

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет  
Кафедра технологічних процесів та обладнання переробних і харчових  
виробництв

Допущений до захисту:  
завідувач кафедри  
д.т.н., професор Севостьянов І.В.

---

«\_\_\_» грудня 2019р.

**ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ БРОДІННЯ В  
ПЕРЕРОБНОМУ ВИРОБНИЦТВІ**

Робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр»  
зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»

Виконав: студент групи 61-МП  
Леочко Андрій Володимирович

---

Керівник: к.т.н., доцент  
Полевода Юрій Алікович

---

ВІННИЦЯ - 2019

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра технологічних процесів  
та обладнання переробних і  
харчових виробництв

Інженерно-технологічний  
факультет

Затверджую:

зав. кафедри ТПОПХВ

\_\_\_\_\_ д.т.н., проф. І.В. Севостьянов

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2019 р.

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ  
студенту Леочку Андрію Володимировичу

на тему:

«Інтенсифікація процесу бродіння в переробному виробництві»

затверджену наказом від 20 травня 2019 р. № 106 - М

Вихідні дані для підготовки роботи:

1. Методичні вказівки з виконання магістерської роботи
2. План магістерської роботи.
3. Підручники і навчально-методичні посібники.
4. Наукові видання (монографії, книги, збірники, журнали, методики, матеріали ЦНТЕІ, тощо).
5. Методика економічної оцінки результатів досліджень.
6. Дані власних досліджень, одержаних в попередній період.

Календарний план виконання магістерської роботи

Структура роботи		Обсяг сторінок	Термін підготовки	Підпис керівника
Анотація		1-2	20.08.19 р	
Вступ		2-5	23.08.19 р	
РОЗДІЛ 1	Огляд і аналіз особливостей бродильних технологій	20-35	27.08.19 р	
РОЗДІЛ 2	Об'єкти, методи і результати досліджень	20-35	10.09.19 р	
РОЗДІЛ 3	Взаємозв'язки між геометричними параметрами апаратів, термодинамікою середовищ та мікробіологічними процесами в технологіях бродіння пива	20-25	01.10.19 р	
РОЗДІЛ 4	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	10-15	01.11.19 р	
Загальні висновки		1-2	05.11.19 р	
Список використаної літератури		2-4	07.11.19 р	

Термін подання роботи на кафедру

для попереднього захисту

«    » грудня 2019 р.

Завдання видав керівник «20» травня 2019 р.

## ЗМІСТ

С

### АНОТАЦІЯ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД І АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ БРОДИЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ .....	10
1.1 Загальні положення.....	10
1.2 Особливості збродження середовищ в хлібопекарній галузі.....	11
1.3 Особливості збродження цукровмістких середовищ в технологіях виробництва етилового спирту.....	13
1.4 Висновки до першого розділу.....	14
РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТИ, МЕТОДИ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	17
2.1 Загальні положення. Методики досліджень та опис експериментальної установки .....	17
2.2 Визначення гідродинамічних параметрів газорідинних систем з повітряною фазою .....	20
2.3 Дослідження газорідинних систем з діоксидом вуглецю .....	24
2.4 Експериментальні дослідження газонасичених тістових заготовок .....	26
2.5 Висновки до другого розділу.....	29
РОЗДІЛ 3. ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКИ МІЖ ГЕОМЕТРИЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ АПАРАТІВ, ТЕРМОДИНАМІКОЮ СЕРЕДОВИЩ ТА МІКРОБІОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ В ТЕХНОЛОГІЯХ БРОДІННЯ ПИВА.....	31
3.1 Загальні положення фізико-хімічних і мікробіологічних взаємодій.....	31
3.2 Геометрія технологічних апаратів і температурна стабілізація середовищ.....	33
3.3 Визначення геометричних параметрів технологічних апаратів для збродження середовищ .....	35
3.4 Енергетичні імпульси в середовищах бродильних апаратів .....	53
3.5 Висновки до третього розділу.....	73

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	74
4.1 Аналіз потенційних небезпек та виробничих шкідливостей.....	74
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	85
ДОДАТКИ.....	90

## АНОТАЦІЯ

Леочко А.В. Інтенсифікація процесу бродіння в переробному виробництві. – Рукопис.

Робота на здобуття освітнього ступеня магістр зі спеціальності 133 – «Галузеве машинобудування». – Вінницький національний аграрний університет. – Вінниця, 2019.

В магістерській роботі виконано теоретичні узагальнення особливостей гідродинаміки і визначення гідродинамічних параметрів середовищ з самогенеруванням диспергованої газової фази.

Визначено впливи геометричних параметрів технологічних апаратів на гідродинаміку середовищ, біохімічні процеси масообміну і можливості стабілізації термодинамічних параметрів систем. Вказані енергетичні трансформації відбуваються у повній відповідності до законів збереження. Показано, що енергетичний потенціал такої системи пов'язаний з величиною газоутримувальної здатності і тому з геометрією апаратів.

Розроблено математичну формалізацію перехідних процесів в умовах імпульсних енергетичних і фізичних впливів на газорідні середовища.

**Ключові слова:** бродильне виробництво, гідродинамічні параметри, газорідні системи, спиртове бродіння, мікробіологічні процеси, бродильні апарати.

## ANNOTATION

Leochko A. V. Intensification of fermentation process in processing industry.  
– The manuscript.

Work on obtaining educational degrees master's degree in the 133 – «Sector engineering». – Vinnytsia National Agrarian University. – Vinnitsia, 2019.

In the master's thesis theoretical generalizations of the hydrodynamics features and determination of the hydrodynamic parameters of the media with self-generation of the dispersed gas phase are performed.

Influences of geometrical parameters of technological devices on the hydrodynamics of media, biochemical processes of mass transfer and the possibility of stabilization of thermodynamic parameters of systems are determined. These energy transformations occur in full compliance with the laws of conservation. It is shown that the energy potential of such a system is related to the magnitude of the gasholding capacity and therefore to the geometry of the apparatus.

The mathematical formalization of transient processes under the conditions of impulse energy and physical influences on gas-liquid media is developed.

**Keywords:** fermentation production, hydrodynamic parameters, gas-liquid systems, alcoholic fermentation, microbiological processes, fermenters.

## ВСТУП

Важливими складовими в процесах трансформації циклічних енергомасових потоків є промислові процеси бродіння, на основі яких синтезуються органічні продукти. Технологіями на цій основі людство користується вже кілька тисяч років. Продукти бродіння за участю різної мікрофлори стають все більш важливими як нові джерела харчування [1, 15].

Розробка нової високоефективної апаратури бродильних виробництв з використанням вторинних енергетичних ресурсів, інтенсивним енерго- і масообміном, гомогенізацією зброджуваних середовищ, обмеженнями матеріальних втрат та підвищенням пропускної здатності забезпечує новітні перспективи розвитку відповідних галузей агропромислового комплексу України. Наявність математичного опису аналізу і синтезу систем є підґрунтям для виконання задач оптимізаційного синтезу [36].

Метою роботи є удосконалення процесів бродіння шляхом створення передумов нової високоефективної масообмінної апаратури для бродильних галузей АПК України.

### Завдання досліджень:

- розробити теоретичні узагальнення особливостей гідродинаміки і гідродинамічних параметрів середовищ з самогенеруванням диспергованої газової фази;
- визначити впливи геометричних параметрів технологічних бродильних апаратів на гідродинаміку газорідинних середовищ;
- розробити математичну формалізацію перехідних процесів в умовах імпульсних енергетичних і фізичних впливів на газорідинні середовища;
- здійснити експериментальну апробацію теоретичних моделей перехідних процесів;
- узагальнити і оцінити перспективи використання суміщених технологій зброджування цукровмісних середовищ та їх перегонки;
- здійснити теоретичну і експериментальну оцінку можливостей



застосування дискретних по тискам технологій в процесах зброджування опар і тіста.

Об'єкт дослідження: фізичні та гідродинамічні процеси, які відбуваються в харчових бродильних середовищах.

Предметом дослідження є харчові бродильні середовища і обладнання бродильних технологій.

Методи дослідження: використано методи математичного моделювання гідродинамічних та технологічних процесів бродильних виробництв і математико-статистичного аналізу результатів експериментів.

Наукова новизна одержаних результатів:

- встановлено, що раціональним шляхом підвищення енергетичної ефективності бродильних середовищ є використання самогенерованої диспергованої газової фази, розповсюдженої у повному об'ємі і такої, що створює нерівномірну по висоті структуру газотримувальної здатності;

- показано, що додатковим джерелом вторинних енергоресурсів в апаратах зі значним висотним габаритом є градієнт насичення рідинної фази діоксидом вуглецю у відповідності до закону Генрі;

- розроблено математичну формалізацію перехідних процесів в умовах імпульсних енергетичних і фізичних впливів на газорідинні середовища;

- розроблено оцінку взаємозв'язків геометричних параметрів апаратів та їх технологічних можливостей з точки зору інтересів стабілізації температурних параметрів середовищ;

- показана можливість впливів на газотримувальну здатність тістових заготовок і хлібопекарських виробів за рахунок накладання змінних тисків.

Практичне значення одержаних результатів.

Визначено раціональні співвідношення висот та діаметрів бродильних апаратів з точки зору інтересів досягнення стабілізації температурних параметрів середовищ.

Запропоновано принципові схеми модернізованих бродильних апаратів.

# РОЗДІЛ 1

## ОГЛЯД І АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ БРОДИЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

### 1.1 Загальні положення

Об'єднувальним елементом в назві «бродильні технології» є присутність трансформацій цукровмісної сировини у водних розчинах під дією дріжджів-цукроміцетів з утворенням етилового спирту і діоксиду вуглецю. Однак у більш повному переліку типів бродіння окрім спиртового розуміють молочнокисле, пропіоновокисле, мурашинокисле, маслянокисле та ацетоно-бутилове бродіння.

Відомо, що із трьох принципово можливих способів регенерації АТФ (дихання, бродіння та фотосинтез) бродіння є найпростішим. У зв'язку з цим у класичному визначенні бродіння – це такий метаболічний процес, у якому регенерується АТФ, а продукти розщеплення органічного субстрату можуть бути одночасно і донорами і акцепторами.

Органічний субстрат є джерелом енергії та вуглецю, а реакції синтезу АТФ є реакціями окислення [4, 12]. Від окисленого вуглецю клітина позбавляється, виділяючи  $\text{CO}_2$  в навколишнє середовище. Окремі етапи окислення являють собою дегідрування, за якого водень переноситься на НАД. Акцепторами водню, який міститься у вигляді НАДН, є проміжні продукти розщеплення субстрату. За рахунок НАДН ці проміжні продукти відновлюються, а продукти відновлення виводяться з клітини.

У процесах зброджування вуглеводів та інших субстратів утворюються такі продукти, як етанол, лактат, пропіонат, форміат, бутират, сукцинат, ацетат, н-бутанол, 2, 3-бутандіол, ацетон, 2-пропанол,  $\text{CO}_2$  та  $\text{H}_2$ .

Молекулярний кисень у процесах бродіння участі не приймає. Більшість мікроорганізмів, які здійснюють бродіння, є облігативними анаеробами або факультативними аеробами, здатними рости як у присутності кисню, так і без нього [6, 22].

Реалізація процесів бродіння супроводжується наступними особливостями, які можливо оцінювати недоліками:

- енергетичні втрати, пов'язані з синтезом діоксиду вуглецю;
- матеріальні втрати вуглецю зі складу органічних першоджерел;
- екологічні впливи на навколишнє середовище (по викидам CO<sub>2</sub>);
- додаткові енергетичні та матеріальні витрати на температурну стабілізацію середовищ.

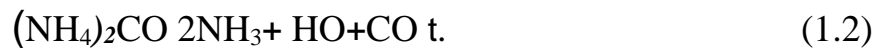
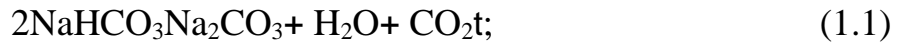
Підкреслимо, що відмічене стосується тільки самого процесу зброджування і логічно відносно кожного з недоліків розглянути можливості їх нейтралізації.

## 1.2 Особливості зброджування середовищ в хлібопекарній галузі

Завданням цієї обробки у виробництві хліба і хлібобулочних виробів є досягнення розпушування тіста для утворення його пористої структури. Такий процес здійснюється біохімічним, механічним або хімічним способами [30-33, 42, 46]. За використання біохімічного методу передбачається застосування пресованих або сушених хлібопекарських дріжджів, дріжджового молока, а також рідких дріжджів і дріжджових заквасок [18]. Житнє тісто готується на спеціальних заквасках, що містять гомо- і гетероферментативні мезофільні молочнокислі бактерії та кислотостійкі раси дріжджів [30].

Хімічний спосіб передбачає розпушення тіста під дією діоксиду вуглецю та аміаку, що виділяється при розкладанні хімічних розпушувачів. Цей спосіб застосовується у виробництві печива, пряників і кондитерських виробів, що містять значну кількість жирів і цукру, коли неможливо застосувати хлібопекарські дріжджі [31].

Для хімічного розпушування використовують натрій гідроген карбонат NaHCO<sub>3</sub>, амоній карбонат (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> або їх суміш. Відповідно до цих застосувань мають місце формули:



Хоч і механічний і хімічний способи є економічніші, ніж біохімічний, однак вони поступаються у смакових якостях, мають помітно гірший стан м'якушки менший об'єм. Лише при біохімічному методі бродіння накопичуються продукти бродіння, які формують смак і аромат виробів, утворюється розпушена еластична м'якушка.

Динаміка збродження цукрів визначає динаміку газоутворення. Очевидно, що на неї впливає рецептура середовища і за показником синтезу  $\text{CO}_2$  за інших рівних умов це добре відображується в графічній інтерпретації (рис.1.1).

Причиною такої складної залежності і присутності екстремумів є постійні зміни концентрацій речовин, їх трансформації тощо, до яких

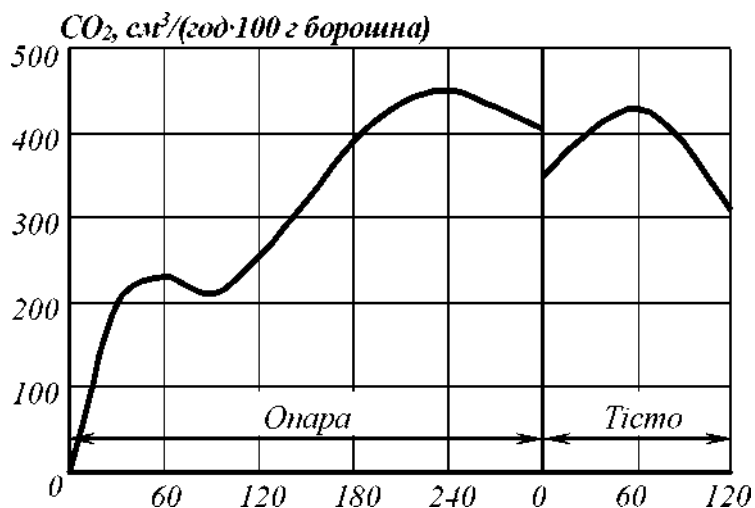


Рис. 1.1 - Інтенсивність газоутворення під час бродіння опари і тіста

додаються змінні значення тисків. Звідси відчутний вплив рецептури, внесення осмоактивних речовин, поява етанолу, адаптація дріжджів до нових умов.

За час дозрівання тіста його маса зменшується на 1,5..3,5% за рахунок часткового випаровування, але, в основному за втрат сухих речовин на

бродіння.

В оточуюче середовище виділяється певна частина діоксиду вуглецю, спирту та летких кислот, за кількістю  $\text{CO}_2$  і  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ , що утворилися, можливо визначатися з загальними втратами сухих речовин.

Вважається, що за технологій роботи на густих опарах втрати СР близькі до 3,0...3,3, а на рідких – 2,5...2,8%.

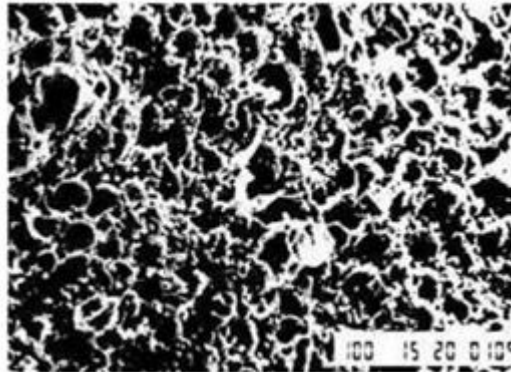


Рис. 1.2 - Мікроструктура тіста: біла сітка – клейковинний каркас; темні овальні вкраплення – крохмальні зерна ( $\times 500$ )

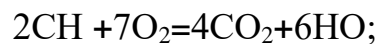
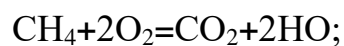
Пентозани поглинають воду осмотично і утворюють в'язкі розчини, наслідком чого є значне підвищення вологопоглинальної здатності тіста і зміцнення його консистенції.

### 1.3 Особливості зброджування цукровмістких середовищ в технологіях виробництва етилового спирту

В основу технологій виробництва етилового спирту покладено використання цукровмісної сировини або сировини з вмістом такого природного полімеру, як крохмаль. Природна сировина в таких випадках стосується зернових культур, картоплі, фруктово-ягідних джерел, цукрових буряків, цукрової тростини, цукрової меляси тощо. У випадках переробки крохмалевмісної сировини до технології її переробки додається операція оцукрювання [16, 27].

Організація процесів бродіння здійснюється з безперервним видаленням діоксиду вуглецю, кількісний показник якого обмежується граничною розчинністю у відповідності до закону Генрі. З врахуванням цієї особливості тиски в технологічних апаратах обмежуються значеннями атмосферних.

Перспективи вичерпання природних ресурсів енергоносіїв змушує суспільство звертатися до технологій на основі відновлюваних ресурсів. Ці технології ретельно вписуються в існуючі природні колообіги. Так виробництво і технічне використання синтезованого спирту розпочинається з відомої біохімічної реакції, в якій приймає участь такий природний каталізатор, як хлорофіл. Складовимитакі реакції є діоксид вуглецю, вода і кванти сонячної світлової енергії з можливостями подальшої трансформації речовин. Важливо, що всі органічні речовини є носіями хімічної енергії в структурі різних речовин. Ланцюг їх подальших перетворень спрямовується до зменшення їх молекулярної маси і кожний перехід супроводжується енергетичними втратами. В кінцевому результаті існування кожної із сполук завершується утворенням таких речовин, як діоксид вуглецю і вода. Це ж стосується всього ряду вуглеводнів у формі газів, нафти та її похідних:



Завершення трансформацій органічних речовин до рівнів  $\text{CO}$  та  $\text{H}_2\text{O}$  означає, що звернення технологій промислових масштабів до дублювання природних колообігів є додатком до того, що створено і діє в умовах планети.

#### 1.4 Висновки до першого розділу

1. Біохімічні технології анаеробного і аеробного бродіння своїм природним ресурсом мають притаманну для всього живого світу потребу

розмноження і нарощення відповідної біомаси мікроорганізмів.

Основним компонентом живлення при цьому є цукри, в матеріальних і енергетичних трансформаціях яких досягаються перетворення на користь живлення мікроорганізмів з одночасним синтезом цільових речовин бродильних технологій і речовин, які оцінюються відповідними втратами.

2. Недоліком анаеробних технологій бродіння є реакція (реагування) мікроорганізмів на величини осмотичних тисків середовищ. Останні на початку бродіння визначаються концентраціями розчинених сухих речовин, падіння яких по мірі зброджування осмотичні тиски зменшує, однак у зв'язку з синтезом етанолу і CO має місце зростання цього показника.

3. Присутність диспергованої газової фази у рідинній та її кількісний показник визначаються матеріальними балансами синтезу CO і гідродинамікою середовища в проявах закону Архімеда.

4. Тиски в газовій фазі у надрідинному середовищі та в газовій диспергованій фазі визначають рівень потенціальної енергії середовища. Потенціал останньої доповнюється кінетичною енергією циркуляційних контурів газорідинної суміші.

5. Вказаним законам збереження відповідають етапи трансформацій потенціальної енергії стиснутої газової фази в кінетичну енергію циркуляційних контурів.

6. Енергетичний імпульс такого перехідного процесу можливо оцінювати через зміни величини газоутримувальної здатності. Присутність диспергованої газової фази в рідинному середовищі означає відповідний прояв закону Архімеда.

7. Виділення додаткової газової фази в режимі перехідного процесу означає його присутність, за якої положення газорідинної суміші в гравітаційному полі змінюється.

8. Зниження концентрації розчиненого діоксиду вуглецю в рідинній фазі середовища означає зменшення осмотичного тиску і збільшення рушійного

фактора масообміну по CO на межі поділу поверхонь мікробних клітин і рідинної фази середовища.

9. Динаміка зворотного напрямку зміни тиску в системі можлива в сповільненому режимі за рахунок подальшого самогенерування газової фази або за рахунок примусового збільшення тиску в газовій фазі

10. Реалізація перехідних процесів на основі зростання тисків в газорідинних системах можлива за рахунок послідовного з бродінням накопичення синтезованої газової фази, що має в собі ознаки енергоощадної технології.

11. Реалізацію явищ колапсу в рідиноповітряних середовищах в аеробних технологіях синтезу біомаси слід розглядати на рівні суперрефективного методу доставки у середовище розчиненого кисню на молекулярному рівні.

12. Одним з технологічних досягнень в бродильних технологіях вважається перехід до неперервних процесів бродіння. Це пов'язано зі стабілізацією параметрів середовищ, збільшенням пропускної здатності систем та зменшенням матеріальних та енергетичних питомих ресурсів.

13. Розвиток гідродинаміки газорідинних систем представлений значною кількістю робіт і у тому числі тими, які вважаються класичними.

14. Імпульсні енергетичні впливи на основі накопичених енергетичних потенціалів диспергованої газової фази в опарі, тістових масивах та заготовках в хлібопекарській галузі мають привести до обмеження матеріальних втрат. Такій технології відповідає організація бродіння опари і тіста під тиском.



## РОЗДІЛ 2

### ОБ'ЄКТИ, МЕТОДИ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Загальні положення. Методики дослідження та опис експериментальної установки

За об'єкти досліджень обиралися технології середовища в режимах анаеробного бродіння у сполучені з апаратурним забезпеченням процесів. Такий вибір стосувався особливостей організації процесів бродіння цукровмісних середовищ в технологіях первинного виноробства, виробництва спирту, пива і, нарешті, хлібобулочних виробів. За виключенням хлібопекарських технологій всі інші названі реалізуються в газорідних середовищах. При цьому утворювана диспергована газова фаза є кількокомпонентною і такою, що складається з діоксиду вуглецю та частково з пари води, спирту та деяких інших газоподібних речовин. Проте в цій диспергованій фазі переважає  $\text{CO}_2$ , тому в подальшому будемо орієнтуватися на двофазну систему «середовище – діоксид вуглецю». Важливою особливістю анаеробного бродіння є безперервний синтез діоксиду вуглецю, який здійснюється у повному об'ємі середовища. Це накладає відмінності на структуру середовища, особливості формування газоутримувальної здатності і, у тому числі, на кількісні співвідношення її в локальних зонах. Таке генерування  $\text{CO}_2$  приводить до яскраво вираженої нерівномірності концентрації його по висоті. Очевидно, що це має супроводжуватися такою ж нерівномірністю енергетичного потенціалу. Оцінку останнього запропоновано здійснити на основі закону Архімеда, прояв якого має місце в дії на

диспергована газову фазу [8].

