

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) _____ ННІТІ ім. акад. І.С.Гулого _____
Кафедра _____ мехатроніки та пакувальної техніки _____

«До захисту в ЕК»	«До захисту допущено»
Директор інституту(декан факультету)	Завідувач кафедри МПТ
_____ Блаженко С.І.	_____ Соколенко А.І.
(підпис)	(підпис)
(прізвище та ініціали)	(прізвище та ініціали)
«__» _____ 20__21__ р.	«__» _____ 20__21__ р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

зі спеціальності _____ 131 Прикладна механіка _____
(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми _____ "Прикладна механіка" _____

на тему: _____ Визначення динамічних і енергетичних параметрів в технологічних системах газорідних середовищ _____

Виконав: здобувач _____ 2 _____ курсу, групи МП-2-1М _____

_____ Жуковський Юрій Олександрович _____

(прізвище, ім'я, по батькові повністю)

(підпис)

Керівник _____ Соколенко Анатолій Іванович _____

(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

(підпис)

Консультанти _____

(прізвище та ініціали)

(підпис)

(прізвище та ініціали)

(підпис)

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент _____

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що в цій кваліфікаційній роботі немає запозичень із праць інших авторів без відповідних посилань.

Здобувач _____
(підпис)

Київ 20__21__ р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) ННІТІ ім. акад. І.С.Гулого
Кафедра мехатроніки та пакувальної техніки
Освітній ступінь магістр
Спеціальність 131 Прикладна механіка
(код і назва)
Освітньо-професійна програма Прикладна механіка
(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МПТ

А.І. Соколенко

" 5 " 11 2020 р.

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Жуковського Юрія Олександровича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Визначення динамічних і енергетичних параметрів в технологічних системах газорідних середовищ

керівник роботи Соколенко Анатолій Іванович, д.т.н., професор,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від "5" листопада 2020 р.
№ 925-кс.

2. Строк подання здобувачем роботи 2.02.2021 р.

3. Вихідні дані до роботи 1. Вид дослідження – аналітичне. 2. Досліджувані параметри системи – кінематичні, динамічні та енергетичні показники технологічних систем. 3. Припущення – загальноприйняті в теорії динаміки машин та термодинаміці.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
1. Реферат 2. Вступ 3. Задачі дослідження 4. Розділи аналітичних досліджень. 5. Висновки. 6. Література

5. Перелік графічного матеріалу: Презентація доповіді

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 05.11.2020 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Реферат	05.11.2020	
2.	Вступ	10.11.2020	
3.	Розділ 1	15.12.2020	
4.	Розділ 2	22.12.2020	
5.	Розділ 3	15.01.2021	
6.	Висновки	20.01.2021	
7.	Література	25.01.2021	
8.	Підготовка презентації	25.01.2021	
9.	Підготовка доповіді	30.01.2021	

Здобувач

(підпис)

Жуковський Ю.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Соколенко А.І.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна магістерська робота, 63 стор., 2 табл., 12 рис., 37 позицій літературних джерел.

ТЕХНОЛОГІЧНА СИСТЕМА, ГАЗОРІДИННЕ СЕРЕДОВИЩЕ, СИРОВИННИЙ ПОТІК, ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ, ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ, ТЕХНОЛОГІЯ, ЗБРОДЖУВАННЯ, ДИНАМІКА

Випускова магістерська робота "Визначення динамічних і енергетичних параметрів в технологічних системах газорідних середовищ" складається зі вступу, трьох розділів, висновків та переліку використаних літературних джерел.

У вступі виконано аналіз завдань і послідовності застосування газорідних систем, відмічається принципова відмінність аеробних і анаеробних середовищ та процесів.

Перший розділ стосується характеристик вхідних сировинних потоків і оцінок енергетичних потенціалів газорідних середовищ та послідовностей енергоматеріальних трансформацій. На цій основі сформульовано задачі досліджень, виконання яких знайшло відображення у трьох розділах і висновках.

Другий розділ присвячено особливостям процесів зброджування середовищ в різних технологіях і оцінкам їх характеристик.

У третьому розділі наведено інформацію щодо складових енергетичних потенціалів газорідних середовищ, динаміки взаємодій між рідинними і газовими фазами, наведено математичні формалізації теоретичних розробок.

ABSTRACT

Qualifying master's thesis, 63 pages, 2 tables, 12 figures, 37 positions of literary sources.

TECHNOLOGICAL SYSTEM, GAS AND LIQUID ENVIRONMENT, RAW MATERIAL FLOW, ENERGY POTENTIAL, ECONOMIC EFFICIENCY, TECHNOLOGY, WASTE

The final master's thesis "Determination of dynamic and energy parameters in technological systems of gas-liquid environments" consists of an introduction, three sections, conclusions and a list of references.

In the introduction the analysis of tasks and sequence of application of gas-liquid systems is executed, the fundamental difference of aerobic and anaerobic environments and processes is noted.

The first section deals with the characteristics of input raw material flows and estimates of energy potentials of gaseous liquids and sequences of energy-material transformations. On this basis, the tasks of research are formulated, the implementation of which is reflected in three sections and conclusions.

The second section is devoted to the peculiarities of fermentation processes in different technologies and assessments of their characteristics.

The third section provides information on the components of energy potentials of gas-liquid media, the dynamics of interactions between liquid and gas phases, mathematical formalizations of theoretical developments.

ЗМІСТ

Стор.

Вступ.....	
1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ВХІДНИХ СИРОВИННИХ ПОТОКІВ І ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОТЕНЦІАЛІВ	
2. ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСІВ ЗБРОДЖУВАННЯ СЕРЕДОВИЩ В РІЗНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ	
2.1. Особливості технологій виробництва виноматеріалів для шампанських і білих ігристих вин	
2.2. Особливості вторинного бродіння у виробництві шампанського	
2.3. Особливості зброджування цукровмістких середовищ в технологіях виробництва етилового спирту	
3. ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГО- ТА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ	
3.1. Фізичне підґрунтя потенціалів розчинених газів	
3.2. Гідродинамічні параметри та інтенсифікація масообміну в газорідних середовищах	
ВИСНОВКИ	
ЛІТЕРАТУРА	

ВСТУП

Однією з складних проблем розвитку економіки України є забезпечення потреб в паливно-енергетичних ресурсах та зниження енергоспоживання на одиницю виробленої продукції. Енергозберігаючий напрямок розвитку харчових технологій передбачає зниження витрат електроенергії на всіх стадіях її споживання, що забезпечує вдосконалення структури енергобалансу.

В загальному формулюванні такий висновок не потребує доказів, проте це спонукало обрати напрямок, який стосується використання замкнених контурів вторинних енергетичних ресурсів, в основу чого покладається штучне створення незрівноважених термодинамічних станів середовищ з отриманням відповідних рушійних факторів. Світовий досвід свідчить, що економія 1 т умовного палива вимагає вдвічі менших витрат, ніж приріст видобування, еквівалентний цій кількості.

В цьому науковому проекті вирішується задача нетрадиційного узагальнення можливостей достатньо розвинених технологій, які разом з тим мають помітні недоліки. Останні стосуються безперервних втрат вторинних енергетичних ресурсів у формі як матеріальних так і енергетичних потоків.

