовий етап підготовки сировини до зброджування, під час якого відбувається переведення крохмалю в розчинний стан та його подальше ферментативне оцукрення. Цей процес забезпечує ефективне вилучення цукристих компонентів і створення середовища, придатного для ферментації.

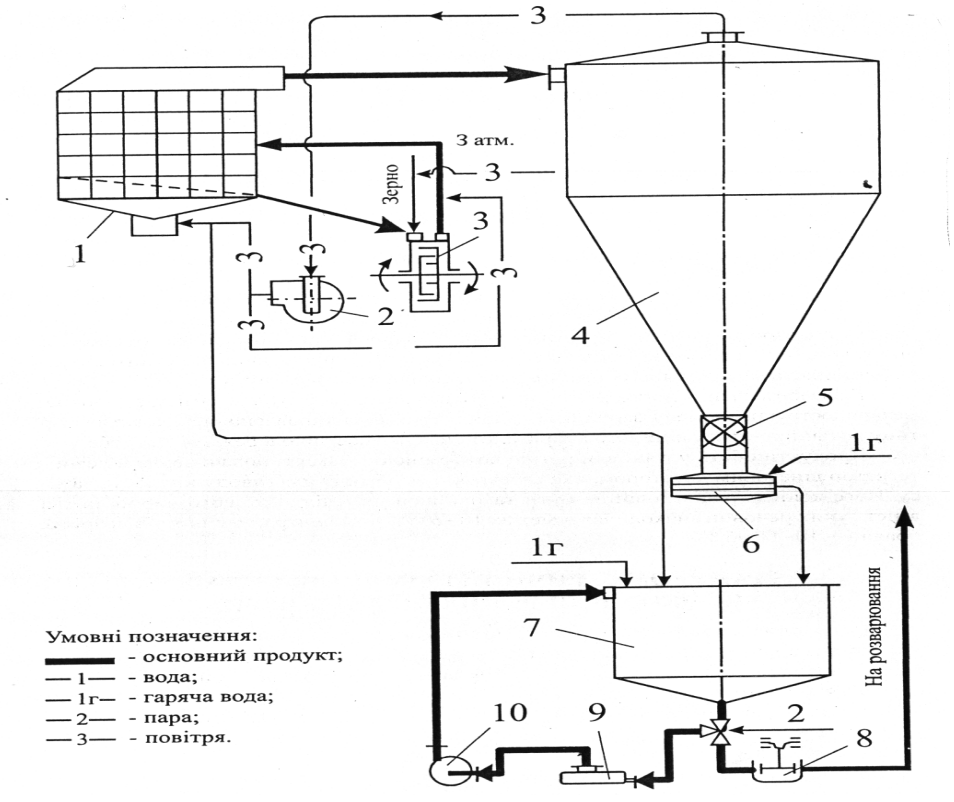


Рисунок 1.1 – Схема водно-теплової обробки сировини

Згідно з наведеною схемою, процес водно-теплової обробки включає такі послідовні етапи:

1. Змішування сировини з водою.Подрібнене зерно (або інша сировина) змішується з водою до утворення однорідної маси – сусла. Цей процес проводиться у замішувальних апаратах за заданими технологічними пропорціями.

2. Підігрів до температури клейстеризації.Сусло підігрівається до температури 85–90 °C для розриву гранул крохмалю та його переведення у розчинну (клейстеризовану) форму. Це значно підвищує доступність вуглеводів для дії ферментів.

3. Додавання ферментів (альфа-амілаза).На етапі нагрівання вводиться альфа-амілаза – фермент, який каталізує розщеплення крохмалю на декстрини. Застосування ферментів дозволяє скоротити тривалість теплової обробки та зменшити енергетичні витрати.

4. Охолодження до температури оцукрення.Після завершення клейстеризації сусло охолоджується до температури 55–60 °C, що є оптимальною для дії глюкоамілази.

5. Оцукрення (введення глюкоамілази).Додається глюкоамілаза – фермент, що розщеплює декстрини до глюкози. Цей етап забезпечує утворення доступного для дріжджів цукристого середовища.

6. Остаточне охолодження.Після завершення оцукрення сусло охолоджується до температури зброджування (30–34 °C) і надходить у головні бродильні апарати.

Водно-теплова обробка не лише забезпечує ефективне перетворення крохмалю, але й стерилізує середовище, зменшуючи ризик бактеріального зараження та створюючи оптимальні умови для дріжджових клітин.

1.3. Процес зброджування

Зброджування є ключовим біохімічним етапом у виробництві етилового спирту, під час якого цукри, що містяться в підготовленому суслі, перетворюються на етиловий спирт за участі дріжджових ферментів. Реакція зброджування проходить в анаеробному середовищі, у спеціалізованих апаратах — бродильних чанах.

До початку зброджування сусло охолоджується до температури, сприятливої для життєдіяльності дріжджів, після чого в нього вносять дріжджову культуру. Основна хімічна реакція, що відбувається в процесі, виглядає наступним чином:

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2 + \text{теплова енергія}$$

де: глюкоза ($C_6H_{12}O_6$) розкладається на етиловий спирт (C_2H_5OH); вивільняється вуглекислий газ (CO_2) і теплова енергія.

Підтримання температури у межах 30–32 °C є критичним для стабільного перебігу зброджування. При підвищенні температури до 35 °C і вище активність дріжджів суттєво знижується, що негативно впливає на якість та обсяг продукції. Саме тому бродильні чани оснащуються системами охолодження, змішуванням та механізмами для відведення газів.

Процес зброджування може здійснюватися періодичним або безперервним способом. Безперервне зброджування є більш раціональним у виробничому плані, оскільки забезпечує стабільний вихід продукції при менших енерговитратах.

У результаті завершення зброджування утворюється бражка, яка містить близько 8–10 % об’ємних часток спирту. Ця суміш далі передається на стадію перегонки для виділення сирцевого спирту.