На додаток до відміченого слід звернутися ще о однієї особливості взаємодії рідинної і газової фаз. Відомо, що утримувальна здатність визначається величиною генерованого або примусово введеного газового потоку залежить від швидкості спливання бульбашок газової фази. При цьому розрізняють швидкість абсолютну і відносну. Саме відносна швидкість визначає за інших рівних умов опір переміщенню бульбашок рідинної фази. Оскільки опір визначається фізико-хімічними властивостями середовищі, то це означає, що для кожного з них відносна швидкість буде стабілізованою.

Вважаємо, що відносна швидкість диспергової газової фази для кожного середовища в умовах узагальнення розмірів бульбашок є наближено сталою. Особливості фізичних явищ в газорідинних системах, існування яких визначаємо припущеннями на основі феноменологічних міркувань, приводять до висновку щодо енергетичного потенціалу. Підкреслимо, що самогенерування  $\text{CO}_2$  в анаеробних умовах зміни швидкостей зброджування цукровмісної сировини обмежені природними властивостямимікроорганізмів, тому швидкісне зростання тисків в таких герметизованих умовах є неможливими. Це означає обмежені властивості систем для створення енергетичних імпульсів. Тим більше, що збільшення тиску в системі за інших рівних умов приводить до зменшення газотримувальної здатності, по-перше, через фізичне стискання газової фази і, по-друге, у зв'язку зі збільшенням розчинності газів у відповідності до закону Генрі.

Іншими будуть прояви енергетичних імпульсів в умовах різких знижень тиску. Різниця в тисках означає перехід системи до нових параметрів термодинамічної рівноваги з швидкоплинним наростанням газотримувальної здатності системи через розширення газової фази з відповідним доповненням її кількості у зв'язку з десорбцією розчиненої частини газової фази. Очевидно, що такий перехідний процес стосується не лише газової фази, а однозначно і рідинної, оскільки збільшення об'єму газової фази однозначно визначає зростання об'єму газорідинної суміші і переміщення рідинної фази. Динаміка останнього супро-

воджується появою сил інерції  $i$ , відповідно, збільшенням тиску в частині загального програмованого його зниження. Однак таке інерційно-динамічне навантаження стосується тільки газорідної суміші і не стосується газової фази в апараті.

Переміщення рідинної фази в результаті розширення диспергованої газової фази здійснюється по вертикалі. Порівняння газорідної системи у динаміці з пружними системами твердих тіл з розподіленими масами приводить до висновку про їх еквівалентність і про можливість застосування принципу Релея для визначення приведеної маси рідинної фази [10].

Експериментальні дослідження заплановані з метою апробації результатів аналітичних досліджень та феноменологічних узагальнень і стосуються гідродинамічних параметрів газорідної систем. До складу установки (рис. 2.1) входили: 1 – компресор WERKBM-50 (з параметрами:

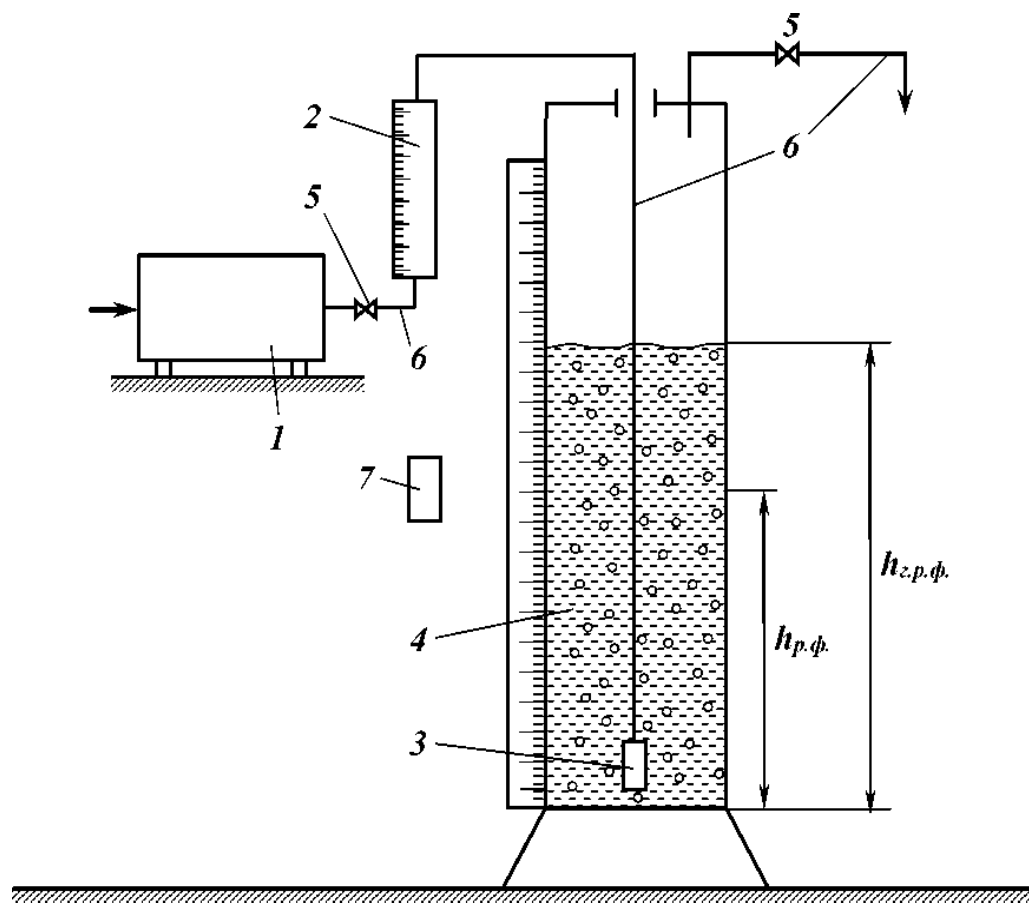


Рис. 2.1 - Схема експериментальної установки для визначення

гідродинамічних параметрів газорідинних систем

motorpower – 1,5 kw/2.HP; maxpressure – 8 bar/116 psi; displacement – 200 L/min/7,0 cfm), 2 – ротаметр РС-5, 3 – аератор, 4 – прозора колона діаметром 150 мм з шкалою рівнів газорідинної суміші, 5 – запірна арматура та 6 – трубопроводи. Перебіг перехідних процесів у часі визначався використанням електронного засобу відліку часу 7.

## 2.2 Визначення гідродинамічних параметрів газорідинних систем з повітряною фазою

Дослідженнями виконувалася задача визначення газоутримувальної здатності середовища зі змінними параметрами висоти рідинної фази  $h$  від інтенсивності аерації, часу перебігу перехідних процесів формування повного об'єму газорідинного середовища, часу перехідного процесу виходу диспергованої газової фази [28, 39].

На основі експериментальних даних розраховувалися гідродинамічні параметри системи. Дослідження виконувалися з повітряною газовою фазою і діоксидом вуглецю. Такий перехід дозволив встановити відмінності в системах з названими газами. Розраховувати на присутність певних відмінностей можливо у зв'язку з різними питомими масами названих газів. Характеристики названих газів мають значення, наведені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1

### Фізичні параметри повітря та діоксиду вуглецю

Газ	Молекулярна маса	Питома маса, кг/м <sup>3</sup>	Газова стала, Дж/(кг·К)
Повітря	28,96	1,293	287
Діоксид вуглецю	44,01	1,977	188,9

Дослідження виконувалися в наступній послідовності. Після налаштування засобів вимірювання параметрів системи здійснювалося заповнення прозорої масообмінної труби заданою кількістю води і здійснювалася планова подача газової фази. Різниця рівнів до подавання газової фази і в режимі аерації визначала значення газотримувальної здатності. Початок і завершення перебігу перехідних процесів фіксувався візуально. Зміна висоти рідинної фази супроводжувалася аналогічно до вказаного новим циклом змін параметрів впливу.

Зміна  $\Delta h$  висоти набухлого газорідного шару порівняно з висотою рідинного означала можливість визначення величини газотримувальної здатності:

$$u_{г.р.с.} = \Delta h f, \quad (2.1)$$

де  $f$  – площа перерізу прозорої колони. При внутрішньому діаметрі  $d = 0,15$  м маємо  $f = 0,0177$  м<sup>2</sup>.

Результати вимірів первинних даних наведені у табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Результати визначення гідродинамічних параметрів системи з пові

Висота рідинної фази $h_{р.ф.} = 0,2$ м						
Відлік показання ротаметра	0,0	10,0	15,0	18,0	20,0	27,0
Висота суміші, м	0,24	0,25	0,27	0,28	0,29	0,295
Утримувальна здатність, м <sup>3</sup>	0,000708	0,000885	0,001239	0,001416	0,001593	0,001682
Висота рідинної фази $h_{р.ф.} = 0,4$ м						
Відлік показання ротаметра	0,0	10,0	15,0	18,0	20,0	27,0
Висота суміші, м	0,485	0,51	0,52	0,53	0,51	0,54
Утримувальна здатність, м <sup>3</sup>	0,0015	0,001977	0,00212	0,0023	0,001947	0,002478

Висота рідинної фази $h_{p.ф.} = 0,8$ м						
Відлік показання ротаметра	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	23,0
Висота суміші, м	0,89	0,90	0,91	0,925	0,935	0,935
Утримувальна здатність, м <sup>3</sup>	0,001593	0,00186	0,01947	0,0221	0,02384	0,02389

Закінчення таблиці 2.2

Висота рідинної фази $h_{p.ф.} = 0,62$ м						
Відлік показання ротаметра	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0
Висота суміші, м	0,67	0,68	0,69	0,70	0,71	0,72
Утримувальна здатність, м <sup>3</sup>	0,000885	0,00106	0,00124	0,001416	0,001593	0,00177

Висота рідинної фази $h_{p.ф.} = 1,0$ м								
Відлік показання ротаметра	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30	35
Висота суміші, м	1,09	1,11	1,125	1,133	1,14	1,15	1,16	1,17
Утримувальна здатність, м <sup>3</sup>	0,001593	0,00196	0,00199	0,0023	0,0026	0,0027	0,0028	0,003

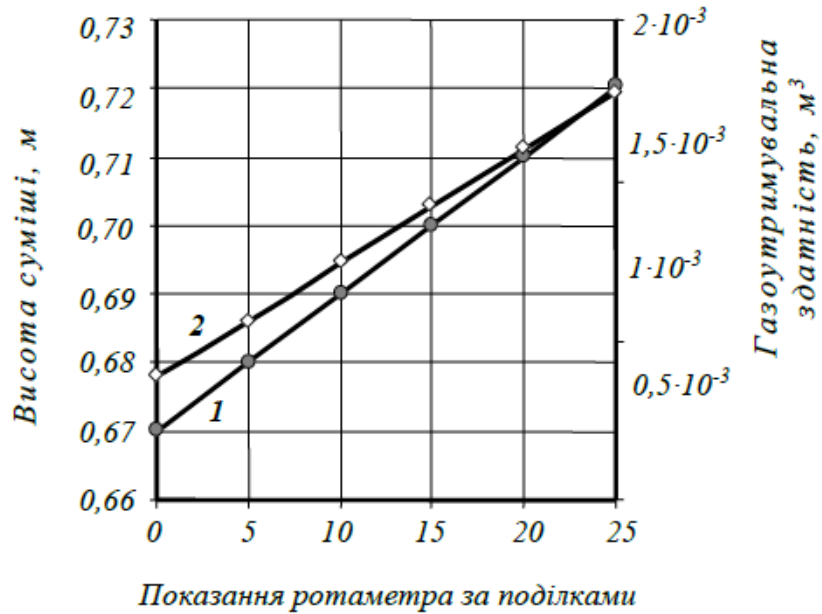


Рис. 2.2 - Залежності висоти суміші «рідина - повітря» (1) та її газоутримувальної здатності (2) від показань ротаметра за висоти рідинного шару 0,62 м

У таблиці 2.3 наведено дані, які стосуються системи «рідинна фаза - діоксид вуглецю». Графічна інтерпретація цього випадку наведена на рис. 2.4.

Таблиця 2.3

Результати визначення гідродинамічних параметрів системи з діоксидом вуглецю

Висота рідинної фази $h_{p.ф.} = 0,2$ м						
Відлік показання ротаметра	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0
Висота суміші, м	1,09	1,11	1,14	1,17	1,19	1,23
Утримувальна здатність, м <sup>3</sup>	0,00159	0,00195	0,00248	0,003	0,00336	0,00407

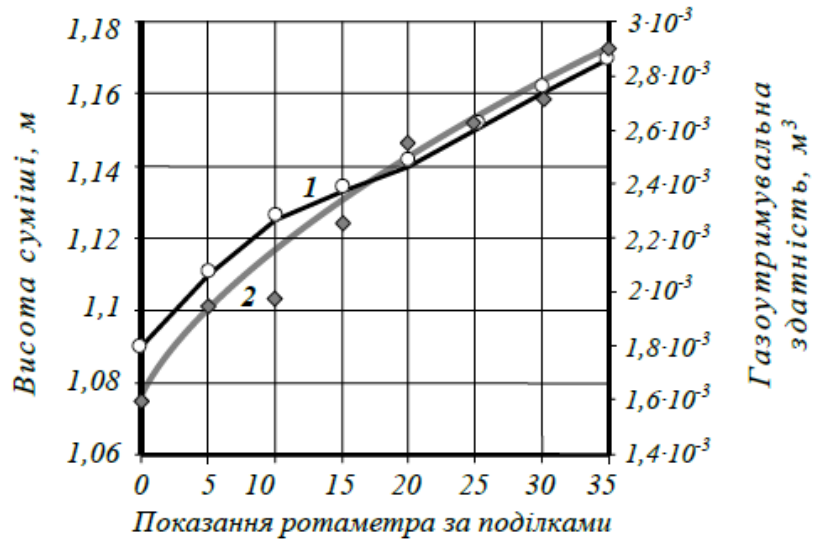


Рис. 2.3 - Апроксимовані залежності висоти суміші «вода - повітря» (1) та її газоутримувальної здатності (2) від показань ротаметра за висоти рідинного шару 1,0 м

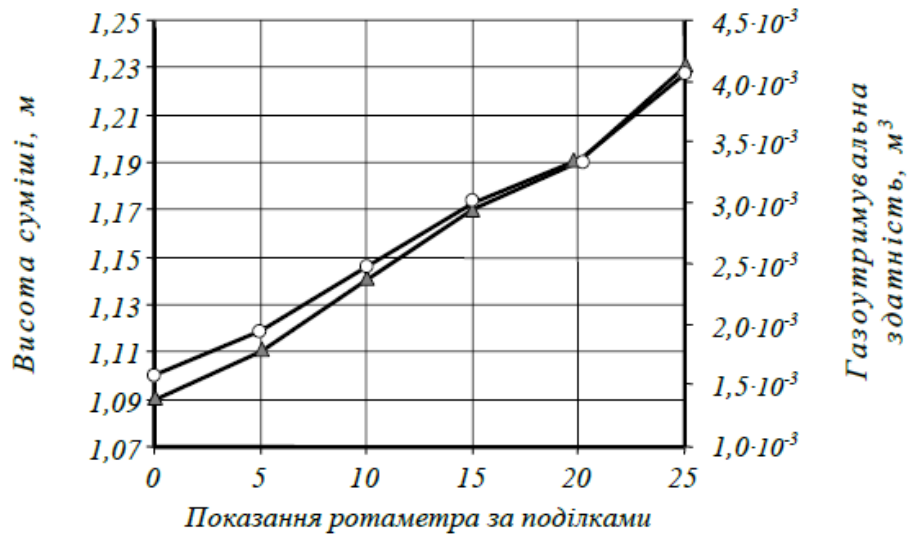


Рис.2.4 - Залежності висоти суміші «вода - діоксид вуглецю» (1) та її газоутримувальної здатності (2) від показань ротаметра за висоти рідинного шару 1,0 м

### 2.3 Дослідження газорідних систем з діоксидом вуглецю



Виконання перехідних процесів в газорідних системах може відбуватися в режимах різкого збільшення газотримувальної здатності або її зменшення в планових умовах.

До числа перехідних процесів в умовах введення ззовні газових потоків відносяться ті, яким відповідає поява диспергованої газової фази в повному об'ємі середовища. При цьому на момент виходу газової фази з середовища рівень газотримувальної здатності є найбільшим з наступним активним зменшенням з переходом до усталеного режиму. Пояснити такий перебіг процесів можливо утворенням на цей момент циркуляційних контурів і збільшенням за цей рахунок абсолютної швидкості газової фази [38, 40].

Перехідному процесу також відповідає припинення подавання ззовні газової фази. Якщо воно здійснюється різким перекриттям зовнішнього потоку, то його результатом є масове спливання диспергованої газової фази. В експериментальному дослідженні визначалися швидкості спливання таких газових масивів.

Результати вимірів швидкостей спливання масивів повітряної газової фази наведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4.

Узагальнені результати швидкостей спливання диспергованих газових масивів

Висота рідинного шару, м	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Швидкість спливання газового диспергованого масиву повітря	0,28	0,31	0,35	0,38	0,41
Швидкість впливання диспергованого масиву діоксиду вуглецю	0,25	0,28	0,32	0,36	0,37

Помічена різниця швидкостей спливання масивів повітря і діоксиду

вуглецю пояснюється фізичними властивостями газів і взаємодією їх диспергованих масивів з рідиною. Очевидно, що на етапах спливання масивів має місце перебудова циркуляційних потоків в залишках газорідинної фази і одночасно всієї системи, яка представлена сукупністю рідинної і газорідинної фаз.

Реалізація такої пропозиції в системах аерації середовищ досягається впливами на роботу генераторів газових потоків і це більше стосується аеробних процесів.

Для умов взаємодії фаз в анаеробних процесах придатною є регульована або навіть нерегульована циркуляція газової фази з поверненням її в рідину.

Змінні значення кінематичних параметрів в циркуляційних контурах з задіяними масами середовищ означають виникнення силових впливів у формі сил інерції. Змінні силові впливи на двофазні газорідинні системи або на трифазні з приєднанням твердої фази забезпечують активізацію масообмінних процесів [3, 14, 23].

Досліди по оцінці газотримувальної здатності вказують на важливість саме газової фази, яка виконує роль енергоносія і енергетичного трансформатора в усіх бродильних технологіях. На додаток до цієї ролі синтез діоксиду вуглецю забезпечує технологічні вимоги по насиченню пива, шампанського, сидрів, газованих напоїв, газонасичених мінеральних вод тощо. Проте особлива роль належить анаеробним процесам в хлібопекарській промисловості. Вказана роль відома не лише спеціалістам, а практично всім споживачам хлібопекарської продукції.

У відповідності до [11] пропонується використовувати ту властивість анаеробних систем, за якою тиски їх збродження можуть бути представлені в широкому діапазоні як нижче атмосферного, так і суттєво вищого. Саме завдяки цій властивості запропоновано спосіб [11], за яким бродіння і доброджування тіста здійснюються за тисків більших за атмосферний в герметичних умовах. Розгерметизація зброджених середовищ приводить до помітного збільшення об'ємів заготовок і газотримувальної здатності, що

показано в наступній частині експериментальних досліджень.

#### 2.4 Експериментальні дослідження газонасичених тістових заготовок

Дослідження впливів зброджування тіста здійснювалося з використанням камери, в якій реалізовувалися змінні тиски. Метою цієї частини роботи було підтвердження структурно-механічних властивостей тіста, які поєднують в собі пружно-пластичні і, одночасно, в'язко-пластичні характеристики. Вони визначають поведінку тіста під час технологічного процесу і впливають на формостійкість тістових заготовок при вистоюванні та випіканні і обумовлюють об'ємний вихід виробів та якість їх м'якушки [18, 20].

Формування зазначених властивостей тіста залежить від співвідношення полімерів борошна, стану білково-протеїнового комплексу, рецептури тіста та від якості його замішування. Автор цього дослідження пропонує здійснити перехід від суто механічного замішування тіста до об'єднання його з мікровпливами за рахунок пульсацій газової фази. Оцінка таких впливів стала завданням третьої частини експериментальних досліджень.

При проведенні досліджень використовували борошно вищого сорту з вмістом клейковини 24,0% за якістю надмірно пружної. Пружно-еластичні властивості тіста визначали використанням альвеографа фірми «Шопен».

Дослідження виконувалося наступним чином. За загально визначеною технологією створювалася суміш компонентів з додаванням дріжджів. Далі здійснювався заміс тіста. Утворений масив тіста проходив початковий етап зброджування, після чого він поділявся на дві рівнозначні частини, одна з яких відповідала досліді, а друга – контролю. Частина контролю залишалася в стані доброджування, а дослідний зразок розміщувався в герметичній камері і підлягав впливам змінних тисків у діапазоні від 0,1 до 0,2 МПа з витримкою в часі на нижньому і верхньому рівнях протягом 20 с. Кількість циклів складала  $n_{\text{цикл}} = 15, 20, 25$  та 30. Після розгерметизації камери здійснювалася 5-ти

хвилинна додаткова витримка зразка, після чого оцінювалися пружно-еластичні властивості обох частин тіста. Результати визначень наведені в табл. 2.5.

Дослідження з використанням альвеографа приводять до висновку про те, що додаткова обробка тіста з деформацією диспергованої фази під дією змінних тисків покращує пружність та еластичність тіста, збільшує витрати питомої енергії на його деформацію, що свідчить про покращення його структурно-механічних властивостей тим більше, чим більше число циклів використовується під час обробки.

Ця частина досліджень привела до висновку про позитивну роль диспергованої газової фази як внутрішнього перетворювача властивостей тіста і тістових заготовок. На основі цього висновку здійснено підготовку відповідної документації і оформлено заявку на розгляд Державної служби інтелектуальної власності України для отримання правової охорони на винахід [37].

Числові дані табл. 2.5 інтерпретовані у формі графіків залежностей  $P = P(n_{\text{цикл}})$ ,  $L = L(n_{\text{цикл}})$ ,  $P/L = P/L(n_{\text{цикл}})$  та  $S = S(n_{\text{цикл}})$ .

Значення величин параметрів, які наведені в табл. 2.2-2.5 відповідають середнім значенням, одержаним з десяти вимірювань.