Крохмаль, цукри, білки, жири і міриади інших з'єднань органічного походження самі по собі є енергоносіями, які слід максимально зберігати в сучасних технологіях. Їх надалі будемо вважати носіями технологічних енергоджерел, які задіяні в природних або штучних колообігах. Кінцевий результат їх енергоматеріальних трансформацій є утворення CO_2 і води, які за участю енергії сонячного світла знову мають бути задіяні в синтезі глюкози та інших органічних речовин.

Втрати енергетичних потоків технологічних енергоджерел є дошкульним недоліком, однак якому сучасна наука не завжди знаходить протидію.

Високим критерієм всякої технології є питомі енергетичні витрати на їх здійснення у формі первинних енергетичних джерел. Використання різних форм енергій забезпечує відповідну задану трансформацію матеріальних потоків.

Використання кожного процесу в таких трансформаціях потребує відповідного енергетичного забезпечення, що означає зростання загальної енергії системи. На ці енергетичні витрати накладаються зовнішні енерговитрати, які пов'язані з необхідністю стабілізації показників термодинамічних параметрів систем. До їх числа відноситься температура, показники газового середовища зі співвідношенням кисню та діоксиду вуглецю, вологість повітря, що подається на аерацію тощо. Наявність зон теплової обробки з відмінними показниками температур або навіть з фазовими переходами відповідають випадкам, коли доцільним стає створення замкнутих локальних зон енергокористування. В такій системі вторинний енергетичний ресурс відповідно трансформується і повторно використовується.

За своєю фізико-хімічною суттю природні енергоматеріальні колообіги є замкнутими контурами.

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 і палива. Так за виробництва сирів молочний цукор лактоза зброджується до молочної кислоти, а кислота змушує згортатись білок молока казеїн. Для одержання різних сортів сиру використовуються різні мікроорганізми. Наприклад, сир чеддер синтезують за використання різних видів *Lactobacillus*, а молочнокислі стрептококи сквашують вершки і надають вершковому маслу характерний смак і аромат. Молочнокислі бактерії роду *Lactobacillus* використовуються для квашення капусти, виготовлення різних посолів і маринадів.

За безумовної важливості названих технологій все ж в перший ряд необхідно поставити хлібопекарську промисловість, а за нею виробництва вина, пива, етилового спирту різного призначення, шампанського, квасу та інших напоїв.

В основі енергоматеріального забезпечення цих технологій і вихідної

продукції є синтез цукрів, крохмалю або інших біополімерів при взаємодії відомої тріади у складі води, діоксиду вуглецю та сонячного проміння.

Безперервний колообіг названих компонентів одночасно з колообігами інших речовин забезпечує синтез органічних сполук, кінцевий розпад яких завершується утворенням діоксиду вуглецю і води.

Бродильні анаеробні технології є частиною названого загального колообігу, хоча частково незавершеного. Ця незавершеність є корисним наслідком для людини, оскільки бродіння завершується одержанням цільових речовин. До останніх у виробництві хліба, вин, пива, квасу відносяться з'єднання, які забезпечують відповідні енергетичні, смакові якості і взаємодії з організмами споживачів продукції.

Але оскільки анаеробні процеси зброджування цукровмістких речовин відбуваються за участю дріжджів-цукроміцетів, то частина матеріальних і енергетичних ресурсів цукрів використовується на забезпечення їх життєдіяльності. Показником динаміки трансформації такої системи є зміни концентрацій цукрів, накопичуваного етилового спирту і виділення діоксиду вуглецю. Зміни співвідношень вказаних речовин визначаються рівнянням Гей-Люсака, яке констатує їх непорушність і дозволяє здійснити ефективність використовуваних технологій. При цьому матеріальний і енергетичний потенціал живильних компонентів частково зберігається у синтезованих сполуках спирту і витрачається на синтез біомаси дріжджів та діоксиду вуглецю. Вказані співвідношення стосуються всіх анаеробних бродильних технологій і в певній мірі останні слід відносити до затратних без перспектив вплинути на величину втрат. Хоча в рівнянні Гей-Люсака маємо лише три складові у формі:



однак, очевидно, що якийсь небаланс повинен відноситись на синтезовану біомасу дріжджів. Якщо знехтувати цією особливістю, то втрати вуглецю складають одну третину від вхідної кількості. У більшості бродильних тех-

нологій це дійсно втрати за тими виключеннями, коли створюються вуглекислотні цехи.

Єдиною технологією з числа бродильних, в яких втрати CO_2 ліквідовані, є виробництва шампанських вин як у класичному виконанні, так і на основі безперервних технологій. Досягається такий результат точним дозуванням цукрів на етапі вторинного бродіння, за якого концентрація CO_2 у готовому напої складатиме 10 г/л на вимогу технології споживання, однак енергетичні втрати при цьому мають місце.

Таким чином, втрати енергоматеріальних ресурсів у виробництвах виноматеріалів у первинному виноробстві, етилового спирту і пива природно запрограмовані, якщо завданням технології є повне зброджування цукрів.

Особливістю бродильних технологій в анаеробних умовах є обмеження життєдіяльності дріжджів у зв'язку з осмотичними тисками накопичуваного алкоголю. У зв'язку з цим до числа актуальних завдань відносяться інтенсифікація енергомасообмінних процесів, удосконалення технологічного обладнання, використання вторинних енергетичних ресурсів, до числа яких слід віднести присутність газової фази, що утворюється в безперервному бродінні в режимі самозародження. Ця особливість супроводжується наслідком у формі виразної вертикальної нерівномірності розчиненого CO_2 і означає перспективи використання вторинних енергетичних ресурсів. Така особливість гідродинамічних умов стосується апаратів для реалізації анаеробного бродіння, однак в літературних джерелах вона практичного відображення не знайшла.

Сучасні циліндроконічні бродильні апарати у своєму виконанні мають висоту у кілька десятків метрів, що приводить до впливів гідростатичних тисків і до значень градієнтів розчиненого діоксиду вуглецю, які також відображують частину енергетичного потенціалу середовища, що також оцінюється незадіяним вторинним ресурсом. До такого ж ресурсу відноситься тепловиділення під час бродіння.

Оскільки процеси бродіння лімітуються осмотичними тисками, то це

обмежує концентрації цукрів і спирту, що в кінцевому результаті приводить до підвищення енергозатрат на процес перегонки. У зв'язку з цим на думку спеціалістів одним з напрямків їх обмеження є нереалізована можливість суміщення процесів бродіння і перегонки.

1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ВХІДНИХ СИРОВИННИХ ПОТОКІВ І ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОТЕНЦІАЛІВ

Сучасний стан харчових виробництв характеризується необхідністю проведення модернізації та оптимізації всіх галузей виробничого сектору України на основі використання новітніх технологій і обладнання. Важливим завданням є максимально раціональне використання матеріальних і енергетичних ресурсів сировини, палива, води. Для досягнення цього результату необхідне чітке уявлення про перетворення, що відбуваються з сировиною в умовах технологічних операцій, витрати та втрати ресурсів для їх здійснення.