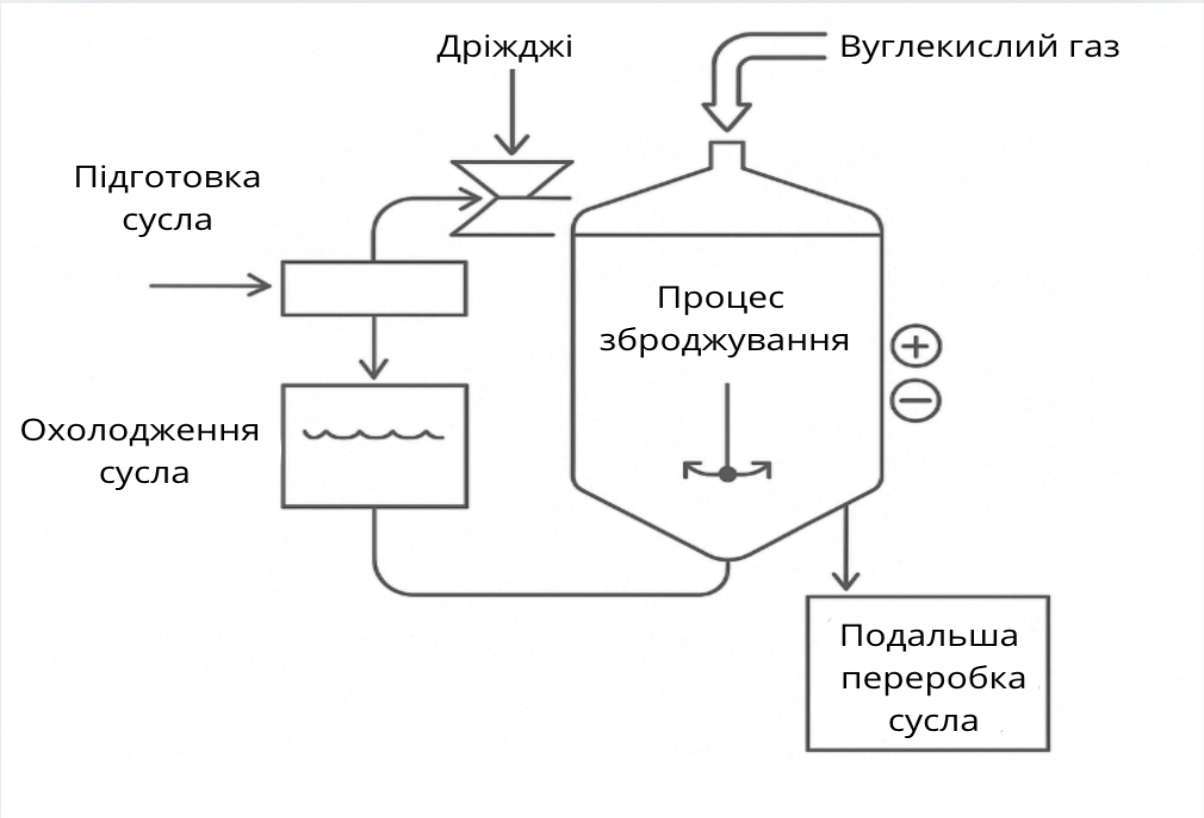


Рисунок 1.2. – Схематичне зображення зброджувального процесу на спиртовому підприємстві

Отже, ефективність зброджування визначається багатьма чинниками: якістю сировини, стабільністю мікрофлори, дотриманням температурного режиму та характеристиками бродильного обладнання, зокрема головного бродильного чану.

1.4. Ректифікація спирту

Ректифікація спирту – це складний фізико-хімічний процес багаторазового випаровування та конденсації, який дозволяє відокремити етанол від води та супутніх домішок, досягнувши високої чистоти продукту — до 96,6% об. спирту.

Схема, яку ви надали, зображує **ректифікаційну колону** — основний елемент цього процесу. Розглянемо її основні функціональні частини та принцип роботи:

Структура колони

1. **Кип’ятильник (куб)** – розташований у нижній частині колони. Саме тут здійснюється нагрівання вихідної сировини (спиртовмісної рідини або браги). У результаті нагрівання утворюються пари етанолу, які прямують угору по колоні.

2. **Колона з тарілками або насадкою** – центральна частина пристрою, в якій відбувається фракціонування пари. Кожен ярус (тарілка) забезпечує часткову конденсацію та подальше випаровування рідинної фази. Завдяки цьому відбувається поступове збагачення пари етанолом і одночасне видалення більш важких (менш летких) домішок.

3. **Дефлегматор (верхній теплообмінник)** – охолоджує частину пари, що піднімається, перетворюючи її назад у рідину (флегму). Ця флегма стікає вниз по колоні, зустрічаючись з висхідними парами та додатково очищаючи їх.

4. **Флегмовий зворотний потік** – забезпечує рекурсивне очищення. Чим більша частка флегми повертається, тим ефективніше йде розділення компонентів.

5. **Відбір готового продукту** – найчистіша фракція (етанол високої концентрації) забирається у верхній частині установки. У нижній частині залишаються залишкові речовини: вода, сивушні масла та інші домішки.

РОЗДІЛ 2 ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА СПИРТУ

2.1. Опис технологічної лінії для виробництва спирту

Виробництво етилового спирту – це цілий ланцюжок етапів, кожен з яких важливий для того, щоб на виході ми отримали якісний продукт. Давайте розберемо, що відбувається на кожному етапі технологічної лінії.

Підготовка сировини

Все починається із зерна або іншої крохмалевмісної сировини. Його спочатку подрібнюють – це як зробити борошно. Потім додають воду та підігрівають – у результаті крохмаль переходить у розчинну форму. Далі йде процес оцукрення: додаються ферменти або кислоти, які «розбивають» крохмаль на прості цукри – ті, що дріжджі люблять найбільше.