Обробку серії вимірювань виконували в наступній послідовності:

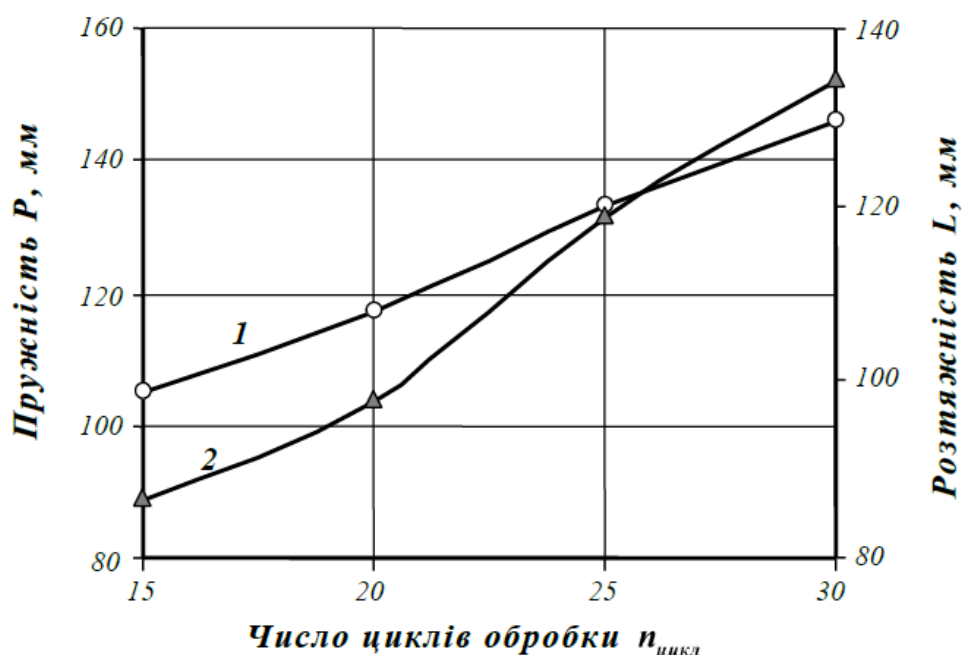


Рис. 2.5 - Графіки залежностей  $P=P(n_{\text{цикл}})$  (1) та  $L=L(n_{\text{цикл}})$  (2) від числа циклів обробки

Таблиця 2.5

Пружно-еластичні властивості тіста з додатковою механічною обробкою

Число циклів обробки	Пружність, P, мм	Розтяжність, L, мм	P/ L	Площа альвеограми, S, см <sup>2</sup>	Питома робота деформації, W·10 <sup>4</sup> , Дж
Контроль (без обробки)	85	68	1,25	36,4	238,06
$n_{\text{цикл}} = 15$	105	88	1,193	48,4	316,54
$n_{\text{цикл}} = 20$	117	99	1,182	66,4	434,3
$n_{\text{цикл}} = 25$	133	120	1,108	83,4	545,4
$n_{\text{цикл}} = 30$	146	135	1,082	94,2	616,1

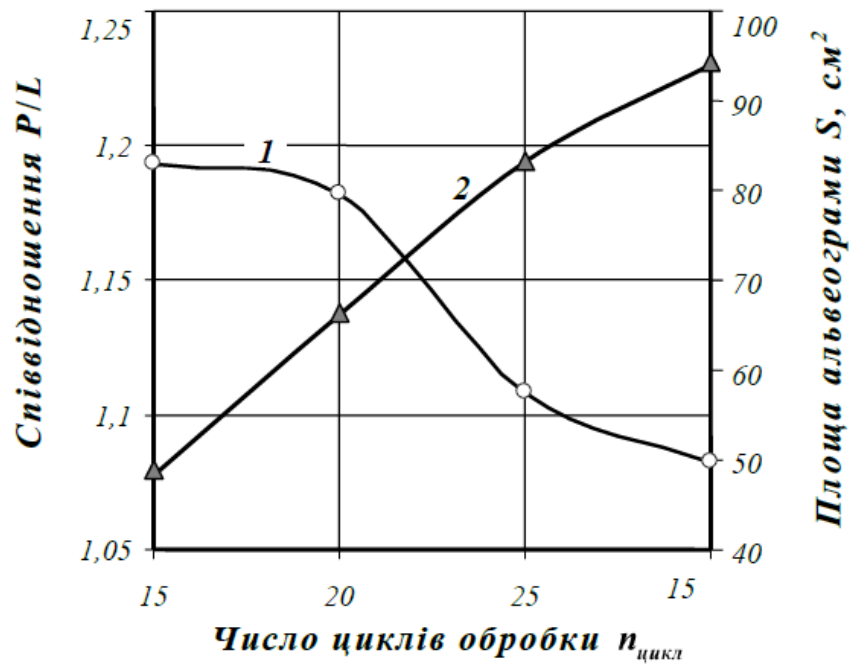


Рис. 2.6 - Графіки залежностей  $P/L=P/L(n_{\text{цикл}})$  (1) та  $L = S = S(n_{\text{цикл}})$  (2) від числа циклів обробки

- 1) визначалося середнє арифметичне значення;
- 2) визначалася середньоквадратична помилка одного виміру;
- 3) визначалася найбільша можлива похибка  $\Delta$  окремого виміру і здійснювалася перевірка того, що серед результатів вимірів відсутні такі, які відрізнялися б від середньоарифметичного більше ніж на найбільшу можливу помилку  $\Delta$  окремих вимірів; визначалася середньоквадратична похибка  $\sigma_0$  середньоарифметичного.

## 2.4 Висновки до другого розділу

Розділ стосувався об'єктів і методів досліджень газорідинних систем, які створюються в умовах анаеробних та аеробних технологій харчових та мікробіологічних виробництв. У розділі наведено поєднання подальших теоретичних та феноменологічних міркувань та експериментальних досліджень. У зв'язку з цим відмітимо наступне:

1. Наявність результатів експериментальних досліджень в сукупності з теоретичними узагальненнями розширюють повноту оцінки фізичних процесів і дозволяють прогнозувати практичну реалізацію одержаних положень та створюватиможливості щодо математичних формалізацій елементів досліджуваних технологій.

2. Об'єднувальною ознакою теоретичних та експериментальних досліджень обрано присутність в середовищах систем газової фази, які самоплинно або примусово утворюються у формі диспергованих фаз.

3. Присутність диспергової газової фази в розглянутих випадках оцінюється на рівні енергоносія. Сформульовано положення, які стосуються особливостей структурної побудови газорідинних середовищ за анаеробного бродіння та у порівнянні з аеробним бродінням.

4. Показано, що газотримувальна здатність за анаеробного бродіння має

яскраво визначену висотну нерівномірність у зв'язку з генеруванням CO<sub>2</sub> у повному об'ємі рідинної фази. З врахуванням того, що газова фаза виконує роль енергоносія, приходимо до висновку про підвищену енергонасиченість верхніх шарів середовища і більшу інтенсивність бродіння в них. Це означає доцільність організації активної вертикальної циркуляції.

5. Вертикальну циркуляцію газорідинної суміші доцільно влаштовувати за рахунок рециркуляції газової фази.

6. Організація технологічного процесу в умовах анаеробного бродіння з додаванням рециркуляції газової фази може у 2-3 рази підвищувати газо вміст середовища і його енергонасиченість.

7. Швидкість зброджування середовищ може збільшуватися за рахунок використання перехідних процесів.

8. Замішування тіста в хлібопекарській промисловості має перспективу зменшення матеріальних витрат, підвищення газоутримувальної здатності та якісних показників продукції. Якість замішаного тіста підвищується за своїми структурними показниками за рахунок впливів зовнішніх тисків і генеруванням відгуків на них дисперговою газовою фазою.

### РОЗДІЛ 3

#### ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКИ МІЖ ГЕОМЕТРИЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ АПАРАТІВ, ТЕРМОДИНАМІКОЮ СЕРЕДОВИЩ ТА МІКРОБІОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ В ТЕХНОЛОГІЯХ БРОДІННЯ ПИВА

##### 3.1 Загальні положення фізико-хімічних і мікробіологічних взаємодій

Перетворення складових суслу у пиво здійснюється трансформацією цукрів в етанол і діоксид вуглецю під дією ферментів дріжджів. При цьому виникають побічні продукти бродіння, які суттєво впливають на споживчі та дегустаційні властивості пива. Утворення і часткове розщеплення таких побічних продуктів є результатом їх масообміну з речовинами дріжджів і повинно розглядатися в названій сукупності. Після бродіння, дозрівання і

доброджування пиво фільтрується і підлягає біологічній та колоїдній стабілізації. При цьому бродіння і доброджування лише умовно поділяються на названі складові і виконуються як одне ціле. Остання особливість є наслідком часткового відступу від класичних технологій, в яких бродіння і доброджування різко розрізняються температурами. Так бродінню відповідали температури біля 6°C, а доброджуванню – 0...2°C. Очевидно, що присутність в цих процесах дріжджів має оцінюватися не просто їх додаванням до сусла, оскільки багатомільярдна кількість окремих клітин абсолютно незалежно одна від одної успадкувала свої властивості в трансформаціях попередніх поколінь, що збережено в їх генах.

Особливості технологічного і апаратного оформлення процесів бродіння здійснюються з врахуванням того, що не ми визначаємо функції дріжджів, а лише маємо можливість впливати на фактори їх життєдіяльності [30]. Для дріжджової клітини значення має лише отримання енергії при споживанні харчових речовин з метою продовження свого існування і утворення клітинної маси. З цього витікає, що компоненти, які мають цінність для пива, виникають лише за оптимальних умов для дріжджової клітини. У зв'язку з вказаними особливостями якості пива у вирішальній мірі залежить від дріжджів та їх масообміну з середовищем.

Розглянемо процеси, які відбуваються з клітиною під час бродіння і дозрівання.

Після потрапляння у сусло дріжджова клітина має адаптуватися до нового середовища, яке від початку справляє на неї шоківу дію: це інші температура, рН, висока концентрація цукру тощо.

Протягом кількох годин дріжджова клітина виділяє у зовнішнє середовище амінокислоти і нуклеотиди. Однак через деякий час вона споживає їх. Чим вища температура, тим більше виділяється амінокислоти. Проте лагфаза закінчується достатньо швидко. Перед тим як клітина вступає у тісний контакт з новим середовищем у ній розщеплюються запаси речовин, які дають їй першу енергію.



Надлишкова кількість зброджуваних цукрів у суслі стимулює споживання їх клітиною. Одночасно з надходженням розчиненого кисню починається і дихання, яке приводить до виділення в мітохондріях, цих силових станціях клітини, збільшеної кількості енергії [44].

Завдяки такому енергетичному зсуву у дріжджів з'являється можливість не тільки почати бродіння, але і одночасно утворювати нові клітинні речовини і розмножуватися брунькуванням. Речовини, необхідні для утворення клітинної субстанції, дріжджі отримують з сусла. Технологія ж повинна піклуватися тільки про те, щоб у суслі завжди були всі необхідні для цього компоненти, а саме [43, 45]:

- амінокислоти для утворення клітинних речовин;
- фосфати для утворення АТФ (аденозинтрифосфату) та подвійного фосфоліпідного шару клітинних і внутрішньоклітинних мембран;
- жирні кислоти для будівництва клітинних мембран;
- цукор для створення запасних вуглеводів;
- солі та мікроелементи (наприклад, цинк);
- кисень в достатній кількості для дихання та інших перетворень.

Більшість цих речовин завжди присутні в суслі у достатній кількості або вони можуть бути самостійно синтезовані дріжджами, але брак окремих компонентів може призвести до проблем під час бродіння [21, 24].

### 3.2 Геометрія технологічних апаратів і температурна стабілізація середовищ

Звичайні бродильні чани і лагерні танки мають певні обмеження за розмірами. Необхідність в більшій економічності виробництв потребувала використання більш містких технологічних апаратів для процесів бродіння і дозрівання пива. Результатом цього було створення циліндрично-конічних бродильних і лагерних танків [26].

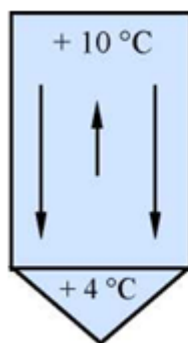
Вади великорозмірних ЦКТ:

- якщо ЦКТ має великий об'єм, то заповнення його довге і перше варіння встигає забродити;
- якщо останнє варіння перекачується без дріжджів, то ця частина довго стоїть незабродженою через обмежене перемішування;
- у великих танках довготривалі операції спорожнення, миття, дезинфекції;
- значні питомі теплові навантаження.

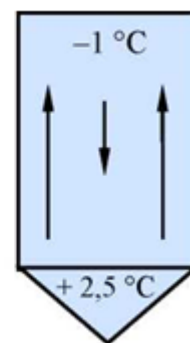
ЦКТ завжди наповнюють і спорожнюють знизу. Він з'єднується з трубопроводом подавання сусла, з трубопроводом відкачування пива, з трубопроводом подавання і повертання СІР. Ці з'єднання повинні бути захищені від потрапляння повітря.

Охолодження ЦКТ. У середньому під час збродження пива з середньою початковою екстрактивністю виділяється 4300...4600 кДж на 1 гл сусла. Загальна потреба в холоді становить 8600...9000 кДж/гл.

Холодоносій охолоджують на 3...4°C нижче від необхідної температури. Як холодоносій використовують етиленгліколь або розчин NaCl з температурою замерзання  $t = -5...-15^{\circ}\text{C}$ .



Конвективні потоки  
за бродіння



Конвективні потоки за  
холодного витримання

За температури проміжного теплоносія  $-4^{\circ}\text{C}$  температура випаровування у випарнику холодильної установки повинна бути  $-10^{\circ}\text{C}$ , за температури

теплоносія  $+1^{\circ}\text{C}$  температура у випарнику становить  $-5^{\circ}\text{C}$ .

За охолодження пива у зовнішньому теплообміннику його відбирають з патрубків у конусі і повертають через вертикальну трубу, вхід якої зроблено на висоті на 1,2 м нижче від рівня пива в танку. Вертикальна труба може бути всередині або назовні танка.

До числа переваг зовнішньої схеми охолодження належить зниження вартості ЦКТ на 25...30%; охолодження на ТО обходиться дешевше.

Температурне розшарування пива є причиною утворення конвективних потоків і зміни їхніх напрямків [4, 17].

Видалення дріжджів з ЦКТ. Дріжджі потрібно знімати так часто і стільки разів, скільки можливо. Навіть під час холодного витримування можливе піднімання мути з теплішого пива в конусі. Дріжджі під час дозрівання виділяють низькомолекулярні азотисті речовини, які не споживаються і погано впливають на стійкість піни. Під час видалення дріжджового осаду не повинна утворюватися воронка.

Дріжджі сповзають стінкою конуса, тому на них іноді накладають пульсуючі впливи.

До числа актуальних задач цього розділу віднесено наступне:

- визначити раціональні геометричні параметри бродильних апаратів у формі ЦКТ [5-7];
- дослідити обмеження і фактори стабілізації температур середовищ;
- одержати математичні моделі динаміки осмотичних тисків;
- розробити методику оцінки енергетичних потенціалів збродженого пивного сусла;
- розробити рекомендації щодо цілеспрямованого використання енергетичних потенціалів середовищ для інтенсифікації і підвищення ефективності процесів збродження пивного сусла;
- розробити пропозиції щодо створення нових технологічних апаратів високої продуктивності.

### 3.3 Визначення геометричних параметрів технологічних апаратів для зброджування середовищ

Знайдемо математичне співвідношення між поверхнею апарата  $S_{\pi}$  його об'ємом  $V$  для циліндричного апарата:

$$S_{\pi} = \pi dh + \frac{\pi d^2}{4}; \quad (3.1)$$

$$V_{\pi} = \frac{\pi d^2}{4} h, \quad (3.2)$$

де  $d$  і  $h$  – відповідно діаметр і висота апарата.

Якщо прийняти умову мінімізації його поверхні  $h = d$ , то ввівши цю умову у рівняння (3.1) і (3.2), запишемо:

$$S_{\pi} = \pi d^2 + \frac{\pi d^2}{2} = 1,5\pi d^2; \quad (3.3)$$

$$V_{\pi} = \frac{\pi d^3}{4}, \quad (3.4)$$

Звідси витікає очікуваний висновок про те, що поверхня апарата пропорційна квадрату його розміру, а об'єм – кубу цього ж розміру. Визначимо їх співвідношення у формі:

$$S_{\pi}/V_{\pi} = 6/d. \quad (3.5)$$

З першого погляду здається, що в останній залежності не приховано неочікуваних несподіванок. Проте питома площа поверхні (площа поверхні віднесена до об'єму) різко зменшується за формулою гіперболи, що відображується нижченаведеним співвідношенням:

$d$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	5,0
$S_{\pi}/V_{\pi}$	30,0	15,0	10,0	7,5	6,0	4,0	3,0	2,4	2,0	1,2

З останнього витікає, що значне нарощування геометричного параметра  $d$  в решті-решт може привести до неможливості стабілізації температури

середовища, якщо поверхня устаткована сорочкою нагрівання або охолодження [2, 8]. формі влаштування виносних циркуляційних контурів з додатковими поверхнями нагрівання.

Швидкість зброджування цукрів  $dM_{\text{ц}}/d\tau$  задається у формі технологічного параметра і з врахуванням того, що зброджування одного моля глюкози супроводжується виділенням 169 кДж теплової енергії знайдемо загальну потужність синтезованого енергетичного потоку:

$$\frac{dQ}{d\tau} = \frac{\frac{dM_{\text{ц}}}{d\tau} Q_{\text{пит}}}{m_{\text{гл}}} = \frac{169}{180} \cdot \frac{dM_{\text{ц}}}{d\tau} = 0,939 \frac{dM_{\text{ц}}}{d\tau}, \text{ кВт}, \quad (3.6)$$

де  $Q_{\text{пит}} = 169$  кДж – питоме тепловиділення;  $m_{\text{гл}}$  – молекулярна маса глюкози.

Можливості системи тепловиділення і стабілізації температури середовища характеризуються залежністю

$$\frac{dQ_{\text{ок}}}{d\tau} = kF\Delta t, \quad (3.7)$$

де  $\frac{dQ_{\text{ок}}}{d\tau}$  – потужність потоку тепловідведення, Вт;  $k$  – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\Delta t$  – температурний рушійний фактор, К.

На основі рівнянь (3.6) та (3.7) визначаємо:

$$F \geq 0,939 \frac{dM_{\text{ц}}}{d\tau} \cdot \frac{1}{k\Delta t}. \quad (3.8)$$

Звідси очевидно, що фактору поверхні теплопередачі  $F$  відповідають сполучення швидкості зброджування, коефіцієнта теплопередачі, температурного напору і співвідношення  $Q_{\text{пит}}/m_{\text{гл}}$ . Оскільки останнє співвідношення є сталим, то до числа програмованих факторів можливих впливів відносяться величини  $dM_{\text{ц}}/d\tau$ ,  $k$  та  $\Delta t$ .

Об'єм апарата розподілено на зони, в яких знаходиться середовище і газова фракція з піною. Об'єм середовища  $V_{\text{сеп}}$  разом з концентрацією дріжджів і коефіцієнтом приросту біомаси  $\mu$  визначають величину  $dM_{\text{ц}}/d\tau$ .

Загальна величина приросту біомаси дріжджів визначається добутком величини накопичень  $G_{\text{нак}}$  на коефіцієнт приросту  $\mu$  за одиницю часу і на загальний об'єм середовища, що відображується залежністю:

$$\frac{dM_{\text{ц}}}{d\tau} = \frac{dM_{\text{ц}}}{d\tau}(V_{\text{сер}}; G_{\text{нак}}; \mu). \quad (3.9)$$

Записана умова (3.9) не відображує числового співвідношення факторів, а лише логіку існування залежності, оскільки ліва і права частини стосуються різних складових системи. Проте з запису (3.9) витікає висновок про те, що з перебігом часу накопичення дріжджової маси  $G_{\text{нак}}$  має зростати, що вказує на нелінійність процесу і присутність логарифмічної фази приросту біомаси. Остання фаза буде витримуватися до тих пір, доки вистачатиме цукрового живлення.

Ця частина міркувань розглядається в розділі, що стосується геометрії апаратів у зв'язку з тим, що умова (3.8) по визначенню площі поверхні охолодження повинна охоплювати діапазон можливих змін у зв'язку з відмінностями параметрів впливів.

Додатковим впливом на систему щодо її нелінійності є зміна гідродинамічних режимів у зв'язку з несталою динамікою утворення диспергованої газової фази, оскільки коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_1$  від середовища до поверхні теплообміну визначається через сукупність фізико-хімічних властивостей середовища і швидкість обтікання поверхні теплопередачі газорідинним потоком.

Утворювані газорідинні циркуляційні контури частіше носять хаотичний характер, що також приводить до порушень теплової циркуляції. При цьому рівні таких порушень можуть бути достатньо глибокими зі змінами напрямків в циркуляційних контурах.

Таким чином, гідродинамічні режими в технологічних апаратах з охолодженням середовищ визначаються двома причинами. Перша з них стосується охолоджувального контуру, в якому опускні потоки утворюються на поверхнях охолодження. Друга причина стосується утворення контурів за участю газової фази.

Очевидно, що кожна з названих причин характеризується своїми рушій-

ними факторами. В першому з них таким фактором є різниця температур культурального середовища і теплоносія в сорочці охолодження. У другому ж випадку рушійним фактором є присутність диспергованої газової фази і притому значення має швидкість утворення останньої, що у свою чергу залежить від швидкості зброджування цукрів (рис. 3.1). Певного рівня узагальнення в останньому випадку може бути представлено утримувальною здатністю середовища по газовій фазі. У зв'язку з фізикою організації процесів та особливостями тепло- та масообміну записуємо

$$\Delta t \neq \text{const}; \quad \alpha_1 \neq \text{const}; \quad (3.10)$$

$$u \neq \text{const}. \quad (3.11)$$

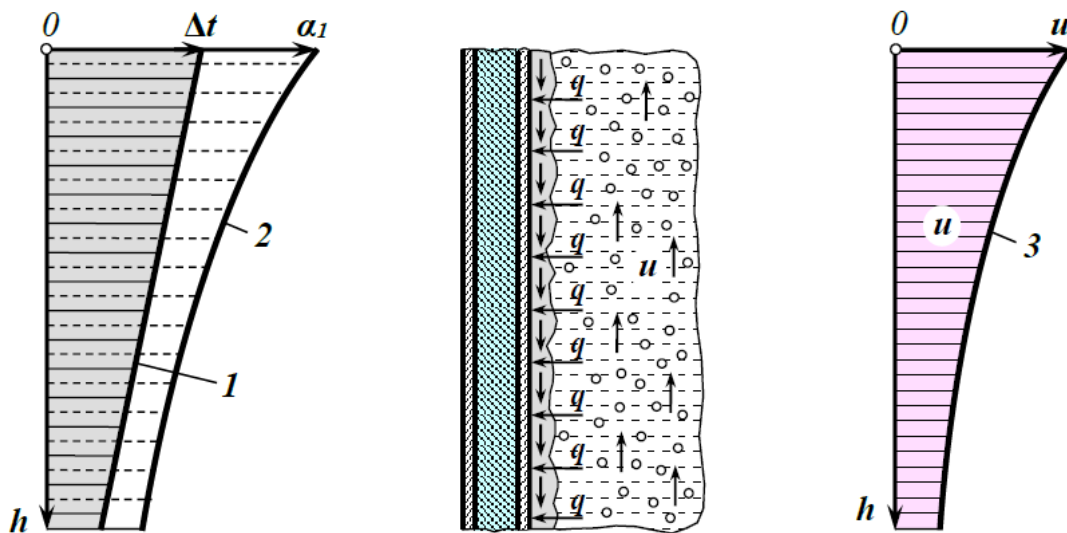


Рис. 3.1. Схема-ілюстрація з представленням факторів впливу на масо- і енергообмін в бродильних апаратах: 1 – залежність  $\Delta t = \Delta t(h)$ ; 2 – залежність  $\alpha_1 = \alpha_1(h)$ ; 3 – залежність  $u = u(h)$

Несталість значення  $\Delta t$  пов'язана з тим, що зі збільшенням значення  $h$  температура в циркуляційній частині рідинної фази зменшується.

Коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_1$  від середовища до стінки апарата залежить від фізико-хімічних параметрів середовища, швидкості руху охолодженої частини рідинної фази в циркуляційному контурі, швидкості оновлення рідинної фази в поперечних площинах. Останнє має бути повноцінною реакцією системи на зміну утримувальної здатності її по газовій фазі. Відомо, що величина утримувальної здатності пов'язана з синтезом  $\text{CO}_2$ , який відбувається у всякій об'ємній точці просторової системи координат. Разом з тим присутність гідростатичного тиску на етапі перехідного процесу і у зв'язку з законом Генрі привносить свій вплив на динаміку газоутворення. Очевидно, що початку утворення диспергованої газової фази відповідають верхні шари з найменшими гідростатичними тисками. За цієї частини перехідного процесу повномасштабна циркуляція відсутня, оскільки перемішуванню відповідає тільки температурна циркуляція, яка зароджується на охолоджувальній поверхні.



Перехід до етапу, на якому відбувається утворення газової фази на всій висоті середовища означає важливий наслідок щодо умови, яку ми визначили у формі  $u = u(h) \neq \text{const}$ , оскільки спливання бульбашок з нижче розташованого об'єму середовища доповнює вище розташовані частини, що власне і відображено епюрою  $\alpha_1 = \alpha_1(h)$  на рис. 3.1.

З цієї частини аналізу фізичних явищ, які відбуваються в системі з самозароджуваною і диспергованою фазою стає очевидним підтвердження раніше сформульованої оцінки про важливість впливів геометричних параметрів технологічних апаратів.

У зв'язку з цим повернемося до цієї частини аналізу.

Очевидно, що першопочатковим параметром технологічного апарата є його робочий об'єм, якому відповідає номінальний об'єм середовища. позначимо цей показник як  $V_p$ , що має доповнюватися об'ємом газової фази  $V_r$  у надрідинному просторі. Тоді повний об'єм апарата складає

$$V = V_p + V_r.$$

Разом з тим рідинний об'єм складається з циліндричної і конічної частин:

$$V_p = V_{p.c.} + V_{p.k.}$$

Цим записам відповідають співвідношення:

$$V_{p.c.} = \frac{\pi d^2}{4} h; \tag{3.12}$$

$$V_{\text{р.к.}} = \frac{\pi d^2}{12} h_{\text{к}}; \quad (3.13)$$

Відповідно площі робочих поверхонь, з яких складається загальна поверхня теплообміну:

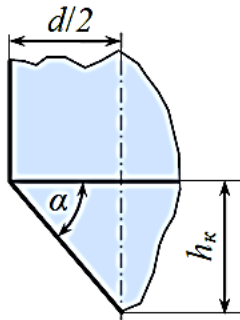
$$S_{\text{р.ц.}} = \pi dh; \quad (3.14)$$

$$S_{\text{р.к.}} = \pi r \ell = \pi r \sqrt{r^2 + h_{\text{к}}^2}; \quad (3.15)$$

Тоді загальна поверхня, на якій відбувається теплообмін:

$$S_{\text{зар.}} = S_{\text{р.ц.}} + S_{\text{р.к.}} = \pi dh + \pi \frac{d}{2} \sqrt{\frac{d^2}{4} + h_{\text{к}}^2}; \quad (3.16)$$

В подальшій частині пошуків геометричних параметрів необхідно стабілізувати висоту конічної частини через обрану величину кута  $\alpha$  (рис. 3.2).



$$h_{\text{к}} = \frac{d \operatorname{tg} \alpha}{2}. \quad (3.17)$$

Технологічно прийнятним може бути  $\alpha = 45^\circ$ . Тоді

$$h_{\text{к}} = d/2. \quad (3.18)$$

Відповідно до одержаного результа

Рис. 1. Схема до визначення кута  $\alpha$  і висоти  $h_{\text{к}}$  конічного об'єму

ту маємо

$$S_{\text{зар.}} = \pi dh + \pi \frac{d}{2} \sqrt{\frac{d^2}{4} + \frac{d^2}{4}} = \pi dh + \pi \frac{d^2}{2\sqrt{2}}. \quad (3.19)$$

Значення кута  $\alpha$  між горизонталлю та положенням твірної конуса може бути різним і таким, яке потребує гомогенізації середовища за показником температури. Очевидно, що вибір кута  $\alpha$  змінює співвідношення між діаметром  $d$  і висотою конусної частини. Ці співвідношення зафіксовані в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Співвідношення між геометричними параметрами бродильних апаратів

$\alpha$ , градус	15	30	45	60	75
$\operatorname{tg}\alpha$	0,268	0,578	1,0	1,732	3,732
$h_k$	0,134d	0,289d	0,5d	0,866d	1,866d

Узагальнимо співвідношення між величинами  $h_k$  і  $d$  позначкою  $k_{h_k}$  :

$$h_k = k_{h_k} d. \quad (3.20)$$

Тоді умова (3.16) переписується:

$$S_{\text{зар.}} = \pi d h + \pi \frac{d}{2} \sqrt{\frac{d^2}{4} + k_{h_k}^2 d^2}. \quad (3.21)$$

В останній залежності невідомою залишається висота циліндричної частини  $h$ . Для знаходження цього параметра скористаємося умовами (3.12) і (3.13) та запишемо вираз по визначенню загального об'єму:

$$V_{\text{зар.}} = \frac{\pi d^2}{4} h + \pi \frac{d^2}{12} k_{h_k}. \quad (3.22)$$

Звідси визначаємо:

$$h = \frac{4 \left( V_{\text{зар.}} - \pi \frac{d^2}{12} k_{h_k} \right)}{\pi d^2} = \frac{V_{\text{зар.}} - \pi \frac{d^2}{12} k_{h_k}}{4/\pi d^2}. \quad (3.23)$$

В числовому прикладі приймемо значення  $V_{\text{зар.}} = 70 \text{ м}^3$ ,  $d = 3 \text{ м}$ ,  $\alpha = 45^\circ$ ,  $k_{h_k} = 0,5$  і розрахуємо:

$$h = \frac{4 \left( 70 - 3,14 \frac{9}{12} 0,5 \cdot 3 \right)}{3,14 \cdot 9} = 9,41 \text{ м}. \quad (3.24)$$

Перехід до значення  $d = 2 \text{ м}$  за інших рівних умов приводить до величини

$$h = \frac{4 \left( 70 - 3,14 \frac{4}{12} 0,5 \cdot 2 \right)}{3,14 \cdot 9} = 21,95 \text{ м}. \quad (3.25)$$

Для можливості графічної інтерпретації впливів параметрів наведемо інші розрахунки за змінних значень діаметрів  $d$ .

Так для  $d = 1,5$  м маємо:

$$h = \frac{4\left(70 - 3,14 \frac{2,25}{12} 0,5 \cdot 1,5\right)}{3,14 \cdot 2,25} = 39,38 \text{ м.} \quad (3.26)$$

Відповідно для  $d = 2,5$  м маємо:

$$h = \frac{4\left(70 - 3,14 \frac{6,25}{12} 0,5 \cdot 2,5\right)}{3,14 \cdot 6,25} = 13,85 \text{ м.} \quad (3.27)$$

Умові  $d = 3,5$  м відповідає:

$$h = \frac{4\left(70 - 3,14 \frac{12,25}{12} 0,5 \cdot 3,5\right)}{3,14 \cdot 12,25} = 6,69 \text{ м.} \quad (3.28)$$

На рис. 3.3 наведено графік залежності  $h = h(d)$ .

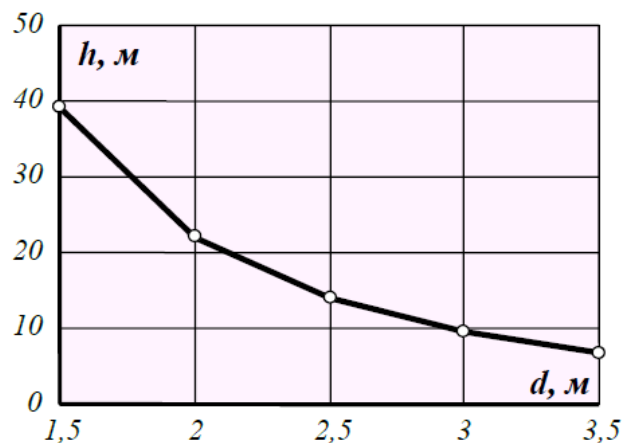


Рис. 3.3 - Графік залежності висоти рідинного шару в циліндричній частині парата від діаметра

Очевидно, що вибір різних співвідношень  $d$  і  $h$  приводить до змін величин поверхонь теплопередавання  $S$  [19].

На рис. 3.4 наведено графічну залежність, яка відображує залежність поверхні теплопередачі від вибору співвідношень  $d$  і  $h$  для ізооб'ємних апаратів з загальним об'ємом рідинної фази  $V = 70 \text{ м}^3$ .

Наведені результати щодо впливу співвідношень геометричних параметрів приводять до висновку про можливість варіацій за показником поверхні теплопередавання в широкому діапазоні.

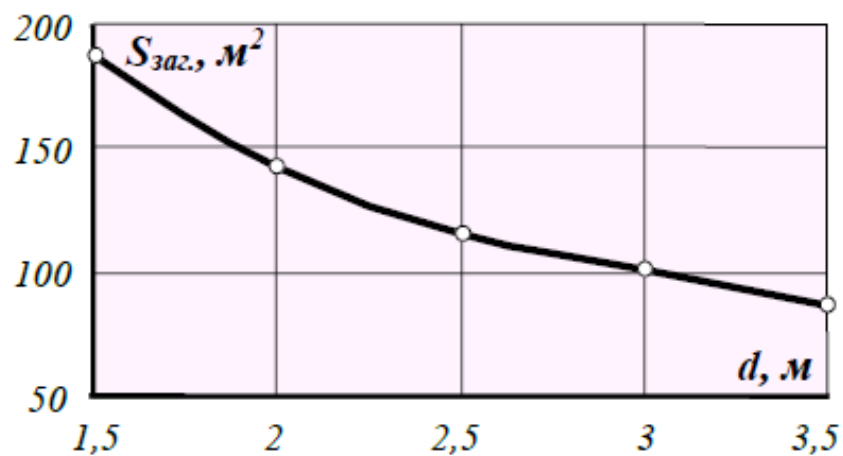


Рис. 3.4 - Графік залежності поверхні теплопередавання від діаметра в бродильному ізо-об'ємному апараті (формула (3.21))

Присутність циркуляційної труби (варіант а, рис. 3.5) дозволяє помітно знизити тиск газової фази, що створюється компресором 3 [49]

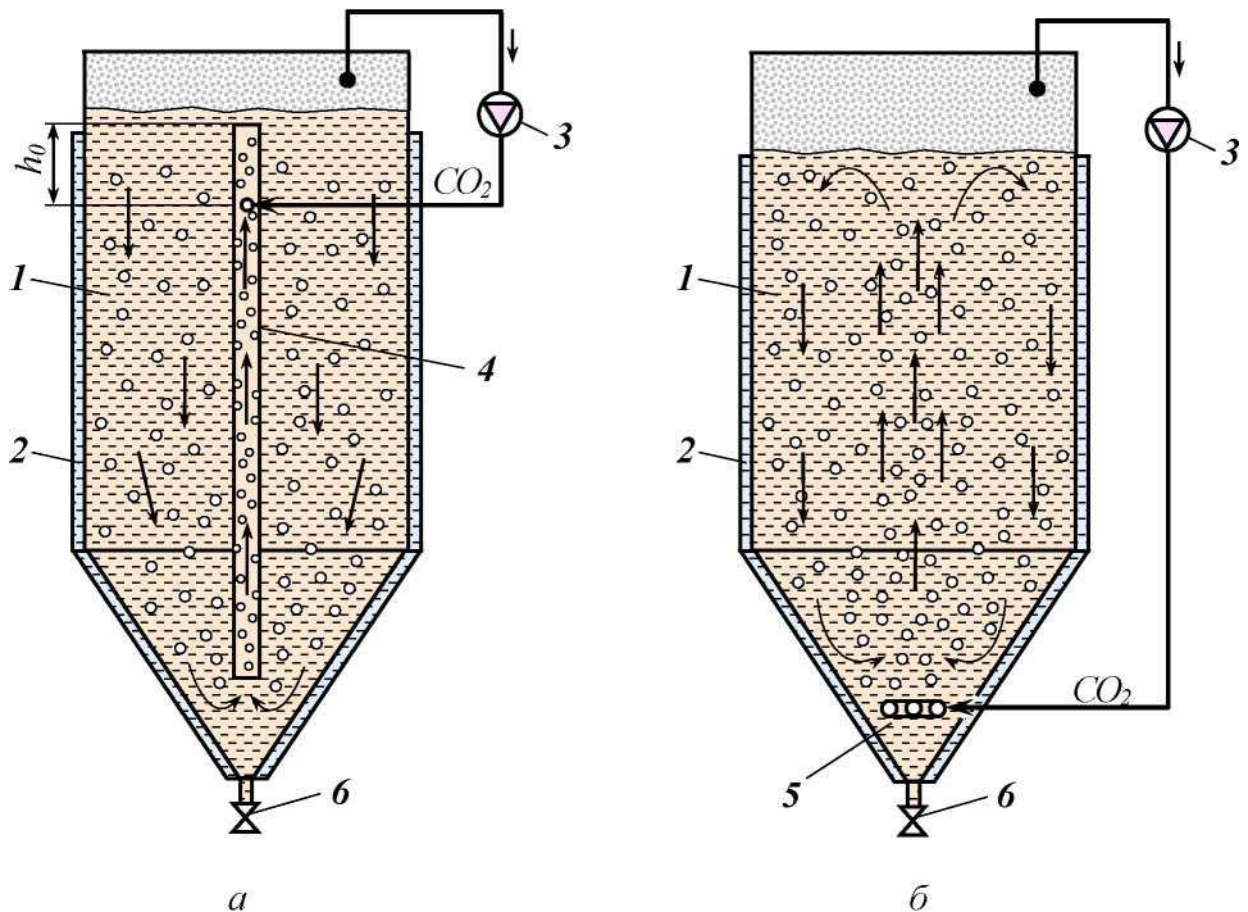


Рис. 3.5 - Схеми влаштування циркуляційних контурів: 1 – бродильний апарат; 2 – сорочка охолодження; 3 – компресор; 4 – циркуляційна труба; 5 – газорозподільний пристрій; 6 – запірна арматура

Введення  $\text{CO}_2$  менш об'єму газової фази в циркуляційну трубу навіть на обмеженій її висоті  $h$  приводить до підвищеного вмісту в ній диспергованої газової фази. За таких умов в трубі 4 виникає активний висхідний газорідинний потік, який підсилюється потенціалом розчиненого газу, що у зв'язку з цим дозволяє призупинити роботу компресора (рис. 3.5, а) [25] і при цьому висхідний потік в циркуляційній трубі продовжує своє існування. Енергетичне джерело у такому випадку обумовлюється градієнтом розчиненого  $\text{CO}_2$  по висоті середовища в апараті.

Циркуляційний контур по рис. 3.5, б влаштовується за умови безперервної роботи компресора, який має долати гідростатичний протитиск рідинної фази.

Порівняння цих двох схем дозволяє віддати перевагу випадку з ерліфт-насосом у зв'язку з обмеженням тиску газової фази, створюваним компресором.

Зупинимося на більш ґрунтовному аналізі явищ енерго- і масообміну, який має місце в подібних випадках. Початку процесу відповідає заповнення апарата культуральним середовищем з концентрацією цукрів 12...13% з додаванням дріжджової маси. Розчин сухих речовин в рідинному середовищі після доволі енергонасичених етапів попередньої обробки є структурою з високим рівнем гомогенізації, однак дріжджові клітини здатні до процесів седиментації. Саме це визначає необхідність створення гідродинамічних режимів з підвищеними рівнями енергетичних потенціалів [35].

В досліджуваній системі первинне енергоджерело присутнє у формі хімічної енергії вуглеводнів, які мають трансформуватися у спирт і діоксид вуглецю. При цьому утворення спирту і діоксиду вуглецю має подвійний термодинамічний прояв, що супроводжується виділенням теплової енергії і утворенням диспергованої газової фази CO<sub>2</sub>.

Виділена тепла енергія у кількості 169 кДж/моль глюкози у сполученні з тепловою енергією холодного джерела реалізується у формі, яку *гіпотетично* можливо вважати системою для перетворення теплової енергії у механічну роботу перемішування середовища. У відповідності до ідеального циклу Карно ККД такої системи визначається відомою залежністю:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad (3.35)$$

де  $T_1$  і  $T_2$  – відповідно абсолютні температури гарячого і холодного джерел.

Якщо прийняти  $T_1 = 283$  К і  $T_2 = 270$  К, то маємо

$$\eta = \frac{283 - 270}{283} \cdot 100 = 4,59 \%$$

Оцінка ККД у формі виразу (3.35) скоріше за все може вважатися помітно наближеною у тому числі і у зв'язку з тим, що на режим циркуляції впливає гравітаційне поле. Однак та обставина, що за значних об'ємів середовищ режим охолодження порушується приводить до висновку про очікувані обмежені значення ККД.

Аабсолютна швидкість визначається сумою відносної швидкості та швидкості газорідинної суміші в циркуляційних контурах:

$$W_{\text{абс.}} = W_{\text{відн.}} + W_{\text{шпр.к.}} \quad (3.36)$$

З точки зору інтересів інтенсивного масообміну на межі поділу фаз важливим є гідродинамічний показник з назвою «швидкість оновлення поверхонь контактування» [2]. Очевидно, що вона залежить від фізико-хімічних властивостей середовищ, розчинності газової фази в рідинній і від швидкості спливання газових бульбашок. При цьому значення має та обставина, що спливання бульбашок супроводжується їх деформацією з переходом до форми еліпсоїдів під дією опорів середовищ. Для окремої бульбашки ці зміни, рівно як і реакція середовища на них, є відносно помітними, однак в масовому диспергованому газорідинному потоці ці зміни нівелюються в опосередкованому вигляді. Для режимів усталеного руху швидкість  $w$  характеризується рівністю сил рушійних і сил опору. За рушійні прийнято називати Архімедові сили, яким відповідає залежність:

$$P_{\text{Арх.}} = \rho g V_6, \quad (3.37)$$

а сили опору записуються у формі:

$$P_{\text{оп.}} = \xi \frac{\pi d_6^2}{4} \cdot \frac{w_{\text{відн.}}^2}{2}, \quad (3.38)$$

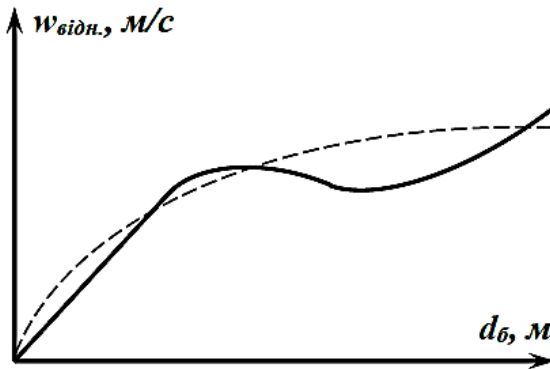
де  $\xi$  – коефіцієнт опору середовища;  $\rho$  – питома маса рідинного середовища;  $d_6$  – діаметр газових бульбашок;  $V_6$  – об'єм бульбашки;  $g$  – прискорення вільного падіння.



Прирівнювання сил рушійних і сил опору дозволяє записати:

$$\rho g V_6 = \xi \frac{\pi d_6^2}{4} \cdot \frac{w_{\text{відн.}}^2}{2}, \quad (3.39)$$

звідки



$$w_{\text{відн.}} = \sqrt{\frac{32 \rho g d_6}{3 \xi}}, \quad (3.40)$$

маючи на увазі, що

$$V_6 = \frac{4}{3} \pi d_6^3.$$

Як бачимо, залеж-

ність величини відносної швидкості від діаметра бульбашки має параболічний характер. Численні

експериментальні дослідження по визначенню  $w_{\text{відн.}}$  дають певне наближення

Співвідношення тиску і температури має вид:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1}. \quad (3.41)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^k. \quad (3.42)$$

де  $k$  – показник адіабати.

Об'єми і діаметри газових бульбашок взаємопов'язані і у відповідності до зазначених умов маємо для ізотермічного процесу:

$$d_2 = d_1 \sqrt[3]{\frac{P_1}{P_2}}. \quad (3.43)$$

і для адіабатного процесу:

$$d_2 = d_1 \sqrt[3]{\frac{P_1}{P_2}}. \quad (3.44)$$

Одночасно з діаметрами бульбашок зростають їх площі поверхні і такі зростання відображуються залежностями в ізотермічному і адіабатному процесах відповідно:

$$\frac{S_{6.2}}{S_{6.1}} = \left( \sqrt[3]{\frac{P_1}{P_2}} \right)^2 ; \quad (3.45)$$

$$\frac{S_{6.2}}{S_{6.1}} = \sqrt[3]{\frac{P_1}{P_2}} ; \quad (3.46)$$

Якщо в ізотермічному процесі врахувати координати газової бульбашки, то умову (3.44) запишемо у формі:

$$d_2 = d_1 \sqrt[3]{\frac{H_{(n)}}{H}} , \quad (3.47)$$

де  $H_{(n)}$  і  $H$  – початкова і кінцева координати відліку переміщень бульбашок.

У результаті даних щодо залежності (3.47) по кожній з координат  $H$  можливо визначитися зі значенням діаметра  $d_2$ . Це означає можливість перейти до оцінки енергетичних проявів у взаємодії бульбашок з рідинним середовищем.

У зв'язку з цим звернемося до умови (3.38), яка теоретично визначає опір переміщенню  $P_{оп}$ . Очевидно, що умови взаємодії газової бульбашки і рідинної фази підлягають закону рівності дії і протидії. Це означає, що рідинна фаза сприймає вказану силову дію  $P_{оп}$  у певній локальній зоні. Але окрім визначеної величини  $P_{оп}$  маємо в кожній локальній зоні швидкість точки прикладання вказаної сили. Тоді миттєва потужність, що при цьому розвивається Архімедовою силою, дорівнює:

$$N_{л.} = P_{оп} \cdot w_{відн.} . \quad (3.48)$$

Підстановка величин в останню умову дозволяє записати:

$$N_{л.} = \xi \frac{\pi d_6^2}{8} w_{відн.}^3 = \xi \frac{\pi d_6^2}{8} \left( \sqrt{\frac{32 \rho g d_6}{3 \xi}} \right)^3 , \quad (3.49)$$

Архімедові сила має прояв дії на середовище від кожної газової бульбашки, а загальний результат оцінюємо на основі принципу суперпозиції. Кількісну оцінку таких дій здійснимо з врахуванням утримувальної здатності. Якщо погодитися на можливість використання такого поняття, як середній діаметр газових бульбашок  $d_{6,c}$ , то тоді кількість  $z$  їх у загальному масиві складає:

$$z = \frac{3u}{4\pi d_6^3}, \quad (3.50)$$

У загальному випадку величину утримувальної здатності визначають миттєвим об'ємом газової фази, яка утримується в рідинній, а фізичний вимір цієї величини здійснюється різницею висоти газорідинної суміші і рідинної фази.