Отримання кінцевого продукту з вхідної сировини відбувається завдяки різним процесам, з операціями по формуванню відповідних показників.

Сировина, що використовується в бродильних технологіях, повинна щорічно відновлюватися в кількості, достатній для промислової переробки, мати високий вміст крохмалю або цукрів. Цим вимогам відповідають картопля, зернові культури, цукровий буряк, виноград, фрукти та ягоди [1].

Меляса. Мелясою називають останній маточний розчин – відтік, що утворюється при відокремленні кристалів сахарози на центрифугах. Відповідно до виду вхідної сировини для виробництва цукру розрізняють бурячну та тростинну мелясу. Меляса є густою в'язкою рідиною темно-коричневого кольору зі специфічним запахом карамелі та меланоїдинів; бурячна меляса має також запах триметиламіну та інших летких амінів, що утворюються при розпаді бетаїну. В мелясі містяться цукри, які отримані з соку цукрового буряка або цукрової тростини, що не були видалені при хімічному очищенні, а також в розчині присутня сахароза, яку виділяти класичним методом кристалізації вже

економічно не вигідно.

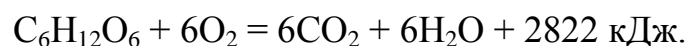
Виробництво спирту з меляси прив'язане до роботи цукроварних заводів, які мають явно виражений сезонний характер. Це змушує спиртові заводи, які спеціалізуються на переробці меляси, мати відповідні ємкості для її зберігання. У випадку перебоїв з поставкою сировини або простоюванням цукрових заводів також можуть виникати проблеми і на спиртовому заводі. Цих недоліків позбавлені спиртові заводи, що переробляють зернові культури.

В харчових і мікробіологічних технологіях вибір термодинамічних параметрів зорієнтовано на вимоги інтенсивного енерго- і масообміну.

Діапазони тисків і температур, за яких здійснюються вказані перетворення, мають технологічні або біохімічні обмеження. Наприклад, в процесах біологічного синтезу мікробних культур або використання як продуцентів певної сировини необхідно враховувати оптимальні температури їх життєдіяльності. Проте у значній кількості технологій виникають протиріччя з точки зору інтересів перебігу окремих складових процесів. Так вирощування мікробних культур в аеробних умовах супроводжується таким «температурним» протиріччям, оскільки оптимальний температурний діапазон, наприклад, дріжджів цукроміцетів становить 28-32 °С, але при цьому стала насичення по кисню, що вводиться в середовище аерацією, має суттєво обмежене значення. Це означає явно не оптимізовані термодинамічні співвідношення за величиною рушійного фактора масоперенесення в газорідній системі. Зниження температури культуральних середовищ нижче вказаного рівня масообмін прискорить, але швидкість продуціювання цільових речовин мікроорганізмами зменшиться. Очевидно, що в таких випадках можливим є пошук співвідношень фізичних і хімічних параметрів, за яких слід очікувати кращих загальних результатів.

Проте, досягнення останніх само по собі означає необхідність визначення критерію оптимізації системи. Повертаючись до проблем біологічного синтезу в тих же культуральних середовищах, відмітимо, що їх розв'язання в напрямку інтересів процесів як біосинтезу, так і інтенсивного масообміну

можна шукати на шляху збільшення концентрації мікроорганізмів і одночасного зниження температур середовищ. Але при цьому слід враховувати необхідність підвищення концентрації живильних речовин і компонентів, які приведуть до зміни в'язкості середовища, поверхневого натягу на границі поділу фаз, до підвищення осмотичного тиску рідинної фази тощо. Таким чином, внесення зміни лише одного термодинамічного параметра супроводжується майже ланцюговою реакцією щодо інших параметрів системи. Саме тому в подібних випадках необхідно виконувати попередньо до внесення змін аналіз на максимально можливу глибину оцінки «реакції» системи на подібні втручання. Пошук «компенсаційного» впливу в цьому випадку вказує на доцільність підвищення тиску в системі (у відповідності до закону Генрі), у тому числі і на рівні гідростатичного тиску. Очевидно, що вибір на користь кожного із вказаних варіантів буде супроводжуватись додатковими енергетичними витратами, а тому подальший аналіз в логістичних пошуках взаємозв'язків між матеріальними і енергетичними потоками повинен враховувати цей фактор як на рівні енергетичного забезпечення аерації, так і охолодження середовища. Останнє пов'язане зі способами енергетичного обміну мікроорганізмами у формі дихання і бродіння. В аеробних процесах має місце дихання, тобто процес окислювання органічних речовин клітинами за доступу кисню. За аеробних взаємодій відбувається повне окислення органічних речовин до діоксиду вуглецю і води за формулою



Таким чином, переробка кожної одиниці умовного живильного компонента супроводжується виділенням теплової енергії, яку необхідно відвести від культурального середовища. З цієї точки зору зниження температури культивування мікроорганізмів означає додаткове навантаження на систему охолодження за показником температури теплоносія. Додатковою реакцією системи охолодження, окрім того, буде зниження холодопродуктивності холодильної установки. З урахуванням тієї обставини, що в процесах аеробних трансформацій і бродіння енергетичні потенціали середовищ оцінюються як

низькопотенціальні, то їх пряме використання практично неможливе. Проте за своєю кількісною величиною цей потенціал цілком заслуговує на заходи по його трансформації і використанню на базі теплових насосів.

При цьому можливими є два варіанти охолодження середовища. За першим створюється циркуляційний контур, в якому воно примусово подається у випарник теплового насоса, а у другому варіанті у системі охолодження використовується проміжний теплоносій. Кожен з варіантів має свої переваги і недоліки як теплотехнічного, так і технологічного рівня. Однак, в обох випадках досягається можливість використання теплової енергії, що виділяється в процесах мікробіологічного синтезу з трансформованими термодинамічними параметрами, за яких тепловий потік, що знімається з конденсатора, перетворюється у високопотенціальний.

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 ацетонобутилове бродіння.

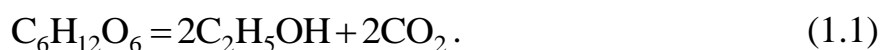
Відомо, що із трьох принципово можливих способів регенерації АТФ (дихання, бродіння та фотосинтез) бродіння є найпростішим. У зв'язку з цим у класичному визначенні *бродіння* – це такий метаболічний процес, у якому регенерується АТФ, а продукти розщеплення органічного субстрату можуть бути одночасно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

Органічний субстрат є джерелом енергії та вуглецю, а реакції синтезу АТФ є реакціями окислення [5]. Від окисленого вуглецю клітина позбавляється, виділяючи 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, CO_2 та 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.

Бродильні технології займають вагомую частку у виробництві напоїв і продуктів харчування, а останнім часом вони використовуються для синтезу відновлюваних природних енергоносіїв технічного призначення. Перетворення природних полімерів в харчових технологіях завершується синтезом спирту і діоксиду вуглецю. У відповідності до рівняння Гей-Люсака в завершальному вигляді досягається оцінка ефективності такої трансформації:



Така оцінка стосується двох аспектів, а саме енергетичного і матеріального. Перший з них стосується енергетичного балансу, представленого енергетичним ресурсом лівої і правої частин умови (1.1). При цьому очевидно, що діоксид вуглецю такого ресурсу не має, і це дозволяє вказану особливість бродильних технологій вважати їх недоліком, оскільки у більшості випадків вони супроводжуються втратами теплової енергії. Величина цих втрат визначена і складає 169 кДж/(г·моль). Останнє співвідношення стосується питомих витрат і втрат, а абсолютні енергетичні втрати, пов'язані з синтезом CO_2 , визначаються виробничими об'ємами.