Бродіння (ферментація)

Солодку суміш охолоджують і додають дріжджі. Вони починають «їсти» цукор і перетворювати його на спирт та вуглекислий газ. Це як міні-пивоварня: процес триває кілька днів, і на виході маємо бражку з низьким вмістом спирту.

Перегонка

Тепер цю бражку нагрівають – спирт випаровується раніше за воду, тому його легко відокремити. Після першої перегонки ми отримуємо так званий «сирий спирт» – він уже містить більше етанолу, але ще не дуже чистий.

Ректифікація

Цей етап – як генеральне прибирання. Спирт-сирець потрапляє в ректифікаційну колону, де багато разів випаровується й конденсується. Це

дозволяє прибрати все зайве: сивушні масла, метанол, альдегіди… В результаті маємо високоякісний спирт – до 96,6% етанолу.

Додаткова очистка

Якщо потрібен майже чистий спирт (наприклад, для технічного чи медичного використання), його ще раз очищають або «висушують» спеціальними речовинами, які забирають залишки води.

Зберігання і фасування

Готовий продукт зберігається у великих резервуарах, а потім розливається в каністри, бочки або пляшки – залежно від того, куди він піде далі: у фармацевтику, харчову промисловість або навіть у парфумерію.

2.2. **Теплотехнологічне обладнання відділення бродіння**

Бродильні апарати (ферментатори)

Це основні резервуари, де й народжується спирт. Вони виглядають як великі металеві баки й зазвичай мають спеціальні сорочки для охолодження, вмонтовані мішалки й автоматизовану систему контролю температури. Усередині підтримується стабільна температура (зазвичай 30–35 °C), а також забезпечується герметичність, аби не потрапило зайве повітря й не завелися небажані бактерії. У ці резервуари подається готове сусло (з цукром), а також дріжджі. Саме тут вони починають свою роботу — перетворюють цукор у спирт і вуглекислий газ.

Без ферментаторів бродіння буде нестабільним або взагалі не почнеться. Усе обладнання розраховане на багатотонні об’єми і має працювати з точністю до градуса.

Охолоджувачі або теплообмінники

Після стадії затирання сусло виходить гарячим – іноді до 90 °C. Але дріжджі при такій температурі просто загинуть. Тому перед подачею в ферментатор сусло обов'язково потрібно охолодити – до 28–32 °C. Це робиться у теплообмінниках — спеціальних установках, де гаряча рідина проходить через труби, оточені холодною водою чи гліколем. Охолодження має бути швидким, але плавним, без різких перепадів температури.

Охолодження — це підготовка до бродіння. Якщо температура буде занадто висока, дріжджі не запрацюють, або зіпсується якість спирту.

Апарат для розмноження дріжджів (дріжджова станція)

Дріжджі не просто додають у бродильний бак з пляшки. Їх попередньо вирощують у спеціальних апаратах. Це як міні-інкубатор, де дріжджі активізуються, починають ділитися, накопичувати біомасу й готуються до «головної роботи».

Такі апарати підтримують стерильність, оптимальну температуру, а іноді й подачу повітря – щоб дріжджі швидко «прокинулися».

Активні, здорові дріжджі — це запорука швидкого й стабільного бродіння, без збоїв та «загнивань».

Система аерації

На ранній стадії вирощування дріжджів іноді потрібно трохи кисню — не для бродіння, а щоб дріжджі могли накопичити сили. Система аерації подає повітря або стерильний кисень у дріжджові розчини, підтримуючи їх активність.

Без короткої аерації дріжджі можуть бути млявими й не розпочати активне бродіння.

Система контролю температури і мішалки

Температура під час бродіння – критично важлива. Якщо вона зросте вище допустимого – дріжджі загинуть. Якщо занизька – бродіння буде повільним або зупиниться. Сучасні бродильні апарати оснащені датчиками, охолоджувальними рубашками (сорочками), іноді – автоматичними змішувачами. Мішалки допомагають розподіляти тепло й дріжджі рівномірно по всьому об'єму.

Стабільна температура = стабільне бродіння = якісний спирт.

2.3. **Брагоперегонні установки**

Перегінний куб (кип’ятильник)

Це перший і найважливіший елемент брагоперегонної установки — масивний металевий резервуар, у який надходить брага, тобто продукт бродіння, що містить спирт, воду та інші органічні речовини. Під дном куба або всередині його сорочки розташовані нагрівальні елементи — це може бути пар, гаряча вода, або електричні тени. Під час нагрівання температура рідини зростає, і леткі компоненти (в першу чергу — спирт) починають випаровуватись.Всередині куба можуть бути спеціальні насадки, пластини або перегородки, які забезпечують кращий розподіл тепла та запобігають спінюванню й перегріванню. Також це покращує стабільність потоку пари та підвищує енергоефективність процесу.

Це місце, де спирт відокремлюється від рідкої маси за рахунок температури. Початок процесу перегонки.

Брагоперегонна колона (з тарілками або насадками)

Після утворення, спиртові пари починають підніматися вгору через

спеціальну вертикальну конструкцію – колону. Усередині колони встановлені **контактні елементи** – це можуть бути тарілки (перфоровані металеві диски) або насадки (структуровані сітки, спіралі чи кільця). Саме на них відбувається перше очищення пари – цей процес **називається** фракціонуванням**.**

Часткове очищення спиртових парів, початкова сепарація домішок. Формує основу для майбутньої ректифікації

Дефлегматор (теплообмінник)

Це елемент, що розташовується у верхній частині колони й виконує роль своєрідного «контролера». Після того, як пари піднялися по колоні, вони потрапляють у дефлегматор, де частково охолоджуються.