Подальший аналіз одержаних залежностей приводить до логічного висновку про те, що енергетичний вплив на зброджуване середовище і який має вважатися важливим чинником гомогенізації середовища, стосується саме величини утримувальної здатності.

Такий висновок відображується сукупністю формул (3.49) та (3.50), які дозволяють записати значення миттєвої потужності для всієї системи у формі:

$$N = \xi z \frac{\pi d_6^2}{8} \left( \sqrt{\frac{32\rho g d_6}{3\xi}} \right)^3 = \xi \frac{3u}{4\pi d_6^3} \cdot \frac{\pi d_6^2}{8} \left( \sqrt{\frac{32\rho g d_6}{3\xi}} \right)^3 = 0,09375 \frac{\xi u}{d_6} \left( \sqrt{\frac{32\rho g d_6}{3\xi}} \right)^3. \quad (3.51)$$

Присутність у правій частині фізичних величин відображує властивості середовища: коефіцієнт опору  $\xi$ , питома маса  $\rho$ , прискорення вільного падіння  $g$ , які впливають на утримувальну здатність цього середовища.

Для оцінки можливостей енергетичного впливу на систему звернемося до залежності (3.51). Очевидно, що фізико-хімічні параметри середовища є наближено стабільними, а тому параметри  $\xi$ ,  $\rho$ ,  $g$  практично неваріативні. Оскільки діаметри бульбашок також відображують впливи попередньо зазначених чинників, то залишається зробити висновок про те, що лише утримувальна здатність  $u$  залишається варіативним фактором впливу [9].

Така особливість утримувальної здатності за стабільної динаміки генерування  $CO_2$  пов'язується з геометрією апарата. Схоже на те, що сучасні

розміри ЦКТ є втіленням багаторічних пошуків і помилок у співвідношеннях об'ємів, діаметрів і висоти апаратів. Проте, як показує дане дослідження, пошуки геометричних параметрів технологічних апаратів продовжуються. Важливою особливістю бродильних апаратів є те, що генерування газової фази в них здійснюється у повному об'ємі рідинної фази. Це означає, що присутність диспергованої газової фази по висоті апарата буде помітно відрізнятися. Найменшою утримувальна здатність буде в нижніх шарах середовища, а найбільша – у верхніх. Це пов'язано з тим, що газова фаза синтезована в нижній і середній частинах об'ємів доповнить газову фазу верхньої частини.

Впливи геометричних параметрів апаратів на величину утримувальної здатності пов'язані з наступним.

Швидкість генерування газової фази визначена технологією процесу і в кожному поперечному перерізі апарата можливо виявити ознаки диспергованої газової фази. Якби джерелом такої фази був би, наприклад, барботажний аераційний пристрій, то кількість поданого через нього газу, віднесена до площі поперечного перерізу визначалася б показником приведеної швидкості, яка уособлює в собі інтенсивність аерації. Очевидно, що для рівновеликих за об'ємами апаратів і за однакових режимів введення газової фази приведена швидкість і щільність розташування газової фази буде більшою в апаратах менших діаметрів.

У бродильних апаратах з особливостями генерування CO<sub>2</sub> ситуація дещо відмінна, але приведена швидкість газової фази у цьому випадку також однозначно визначає інтенсивність енергообміну і масообміну. Неврахування цих особливостей свого часу привела до невдалих рішень на рівні використання апаратів з діаметрами до 5 м і більше. На сьогодні ще залишаються в експлуатації апарати зі співвідношенням висоти середовища до діаметра від 1:1 до 5:1. Стосовно таких співвідношень можливо чітко прогнозувати переваги апаратів зі співвідношенням 5:1.

Формування таких переваг пов'язується з підвищеною величиною утримувальної здатності, що, як було показано раніше, приводять до

підвищеного енергетичного потенціалу механічного перемішування [22]. Окрім того збільшена утримувальна здатність підвищує рівень очищення середовищ від проміжних газових компонентів бродіння. Оскільки  $\text{CO}_2$  генерується дріжджовими клітинами у молекулярній формі передається в рідинне середовище на межі поділу фаз, то вірогідність флотаційних явищ зростає, що сприяє інтенсивному масообміну міждріждами і середовищем. При цьому явище зародження газових бульбашок правомірно стосується всяко локально зони, що насправді має місце, але повна рівномірність з точки зору їх появи порушується присутністю циркуляційних контурів.

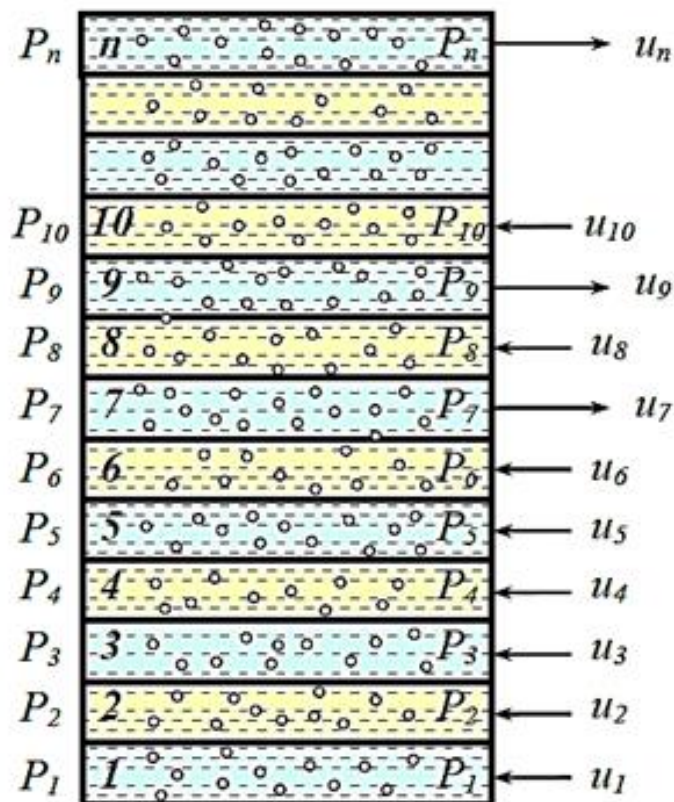


Рис. 3.7 - Розрахункова схема до визначення утримувально здатності газорідинних середовищ

Генерування газової фази в локальних зонах з підвищеними гідростатичними тисками є додатковим енергетичним джерелом, яке виникає в процесах бродіння. При цьому енергетичні витрати на організацію і здійснення

технології залишаються незмінними за виключенням подовження часу в перехідному процесі в період лаг-фази і відповідно в режимах насичення середовищ на  $\text{CO}_2$ .

Виконаємо перехід до оцінки величини утримувальної здатності в середовищі з безперервним генеруванням  $\text{CO}_2$ . Розрахункова схема цього випадку наведена на рис. 3.7. В умовному позначенні висоту газорідного середовища розіб'ємо на пділянок однакової висоти.

Кожному з визначених об'ємів відповідають величини гідростатичних тисків  $P$ , до яких додаються тиски над газорідним середовищем.

За обмежених висот прошарків можливо рахувати, що вказані тиски відображують їх середні значення. Генерування  $\text{CO}_2$  відбувається в кожному прошарку, але перехід з кожного нижнього у верхньорозташований газової фази за об'ємом зростає. Так при ізотермічному процесі перехід  $\text{CO}_2$  з величиною из першого прошарку в другий характеризується співвідношенням:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{u'_2}{u_1} \quad (3.52)$$

Звідси

$$u'_2 = \frac{P_1 u_1}{P_2}, \quad (3.53)$$

де  $u'_2$  – утримувальна здатність по газовій фазі, одержана за рахунок трансформації  $u_1$ .

Разом з тим в кожному прошарку генерується  $\text{CO}_2$  у кількостях, які відображаються наближеними значеннями  $u$ . Це означає можливість записати для другого прошарку:

$$u_2 = u + \frac{P_1 u_1}{P_2} = u + \frac{P_1}{P_2} u. \quad (3.54)$$

Тоді для третього прошарку отримуємо:

$$u_3 = u + \frac{P_2}{P_3} \left( u + \frac{P_1 u}{P_2} \right). \quad (3.55)$$

Аналогічно для четвертого прошарку записуємо:

$$u_4 = u + \frac{P_3}{P_4} \left( u + \frac{P_2}{P_3} \left( u + \frac{P_1 u}{P_2} \right) \right). \quad (3.56)$$

Записані умови (3.54)–(3.56) трансформуємо до виду:

$$u_n = u + \frac{P_{n-1}}{P_n} u_{n-1}. \quad (3.57)$$

Очевидно, що загальна утримувальна здатність повинна визначатися умо-  
вою

$$u_{\text{заг.}} = u_1 + u_2 + u_3 + \dots + u_n. \quad (3.58)$$

Одержані залежності слід оцінювати першим наближенням, оскільки, як було показано, саме утримувальна здатність по газовій фазі визначає миттєву потужність, присутню у середовищі. Це однозначно визначає інтенсивність циркуляційних контурів, збільшуючи в них швидкості рідинної фази і, одночасно, зменшуючи величини утримувальної здатності. Проте незважаючи на цю особливість взаємовпливів параметрів головний висновок залишається в силі: утримуюча здатність зброджуваних середовищ однозначно пов'язана з геометрією апаратів і збільшення в них співвідношення висоти до діаметра за їх однакових об'ємів приводить до зростання утримувальної здатності та енергетичного потенціалу перемішування.

### 3.4 Енергетичні імпульси в середовищах бродильних апаратів

Накопичення енергетичних потенціалів у формі розчиненого діоксиду вуглецю завершується утворенням диспергованої газової фази в середовищах і за герметичних технологічних апаратів збільшенням тиску в об'ємах газових

середовищ [41]. Приріст такого тиску у своїй динаміці впливає на генерування газової фази у відповідності до закону Генрі, за яким розчинність  $\text{CO}_2$ , як і інших газів, пропорційна парціальним тискам:

$$c_H = kP, \quad (3.59)$$

де  $c_H$  – граничне насичення середовища діоксидом вуглецю,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $k$  – константа Генрі,  $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{Па})$ ;  $P$  – парціальний тиск відповідної газової фази,  $\text{Па}$ .

В умовах технологій бродіння газова фаза у надрідинному об'ємі і диспергована газова фаза представлені лише діоксидом вуглецю, а тому парціальні та фізичні тиски між собою співпадають. Таким чином в наших умовах величина  $P$  відображує загальне значення тиску.

Представлення закону Генрі у формі (3.59) носить класичний вид, однак насправді до неї слід ввести добавку, яка враховувала б вплив температури. Таке врахування має привести до форми:

$$c_H = c_H(P, t).$$

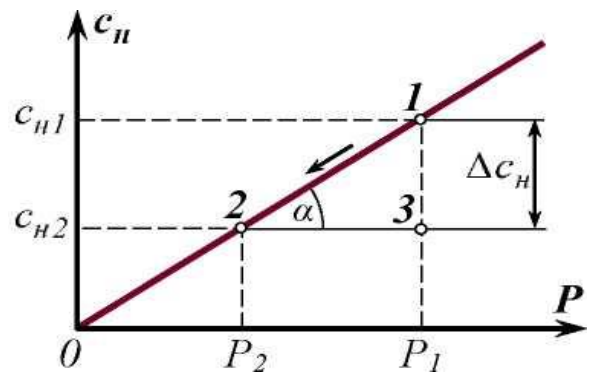


Рис. 3.8 - Залежність між термодинамічними параметрами у відповідності до закону Генрі

На графічних залежностях впливи температури враховуються кутом  $\alpha$ . Це означає, що для фіксованого значення температури зброджуваного середовища  $t = \text{const}$  залежність (3.59) наводиться у формі рис. 3.8.

Припустимо, що системою керування термодинамічних параметрів передбачено досягнення максимального тиску  $P_1 = P_{\text{max}}$  і від моменту його досягнення передбачається зниження до певного значення  $P_2$ . При цьому зниження концентрації розчиненого діоксиду вуглецю повинно скласти  $\Delta c_H$ :

$$\Delta c_H = c_{H1} - c_{H2}. \quad (3.61)$$



Виділення питомої кількості  $\Delta c_H$  з швидкоплинним перебігом у часі означає таке ж швидкоплинне збільшення утримувальної здатності з енергетичним імпульсом. При цьому

$$\Delta c_H = \Delta P \operatorname{tg} \alpha ; \quad (3.62)$$

$$\Delta P = P_1 - P_2 . \quad (3.63)$$

Важливо, що зміна тиску  $\Delta P$  від координати обраної точки не залежить. Це означає, що масова питома кількість  $\text{CO}_2$  від координати всякої точки також не залежить. Однак об'єм газу, що виділяється, від координати залежить і це означає, що величина утримувальної здатності також залежить від розташування відповідних прошарків середовища. очевидно, що газова фаза виділяється у формі масивів диспергованих бульбашок, загальний об'єм яких обчислюємо з використання рівняння Менделєєва-Клайперона:

$$V_{\text{пит.}} = \frac{m_{\text{CO}_2}}{P_{(к)}} RT . \quad (3.64)$$

Як було показано раніше питома маса  $\text{CO}_2$  є відомою і відомим є кінцевий тиск  $P_{(к)}$ , який відповідає обраній координаті  $H$ , тоді

$$P_{(к)} = P_0 + mgH . \quad (3.65)$$

Тому

$$V_{\text{пит.}} = \frac{m_{\text{CO}_2}}{P_0 + mgH} RT , \quad (3.66)$$

де  $R$  і  $T$  – відповідно універсальна газова фаза і абсолютна температура середовища.

Генерування дисперсної газової фази на фоні вже існуючої означає додатковий розрив суцільності середовища, що супроводжується збільшенням загального об'єму газорідного середовища і його «набуханням». Останнє означає присутність переміщення кожної складової рідинної маси середовища і всієї маси в цілому. Такий процес є перехідним, оскільки його дія в часі є обмеже-

ною у зв'язку з різким зниженням енергетичного потенціалу розчиненого газу. Математична модель, яка стосується такого перехідного процесу може записуватися у формі рівняння руху приведеної маси  $m$  системи

$$m\ddot{y} = P_{руш.} - P_{оп.}, \quad (3.67)$$

де  $m$  – приведена маса системи. У відповідності до принципу Релея  $m = \frac{1}{3} m_{р.ф.}$ , де  $m_{р.ф.}$  – загальна маса рідинної фази;  $P_{руш.}$  – приведена рушійна Архімедова сила;  $P_{оп.} = mg$  – сила опору переміщення приведеної масі системи;  $\ddot{y}$  – прискорення приведеної маси.

Процес додаткового нарощування утримувальної здатності є швидкоплинним з досягненням екстремуму за час  $t_{екс.}$  (рис. 3.9). Сила опору при переміщенні приведеної маси залишається величиною сталою, однак для математичної формалізації правої частини умови (3.67) необхідним є одержання експериментальних доповнень.

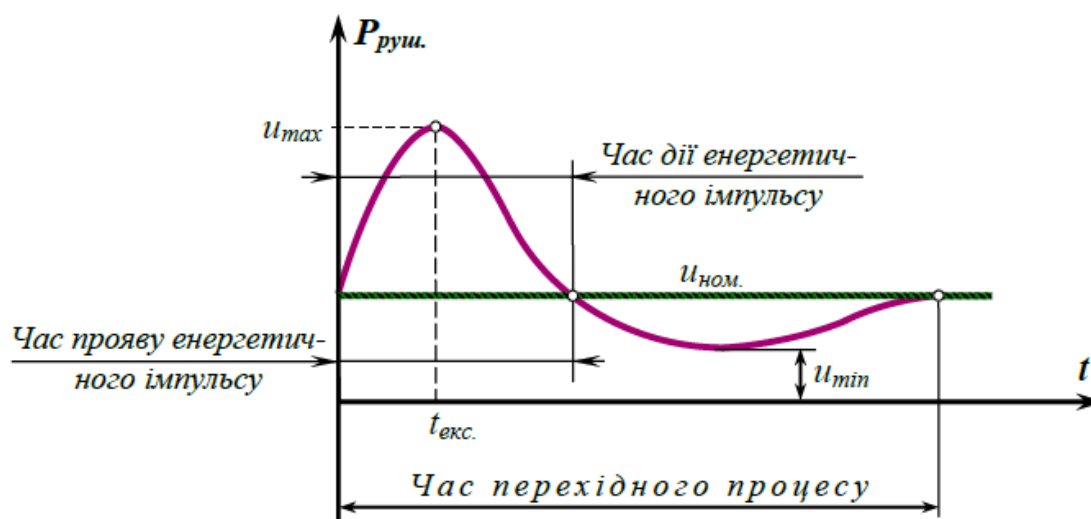


Рис. 3.9 - Графічна інтерпретація перехідного процесу, пов'язаного з енергетичним імпульсом

Важливо, що енергетичний імпульсу може бути програмованим за величиною і в часі за рахунок регульованої динаміки зниження тиску в газовому об'ємі. Очевидно, що остання може бути представлена різними законами і у тому числі лінійними з різними проміжками досягнення екстремального зна-

чення  $P_{руш.ек.}$ . У такому випадку на першому етапі маємо:

$$P_{руш.} = P_{руш.(n)} + k_y t; \quad (3.68)$$

$$m\ddot{y} = P_{руш.(n)} + k_y t - P_{оп.}, \quad (3.69)$$

де  $k_y$  – коефіцієнт пропорційності, Н/с.

Виконавши заміну  $\dot{y} = dy/dt$ , запишемо

$$d\dot{y} = \frac{P_{руш.(n)}}{m} dt + \frac{k_y t}{m} dt - \frac{P_{оп.}}{m} dt. \quad (3.70)$$

Тут  $P_{руш.(n)}$  відповідає початковій величині рушійної сили (і початковій величині утримувальної здатності). Інтегрування умови (3.70) дозволяє записати:

$$\dot{y} = \frac{P_{руш.(n)}}{m} t + \frac{k_y t^2}{2m} - \frac{P_{оп.}}{m} t + C, \quad (3.71)$$

де  $C$  – стала інтегрування.

Останню знайдемо за початкових умов:

$$t_{(n)} = 0; \quad y_{(n)} = P_{руш.(n)}; \quad \dot{y}_{(n)} = 0. \quad (3.72)$$

Тоді остаточно маємо:

$$\dot{y} = \frac{P_{руш.(n)} - P_{оп.}}{m} t + \frac{k_y t^2}{2m}. \quad (3.73)$$

Повторне інтегрування умови (3.73) дозволяє записати:

$$\dot{y} = \frac{dy}{dt}. \quad (3.74)$$

Здійснивши підстановку (3.74) і розділивши змінні маємо:

$$dy = \frac{P_{руш.(n)} - P_{оп.}}{m} t dt + \frac{k_y t^2}{2m} dt.$$

Інтегрування останнього виразу приводить до рівняння:

$$y = \frac{P_{руш.(n)} - P_{оп.}}{m} \cdot \frac{t^2}{2} + \frac{k_y t^3}{6m} + C'. \quad (3.75)$$

За початкових умов (3.72) маємо

$$C' = P_{руш.(n)}. \quad (3.76)$$

Остаточно координата газорідного середовища визначається залежністю:

$$y = P_{\text{руш.}} + \frac{P_{\text{руш.}(n)} - P_{\text{оп.}}}{m} \cdot \frac{t^2}{2} + \frac{k_y t^3}{6m}. \quad (3.77)$$

За умовою (3.77) досягається можливість визначення  $y_{\text{max}}$  і максимальної утримувальної здатності по  $\text{CO}_2$ .

Наведені міркування з аналітичними залежностями вказують на можливий важливий і значний перерозподіл енергетичних потенціалів. Проте, як бачимо, створений енергетичний імпульс завершується втратою енергетичного потенціалу на другій частині перехідного процесу. Разом з тим слід очікувати, що зміни в гідродинаміці середовища мало і, навіть, зовсім мало відобразяться на швидкості генерування газової фази. Іншими словами загальний енергетичний вплив за час перехідного процесу слід очікувати не змінним. Проте, якби дослідження підтвердили негативні впливи імпульсів, слід було б звернутись до стабілізації силових дій. Адже сили інерції в масивах рухомих середовищ впливають на газову фазу, додатково деформують її, змінюють умови масообміну і утримувальну здатність.

Таблиця 3.3

Складові і результати спиртового бродіння з початковою концентрацією цукру 10 %

Складові реакції	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$	$2 \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	$2\text{CO}_2$
Концентрація речовин, $\text{кг}/\text{м}^3$	100	51,11	48,88
Молекулярна маса, $\text{кг}/\text{кмоль}$	180	46	44
Температура розчину, %	293	293	293
Осмотичний тиск, МПа	1,354	2,707	2,707

Таблиця 3.4

Осмотичні тиски розчинів етанолу при  $T = 293 \text{ K}$ 

Вміст спирту, %	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Осмотичний тиск, МПа	0,5296	1,05	1,59	2,118	2,47	3,18	3,71	4,24	4,77	5,3
Вміст спирту, %	12	14	16	18	20	22	30	40	50	60
Осмотичний тиск, МПа	6,35	7,41	8,47	9,93	10,59	11,65	15,89	21,18	26,48	31,78

Таблиця 3.5

Осмотичні тиски розчинів  $\text{CO}_2$  при  $T = 293 \text{ K}$ 

Концентрація $\text{CO}_2$ , %	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Осмотичний тиск, МПа	0,28	0,55	0,83	1,11	1,38	1,66	1,94	2,22	2,49	2,77
Концентрація $\text{CO}_2$ , %	12	14	16	18	20	22	24	26	30	40
Осмотичний тиск, МПа	3,32	3,88	4,43	4,98	5,55	6,09	6,64	7,21	8,31	11,07

Таблиця 3.6

Осмотичні тиски розчинів цукрози при  $T = 293 \text{ K}$ 

Концентрація цукрози, %	10	20	30	40	50	60	70	80
Осмотичний тиск, МПа	0,712	1,425	2,136	2,848	3,560	4,272	4,984	5,696

Наведені результати осмотичних тисків приводять до висновку про те, що саме завдяки обмеженій розчинності  $\text{CO}_2$  досягається можливість зброджування середовищ в рамках існуючих технологій і параметрів.

В усталених режимах хоча б з наближеною стабілізацією параметрів можливим є утворення матеріальних і енергетичних потоків в масо- і енергообміну між клітиною і середовищем. Очевидно, що динаміка виведення

молекулярного потоку CO<sub>2</sub> характеризується певними співвідношеннями концентрацій молекул у середовищі і клітинах. У відповідності до цих особливостей різкий відступ від цієї умови динамічної рівноваги супроводжується реакцією кожної клітини на рівні метаболізму.