Друга складова втрат за умовою (1.1) стосується вуглецю, який є основою органічного світу і у цьому випадку ця складова становить одну третину від початкової кількості. Участь мікроорганізмів у процесах бродіння потребує стабілізації температурних режимів середовищ з відповідною інтенсивністю тепловідведення. Це означає присутність додаткових енергетичних або енергетичних і матеріальних витрат, пов'язаних з вказаною стабілізацією.

Таким чином, реалізація процесів бродіння за умовою (1.1) 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_2);
- 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. Очевидно, що відносно перших двох пунктів внесення якихось змін неможливе. Стосовно третього пункту альтернативою є виробництво діоксиду вуглецю ендогенного походження, що одночасно є позитивною альтернативою щодо недоліку по другому пункту.

Перший і четвертий недоліки також взаємопов'язані і нейтралізуються, наприклад, за рахунок використання теплових насосів з одержанням теплових потоків з підвищеними термодинамічними потенціалами. Таким чином реалізується використання вторинних енергетичних ресурсів. З врахуванням того, що температури бродильних середовищ в залежності від технологій складають від 6...10 до 38...40 °C, ефективність використання теплових насосів, яка визначається відношенням генерованої теплової енергії до споживаної електричної енергії, досягатиме 6...8 одиниць. Це означає логічність і доцільність використання теплових насосів на основі зворотного циклу Карно [3, 6-8].

Особливістю бродильних процесів є самогенерування в середовищах диспергованої газової фази, яка в полі сил тяжіння приводить до утворення газорідних контурів активного перемішування та інтенсифікації масообмінних і біохімічних процесів. При цьому у відносно спрощеному описі масообмін має двосторонній характер. Синтезований діоксид вуглецю на молекулярному рівні долає бар'єри цитоплазматичної і зовнішньої оболонки мік-

робіологічної клітини і при цьому також слід розраховувати на необхідність подолання опору рідинної плівки. Ситуація певною мірою ускладнюється існуванням спряжених потоків харчування і видалення етилового спирту. Очевидно, що на загальний результат при цьому впливають форма і склад первинної сировини живлення, концентрація сухих і живильних речовин, властивості мікробіологічних клітин, технологічні особливості попередньої обробки сировини тощо.

У зв'язку з викладеним вище **задачі досліджень** наступні:

1. Здійснити оцінку присутності і можливостей трансформацій структури, кінематики, динаміки і енергетичних параметрів як складових газорідинних систем.
2. Виконати порівняння особливостей процесів збродження середовищ в різних технологіях.
3. Виконати оцінку енергоекономічної ефективності технологій, основаних на використанні газорідинних середовищ.
4. Розробити пропозиції методів підвищення енергоекономічної ефективності технологій анаеробного бродіння.

2. ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСІВ ЗБРОДЖУВАННЯ СЕРЕДОВИЩ В РІЗНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

2.1. Особливості технологій виробництва виноматеріалів для шампанських і білих ігристих вин

Відомо, що в технологіях виробництва шампанського передбачається подвійне бродіння, а підготовка до першого з них стосується переробки винограду на сусло з використанням різних методів. Найбільш освоєними з числа названих є подрібнення, відокремлення гребенів та відокремлення сусла першої фракції на шнекових стікателях, пресування цілих грон винограду на різних пресах та комбінації гребеневідокремлення і пресування ягід [9].

Цільовим компонентом такої сировини є цукор у суміші глюкози і фруктози, а за своїми фізико-хімічними властивостями сировинний потік вимагає негайної переробки. З цієї точки зору сировинні потоки в інтересах бродильних технологій поділяються на два види. До першого віднесемо культури, в яких синтезуються цукри (сахароза, глюкоза, фруктоза), а до другого – крохмалевмісні.

До цукровмісних потоків відносяться ягідні, виноградні, деякі фруктові, після подрібнення мезга з яких спрямовується на стікання з одержанням сусла. Останнє проходить операцію освітлення і, нарешті, передається на зброджування. Окрім сортових особливостей винограду, способів вилучення та освітлення сусла на якість шампанських і білих ігристих вин впливають умови зброджування сусла. Речовини, що утворюються при бродінні, приймають участь у формуванні букета і смаку, а також специфічних властивостей (здатність до піноутворення, ігристі властивості, опір втратам діоксиду вуглецю) [9-12].

Механізм спиртового бродіння тісно пов'язаний з ендогенною природою бродильних ферментів, тобто з перетворенням моноцукрів всередині дріжджових клітин. Молекули цукру із середовища дифундують через оболонки клітин за рахунок осмотичного тиску, потім ендoferменти розщеплюють цукри, а утворені речовини видаляються в середовище [13, 14].

При спиртовому бродінні окрім етилового спирту і діоксиду вуглецю утворюються вторинні продукти бродіння: гліцерин, янтарна і молочна кислоти, оцетальдегід, ацетон та інші. Паралельно спиртовому відбувається гліцеровиноградне бродіння з витратами біля 8 % цукрів з утворенням ізоамілового, ізобутилового, 4-пропілового спиртів тощо [15, 16].

Динаміка процесів бродіння залежить від різної природи факторів: фізичних (температури, тиску, режими), хімічних (склад середовища і його зміни в процесі бродіння), біологічних (раса дріжджів, концентрація і стан клітин). Важливе значення також має дотримання технології підготовки виноградного сусла. Після подрібнення винограду сусло спрямовується на відсто-

ювання в спеціальні апарати і декантується освітленою масою з відокремленням осадів, частково мікроорганізмів, окислених ферментів, частинок тканин виноградної лози. У процесах відстоювання передбачаються заходи проти заброджування середовища.

Ступінь освітлення сусла впливає на швидкість і якість бродіння [17]. За умови обробки сусла ферментними препаратами пектолітичної дії досягається високий рівень освітлення, бродіння відбувається більш плавно без помітного вспінювання з обмеженим нарощуванням температури, що особливо важливо при зброджуванні в габаритних апаратах.

В процесах спиртового бродіння з глюкози і фруктози всередині і на поверхні клітин дріжджів утворюються два головних продукту – етиловий спирт і діоксид вуглецю [18], а також проміжні вторинні продукти: гліцерин, янтарна, оцтова, лимонна, піровиноградна кислоти, ефірні та сивушні спирти [12].

Найлегше зброджуються глюкоза і фруктоза, повільніше – заноза і галактоза, сахароза зброджується з допомогою ферменту інвертази, який завжди присутній в дріжджах.