Завдяки охолодженню, деякі з компонентів пари (ті, що мають вищу температуру конденсації) **переходять назад у рідкий стан** і спускаються вниз по колоні. Цей процес називається **поверненням флегми**. Решта пари — найбільш леткі речовини (переважно етанол) — продовжують шлях уперед.

Це своєрідне **внутрішнє очищення**, яке значно підвищує якість кінцевого продукту.

Стабілізація температурного режиму у верхній частині колони, покращення фракційного розділення парів.

Холодильник (конденсатор)

Це останній етап у ланцюжку брагоперегонки. Пари, які пройшли через дефлегматор, надходять у холодильник — пристрій, у якому вони остаточно охолоджуються й перетворюються на рідину**.**

Холодильник працює за принципом теплообміну: всередині проходить пара, а зовні – холодна вода або інший теплоносій. У результаті ми отримуємо

спирт-сирець – рідину, яка містить від 25 до 35% етанолу, і яку далі направляють на ректифікацію для доведення до високої чистоти.

Перетворення очищеної пари в рідкий спирт для подальшого очищення або використання.

2.4. **Ректифікаційні колони**

Якщо брагоперегонна установка – це перший фільтр, що «відсікає грубі домішки», то ректифікаційна колона – це справжня лабораторія тонкого очищення спирту, де кожна крапля проходить через десятки міні-перевірок, перш ніж стати готовим продуктом.

Усе відбувається в межах високої вертикальної конструкції – схожої на «спиртову вежу». І хоча вона може виглядати просто, всередині працює надточний фізико-хімічний механізм.

Основна ректифікаційна колона (етанольна)

Це серце всієї системи. Сюди надходить спирт-сирець – рідина з приблизно 25–35% етилового спирту. Знизу в колоні подається тепло – зазвичай це пара під тиском. В результаті рідина починає випаровуватись, і пари рухаються вгору по колоні.

Усередині колони встановлені тарілки або насадки – це як своєрідні «етапи очищення». На кожному з них частина пари конденсується, а потім знову випаровується, що дає змогу поступово відокремлювати шкідливі та небажані домішки.

Уявіть: це як якщо б ви кожен раз переливали воду з однієї склянки в іншу, залишаючи на дні осад. І так – десятки разів. Саме так спирт очищується на кожному рівні.

Колона епіурації (для легколетких домішок)

У верхній частині системи працює ще одна важлива колона — її завдання полягає в тому, щоб відловити найнебезпечніші леткі домішки, які можуть бути навіть шкідливими для здоров’я. Це, зокрема, метанол, альдегіди, ацетон.

Ці речовини мають нижчу температуру кипіння, ніж етиловий спирт, тому вони йдуть у парову фазу першими. Їх спеціально відводять у бік, ізолюють і не допускають у кінцевий продукт.

Колона сивушна (для важких домішок)

У протилежному напрямку — в нижній частині колони — накопичуються важчі компоненти, такі як сивушні масла, що мають вищу температуру кипіння. Їх відбирають у спеціальну частину системи — сивушну колонну.

Вона працює як «страж позаду»: усе, що не встигло випаруватись, затримується й виводиться окремо. Завдяки цьому кінцевий продукт не матиме ні неприємного запаху, ні побічних смаків.

Дефлегматор і система повернення флегми

Щоб спирт очищувався максимально ефективно, частину парів навмисно охолоджують і повертають назад у рідку фазу. Це робить дефлегматор – спеціальний теплообмінник. Він частково конденсує пару у верхній частині колони, і ця рідина стікає вниз у вигляді флегми.

Флегма змішується з парами, які ще піднімаються, і додатково відмиває їх від домішок. Це як якщо б ви поливали пилюку водою зверху – вона краще осідає й не піднімається.

Конденсатор (холодильник)

На виході з усієї системи пари, які пройшли всі рівні очищення,

потрапляють у конденсатор. Це останній крок: тут пари охолоджуються й переходять у рідкий стан. І саме в цей момент народжується чистий етиловий спирт — той самий, що далі розливають у бочки або пляшки.

РОЗДІЛ 3 КОНСТРУКЦІЯ ТА ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ БРОДИЛЬНИХ ЧАНІВ

В установках безперервного бродіння основний процес зброджування цукристих речовин до 5-6° здійснюється в головних бродильних чанах, у яких подають дріжджі та охолоджене сусло з теплообмінника. З головних бродильних чанів середовище, що бродить, безупинно перетікає в усі наступні чани бродильної батареї. Конструктивна відмінність головних апаратів і трьох наступних за ними від хвостових чанів полягає в тім, що вони постачені змійовиками або виносними теплообмінниками для відводу тепла, що виділяється в процесі шумування.

Бродильний апарат (рис. 2.6) являє собою циліндр із конічним днищем, виготовлений зі сталі товщиною 6...8 мм. Сусло в ньому зброджується під дією ферментів дріжджів. Усередині апарата змонтований змійовик зі сталевих труб діаметром 51...76 мм для відводу теплоти, що виділяється при бродіння маси. Маса та дріжджі подаються через штуцер. Вуглекислота, що виділяється при бродіння, подається через патрубок.

Для огляду і ремонту апарат оснащений люками. За процесом бродіння спостерігають через оглядове віконце за допомогою світильника. Термометри встановлюють у гільзи. До штуцера підключають гідрозатвор, що запобігає утворенню вакууму при пропарюванні апарата парою. При безперервно-проточному способі бродіння на переточних трубах встановлюють дисковий затвор, за допомогою якого апарат відключається від батареї для мийки й дезінфекції. Конструкція затвора запобігає застою бражки, що забезпечує стерильність процесу бродіння.