На основі існуючої інформації щодо можливостей перебудови в процесах життєдіяльності мікроорганізмів за змінних умов зовнішнього середовища достовірним може бути висновок про існування якоїсь реакції. Проте такий висновок є лише феноменологічно обґрунтованим на тій основі, що стрибки в динаміці зброджування цукрів не зафіксовані. Разом з тим різке зниження осмотичних тисків на періоди перехідних процесів за рахунок зниження концентрацій CO<sub>2</sub> має в собі потенціал впливу, який очікується позитивним.

Проте остаточна оцінка впливів різких змін осмотичних тисків залишається не завершеною. Останнє характеризується тим, що ефекти їх зниження доповнюються змінами тисків з усіма їх наслідками.

Важливо, що зміна осмотичних тисків є варіативним фактором, який змінюється за величиною і у часі. Таким чином, зниження тиску в бродильному середовищі приводить до енергетичного імпульсу, зростання утримувальної здатності, осмотичного шоку, генерування механічних інерційних впливів, інтенсифікація масообміну.

На рис. 3.10 у графічній формі наведено перелік і взаємодію між факторами, зародження яких пов'язане з різким зниження тисків над газорідними середовищами за участю діоксиду вуглецю.

Очевидно, що вибір параметрів енергоімпульсних впливів за показниками перепадів тиску і часу перебігів процесів може бути різним, хоча, як відмічалось, енергетичний потенціал в сумарній оцінці за перехідний процес залишається сталим.

Третім варіативним фактором впливу на перебіг перехідних процесів є частота спрацювання енергетичних імпульсів. Нарощування цього фактора приводить до обмежень в значеннях перепадів тисків та інших значень параметрів супроводження. Витікає висновок про можливість вибору різних

параметрів першочергового значення для вирішення технологічних задач.

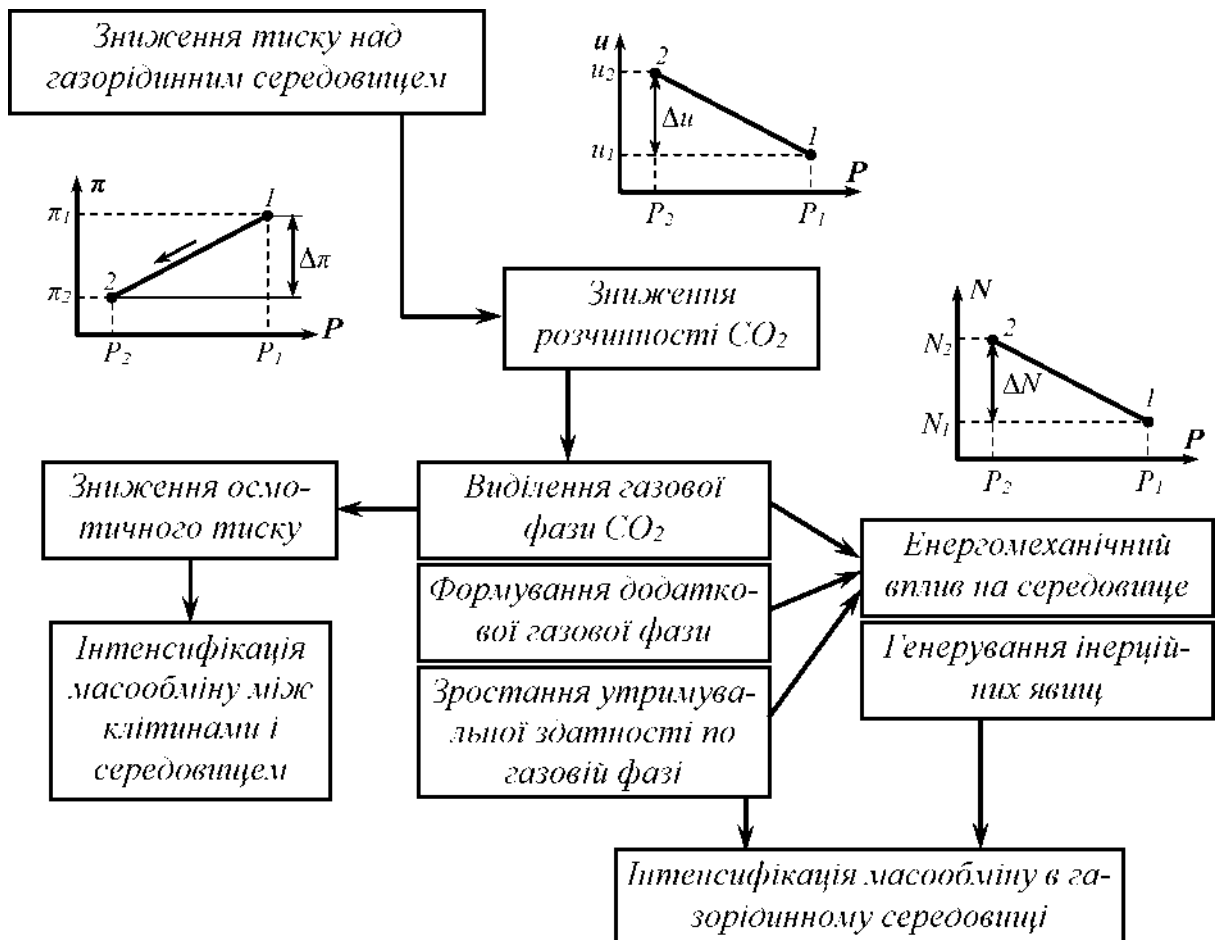


Рис. 3.10 - Перелік взаємодій факторів, що супроводжують енергоімпульсні зниження тисків у газорідних середовищах

Можливості і необхідність вибору параметрів у своїй послідовності розпочиналися з оцінки впливів геометрії технологічних апаратів. Аналіз сукупності факторів, які супроводжують технології з самогенеруванням в повних об'ємах рідинної фази диспергованої газової фази, привів до висновку про доцільність циліндрично-конічних форм апаратів.

Відомо, що рівнодіюча сил внутрішнього тиску  $R$  на криволінійну поверхню одиничної висоти визначається добутком тиску на площу діаметрального перерізу апарата

$$R = pDh_1, \quad (3.79)$$

де  $h_1 = 1$  м – одинична висота стінки апарата.

У нашому випадку у зв'язку з присутністю гідростатичного тиску загальний тиск не є сталим і тому:

$$R = (p_0 + \rho gh)Dh_1. \quad (3.80)$$

Гідростатичний тиск (рис. 3.11) враховується складовою  $\rho gh$ :

за умови, що  $y = \frac{3}{4}(H + H_k)$ .

Якщо  $H \geq H_k$ , то

$$\sigma_{t\max} = \frac{\gamma \operatorname{tg} \alpha}{48 \cos \alpha} (H + H_k)^2 \quad (3.85)$$

$$\sigma_m = \frac{\gamma \operatorname{tg} \alpha}{2\delta \cos \alpha} \left( H + H_k - \frac{2}{3}y \right) y, \quad (3.81)$$

де  $H$  – висота середовища у циліндричній частині апарата;  $H_k$  – висота конічної частини;  $\alpha$  – кут твірної конуса.

$$\sigma_t = \frac{\gamma y \operatorname{tg} \alpha}{\delta \cos \alpha} (H + H_k - y). \quad (3.82)$$

Якщо  $H > H_k/3$ , то

$$\sigma_{m\max} = \frac{\gamma \operatorname{tg} \alpha}{2\delta \cos \alpha} \left( H + \frac{H_k}{3} \right) H_k \quad (3.83)$$

за умови, що  $y = H_k$ .

Якщо  $H < H_k/3$ , то

$$\sigma_{m\max} = \frac{3\gamma \operatorname{tg} \alpha}{16\delta \cos \alpha} (H + H_k)^2 \quad (3.84)$$

при  $y = \frac{H + H_k}{2}$ .

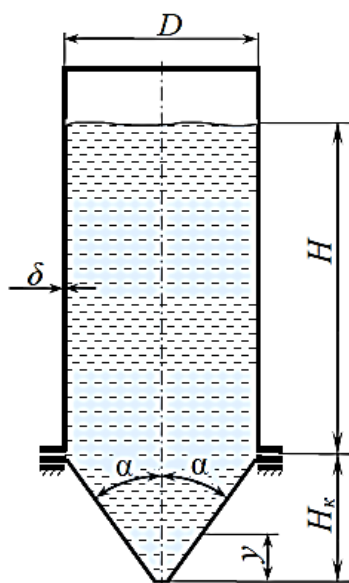
$$\text{За умови } H \leq H_k \quad \sigma_{t\max} = \frac{\gamma \operatorname{tg} \alpha}{\delta \cos \alpha} H H_k \quad \text{при } y = H_k. \quad (3.86)$$



За наведених залежностей видно, що величини і зони досягнення максимальних меридіональних і колових напружень залежать від співвідношень висоти циліндричної і конічної частин. У співвідношенні основних розмірів важливе значення належить обраному куту  $\alpha$ :

$$D = 2H_k \operatorname{tg} \alpha. \quad (3.87)$$

Однак циліндрична частина має деякі особливості в навантаженні, оскільки тут маємо



$$\sigma_t = \frac{R}{h\delta} = \frac{pDh}{h\delta} = \frac{pD}{\delta} \leq [\sigma]_t; \quad (3.88)$$

$$\delta = \frac{pD}{[\sigma]_t},$$

$$(3.89)$$

де  $[\sigma]_k$  – допустимі колові навантаження.

Оскільки масові витрати матеріалу  $M_m$  визначаються залежністю

$$M_m = \pi D h \delta \rho, \quad (3.90)$$

Рис. 3.11. Розрахункова схема до визначення напружень в дні ЦКТ

де  $\rho$  – питома маса матеріалу оболонки, то це означає, що за інших рівних входних параметрів рівномірності умови і стабілізовані матеріальні витрати досягаються відповідним вибором параметрів  $D$  і  $\delta$ .

Записані умови міцності, що в різних формах стосуються оболонок циліндро-конічних апаратів, стосуються випадків зі сталими значеннями внутрішніх тисків. Хоча перехід до імпульсних видів навантажень відображується іншою математичною формалізацією опору матеріалів, однак у цьому випадку

гаються відповідним вибором параметрів  $D$  і  $\delta$ .

Записані умови міцності, що в різних формах стосуються оболонок циліндро-конічних апаратів, стосуються випадків зі сталими значеннями внутрішніх тисків. Хоча перехід до імпульсних видів навантажень відображується іншою математичною формалізацією опору матеріалів, однак у цьому випадку має місце зниження максимальних запрограмованих тисків до менших значень тисків у газовій фазі зі збереженням закону розподілу гідростатичних тисків.

Особливості перебігу технологічних і енергомасообмінних процесів та виявлені недоліки в їх здійсненні на основі поглибленого аналізу завершилися новітніми розробками, зафіксованими на рівні винаходів.

має місце зниження максимальних запрограмованих тисків до менших значень тисків у газовій фазі зі збереженням закону розподілу гідростатичних тисків.

Особливості перебігу технологічних і енергомасообмінних процесів та виявлені недоліки в їх здійсненні на основі поглибленого аналізу завершилися новітніми розробками, зафіксованими на рівні запропонованих конструкцій.

На рис. 3.12 показано бродильний апарат. Він складається з циліндричного корпусу 1, конічного днища 2, технічного люка 3, патрубків 4 підведення та відведення середовища, запобіжного клапана 5, клапана санітарної обробки 6, циркуляційного контуру у складі трубопроводу 7, компресора 8, теплообмінника 9, барботажного газорозподільника 10, з'єднаного з газовим простором та рідинним середовищем бродильного апарата.

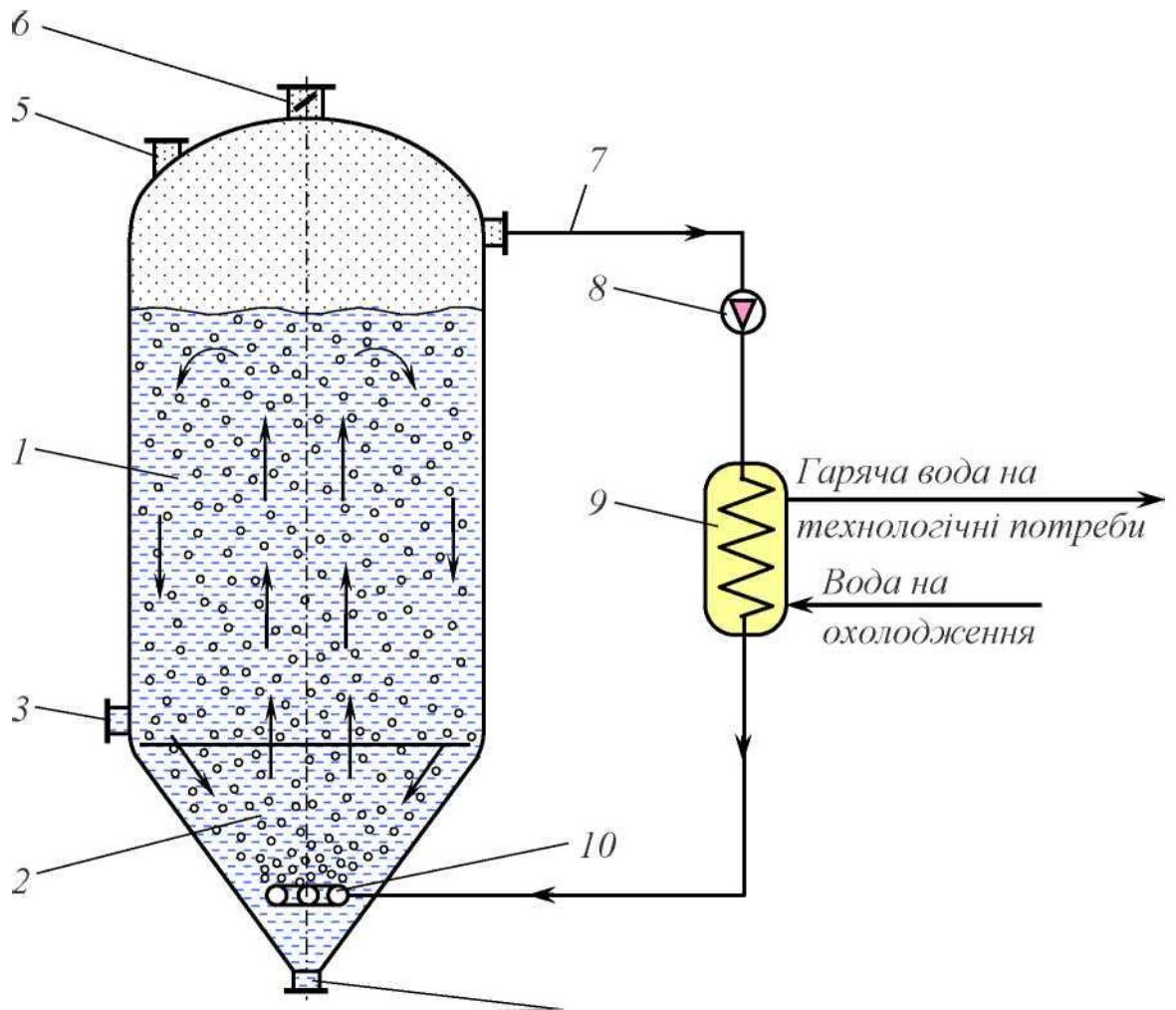


Рис. 3.12 - Бродильний апарат

Бродильний апарат працює наступним чином. Через патрубок 4 підведення середовища здійснюється заповнення об'ємів конічного днища 2 і циліндричного корпусу 1. У процесі бродіння відбувається насичення середовища діоксидом вуглецю, зростає внутрішній тиск в газовому просторі циліндричного корпусу.

Стискання газової фази, яка трубопроводом 7 потрапляє у компресор 8, приводить до підвищення температури на виході з компресора 8, що забезпечує відведення теплового потенціалу в теплообміннику 9 проміжним теплоносієм (водою).

Технічний люк 3, запобіжний клапан 5 та клапан санітарної обробки 6

використовується для технічної підготовки апарата до наступного циклу.

Технічний результат полягає в можливості трансформації і використання теплового потенціалу, інтенсифікації процесу бродіння та підвищення продуктивності апарата.

На рис. 3.13 показано бродильний апарат.

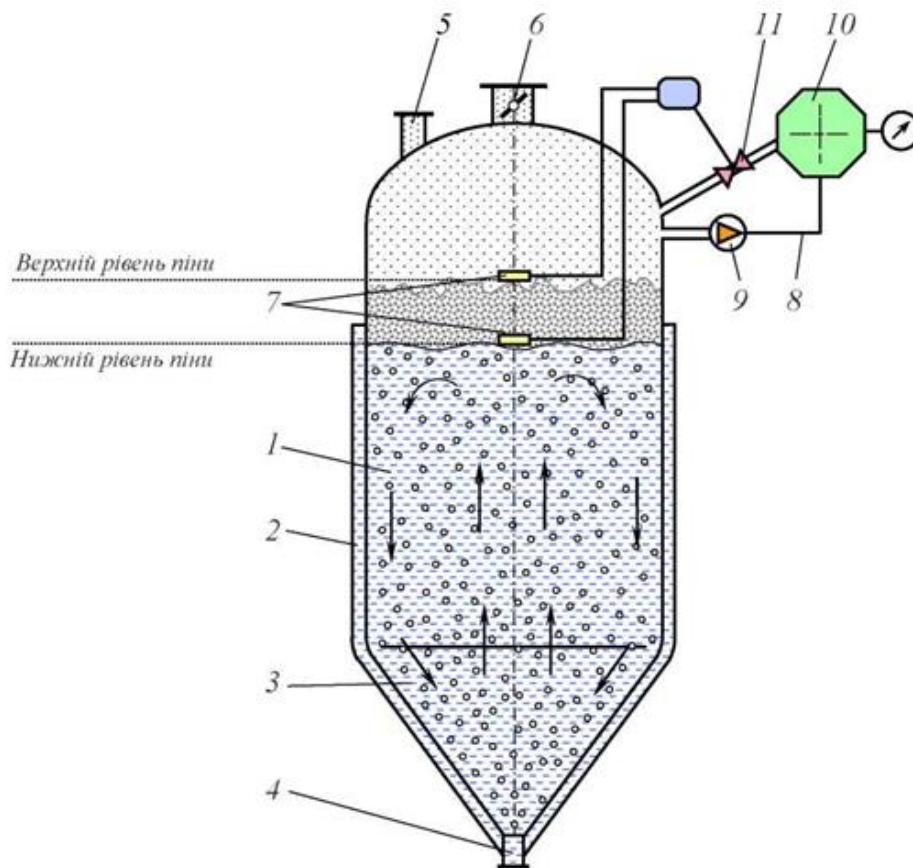


Рис. 3.13 - Бродильний апарат

Бродильний апарат складається з циліндричного корпусу 1, сорожки охолодження 2, конічного днища 3, патрубків підведення і відведення середовища, запобіжного клапана 5, клапана санітарної обробки 6, системи стабілізації висоти пінної фракції у складі датчиків висоти шару піни 7, трубопроводу 8, компресора 9, ресивера 10 та регулювального клапана 11.

Бродильний апарат працює наступним чином.

Через патрубків підведення середовища здійснюється заповнення об'ємів конічного днища 3 і циліндричного корпусу 1 і розпочинається процес бродіння, у результаті якого утворюється діоксид вуглецю, що поступово

заповнює надрідинний простір апарата. Компресор 9 по трубопроводу 8 нагнітає діоксид вуглецю в ресивер 10 і стискає його до величини 0,2...0,3 МПа. У зв'язку з присутністю у середовищі поверхнево-активних речовин і виділення CO<sub>2</sub> утворюється пінна фракція, шар якої поступово збільшується, заповнюючи надрідинний простір. При досягненні певної висоти шару піни спрацьовує датчик 7, чим подається команда на з'єднання регулювальним клапаном 11 об'єму ресивера з надрідинним простором апарата. Підвищення тиску в апараті руйнує пінну фракцію, утримуючи її на мінімальному рівні, забезпечуючи збільшення корисного об'єму апарату.

Термостабілізація середовища здійснюється за допомогою сорочки охолодження 2. Запобіжний клапан 5 та клапан санітарної обробки 6 використовуються для технічної підготовки апарата до наступного циклу.

Технічний результат полягає в забезпеченні більш повного використання об'єму апарату та збільшенні продуктивності [48].

На рис. 3.14 показано циліндрично-конічний танк для зброджування пива, що складається з циліндричного корпусу 1, конічного днища 2, сорочки охолодження 3, патрубків введення 4 та відведення 5 середовища, запобіжного клапана 6, клапана санітарної обробки 7, трубопроводів циркуляційного контуру 8, компресора 9, дворівневого барботажного газорозподільвача 10, контролера 11 і датчиків температур 12.

Циліндрично-конічний танк для зброджування пива працює наступним чином. Через патрубок введення середовища 4 здійснюється заповнення об'ємів конічного днища 2 і циліндричного корпусу 1. В процесі бродіння відбувається насичення середовища діоксидом вуглецю, зростає внутрішній тиск в газовому просторі циліндричного корпусу. Теплота, яка виділяється при бродінні, відводиться через сорочку охолодження 3. Наявність сполучення зовнішньої сорочки охолодження і нижньої конічної частини приводить до затримки в останній найбільш охолодженої частини середовища.