Винні дріжджі здатні зброджувати середовища з початковою концентрацією цукрів до 60 %. Важливою особливістю спиртового бродіння в апаратах великої місткості є підвищення температури сусла. Останнє має у своєму складі ефірні масла, які створюють з часом букет вина. В процесі бродіння утворювана диспергована газова фаза насичується парами ефірних масел і виносить їх в атмосферу. У зв'язку з цим доцільним є обмеження температур бродіння. Окрім того за підвищених температур бродіння відмерлі дріжджові клітини швидше підлягають автолізу, внаслідок чого виноматеріали збагачуються азотистими речовинами. Це збільшує схильність вин до білкових помутнів і мікробіологічних захворювань [10, 14].

Температура бродіння виноградного сусла суттєво впливає на швидкість зброджування цукрів, хімічний склад одержуваного вина і на його якість. Вина, отримані шляхом повільного зброджування за знижених темпе-

ратур, характеризуються свіжим і чистим сортовим ароматом та гармонічним тонким смаком. Температурний оптимум розмноження дріжджів складає 22...30 °С. Мінімальна температура, до якої дріжджі підтримують життєдіяльність, вважається близькою до 8 °С. Значний вплив на обмін речовин під час бродіння і на утворення та активність ферментів мають рН середовища, температура і рівень аерації сусла. Практикою підтверджено, що переливання виноматеріалів в наближенні до завершення бродіння з аерацією помітно активізує діяльність дріжджів і допомагає обмежувати недоброди. У відкритих бродильних апаратах (з доступом повітря) концентрація дріжджових клітин за інших рівних умов завжди більша, ніж у закритих. У першому випадку в 1 мл сусла присутні 100 млн. клітин, а у другому – 50 млн. Це означає можливість регулювати концентрацію дріжджів за рахунок аерації і впливати на швидкість бродіння. Швидкість зброджування виноградного сусла пов'язана з динамікою його охолодження і остання вимагає використання сучасних технологій теплообміну і трансформацій енергетичних потенціалів. Це означає доцільність подвійного використання синтезованих в процесах бродіння теплових потоків. Їх особливістю є обмежені значення температур, максимумами яких наближаються до 30 °С, хоча навіть цей достатньо обмежений показник має зменшуватись в інтересах якості кінцевого продукту. За вказаної особливості вибір охолоджувального теплового агента є достатньо проблематичним через необхідність підтримання заданої різниці температур, а тому навіть використання води із свердловин частіше ситуацію не розв'язує. Завдання щодо температурної стабілізації ускладнюється тим, що процеси первинного виноробства з піком технологічних навантажень відбуваються у часі, коли температури навколишнього середовища достатньо наближені до номінальних температур бродіння. У зв'язку з цим з точки зору інтересів технологічних вимог найбільш доцільним є використання холодильних систем охолодження. Використання їх за своїм першопочатковим призначенням для охолодження зброджуваних середовищ цілком логічно доповнити утилізацією трансформованого теплового потоку біохімічного бродіння [7, 19, 20]. Таке рішення досяга-

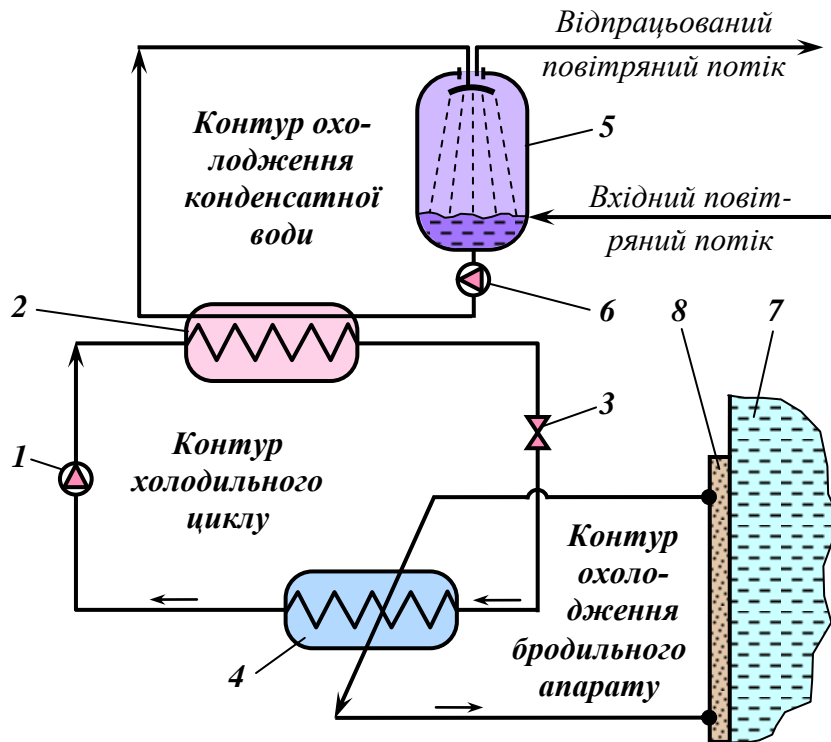


Рис. 2.1. Принципова схема системи охолодження бродильного апарату: 1 – компресор; 2 – конденсатор; 3 – регулювальний вентиль; 4 – випарник; 5 – градирня; 6 – насос конденсатної води; 7 – бродильний апарат; 8 – сорочка охолодження бродильного апарату

ється відносно обмеженою трансформацією існуючих холодильних установок, в основу яких покладено зворотний цикл Карно (рис. 2.1), представлений сукупністю двох адіабат і двох ізотерм (рис. 2.2) [3].

Відомо, що за вказаних умов теплоті конденсації відповідає величина

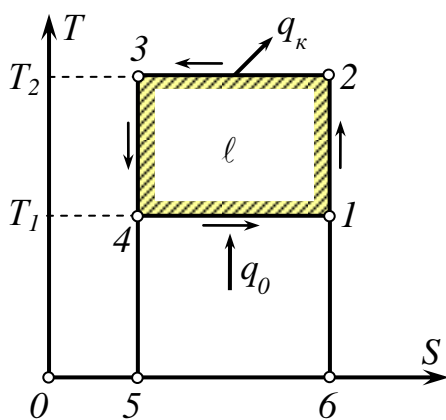


Рис. 2.2. Теоретичний зворотний цикл Карно в діаграмі T-S

q_k , представлена площею 1–2–3–4–5–6–1, і яка виводиться в контур охолодження конденсатної води. Холодопродуктивності відповідає величина q_0 , представлена площею 1–4–5–6–1, а роботі компресора відповідає площа 1–2–3–4–1. Звідси витікає залежність

$$q_k = q_0 + l.$$

При цьому важливо, що температурні діапазони контуру холодильного циклу є термодинамічно досяжними і вигідними. Економічна доцільність системи зростає за використання теплого потоку контуру охолодження конденсатної води і за відмови використання в ньому градирні.

У системах безперервного бродіння температурна стабілізація збродженого суслу досягається з врахуванням теплових витрат на догрівання вхідного сировинного потоку, температура якого знаходиться у межах 2...4 °С. Температура виноградного сусла помітно впливає на швидкість збродження цукрів, хімічний склад вина і його якісні показники [10].

Після бродіння здійснюється освітлення виноматеріалів в бродильних апаратах. Для прискорення освітлення і попередження насичення виноматеріалів азотом здійснюють його декантацію, а дріжджову гущу спускають в спеціальні збірники.