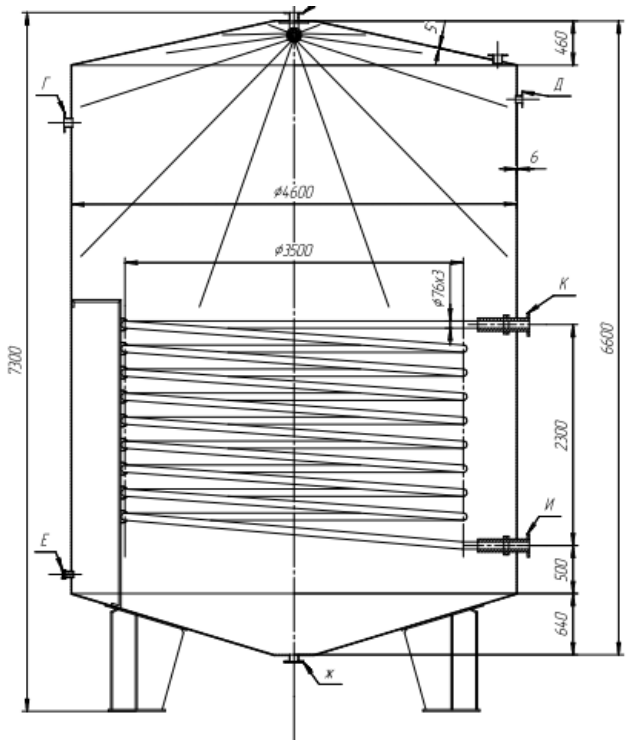


Рисунок 3.1 – Загальний вид бродильного чану

Механізована мийка апарата водою й розчинами антисептиків здійснюється за допомогою мийного апарата. Апарат складається з розподільної голівки й двох колекторів, оснащених соплами. Колектори виготовлені із труб діаметром 50...76 мм.

Поверхня охолодження може бути розміщена поза бродильним апаратом, У цьому випадку поруч із апаратом установлюють теплообмінник, через який зброджену масу прокачують насосом.

При періодичному способі бродіння обсяг апарата розраховують із умови заповнення одного апарата протягом 7...8 год. Перегінні труби в апаратах, починаючи із третього, кріпляться на різних рівнях по висоті таким чином, щоб відстань між місцями закріплення труб двох будь-яких сусідніх апаратів становлять 0,1 м. Апарат установлюють на металевих стійках, висота від підлоги до днища 0,8...1,2 м.

У чані два люки: у кришці – для контролю й миття апарата та люк у циліндричній частині для видалення вуглекислоти після перекачування з

апарата продукту при профілактичному огляді нижньої частини чана. Безпосередньо під верхнім люком розміщені сходи для обслуговування апарата при експлуатації й ремонті. Патрубок у днищі призначений для спуска продукту, промивних вод і подачі пари при стерилізації апарата. Чан постачений мановакуумметром, гідрозатвором (запобіжним клапаном) з вакуум-переривником, які виключають можливість розриву апарата у випадку підвищення тиску або зминання при утворенні вакууму. Виготовляють головні бродильні чани зі сталі Ст 3.

Вихідні дані для розрахунків.

Добова продуктивність заводу С = 2000 дал.

Внутрішній діаметр чана $D_{вн}$ = 2 м

Температура повітря в приміщенні бродильного відділення 15 °С.

Температура стінок чана 35 °С.

Температура охолоджуючої води t_1 = 10 °С, в змійовику вона нагрівається до t_2.= 22 °С.

4 РОЗРАХУНКИ ГОЛОВНОГО БРОДИЛЬНОГО ЧАНА

4.1 Розрахунок геометричних розмірів чана

Корисний (робочий) об'єм бродильної батареї визначимо за формулою, $м^3$:

$$V^p_{бат} = 2,5 \cdot C\ \sigma_{сус} = 2,5 \cdot 2000 \cdot 0,125 = 625,$$

де 2,5 – тривалість бродіння, діб;

С – добова видатність заводу по спирту-сирцю, дал;

$\sigma_{сус}$ – питома витрата солодкого сусла на одержання 1 дала спирту ($\sigma_{сус} = 0,125$ $м^3$/дал).

Робочий об'єм одного головного бродильного чану, $м^3$:

$$V^p_{год} = V^p_{бат} / n = 625/ 8 = 78,1,$$

де n = 8 – число чанів в бродильній батареї (з вихідних даних).

Повний об'єм ($м^3$) чану при коефіцієнті заповнення $\eta_з = 0,9$:

$$V_{год} = V^p_{год} / \eta_з = 78,1 / 0,9 = 86,8.$$

Внутрішній діаметр чана приймаємо $D_{вн} = 2$ м (з вихідних даних). Висота конічного днища складає, м

$$h_1 = 0,14\ D_{вн} = 0,14 \cdot 2 = 0,28.$$

Об'єм конічного днища, $м^3$:

$$V_{дн} = (\pi\ h_1 /3)\ (R^2 + Rr + r^2) = (3,14 \cdot 0,28 / 3) \cdot (1^2 + 1 \cdot 0,2 + 0,2^2) = 0,36,$$

де $R = D_{вн} / 2$ – радіус великої основи конуса, м;

r – радіус усіченої вершини конуса, м (з конструктивних міркувань r = 0,2 м).

Об’єм конічної кришки визначають як і об’єм конічного днища, беручи до уваги, що висота конічної кришки $h_2 = 0,1\ D_{вн} = 0,1 \cdot 2 = 0,2$ м.

Об’єм конічної кришки, м^3:

$$V_{кр} = (\pi\ h_2 /3)\ (R^2 + Rr + r^2) = (3,14 \cdot 0,2 / 3) \cdot (+0,6^2 + 0,6 \cdot 0,2 + 0,2^2) = 0,257.$$

Об’єм циліндричної частини чана, м^3:

$$V_ц = V_ч – (V_{дн} + V_{кр}) = 86,8 – (0,36 + 0,257) = 86,18.$$

Висота циліндричної частини чана, м:

$$H_ц = V_ц / F_ц = 86,65 / 12,56 = 6,9,$$

де $F_ц = \pi\ D_{вн}^2 = 3,14 \cdot 2^2 = 12,56$ – площа перетину циліндричної частини, м^2 .