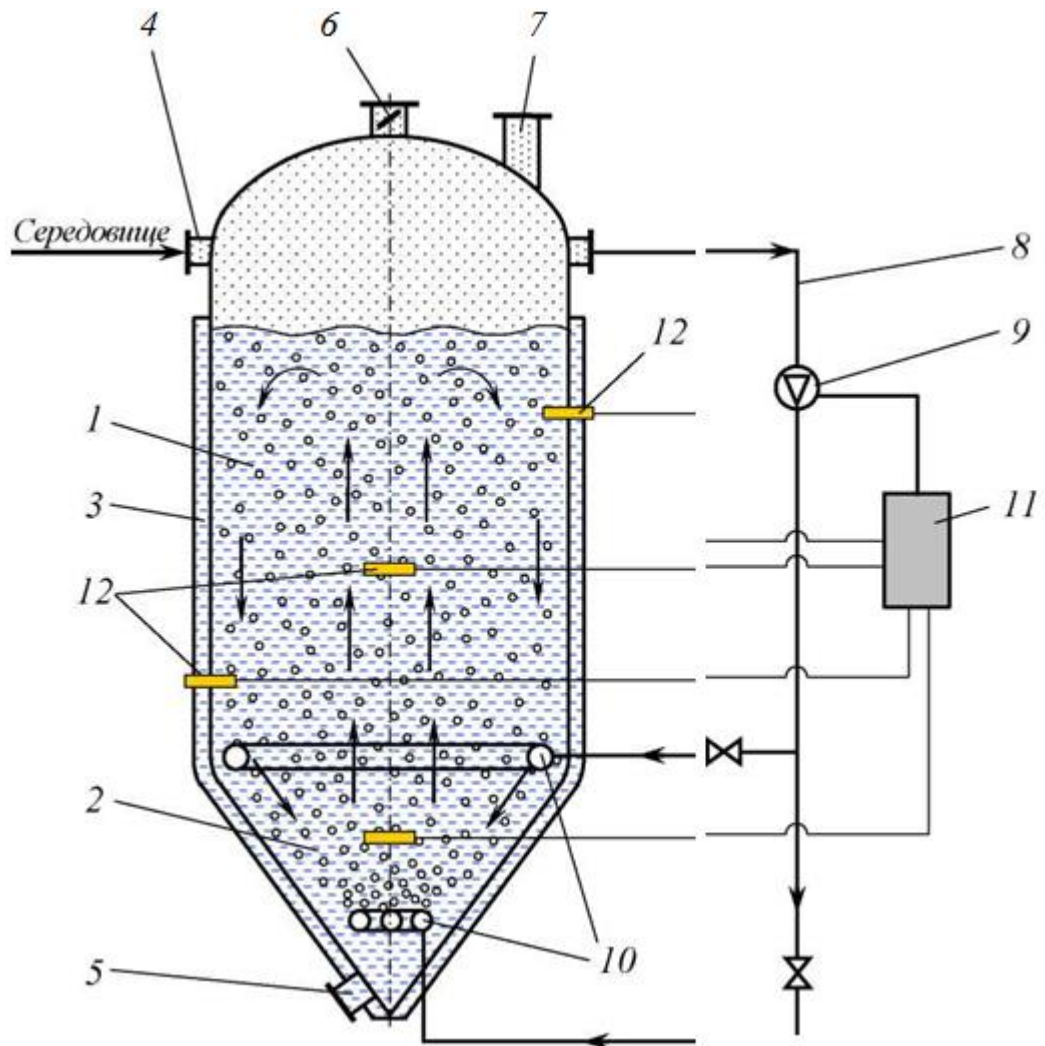


Рис. 3.14 - Циліндрично-конічний танк для збродження пива

Подавання газової фази трубопроводом 8 за допомогою компресора 9 і розподілення її в дворівневому барботажному розподільнику 10 забезпечує перемішування середовища і вирівнювання температур. Перший рівень барботажного розподільника встановлено у нижній частині конічного днища, а верхній рівень – у нижній частині циліндричного корпусу біля стінки. Подача діоксиду вуглецю у нижню частину конічного днища створює циркуляційний контур, який сприяє підніманню найбільш охолодженого середовища у верхню частину циліндрично-конічного танку, що забезпечує його перемішування і вирівнювання температур у всьому об'ємі танка. Надходження стиснутого  $\text{CO}_2$  у верхній рівень барботажного розподільника дозволяє зупинити опускання

охолодженої частини середовища.

Режими і напрямки подавання газової фази компресором визначаються контролером 11 з врахуванням даних, отриманих від розміщених в локальних зонах датчиків температури 12.

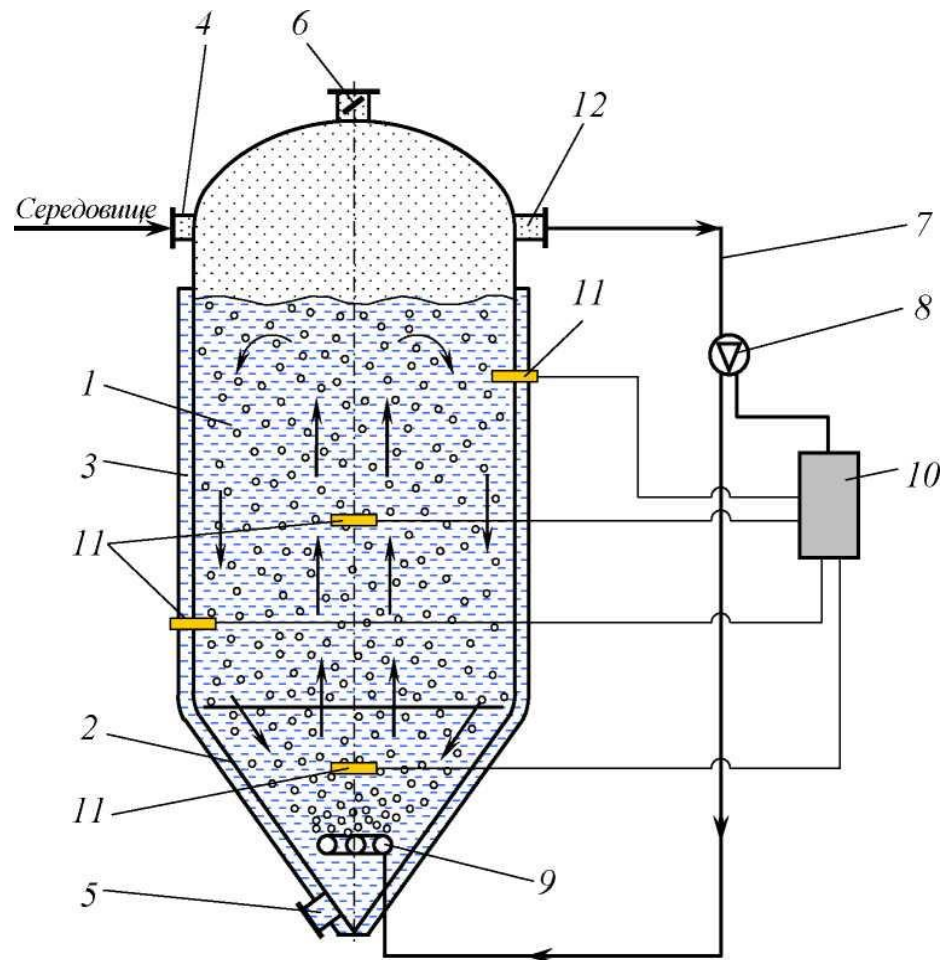


Рис. 3.15 - Циліндрично-конічний танк для бродіння пива

При підвищенні тиску газової фази вище допустимої норми спрацьовує

запобіжний клапан 6. По завершенні зброджування середовище відводиться через патрубок 5. Для санітарної обробки ємкості використовується клапан 7.

Технічний результат полягає у забезпеченні необхідного рівня гомогенізації середовища, вирівнювання температури у всьому об'ємі танку та підвищенні рівня зброджування і продуктивності.

На рис. 3.15 показано циліндрично-конічний танк [29]. Він складається з циліндричного корпусу 1, конічного днища 2, сорочки охолодження 3, патрубків підведення 4 та відведення 5 середовища, запобіжного клапана 6, трубопроводу 7 циркуляційного контуру у складі: компресора 8, який трубопроводом з'єднано, як з патрубком 12, що встановлено у верхній частині корпусу, так і з барботажним газорозподільником 9, контролера 10, чотирьох датчиків температури 11, які розташовані у вертикальній площині таким чином, що кожен з них може здійснюватимір температури середовища незалежно один від одного (зонально).

Циліндрично-конічний танк працює наступним чином. Через патрубок 4 підведення середовища здійснюється заповнення об'ємів днища 2 і циліндричної частини корпусу 1. У процесі бродіння відбувається насичення середовища діоксидом вуглецю, зростає внутрішній тиск в газовому просторі циліндричного корпусу. Теплота, утворена під час бродіння, відводиться через сорочку охолодження 3. У периферичній циліндричній частині корпусу знаходиться більш охоложене середовище, яке переміщується донизу. В результаті у конічній частині корпусу середовище має меншу температуру. Подавання газової фази трубопроводом 7 за допомогою компресора 8 і розподілення її у газовому розподільнику 9 забезпечує перемішування середовища і вирівнювання температури. Режим подавання газової фази компресором регулюється контролером 10 з врахуванням показань датчиків температури середовища 11, які розташовані в локальних зонах. При підвищенні тиску газової фази вище норми спрацьовує запобіжний клапан 6. По завершенні зброджування середовище відводиться через патрубок 5.

Технічний результат полягає в можливості вирівнювання температури у



всьому об'ємі танка, ліквідації різнотемпературних зон, підвищення продуктивності та покращення якості продукції.

Особливості технічних рішень стосовно напрямків удосконалення бродильних апаратів наведено, проте взаємозв'язок між технічними розробками вбачається у їх прогнозованих впливах на перебіг технологічних процесів і у взаємних впливах взаємодій. У зв'язку з цим наведемо коментар з метою узагальнення інформації щодо винаходів.

Опис способу зброджування цукровмістких середовищ (рис. 3.12) дещо виходить за рамки технологій зброджування пивного суслу і більше стосується технологій виробництва спирту. Однак можливість реалізації суміщення у часі процесів бродіння і перегонки продовжує знаходитися у сфері інтересів розробників бродильних технологій з наслідками щодо інтенсифікації масообмінних процесів, фізико-хімічних і мікробіологічних середовищ, створення систем подовженої і безперервної дії тощо.

Щодо пивоварної галузі – то запропонований спосіб дає можливість реалізувати виробництво пива з підвищеним вмістом спирту без нарощування загального часу бродіння.

Головним досягненням запропонованого способу зброджування цукровмістких середовищ є можливість стабілізації концентрації в них спирту і осмотичних тисків, що забезпечує номінальні умови життєдіяльності мікроорганізмів.

Головна частина матеріальних втрат стосується діоксиду вуглецю та неповного зброджування цукровмістких речовин, а енергетичні втрати стосуються теплоти бродіння. У зв'язку з відміченим пропонується рішення, за яким типовий бродильний апарат оснащується циркуляційним контуром у складі компресора, теплообмінника, барботажного газорозподільника, з'єданого з газовим простором та рідинним середовищем бродильного апарата.

Повернення в циркуляційному контурі газової фази і її барботаж через газорідинне середовище приводить до підвищення газоутримувальної здатності, інтенсифікації масообмінних процесів та забезпечує гомогенізацію

середовища.

Окрім того на циркуляційний контур покладається задача стабілізації температури зброджуваного середовища і одночасно використання теплового ресурсу бродіння. Поглиблений аналіз схеми має привести до висновку, що в ній реалізується зворотний термодинамічний цикл Карно. Робочим середовищем в ньому є діоксид вуглецю, який, до речі, і в класичних термодинамічних циклах використовується в ролі теплового агента. Компресор 8 (рис. 3.12) забезпечує стискання газової фази, яка відбирається з газового об'єму і передається трубопроводом 7.

Теплообмінник 9 має своїм призначенням відведення теплової енергії газового потоку і енергії, доданої компресором. При цьому в залежності від термодинамічних параметрів в теплообміннику може відбуватися конденсація CO<sub>2</sub> або охолодження газового потоку.

Таким чином охолоджений або сконденсований газ подається на барботажний газорозподільник 10, долаючи гідростатичний тиск, і у формі диспергованої фази CO<sub>2</sub> створює активне перемішування середовища і його охолодження. Очевидно, що інтенсивність взаємодій середовищ в апараті залежить від величини газового потоку в циркуляційному контурі.

У загальній термодинамічній оцінці таку систему слід віднести до теплового насоса, в якому здійснюється трансформація низькопотенціального теплового потоку бродіння в теплову енергію високих потенціалів.

Розширення можливостей технологічних апаратів стосується конструкції, що зображена на рис. 3.13. Виділення газової фази в бродильних технологіях супроводжуються явищем піноутворення. У зв'язку з цим біля 30% загального об'єму бродильних апаратів використовується в ролі компенсаторів піноутворення. Однак навіть за таких умов не виключається застосування хімічних піногасників на основі жирних кислот, хоча у загальній оцінці таке застосування є небажаним.

У зв'язку з цим пропонується система за схемою по рис. 3.13 з механічним гасінням піни в межах заданого рівня. При цьому гасіння піни

досягається за рахунок підвищення тиску  $\text{CO}_2$ , накопиченого в ресивері 10 за використання компресора 9 і системи датчиків 7 системи контролю. Робота компресора програмується на підтримання заданого тиску в ресивері, а спрацювання клапана 11 супроводжується швидкоплинним гасінням піни.

Разом з тим різке наростання тиску в апараті буде супроводжуватися реакцією середовища на зменшення утримувальної здатності у зв'язку з деформацією газових бульбашок. Кінцевий результат таких деформацій визначається величиною зростаючих тисків. Цілком досяжним результатом для деякої частини газової фази можуть бути явища колапсу, що є повноцінним аналогом кавітації з відповідним супроводженням тисків, утворенням зон з локальним підвищенням енергетичних рівнів тощо.

Загальне підвищення силової дії в оболонці апарата стосується лише підвищення тиску з боку ресивера, оскільки гідростатичні тиски незалежно від деформації газової фази залишаться незмінними.

Піноутворення, яке стосується більшості бродильних технологій, супроводжується частковою флуктуацією дріжджових клітин з вилученням їх з технологічного процесу. У зв'язку з цим регулярне руйнування піни з цієї точки зору може вважатися додатковим позитивним наслідком.

Попередній теоретичний аналіз, виконаний у цьому розділі, дозволив чітко вказати на взаємозв'язки між гідродинамічними станами середовищ, температурними режимами, технологічними показниками і результатами процесів/

Структура таких взаємодій відображується за рахунок присутності систем контролю температур, контролера, дворівневого циркуляційного контуру (рис. 3.14).

На рис. 3.15 наведено схему циліндрично-конічного танка для бродіння пива з подібною реалізацією технологічних[50].

В обох останніх випадках до головних переваг відносяться можливість регульованого нарощування газотримувальної здатності за обмеженого генерування  $\text{CO}_2$  середовищем і можливість трансформації і використання

теплової енергії, що утворюється в процесі бродіння.

### 3.5 Висновки до третього розділу

Виконаний аналіз особливостей енергетичних трансформацій і масообміну в газорідних бродильних середовищах, моделювання взаємозв'язків між динамікою перебігів перехідних процесів і геометричних параметрів технологічних апаратів дозволяє відмітити наступне.

1. Динаміка процесів зброджування цукровмістких середовищ є визначальною в синтезі диспергованої газової фази з попереднім її накопиченням в розчинній формі у відповідності до закону Генрі.

2. Утворення самозароджуваної газової фази здійснюється у повному об'ємі середовища, яка після перехідного процесу у відповідності до закону Архімеда приймає участь у створенні газорідних циркуляційних контурів.

3. Гідродинамічний стан зароджуваних середовищ у значній мірі визначається величиною газоутримувальної здатності.

4. За інших рівних умов газоутримувальна здатність визначає енергетичний потенціал середовищ, інтенсивність масо- і енергообмінних процесів, стимулює процеси бродіння, хоча сама газоутримувальна здатність є наслідком бродіння.

5. Газоутримувальна здатність взаємопов'язана з геометрією технологічних апаратів. Збільшення висоти ізооб'ємних апаратів приводить до зростання газоутримувальної здатності та інтенсифікації технологічних процесів.

6. Характеристикою створення газоутримувальної здатності є приведена швидкість диспергованої газової фази.

7. Геометрія бродильних апаратів має бути зорієнтована на користь збільшеної висоти.

8. Застосування замкнених циркуляційних контурів розв'язує завдання збільшення газоутримувальної здатності середовищ, інтенсифікацію технологічних процесів і утилізацію теплових енергетичних ресурсів.

## РОЗДІЛ 4

### ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

#### 4.1 Аналіз потенційних небезпек та виробничих шкідливостей

Аналіз запиленості та загазованості.

Технологічне обладнання, що використовується на ділянці переробки зерна відрізняється тим, що не створює небезпеки з точки зору вимог по запиленості та загазованості [34].

Але для забезпечення заданого рівня запиленості передбачаю використання стандартної витяжної вентиляції та стандартних місцевих витяжних систем.

Гранично допустимі концентрації (ГДК) речовин, які використовуються при митті та дезинфекції виробничого устаткування, вмісту цих шкідливостей в повітрі концентрації встановлюються по ГОСТ 12.1.005-88 [34] і наведені в таблиці 4.1

Таблиця 4.1.

#### Загазованість повітряного середовища

Назва речовини	Величина ГДК мг/м <sup>3</sup> ГОСТ 12.1.005-88
Синтетичні миючі засоби	5
Хлор	1

Як видно з таблиці рівень загазованості не перевищує норми.

Аналіз мікроклімату.

Умови мікроклімату визначаються для робочої зони на висоті 2 м на рівні підлоги в відповідності з вимогами. Значення допустимих значень параметрів мікроклімату відповідають категорії важкості-І. Мікрокліматичні умови знаходяться в межах норми.

Допускаються нормовані величини:

в холодну пору року:

- температура 16-18°C...(13-19)°C;
- відносна вологість не більше 75% (40-60)%;
- швидкість руху повітря не більше 0,3 м/с.(≤ 0,5);

в теплу пору року:

- температура не більше 18-20°C...(15-26)°C;
- відносна вологість не більше 65% (40-60)%;
- швидкість руху повітря не більше 0,2÷0,6 м/с згідно ГОСТ 12.1.005-88.

Аналіз освітлення.

Найбільш несприятлива ситуація на ділянці з освітленням. Через те що, тільки одна сторона ділянці має два вікна площа яких становить 5...15% від загальної площі ділянки, то його частка в освітленні приміщення не перевищує 20...30% загального світлового потоку. Збільшувати площу вікон не технологічно, так як це основне джерело пилу і вологи, які потрапляють на ділянку.

Аналіз шуму та вібрації.

Шум видів устаткування, яке використовується, має середньочастотний характер. Основними джерелами шуму та вібрацій є: електродвигуни приводу сушарки, електродвигуни приводів барабанів сепараторів, зубчасті передачі редукторів приводів, підшипникові вузли, подача тепло- та холодо агентів, подача мийно-дезінфікуючих засобів, процес миття обладнання та безпосередньо сам процес обробки. Відповідно до ДСН 3.3.6.037-99 «[Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку](#)» допустимий рівень шуму складає 80 дБа. Значення в межах норми.

Рівень вібрації не повинен перевищувати 92 дБ за ДСН 3.3.6.039-99 «[Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації](#)».

Для зниження вібрації все обладнання встановлене на віброізолюючі опори [47].

При роботі обладнання в цеху створюється шум, який є шкідливим фактором впливу на людей, працюючих на дільниці. Шум нормується згідно ДСН 3.3.6.037-99 «[Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку](#)» [49].

Шкідливим фактором також є вібрація, виникаюча при роботі обладнання внаслідок наявності невірноважених силових дій. Вібрація нормується по ДСН 3.3.6.037-99 «[Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку](#)».

Аналіз пожежної безпеки.

Речовини і матеріали, які застосовуються в технологічному процесі є пожежобезпечними. Згідно НАПБ Б.03.002-2007 «Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою» дільниці відносяться до категорії [47].

Для запобігання пожежі необхідно передбачити: захист електрообладнання від струмів короткого замикання плавкими запобіжниками;  
- захист електроприладів від перенавантаження, тобто, автоматичне відключення їх від мережі; розміщення вогнегасників ОУ-5, ОВП(ОП); розміщення пожежних щитів; вибирати електрообладнання – закритого типу.

На дільницях необхідно передбачити спеціалізовані місця, де будуть розташовані засоби гасіння пожежі. Також необхідно передбачити шляхи для евакуації шириною не менш 3 м. Відстань від робочого місця до виходу не повинна перевищувати 35 м.

Аналіз електробезпеки загальний.

Електрозабезпечення обладнання здійснюється від 3-х фазної 4-х провідної мережі напругою 380/220В. Дільниці, на яких встановлено використане в техпроцесі обладнання, по небезпеці враження електричним струмом, відносяться до II класу: приміщення з підвищеною небезпекою за ПУЕ-86, тому що підлога їх виконана з залізо-бетону, який проводить струм. Для забезпечення безпечної експлуатації обладнання на дільницях, необхідно

щоб: провідники, кабелі, які здійснюють електроживлення були прокладені в металевих трубах;

- електричні провідники мали відповідні кольори, щодо їх призначення та були ізолюваними; верстати мали заземлення, занулення, захисне відключення, блокування; використовувалася мала напруга ( $U=24$  В) для світильників місцевого призначення;

- двері шаф з електрообладнанням були заблоковані з аварійним вимикачем таким чином, щоб усунути можливість їх відкриття при включеному вхідному вимикачі;

- контактні зажими вхідних вимикачів, які призначені для приєднання проводів, що йдуть від джерела струму, були закриті кришками з ізоляційного матеріалу;

- верстати мали кнопку аварійного відключення;

- були встановлені відповідні знаки безпеки (на дверях електрошафи) та попереджувальні написи; використовувались гумові килимки або дерев'яні підставки.

Електробезпека.

Основними заходами захисту від ураження електричним струмом на ділянці: забезпечення недоступності струмоведучих частин; пристрій захисного заземлення та автоматичного відключення; використання захисних засобів при обслуговуванні електрообладнання; гумові покриття; дерев'яні решітки.

Місце в яких виникає небезпека ураження електричним струмом на ділянці позначені попереджувальними знаками і надписами, проводиться інструктаж по електробезпеці.

Пожежна безпека.

В цеху є 2 евакуаційних виходи. Відстань від найбільш віддаленого евакуаційного виходу до робочого місця не перевищує 30 м.

Для гасіння пожежі в цеху є внутрішній пожежний водопровід з шістьма пожежними кранами.



Крани розміщені в легко доступних місцях на відстані від підлоги, мають рукав та ствол, які знаходяться в спеціальних шафах.

В цеху є два пожежні щити на кожному з яких є два вогнегасника та один вуглекислотний, відро, дві сокири. Біля кожного щита є ящик з піском.

Захист від обертаючих та рухомих частин обладнання.

Для захисту від рухомих частин обладнання, використовують екрани, засоби індивідуального захисту (окуляри, маски).

Для запобігання захвату частин одягу та волосся рухомими та обертаючими частинами обладнання використовують спеціальний одяг (берети, нарукавники).

Приміщення для встановлення обладнання повинно задовольняти наступним вимогам:

а) площа, що необхідна для встановлення та обслуговування машини 16,1 м<sup>2</sup> (4,75x3,4);

б) можливість виконання ремонту та огляду машини, для чого між стінкою та машиною повинен бути прохід шириною не менше 0,8 м;

в) водостійка підлога;

г) наявність силового електричного вводу та контуру заземлення.

При розміщенні виробничого устаткування не повинно залишатися місць, не доступних для миття і санітарної обробки. Виробниче устаткування не повинно загороджувати віконні отвори і знижувати освітленість робочих місць.

При розміщенні технологічного устаткування повинні дотримуватися такі норми проходів і відстаней:

- відстань між устаткуванням і стіною за наявності робочих місць між ними – не менше ніж 1,4 м, за відсутності їх – не менше ніж 1,0 м;
- відстань між частинами устаткування, що виступають, з урахуванням одностороннього проходу – не менше ніж 0,8 м;
- відстань між частинами устаткування, що виступають, де не потребується їх ремонт і не передбачається рух людей – не менше 0,5 м;

- відстань від верху устаткування до низу балок (при установленні поміж балками) – не менше ніж 0,2 м;
- відстань між устаткуванням при установленні його фронтами одно до другого – не менше ніж 1,5 м;
- проходи між устаткуванням для обслуговування і ремонту, а також проходи між устаткуванням і стінами – шириною не меншою ніж 1,0 м, за наявності робочих місць між ними – 1,4 м.

Органи керування виробничим устаткуванням повинні розташовуватись у робочій зоні так, щоб не утрудняти виконання технологічних операцій, приводитись у дію зусиллями, що не перевищують встановлених відповідними нормами.