До переваг безперервної схеми бродіння відноситься виключення операцій розбродження і тихого доброджування, спрощується термостабілізація середовищ. Продуктивність схем безперервного бродіння зростає до 40 %.

2.2. Особливості вторинного бродіння у виробництві шампанського

Виготовлення шампанських вин шляхом вторинного бродіння здійснюється на основі шампанізованих виноматеріалів. Біотехнологічний процес шампанізації супроводжується природним насиченням виноматеріалів діоксидом вуглецю.

Шампанське, що випускається класичним методом, має особисті піноігристі властивості, світло-солом'яне зафарблення з легким зеленуватим відтінком, має тонкий аромат витримки та м'який гармонічний смак. Виготовляють шампанське таких марок: екстра брют, брют, сухе, напівсухе, напівсолодке і солодке трьома способами [9, 17]:

- 1) пляшковий метод, за якого насичення вина діоксидом вуглецю здійснюється під час вторинного бродіння в терміни від 1 до 3

років;

- 2) періодичний резервуарний, який здійснюється в металевих емальованих резервуарах;
- 3) неперервний, який реалізується в системі резервуарів значних ємкостей за сталих тисків. Схемі, в якій реалізовано неперервний спосіб шампанізації, відповідає патент України на винахід № 101222 [21].

Подовженість бродіння при резервуарному методі складає 2...6 місяців.

Названі технології поєднують особливості побудови процесів, в яких має досягатися повне зброджування цукрів з нормативним вмістом діоксиду вуглецю 10 г/л. Саме останнє відрізняє процеси шампанізації від інших бродильних технологій, оскільки їх здійснення не супроводжується матеріальними втратами діоксиду вуглецю. Очевидно, що такий результат досягається витримкою матеріальних балансів, за яких концентрація цукрів в тиражній суміші в процесі бродіння забезпечить концентрацію CO_2 10 г/л. Досягнення такого результату, однак, супроводжується невідповідністю по вмісту синтезованого спирту, тому коректування шампанського за цим показником здійснюється операцією дегоржажу за рахунок дозування експедиційного лікеру.

За визнання вихідним контрольним параметром бродіння вказаний вміст CO_2 початкова концентрація цукру задається у відповідності до рівняння Гей-Люсака. Контрольною величиною в загальній оцінці динаміки вторинного бродіння є зниження концентрації загального вмісту цукрів на 18 г/дм³.

Практично операція дозування цукру (у формі лікеру) є кінцевою за приготування тиражних сумішей без можливостей втручання в процеси зброджування в пляшках або акратофорах. Динаміка біохімічних трансформацій залежить, у тому числі, від параметрів тиску і температури, які визначають розчинність CO_2 у відповідності до закону Генрі:

$$c_n = kP,$$

де c_n – концентрація насичення середовища, кг/м^3 ; k – константа Генрі, що залежить від температури і фізико-хімічних властивостей середовища; P – парціальний тиск газової фази, Па (бар).

Дані щодо розчинності діоксиду вуглецю у вині наведені у табл. 2.1 і на рис. 2.3.

Таблиця 2.1. Розчинність діоксиду вуглецю у вині в залежності від тиску і температури, г/л

Температура, °C	Т и с к , б а р						
	1	2	3	4	5	6	7
0	3,62	7,25	10,87	14,50	18,12	21,75	25,37
2	3,39	6,78	10,17	13,56	16,94	20,33	23,72
4	3,17	6,34	9,52	12,69	15,86	19,03	22,21
6	2,97	5,95	8,92	11,90	14,57	17,84	20,82
8	2,79	5,58	8,37	11,16	13,96	16,75	19,54
10	2,62	5,25	7,87	10,49	13,11	15,74	18,36
12	2,47	4,94	7,40	9,87	12,34	14,81	17,27
14	2,32	4,65	6,97	9,30	11,62	13,95	16,27
16	2,19	4,38	6,58	8,77	10,96	13,15	15,34
18	2,07	4,14	6,21	8,28	10,35	12,42	14,49

У відповідності до наведених даних існує зона можливих сполучень тисків і температур, за яких досягається граничне значення c_n . Очевидно, що в основі досягнення заданої концентрації CO_2 є початкова концентрація цукрів, а утримання її досягається вибором тисків і температур.

Бродильні апарати (акратофори) виконуються у формі з циліндричною геометрією і напівсферичними торцевими поверхнями з вертикальною орієнтацією. При цьому висота апаратів складає 4...6 м і більше. Це означає, що в загальній величині тиску складова гідростатичного тиску має достатньо вагоме значення, що означає присутність градієнта величини c_n по висоті апаратів.

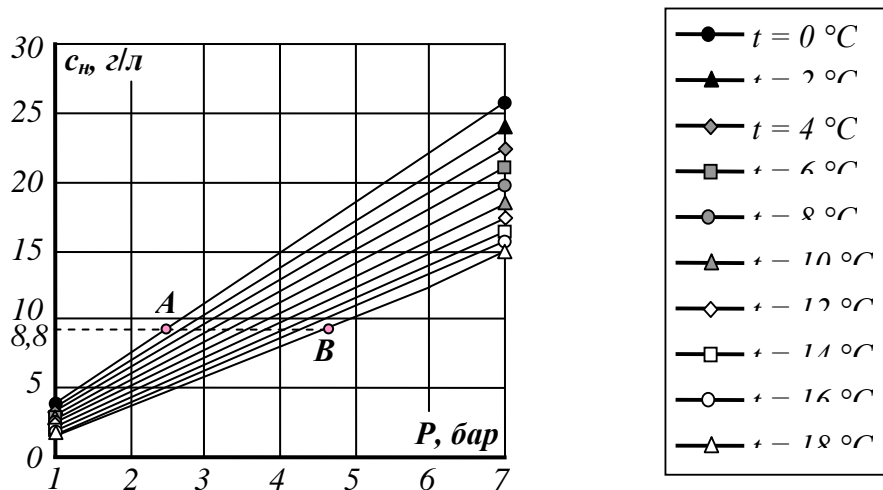


Рис. 2.3. Графік розчинності діоксиду вуглецю у сухому вині

У роботі [22] показано, що стабілізованим прирощенням тиску відповідають різні швидкості зброджування цукрів, що залежать від температур. Тому за $P = \text{const}$ і різних температур відбувається зниження температур зброджування.

В іншому формулюванні останній висновок має форму "відмічений у технологічній інструкції максимальний приріст тиску на фіксованому проміжку часу не може слугувати єдиною і вірною характеристикою процесу бродіння". Звідси витікає, що накопичений досвід зброджування тиражних сумішей, як за технологій бродіння в пляшках, так і в резервуарах вказує на співпадіння послідовності трансформацій речовин в анаеробних умовах. Так у відповідності до схеми бродіння по Ембдену-Мейергофу-Парнасу [5] утворення діоксиду вуглецю досягається на 11-му етапі перетворень, а утворенню етанолу відповідає 13-й етап.