Загальна висота чана, м:

$$H = h_1 + H_ц + h_2 = 0,28 + 6,9 + 0,2 = 7,38.$$

Площа поверхні чана, м^2:

$$F_ч = \pi\ D\ H_ц + \ \pi\ [2(R^2 + r^2) + (R + r) \cdot (h_1 + h_2)] = 3,14 \cdot 2 \cdot 6,9 +$$
$$+ 3,14[2(2^2 + 0,2^2) + (2 + 0,2) \cdot (0,28 + 0,2)] = 72.$$

4.2 Втрати теплоти бродильним чаном

При розрахунку втрат теплоти сталевим герметичним чаном, який встановлено в неопалюваному приміщенні бродильного відділення, враховують, що поверхня нагрітого апарата втрачає теплоту в довкілля конвекцією.

Втрата тепла з випромінюванням визначається за рівнянням, Вт:

$$Q_{пр} = C_{1–2}\ \varphi\ F[(T_1/100)^4 – (T_2/100)^4],$$

где C_{1-2} – коефіцієнт випромінювання, що залежить від ступеня чорнуватості та взаємного розташування випромінюючих поверхонь, Вт/(м^2·К^4);

φ – кутовий коефіцієнт;

F – поверхня випромінювання, м^2;

T_1, T_2 – абсолютні температури поверхні більш та менш нагрітого тіл, К.

При визначенні коефіцієнта випромінювання C_{1-2} необхідно приймати до уваги наступне. Якщо апарат, що має поверхню випромінювання F_1, перебуває усередині приміщення з поверхнею випромінювання F_2, то кутовий коефіцієнт φ = 1, а у розрахункове рівняння підставляється величина поверхні апарата $F_ч = F_1$ та

$$C_{1-2} = (1/C_1) +(F_1 / F_2) [(1/C_2) – (1/C_ч)],$$

де $C_1 = ε_1$ $C_ч$ = 0,85·5,7 = 4,85 – коефіцієнт випромінювання стінок апарата;

$C_2 = ε_2 \cdot C_ч$ – коефіцієнт випромінювання поверхонь стін приміщення;

$C_ч$ – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, $C_ч$ = 5,7 Вт/(м^2·К^4);

$ε_1$, $ε_2$ – ступінь чорнуватості поверхонь апарата та стін приміщення; середнє значення ступеня чорнуватості для окисленої сталі ε = 0,85.

Якщо відношення випромінюючих поверхонь F_1/F_2 дуже мало, те коефіцієнт випромінювання C_{1-2} можна прийняти рівним C_1. Тоді C_{1-2} = 4,85. Приймаємо температуру повітря в неопалюваному приміщенні бродильного відділення 15 °С. Температура стінок чана – 35 °С. Тоді

$$Q_{пр} = C_{1–2}\ φ\ F[(T_1/100)^4 – (T_2/100)^4] = 4{,}85·1·72·[((35 + 273) / 100)^4 –$$
$$– ((15 + 273) / 100)^4] = 7401 \text{ Вт}.$$

Поверхня нагрітого апарата (чана) втрачає тепло в навколишній простір не тільки випромінюванням, але також і конвекцією. Втрата тепла може бути знайдена за наступним рівнянням, Вт:

$$Q_{\Sigma} = \alpha F (t_{ст} – t_{в}) = 11,14 \cdot 72 \cdot (26 – 15) = 16042,$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням і конвекцією, Вт/(м^2·град).

Коефіцієнт тепловіддачі α при розрахунку втрати тепла для апаратів, що перебувають у приміщенні та мають температурі стінок не вище 150 °С, можна приблизно визначити за наступним рівнянням, Вт/(м^2·град):

$$\alpha = 9,74 + 0,07 \Delta t = 9,74 + 0,07 \cdot (35 – 15) = 11,14,$$

де Δt – різниця температур поверхні стінки апарата та навколишнього повітря.

4.3 Визначення поверхні охолодження для бродильного чану

Під час бродіння на кожен кілограм зброджені мальтози виділяється 613,8 кДж тепла. Тепло, що виділяється, необхідно відводити охолоджуючою водою. При цьому частина цього тепла втрачається через стінки чана в навколишній простір, частина його витрачається на нагрівання солодкого сусла до температури бродіння (якщо сусло має температуру нижче оптимальної температури бродіння) і йде на утворення пар спирту та води, що виходить разом із вуглекислотою. Кількість тепла, що залишається, повинно бути передано воді, що протікає по трубах охолоджуючих змійовиків:

$$Q = Q_1 – Q_2 – Q_3 – Q_4,$$

де Q – теплове навантаження на охолоджуючий змійовик, кДж/год;

Q_1 – тепло, що виділяється при зброджуванні, кДж/год;

Q_2, Q_3, Q_4 – кількість тепла, що втрачається відповідно в навколишній простір, що витрачається на нагрівання сусла та випарювання води й спирту, кДж/год.

Для визначення кількості тепла, що виділяється при бродінні, $Q_{1\text{-}4}$ здійснюють наступні обчислення. Загальна тривалість бродіння при безперервнопоточному методі дорівнює 60-62 год, з яких близько 20 год доводиться на період головного (найбільш інтенсивного) бродіння в головних чанах. Під час головного бродіння зброджується приблизно 90 % всіх речовин. Якщо прийняти вміст зброджуваних речовин у суслі рівним 12,4 % , то протягом однієї години густина сусла буде знижуватися в середньому на (12,4·90) / (20·100) = 0,56 %.