Мінімальна довжина робочого місця повинна бути 0,8 м на одного працюючого, при використанні допоміжних пристроїв (підносів, ящиків тощо) – не менша ніж 1,4 м.

Сигнальні лампи на розподільних щитах біля робочих місць повинні мати написи, що зазначають характер сигналу.

Сигнально-попереджувальне фарбування небезпечних елементів технологічного устаткування повинно відповідати вимогам ДСТУ ГОСТ 12.2.061:2009.

У процесі роботи устаткування не дозволяється проштовхувати сировину до робочих органів руками, для цього потрібно використовувати спеціальний інвентар (дерев`яні проштовхувачі, лопатки тощо).

Обслуговуючий персонал повинен: виконувати інструкції з охорони праці та пожежної безпеки; не залишати робоче місце при працюючій машині чи механізмі; курити і вживати їжу тільки в спеціально відведених і обладнаних для цього місцях; слідкувати за чистотою робочого місця і проходів; у разі нещасного випадку терміново звертатись у медпункт і повідомляти завідувача дільниці чи начальника цеху про травму.

Об'єм виробничих приміщень на кожного працюючого повинен бути не менший ніж  $15 \text{ м}^3$ , а площа не менша ніж  $4,5 \text{ м}^2$ .

У цехах, що виробляють харчові продукти, і приміщеннях санітарного блоку панелі стін і колони повинні бути облицьовані глазурованою плиткою або пофарбовані масляною фарбою світлих відтінків на висоту не менше ніж 2,0 м.

Підлога в усіх приміщеннях повинна бути без щілин і вибоїв і покрита водонепроникними матеріалами з ухилом убік трапів не менше ніж 0,03, розміщених осторонь від робочих місць і проходів.

Розміщення устаткування повинно виконуватися так, щоб були створені умови, які забезпечують проведення ветеринарно-санітарного контролю за виробничими процесами, якістю сировини і готової продукції, а також можливість миття, прибирання і дезінфекції.

Конструктивні особливості устаткування та приміщень повинні забезпечувати можливість проведення ефективної санітарної обробки.

Штучна вентиляція.

У всіх виробничих та допоміжних приміщеннях необхідно передбачити вентиляцію. Під вентиляцією розуміють сукупність заходів та засобів, призначених для забезпечення на постійних робочих місцях та зонах обслуговування виробничих приміщень метеорологічних умов та чистоти повітряного середовища, що відповідають гігієнічним та технічним вимогам.

Основне завдання вентиляції – вилучити із приміщення забруднене або нагріте повітря та подати свіже, тобто забезпечити в приміщеннях метеорологічні умови (температуру, відносну вологість та швидкість руху повітря), що відповідають нормативним вимогам, а також виключити можливість вмісту в повітрі шкідливих речовин, які перевищують гранично допустимі концентрації (ГДК).

Штучна вентиляція дає можливість очищувати повітря перед його викидом в атмосферу, вловлювати шкідливі речовини безпосередньо біля місць їх утворення, обробляти припливне повітря (очищувати, підігрівати,

зволожувати), більш цілеспрямовано подавати повітря в робочу зону. Окрім того, механічна вентиляція дає можливість організувати повітрозабір у найбільш чистій зоні території підприємства і навіть за її межами.

Ефективність дії систем вентиляції та кондиціонування повітря залежить не тільки від забезпечення необхідного повітрообміну, але й від схеми організації повітрообміну, тобто вибору зони вилучення та подачі необхідної кількості повітря.

Схеми вентиляції визначаються: специфікою виробничого приміщення; характером шкідливостей; місцем їх виділення; кратністю повітрообміну.

Враховуючи усі фактори, обираємо загальнообмінну вентиляцію.

Схема організації повітрообміну – зверху вниз. Цю схему доцільно застосовувати у випадку, коли припливне повітря в холодний період року має температуру нижчу від температури приміщення. Припливне повітря перш ніж досягти робочої зони нагрівається за рахунок повітря приміщення.

Загальнообмінна вентиляція за напрямком потоку повітря може бути припливна, витяжна, припливно-витяжна.

Припливна вентиляція забезпечує подачу чистого зовнішнього повітря у виробничі приміщення. У цьому випадку видалення забрудненого повітря здійснюється через фрамуги, дефлектори, вентиляційний жолоб.

Отже обираємо загально обмінну припливну вентиляцію.

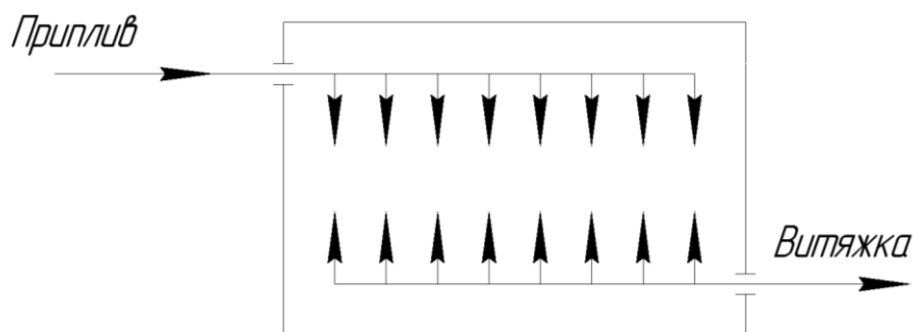


Рис. 4.1 - Схема зверху-вниз організації повітрообміну при загальнообмінній вентиляції

Для підігріву повітря в системах вентиляції використовують калорифери, у яких теплоносієм застосовується пара або вода. Проектують калориферні установки виходячи з мінімального числа калориферів з арматурою, яка забезпечує регулювання продуктивності за теплом.

Проведемо розрахунок необхідних вентиляторів та електродвигуна.

1. Визначаємо кількість повітря, яке необхідно для вентиляції (продуктивність вентиляторів)

$$L_{нов} = n \cdot V_{пр}, \text{ м}^3/\text{год},$$

де  $V_{пр}$  – об'єм приміщення,  $\text{м}^3$ ,  $V_{пр}=2002 \text{ м}^3$ ;

$n$  – кратність повітрообміну, показує скільки разів протягом години повинно повністю змінитися повітря в приміщенні,  $n=5$ .

$$L_{нов} = 5 \cdot 2002 = 10010, \text{ м}^3/\text{год},$$

2. Визначаємо усталену потужність електродвигуна

$$N_{уст} = \frac{L \cdot H \cdot k}{3600 \cdot 102 \cdot \eta_v \cdot \eta_{р.п.}} n \cdot V_{пр}, \text{ кВт},$$

де  $L$  – продуктивність вентиляторів,  $\text{м}^3/\text{год}$ .

$H$  – повний тиск вентиляторів,  $\text{кг}/\text{м}^2$ ,  $H=18 \text{ кг}/\text{м}^2$ ;

$k$  – коефіцієнт запасу,  $k=1,3$ ;

$\eta_v$  – ККД вентиляторів,  $\eta_v=0,6$ ;

$\eta_{р.п.}$  – ККД ремінної передачі (для плоских пасів 0,85 - 0,90, а для клиновидних 0,90 - 0,95),  $\eta_{р.п.}=0,9$ .

$$N_{уст} = \frac{10010 \cdot 18 \cdot 1,3}{3600 \cdot 102 \cdot 0,6 \cdot 0,9} = 0,64 \text{ кВт}$$

3. Згідно методичних вказівок обираємо вентилятор Ц4-70 №5. Знаючи вентилятор, обираємо електродвигун типу А 02-21-6 ( $n = 930 \text{ об./хв.}$ ,  $N_{уст} = 0,8 \text{ кВт}$ ).



Рис. 4.2 - Загальний вид вентилятору Ц4-70-5

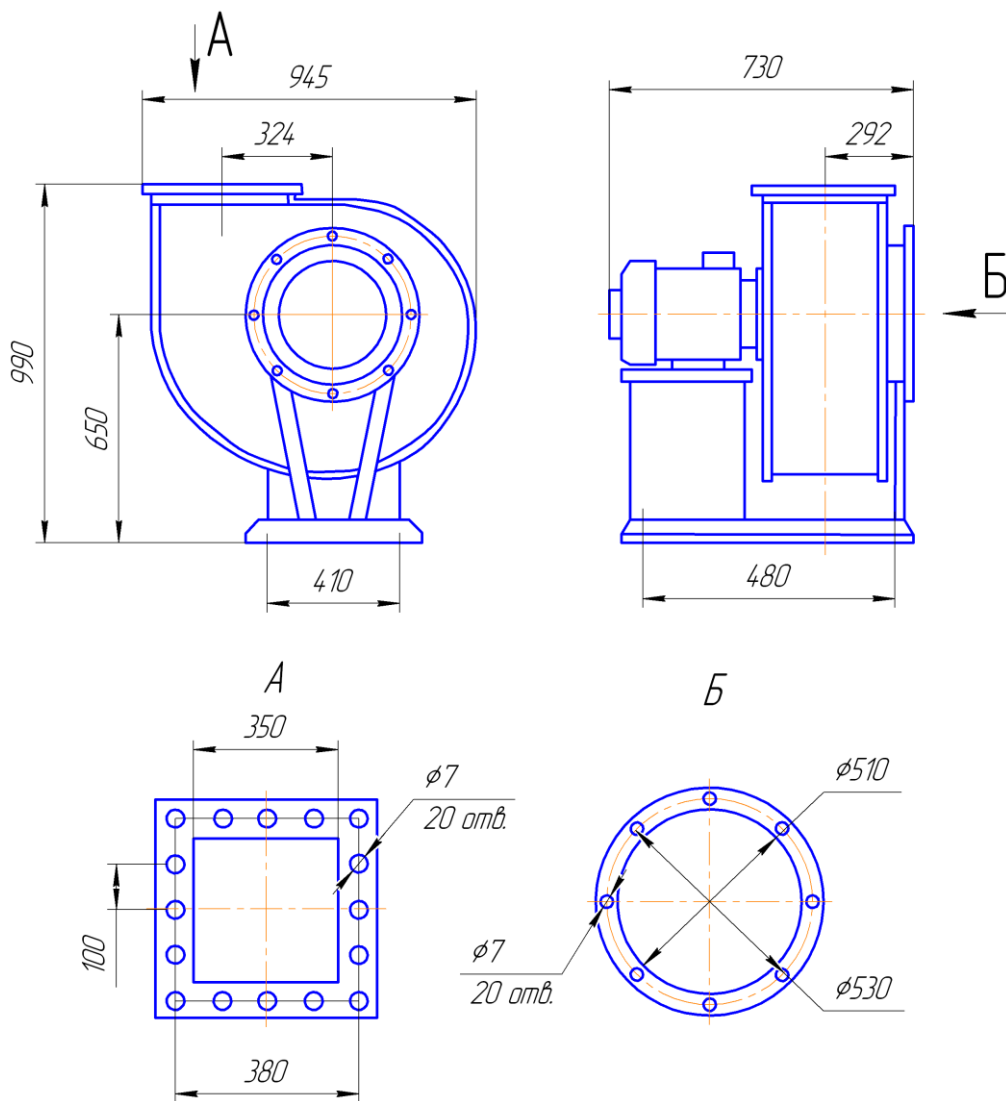


Рис. 4.3 - Приєднувальні розміри вентилятору Ц4-70-5

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Виконано теоретичні узагальнення особливостей гідродинаміки і визначення гідродинамічних параметрів середовищ з самогенеруванням диспергованої газової фази.

2. Визначено впливи геометричних параметрів технологічних апаратів на гідродинаміку середовищ, біохімічні процеси масообміну і можливості стабілізації термодинамічних параметрів систем. Вказані енергетичні трансформації відбуваються у повній відповідності до законів збереження. Показано, що енергетичний потенціал такої системи пов'язано з величиною газотримувальної здатності і тому з геометрією апаратів.

3. Розроблено математичну формалізацію перехідних процесів в умовах імпульсних енергетичних і фізичних впливів на газорідні середовища. Зниження тиску в системі викликає різке зменшення розчинності газової фази і активне додаткове утворення диспергованої газової фази, збільшення газотримувальної здатності і кінетичної енергії циркуляційних контурів. Такий перехід продовжується до досягнення нового стану рівноваги у відповідності до закону Генрі.

Енергетичний імпульс такого переходу можливо оцінювати через зміни газотримувальної здатності.

Присутність диспергованої газової фази означає відповідний прояв закону Архімеда і рівність сил рушійних і сил опору в умовах усталених режимів, що відповідає третьому закону Ньютона. Гідростатичні тиски середовищ приводять до різних концентрацій розчиненого  $\text{CO}_2$ , що створює відповідний градієнт і можливість використання цього потенціалу на користь масообміну і гомогенізації середовища. Запропоновано до використання математичні моделі перехідних процесів.

4. Здійснено розробку методу замішування хлібних заготовок і бродіння за умови безмашинних механічних впливів за рахунок деформацій диспергованої газової фази.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Соломон А. М. Кисломолочні десерти збагачені біфідобактеріями / А. М. Соломон, Ю. А. Полевода // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2019. – № 2 (105). – С. 66 – 74.
2. Бандура В., Котов Б., Калініченко Р. Математичне моделювання та ідентифікація тепломасопереносу в рослинному дисперсному матеріалі при сушінні і нагріванні електромагнітним полем надвисокої частоти / «Енергетика і автоматика». – НУБІП №6. 2018.– С.35–50.
3. Котов Б.І., Грищенко В.О., Кормановський С.І. Моделювання динамічних режимів тепловологісної обробки рослинних продуктів / Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. Випуск: 2(85), 2014. – 211 с.
4. Кунце В. Технология солода и пива / В. Кунце. – С. – Пб.: Профессия, 2001. – 912 с.
5. Домарецький В.А. Вітчизняний та світовий досвід України у виробництві пива / В.А. Домарецький, А.М. Куц, Н.В. Карпутіна та ін. // Харчова промисловість. – 2012. – № 13. – С. 6–9.
6. Карпутіна Н.В. Сучасні способи розведення чистої культури пивоварнихдріжджів / Н.В. Карпутіна, В.А. Домарецький, З.М. Романова та ін. // Харчова промисловість. – 2012. – № 13. – С. 10–14.
7. Підлісний В.В. Удосконалення процесів та обладнання для виробництва солоду: автореф. дис... канд. техн. наук: спец. 05.18.12 «Процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв» / Підлісний Віталій Володимирович; НУХТ. – К., 2009. – 20 с.
8. Шляхи інтенсифікації процесу теплової стерилізації консервів на основі його аналізу / Цуркан О.В., Гурич А.Ю., Пентюк Б.М., Кузь В.О.// Збірник наукових праць ВНАУ. Серія Технічні науки. Випуск 1(84). – м. Вінниця, 2014р. – С.170–177
9. Александров А.Г. Оптимальные и адекватные системы / А.Г. Александров. – М.: Высшая школа, 1989. – 263 с.



10. Берник І.М. Аналіз параметрів впливу на формування моделі акустичної обробки рідинних харчових середовищ / І.М. Берник // Наукові праці ОНАХТ. Серія Технічні науки. Випуск 45. – Том 2. – м. Одеса, 2014 р. – С. 129–133.
11. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
12. Глинка Н.Л. Общая химия / Н.Л. Глинка. – Л.: Химия, 1981. – 704 с.
13. Джонсон Н. Статистика и планирование экспериментов в технике и науке / Н. Джонсон, Ф. Лион. – М.: Мир, 1981. – 520 с.
14. Снежкін Ю.Ф. Темломасообмінні процеси при сушінні функціональної сировини / Ю.Ф. Снежкін, О.Ж.Петрова, В.М. Пазюк // Наукові праці ОНАХТ. Серія Технічні науки. Випуск 46. – Том 2. – м. Одеса, 2014р. – С. 303–308.
15. Соколенко А.І. Енергетичні трансформації і енергозбереження в харчових технологіях: монографія / А.І. Соколенко, А.А. Мазаракі, В.А. Піддубний та ін. – К.: Фенікс, 2012. – 484 с.
16. Шиян П.Л. Інноваційні технології спиртової промисловості. Теорія і практика: монографія / П.Л. Шиян, В.В. Сосницький, С.Т. Олійнічук. – К.: ВД «Асканія», 2009. – 424 с.
17. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача / В.В. Нащокин. – М.: Высшая школа, 1980. – 469 с.
18. Дробот В.І. Технологія хлібопекарського виробництва / В.І. Дробот. – К.: Техніка, 2006. – 408 с.
19. Ковалев Н.Н. Технология игристых вин / Н.Н. Ковалев. – К.: Преса України, 2007. – 432 с.
20. Справочник специалиста пищевых производств. Книга 2. Теплофизические процессы. Энергосбережение / А.И. Соколенко, А.И. Украинец, В.Л. Яровой и др.; Под ред. А.И. Соколенко. – К.: АртЭк, 2003. – 432 с.

21. Гунько І.В. Універсальне енергозберігаюче пастеризаційне обладнання для виробництва жирових продуктів / І.В. Гунько, Ю.В. Майборода, І.А. Зозуляк // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2018. – 3 (102). – С.62–69.

22. Агеева Н.М. Физико-химические и биотехнологические основы повышения качества и устойчивости вин к помутнениям: автореф. дисс... докт. техн. наук: спец. 05.18.01 «Технология обработки, хранения и переработки злаковых, бобовых культур, крупяных продуктов, плодоовощной продукции и виноградарства» / Агеева Наталья Михайловна; Краснодар, 2001. – 53 с.

23. Пришляк В.М. Оптимізація технічних параметрів тепломасообмінного процесу в теплообмінниках концентричного типу. / В.М. Пришляк, В.М. Яропуд // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК» Вінниця ВНАУ, 2015 №1 (91) 123 с. – С. 85–91.

24. Бабич Н.И. Проблемы повышения качества вин / Н.И. Бабич // Вестник «Крымское качество». – 2006. – Вып. 2 (8). – С. 120–122.

25. Матвійчук В.А., Дмитришен О.М., Рубаненко О.О. Розробка газогенераторного котла для отримання теплової енергії в сільському господарстві шляхом використання біовідходів // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – 2015. – №1(89). – С. 149–150.

26. Кишковский З.Н. Технология вина / З.Н. Кишковский, А.А. Мержаниан. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 504 с.

27. Паламарчук І.П. Дослідження фізико-механічних властивостей зернової крохмаловмісної сировини як об'єкта технологічної дії спиртового виробництва / І.П. Паламарчук, В.П. Янович, І.М. Купчук // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2016. – №3(95).

28. Авакянц С.П. Биохимические основы технологии шампанского / С.П. Авакянц. – М.: Пищевая промышленность, 1980. – 352 с.

29. Варфоломеев А.Й. Вибір геометрії упаковок / А.Й. Варфоломеев,

Й.І. Сторіжко // Упаковка. – 2001. – № 2. – С. 54–55.

30. Плевако Е.А. Технология дрожжей / Е.А. Плевако. – М.: Пищевая промышленность, 1978. – 267 с.

31. Дробот В.І. Технологія хлібопекарського виробництва / В.І. Дробот. – К.: Логос, 2002. – 365 с.

32. Дробот, В.І. Довідник з технології хлібопекарського виробництва / В.І. Дробот. – К.: Руслана, 1998. – 415 с.

33. Циганова, З.С. Технология хлебопекарного производства / З.С. Циганова – М.: ПрофОбрИздат, 2001. – 428 с.

34. Казаков, Е.Д. Биохимия зерна и продуктов его переработки / Е.Д. Казаков, В.Л. Кретович. – М.: Агропромиздат, 1989. – 367 с.

35. Левтринская Ю.О. Микроволновые технологии интенсификации массообменных и тепловых процессов при переработке растительного сырья / Ю.О. Левтринская, Н.В. Ружицкая, Т.А. Резниченко, В.Н. Бандура // Наукові праці ОНАХТ. – №1 (80) 2017. – С. 67–73.

36. Казаков, Е.Д. Обзорная информация. Структура клейковины и качество помольных партий. Ч. 1. / Е.Д. Казаков. – М.: ЦНИИТЭИ хлебопродуктов, 1992. – 65 с.

37. Protein and lipid contributions to wheat flour functionality: Resume 9<sup>th</sup> Congr. Int. cereals et pain, Paris, 1-5 juin, 1992: Resumes Sess. Techniques / Macritchie F. // Ind. Cereal. – 1992. – №7. – с. 33.

38. Спирін А.В., Котов Б.І., Калініченко Р.А. «Тепло- і масообмін при сушінні сільськогосподарських рослинних матеріалів у щільному нерухомому шарі» // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – Вінниця, 2016. – №2 С.41–44.

39. Друкований М.Ф. Засоби алгоритмічного моделювання процесу розчинення частинки фосфату кальцію в рідкій біомасі / М.Ф. Друкований, В.П. Янович / Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК» №1 (96) 2017. – С.83–87.

40. Effects of ascorbic acid and related compounds on wheat flour dough and starch in breadmaking / Zhang Li, Yamaguchi Yukihiro Morita Naofumi, Takagi Masanosuke // Denp un kadaku – J. Starch and its Relat. Carbohydr and Enzymes. –

1992. – 39, №3. – Р. 183–187.

41. В.Ф. Анісімов, В.І. Музичук, І.В. Гунько, О.С. Ковальчук. Дослідження основних елементів конструкції гідромашини 310.224 / Техніка, енергетика, транспорт АПК. – №2(97), 2017. – С. 41–46.

42. Білик, О.А. Удосконалення технології хлібобулочних виробів з борошна зі зниженими хлібопекарськими властивостями: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.01 / Білик Олена Анатоліївна; НУХТ. – К., 2006. – 146 с.

43. Николаев, Б.А. Измерение структурно-механических свойств мучного теста / Б.А. Николаев. – М.: Пищевая промышленность, 1976. – 246 с.

44. Реометрия пищевого сырья и продуктов / под ред. Ю.А. Мачихина – М.: Агропромиздат, 1990 – 272 с.

45. Технологические рекомендации по улучшению качества хлеба и сокращения потерь на хлебопекарных предприятиях / Р.В. Кузьминский, В.А. Патт, Т.И. Шкваркина и др. – М.: ЦНИИТЭИпищепром, 1973. – 69 с.

46. Аношкина Г. Переработка муки с пониженными хлебопекарными свойствами / Г. Аношкина // Хлебопродукты. – 2001. – №8. – С. 30–33.

47. Рудницький Б.О., Твердохліб І.В., Омелянов О.М. «Дослідження причин електротравматизму в с.г. виробництві та його профілактика» Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК» Випуск №4(96) С.19–24.

48. Стаднік М.І., Рубаненко О.О., Римар В.В. Використання електродвигунів змінного струму для дифузійного апарату цукрового заводу // Збірник наукових праць ВНАУ: Серія техніка, енергетика, транспорт АПК– 2016. № 4 (96). – С. 102–106.

49. Аналіз принципів схем та конструктивних рішень насосних гідроприводних агрегатів / Н.Р. Веселовська, О.А. Яремчук // Техніка енергетика транспорт АПК – №2(98) – 2017. – С. 123–129.

50. Главачек Ф. Лхотский М. Пивоварение / Ф. Главачек, М. Лхотский – М.: Пищевая промышленность, 1977. – 623 с.

# ДОДАТКИ