При цьому має місце відмінність температурних режимів. Якщо за резервуарних технологій здійснюється примусове зниження температури зброджування від 15 до 10 °C на завершальній стадії, то в класичних технологіях температура не регулюється і має місце природний теплообмін з навколишнім середовищем, температура якого складає 12...15 °C.

Енергетичний баланс перетворень визначається присутністю в речовинах живлення водню і вуглецю. Глюкоза має енергетичний потенціал 2870

кДж/моль, спирт – 2640, а їх різниця складає 230 кДж/моль. Це значення характеризується як вільна ентальпія (ΔG) і записується зі знаком "мінус", що є вказівкою на її виділення в процесі перетворення глюкози у спирт. Однак в розпорядження дріжджової клітини спрямовується тільки та енергія, яка у формі хімічної енергії збереглася у вигляді АТФ (при спиртовому бродінні – 2 молекули АТФ). Залишок енергії витрачається у вигляді теплової енергії. У зв'язку з цим з $\Delta G = 230$ кДж/моль дріжджова клітина отримує тільки 61 кДж/моль, а залишок теплової енергії 169 кДж/моль виділяється у середовище. Охолодження останнього і підтримання температури в межах 10...12 °С приводить до збільшення розчинності CO_2 . За даними досліджень Лензіона С.В. [23] присутність впливів висотних градієнтів на розчинності CO_2 має впливи на визначення періодів лаг-фази, завершення яких оцінюється появою надлишкових порівняно з атмосферним тисків в газовій фазі акратофорів. З припущень про гомогенність середовища щодо живильних речовин і мікроорганізмів витікає, що динаміка зброджування та накопичення CO_2 буде однаковою у кожній локальній зоні. Проте за рахунок впливів гідростатичних тисків стани насичення будуть досягатися від початку у верхніх шарах середовища з поступовим зміщенням зони насичення. Це означає, що відлік умовного часу початку бродіння, зазначений моментом відриву стрілки манометра від нуля не відображує реальний перебіг динаміки бродіння. Така особливість має проявлятися у спробах порівнянь динаміки бродіння середовищ у вертикальних і горизонтальних бродильних апаратах. Для вертикальних апаратів маса розчиненого діоксиду вуглецю має складати значення:

$$M_{\text{CO}_2} = \left(kP_0 + \rho g \frac{H}{2} \right) V,$$

де V – об'єм рідинної фази, м^3 ; P_0 – тиск в газовій фазі апарата, Па; ρ – питома маса рідинної фази, $\text{кг}/\text{м}^3$; g – прискорення вільного падіння, $\text{м}/\text{с}^2$; H – висота рідинної фази.

Значення повисотного градієнта у зв'язку з наведеними міркуваннями визначатиметься залежністю:

$$c_n^{гр} = \frac{\Delta c_n}{H}, \frac{г}{л \cdot м},$$

де Δc_n – різниця максимальних і мінімальних розчинностей CO_2 , г/л.

Процеси вторинного бродіння потребують такої організації, за якої відсутні або хоча б обмежені процеси осідання дріжджів. У зв'язку з пошуками таких обмежень пропонується використовувати повисотні градієнти.

Утворення газорідинних середовищ стосується значної кількості технологій за рахунок двох підходів. Вони стосуються методів аеробного і анаеробного бродіння, кінцевий результат яких пов'язаний з забезпеченням мікроорганізмів в культуральних середовищах киснем. В умовах аеробних процесів ця задача вирішується утворенням диспергованої газової фази за рахунок подавання в рідинну фазу стиснутого повітря. звідси витікає відповідна назва процесу – аерація. Присутність диспергованої газової фази в рідинній і одночасно цієї системи в гравітаційному полі перетворює її в динамічну з енергетичними потенціалами в різній формі. Динамічні властивості газорідинних систем є проявом законів Архімеда, Генрі, Ньютона, нерозривності потоків, термодинаміки тощо, які об'єднуються законами збереження матерії і енергії. Це означає можливість застосування матеріальних і теплових балансів при розв'язанні різних задач, пов'язаних з пошуками можливостей інтенсифікації енерго- і масообмінних процесів.

При цьому перебіг технологічних процесів обов'язково поєднує в собі обидві названі складові і в більшості випадків реакції газорідинних систем на спроби зовнішніх впливів або додаткових механоенергетичних впливів проявляються в двох напрямках. Проте результат або напрямки впливів мають дві складові.

Інтенсифікація перебігу процесів завершується підвищенням продуктивності системи, тоді як застосування енергетичних впливів доцільно поєднувати з пошуками можливостей обмеження питомих витрат і рекуперації енергетичних ресурсів.

Звертання до аеробних технологій здійснимо на прикладі синтезу хлі-

бопекарських дріжджів в середовищах активної взаємодії між диспергованою газовою фазою, рідинною фазою культурального середовища і мікроорганізмами. При цьому акцент у дослідженні спрямуємо на особливості трансформацій енергоматеріальних потоків у формі динамічних і енергетичних проявів.

Газорідинні середовища в загальній оцінці їх гідродинамічних режимів прийнято характеризувати абсолютним вмістом газової фази в одиниці об'єму середовища в м^3 або в повному об'ємі середовища [2]. Утворенню диспергованої газової фази має відповідати підготовка вхідного газового потоку, тобто стискання, охолодження, очищення тощо, наступного введення в контакт від початку з рідинною, а потім з газорідинною сумішшю. У більшості випадків доцільним вважається рівномірний розподіл газової фази по поперечному перерізу апарата за рахунок використання барботажних газорозподільних систем. Очевидно, що результат енергомасообмінних процесів у значній мірі залежить від рівня дисперсності газової фази, оскільки від неї залежать міжфазна поверхня і швидкість спливання газових бульбашок, а рівно і величина газотримувальної здатності.

Головним рушійним фактором при створенні гідродинамічного стану середовища є прояв силових дій на дисперговану газову фазу і протидія у формі опору середовища, що відповідає сукупності законів Архімеда і Ньютона. Наслідком цих процесів є виникнення вертикальних циркуляційних контурів, що супроводжується відповідними енергетичними трансформаціями, які доповнюють організовану циркуляцію в середовищі у зв'язку з необхідністю його охолодження.

Головне технологічне завдання в системах аеробного бродіння стосується забезпечення постійної присутності розчиненого кисню в рідинній фазі на фоні такої ж постійної присутності споживача дріжджів-цукроміцетів. динаміка приросту мікроорганізмів. Рівень споживання кисню, рівень аерації і ефективність масообмінних систем повинні бути в балансі, оскільки диспропорція в рівнях споживання кисню і його доставки в середовище через кілька

секунд пере налаштує дріжджі на анаеробних режим дихання.

Очікуваний результат як наслідок поглиблення інформації щодо динаміки і енергетичних трансформацій та розробки відповідних рекомендацій пов'язаний з перспективами підвищення продуктивності апаратів для вирощування хлібопекарських дріжджів зі збільшенням накопичень біомаси від 40-50 до 70-80 кг/м³ і одночасно виходу по масі перероблюваної меляси від 60-70 до 90-100 %.