Кількість зброджуваної рідини в чані дорівнює

$$G = V^p_{год}\, \rho_c, = 78{,}1 \cdot 1076 = 84035 \text{ кг},$$

де $V^p_{год}$ – робочий об'єм чана, $м^3$;

ρ_c – густина сусла, кг/$м^3$, приймаємо ρ_c = 1076 кг/$м^3$.

Тоді

$$Q_1 = (G \cdot 0{,}56 \cdot 613{,}8) / 100 = (84035 \cdot 0{,}56 \cdot 613{,}8) / 100 =$$

$$= 288853{,}8 \text{ кДж/год}.$$

Втрату тепла в навколишній простір визначимо як, кДж/год

$$Q_2 = Q_\Sigma = 16042 \cdot 3600 / 1000 = 57751,$$

де Q_Σ визначається вище в розрахунку.

Витрата тепла на нагрівання сусла не враховується (Q_3 = 0), так як в збродживачі сусло нагрівається до $t_{бр}$ = 26 °С.

Втрату тепла на випар води й спирту приймають 6-8 % від загальної кількості тепла, яке виділяється при бродінні:

$$Q_4 = 0{,}06 \cdot Q_1 = 0{,}06 \cdot 288853{,}8 = 17331 \text{ кДж/год}.$$

Тоді кількість теплоти, яке необхідно передати через поверхню теплопередачі охолоджуючій воді:

$$Q = Q_1 – Q_2 – Q_4 = 288853,8 – 57751 – 17331 = 213773 \text{ кДж/год.}$$

Охолоджуюча вода має температуру t_1 = 10 °С, а в змійовику вона нагрівається до t_2.=22 °С.

Витрата води визначається, м^3/год:

$$W = Q / [C_в (t_2 – t_1) 1000] = 213773 / [4,187 (22 – 10)\cdot 1000] = 4,25,$$

де $C_в$ – питома теплоємність води, $C_в$ = 4,187 кДж/(кг·К).

Площа поверхні охолодження змійовика, м^2:

$$F_з = Q/(k\cdot\Delta t\cdot 3,6) = 213773 / (465\cdot 8,7\cdot 3,6) = 14,68,$$

де k – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м·К). На підставі експериментальних даних k = 465 Вт/(м·К);

Δt – середня різниця температур бражки та охолоджуючої води

$$\Delta t = (\Delta t_б – \Delta t_м) / \ln (\Delta t_б / \Delta t_м) = (16 – 4) / \ln (16 / 4) = 8,7 \text{ °С,}$$

де $\Delta t_б = t_{бр} – t_1 = 26 – 10 = 16$ °С – різниця температур бражки та води, що подається,°С;

$\Delta t_м = t_{бр} – t_2 = 26 – 22 = 4$ °С – різниця температур бражки та води, що відходить, °С.

Варто взяти до уваги, що площа поверхні охолодження змійовика на 1 м^3 місткості чана повинна бути не менш 0,25 м^2. З огляду на те, що робочий об’єм чана $V^p_{год}$ = 78,1 м^3, мінімальна площа поверхні змійовика складе

$$F_з = 78,1\cdot 0,25 = 19,53 \text{ м}^2.$$

Так як розрахункове значення становить 14,68 м^2, то обираємо $F_з$ = 19,53 м^2.

Холодильні змійовики при безперервнопоточному зброджуванні встановлюються в перших 3 – 4 чанах бродильної батареї.

Загальна довжина труб змійовика $L_{зм}$ розраховується за формулою, м

$$L_{зм} = F_з / (\pi\, d_{ср}) = 19{,}53 / (3{,}14 \cdot 0{,}073) = 85{,}2,$$

де $d_{ср} = (d_н + d_{вн}) / 2 = = (0{,}076 + 0{,}07) / 2 = 0{,}073$ м – середній діаметр труб, дорівнює половині суми їх внутрішнього й зовнішнього діаметрів.

Довжина одного витка змійовика, м:

$$\ell_{зм} = \sqrt{(\pi\, D_{зм})^2 + h^2} = \sqrt{(3{,}14 \cdot 3)^2 + 0{,}25^2} = 9{,}42,$$

де $D_{зм}$ – внутрішній діаметр витка змійовика, м (звичайно приймають біля 3 м); h – крок витка, м (h = 0,25 м).

Число витків у змійовику

$$n = L_{зм} / \ell_{зм1} = 85{,}2 / 9{,}42 = 9.$$

Витрата пари складає 10 – 12 кг на 1 $м^3$ чана при 30-хвилинному пропарюванні. Тоді для чана об’ємом 78,1 $м^3$ необхідна кількість пари на цикл роботи чану складає

$$D_п = 10 \cdot V_ч = 10 \cdot 86{,}8 = 868 \text{ кг/цикл}.$$

Результати розрахунку зводимо в таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати теплового розрахунку головного бродильного чану

Параметр	Величина
Втрати теплоти в навколишнє середовище, кДж/год	57751
Витрати теплоти на нагрівання сусла, кДж/год	0

Закінчення табл. 4.1

Витрати теплоти на випарювання спирту та води, кДж/год	17331
Тепло, що виділяється при зброджуванні, кДж/год	288853,8
Кількість теплоти, яке необхідно, передати охолоджуючій воді, кДж/год	213773
Площа поверхні охолоджуючого змійовика, $м^2$	19,53
Кількість охолоджуючої води, $м^3$/год	4,25
Кількість пари на пропарювання чана, кг/цикл	868

4.4 Розрахунок чана на міцність

При розрахунку чана на механічну міцність товщину стінки найбільш напруженої нижньої частини чана визначають за формулою, що й для апаратів, які працюють під тиском:

$$\delta_{ц} = \frac{p_{в} \cdot D}{2\varphi[\sigma] - p_{в}} + C_{ц} = \frac{0{,}0723 \cdot 2}{2 \cdot 0{,}9 \cdot 134 - 0{,}0723} + 0{,}003 = 0{,}0041 \text{ м},$$

де p – розрахунковий тиск, МПа;

D – діаметр корпусу, м;

φ – розрахунковий коефіцієнт міцності;

[σ] – припустима напруга, МПа;

$С_ц$ – збільшення до товщини стінки, м.

Розрахунковий тиск:

$$p = 0{,}98 \cdot 10^{-5} \cdot \rho_{м} \cdot H_{р} = 0{,}98 \cdot 10^{-5} \cdot 1076 \cdot 6{,}49 = 0{,}0684 \text{ МПа}.$$

Висота шару рідини (маси, що зброджується) в апарату:

$$H_р = \eta_з \cdot H_ц + h_1 = 0,9 \cdot 6,9 + 0,28 = 6,49 \text{ м.}$$

Висота стовпа води в апарату при гідравлічних випробуваннях (при повному заповненні):

$$H'_р = H_ц + h_1 + h_2 = 6,9 + 0,28 + 0,2 = 7,38 \text{ м.}$$

Тиск, створюваний стовпом рідини:

$$p_в = 0,0098 \cdot 7,38 = 0,0723 \text{ МПа.}$$

Приймаємо $\delta_ц = 6$ мм. Товщину верхньої частини чану приймаємо $\delta'_ц = 5$ мм.

Товщина стінки конічного днища

$$\delta_{дн} = \frac{p \cdot D У}{4\varphi[\sigma]} + C_{дн} = \frac{0,0723 \cdot 2 \cdot 8,2}{4 \cdot 0,9 \cdot 134} + 0,0035 = 0,006 \text{ м,}$$

де У – фактор форми днища, його величина залежить від кута нахилу утворюючої конусу донця до вертикалі α та співвідношення R_0 / D (радіусу закруглення переходу утворюючої донця в вертикальну стінку та внутрішнього діаметру циліндричної частини апарату).

Розраховуємо кут нахилу утворюючої конуса днища до вертикалі

$$\cos \alpha = h_1 / l_1 = 0,28 / 0,96 = 0,292, \alpha = 73°.$$

Для невідбортованого днища приймаємо $R_0/D = 0,01$.

За графіком визначаємо значення У = 8,2. З міркувань забезпечення жорсткості днища приймаємо $\delta_{дн} = 8$ мм.

ВИСНОВОК

1. У даній роботі досліджено технологічну схему та ключові етапи виробництва етилового спирту з крохмалевмісної сировини. Висвітлено принцип роботи, будову та експлуатаційні особливості теплотехнологічного обладнання, що використовується на спиртових підприємствах.

2. Здійснено аналіз конструктивних рішень і технічних характеристик бродильних чанів, що забезпечують ефективне зброджування цукристих речовин у спиртовій промисловості.

3. Проведено конструктивний розрахунок головного бродильного чану для підприємства з добовою продуктивністю 2000 дал. Визначено основні геометричні розміри чану та обґрунтовано необхідність встановлення восьми апаратів для забезпечення безперервного виробництва. Об’єм чану – 86,18 м^3, площа поверхні чана – 72 м^2.

4. Виконано тепловий розрахунок чану, розраховано його тепловий баланс. Загальні теплові втрати склали 75082 кДж/год, при цьому теплота, що утворюється під час зброджування, дорівнює 288854 кДж/год. Розраховано кількість охолоджуючої води для передачі 213773 кДж/год теплоти, що складає 4,25 м³ на годину. Визначено, що мінімальна площа поверхні змійовика складає 19,53 м^3 при довжині 9,42 м. Також виконано розрахунок кількості пари для пропарювання чану, що склало 868 кг/цикл. Проведено перевірку на механічну міцність і визначено необхідну товщину стінок апарата – 6 мм, днища – 8 мм.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Павленко І. М., Лисенко Л. А. Основи теплотехніки та теплотехнічні вимірювання. К.: Либідь, 2020. 276 с.

2. Ткаченко О. І. Теплотехнічні процеси в харчовій промисловості. Харків: ХНАУ, 2021. 193 с.

3. Білоконь С. А. Теплообмінні процеси і апарати. К.: Вища школа, 2018. 336 с.

4. Клімов А. А., Швець О. В. Основи процесів та апаратів хімічної технології. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. 312 с.

5. Мисик О. П., Дьяків О. Ю. Проектування підприємств харчової промисловості. Львів: Видавництво ЛНТУ, 2019. 250 с.

6. Осипенко О.П., Таран В.М., Доломакін Ю.Ю. Технологічне обладнання галузі. Виробництво етилового спирту шляхом зброджування: конспект лекцій для студентів. Київ: НУХТ, 2012. 48 с.

7. Ареф’єв В. А. Основи біотехнології. Харків: НТУ «ХПІ», 2021. 198 с.

8. Жуков С. Г. Процеси і апарати харчових виробництв. Одеса: ОНАХТ, 2022. 305 с.

9. Власенко С. І. Теплові розрахунки енергетичного обладнання. Київ: УкрНДІпроект, 2018. 228 с.

10. Perry R.H., Green D.W. Perry’s Chemical Engineers Handbook. 9th ed. New York: McGraw-Hill, 2018. 2640 p.

11. Smith J.M., Van Ness H.C., Abbott M.M. Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics. 8th ed. New York: McGraw-Hill, 2017. 784 p.

12. Seader J.D., Henley E.J., Roper D.K. Separation Process Principles. 4th ed. Wiley, 2016. 912 p.

13. Coulson J.M., Richardson J.F. Chemical Engineering: Volume 6: Chemical Engineering Design. 6th ed. Butterworth-Heinemann, 2019. 864 p.

14. Westerterp K.R., van Swaaij W.P.M., Beenackers A.A.C.M. Chemical Reactor Design and Operation. Wiley, 2017. 736 p.

15. Towler G., Sinnott R. Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design. 2nd ed. Elsevier, 2013. 1320 p.