Анаеробні технології стосуються процесів зброджування виноградного суслу, вторинного бродіння у виробництві шампанських вин, етилового спирту, квасу тощо. В анаеробних процесах кисень, що споживається дріжджами, вилучається з цукрів, які є матеріальним і енергетичним підґрунтям відповідних балансів з утворенням спирту і діоксиду вуглецю. Саме останній приводить до насичення рідинної фази з наступним утворенням диспергової газової фази в режимі деаерації з відповідними наслідками щодо газоутримувальної здатності, гідродинамічних і енергетичних потенціалів, продуктивності систем.

Важливим аспектом в обмеженнях анаеробних процесів є осмотичні тики, пошуки обмежень впливів яких складають важливу і поки що не вирішену задачу.

2.3. 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. В останньому випадку в класичних технологіях використовувалося солодове

молочко з накопиченими в процесі пророщування зернової маси ферментами. Однак в сучасних умовах зростає рівень використання ферментних препаратів, синтезованих за спеціальними технологіями [8]. Хоча варто відмітити, що пивоварна галузь зберігає традиційний напрямок накопичення ферментних комплексів в складовій виробництва солоду на етапах замочування і пророщування зерна та сушіння солоду.

Повне і комплексне використання накопичених ферментів здійснюється в операціях оцукрювання заторної маси. В пивоварній галузі оцукрювання заторів здійснюється на основі класичних технологій з привнесеними спробами впровадження новітніх пропозицій з синтезованими ферментами. В технологіях виробництва спирту операції оцукрювання знаходяться в стані безперервного удосконалення. Одним із важливих напрямків є вибір на користь створення замкнутих рециркуляційних енергетичних контурів (патенти України № 103969 та № 104081) [24, 25].

Процеси зброджування цукровмісних середовищ здійснюються з використанням осмофільних рас дріжджів цукроміцетів, однак навіть за таких умов накопичення спирту не перевищує 10...12 %. Такий результат пояснюється осмотичним тиском, створюваним розчиненим спиртом і, частково, розчиненим діоксидом вуглецю.

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.

Названі граничні концентрації спирту 10...12 % визначають не тільки значні витрати технологічної води, а і значні енергетичні витрати у процесах перегонки та значні об'єми технологічних апаратів [8].

Безперервною реакцією науковців і працівників промисловості на цю ситуацію є пошуки рас дріжджів з підвищеними осмофільними властивостями для досягнення граничних концентрацій C_2H_5OH хоча б 16...17 % [8].

Однак такі результати поки залишаються недосяжними.

Оскільки концентрація спирту в середовищі змінюється від нуля до кінцевої максимальної, то була запропонована ідея суміщення операції бродіння з процесом перегонки і стабілізації таким чином обмеженої концентрації спирту, за якої дріжджі залишаються в активному стані [8]. Такому суміщенню, в якому реалізується утворення парової фази за номінальних для дріжджів температур, мають відповідати фізичні тиски 0,000103 МПа. Проте навіть за таким обмеженням у газовій фазі кипіння рідинної фази у глибині буде обмеженим через гідростатичні тиски. Окрім того, вакуум в технологічному апараті за вказаної величини повинен враховуватися в забезпеченні його умов міцності. Очевидно, що за габаритних розмірів існуючих бродильних апаратів технічне забезпечення цієї умови практично неможливе [26].

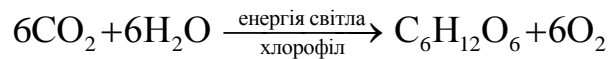
Пошуки нових технічних рішень привели до ідеї, за якою вакуумування середовища з відповідним результатом повинно здійснюватися в окремих камерах з помітно обмеженими розмірами, з яких парова фаза спрямовується на подальшу теплову обробку в режимі перегонки, а рідинна фаза повертається в технологічний апарат (патенти України №№ 103440, 104271 та 87594) [27-29].

Утворювана в бродильному апараті диспергована газова фаза вміщує в собі не лише діоксид вуглецю, а одночасно і пару C_2H_5OH , що враховується оснащенням вказаних апаратів спиртовловлювачами.

Реалізація такого напрямку може помітно підсилюватися за рахунок створення газових циркуляційних контурів з досягненням активної масопередачі з основною рідинною фазою в апараті. Як варіант пропонується схема, за якої з циркуляційного контуру рідинної фази фільтрацією вилучається дріжджова фаза, а рідинна фаза вилучається з контуру і подається на перегонку, по завершенні якої охолоджується і повертається в бродильний апарат.

Перспективи вичерпання природних ресурсів енергоносіїв змушує суспільство звертатися до технологій на основі відновлюваних ресурсів. Ці тех-

нології 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. Складовими такої реакції є діоксид вуглецю, вода і кванти сонячної світлової енергії. Результатом такої взаємодії є синтез глюкози



з можливостями подальшої трансформації речовин. Важливо, що всі органічні речовини є носіями хімічної енергії в структурі різних речовин.

3. ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГО- ТА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Трансформації сировинних потоків в харчових технологіях відбуваються під дією зовнішніх потоків теплової, електромагнітної, хімічної, променевої, механічної, сонячної енергій, енергій гравітаційних полів тощо. Перебіг кожної з трансформацій сировинних потоків відбувається за рахунок хімічної енергії самої сировини. При цьому в інтересах існуючих технологій енергетичні витрати з боку зовнішніх потоків мають бути мінімізованими, рівно як і втрати хімічної енергії сировинних потоків.

Кожна з існуючих технологій харчових виробництв характеризується особливостями таких взаємодій і перетворень і повнота останніх достатньо ілюструється в бродильних виробництвах, характерним для яких є використання газорідних середовищ.

Термін "газорідне середовище" відноситься до систем, у яких присутні газова і рідина фази. При цьому газова фаза є динамічною і такою, яка під дією гравітаційного поля і Архімедових сил, утворює висхідні потоки відносно рідинної фази, що одночасно є причиною створення вертикально спрямованих циркуляційних контурів. У більшості випадків газова фаза є диспергованою і її утворення пов'язане з анаеробним бродінням, при якому вона генерується внаслідок біохімічних процесів. Енергетичне підґрунтя такого

синтезу представлено хімічною енергією речовин живлення мікроорганізмів, трансформація якої супроводжується біохімічними перетвореннями, синтезом цільових речовин і діоксиду вуглецю. Оскільки середовища біохімічного синтезу характеризуються значною однорідністю щодо живильних компонентів і мікроорганізмів-споживачів останніх, то система вважається такою, в якій диспергована газова фаза також наближається до рівня рівномірно розосередженої. Однак від початку формування однорідність її перебування в рідинній фазі порушується з утворенням циркуляційних контурів.

Аналогічні перетворення мають місце в технологіях зброджування виноградного суслу у виноробній промисловості (первинне виноробство), в технологіях вторинного бродіння у виробництві шампанського, при зброджуванні пивного суслу або цукровмістких середовищ у спиртовій промисловості тощо.

Хоча вхідні сировинні потоки названих технологій мають певні відмінності, однак їх спільною характеристикою є те, що всі вони є носіями хімічної енергії цукрів. Названа спільність продовжується ланцюгом співпадаючих перетворень, який представлено схемою на рис. 3.1.

Вхідні матеріальні потоки тут представлені рідинним середовищем-розчинником, цукрами як живильними компонентами і мікроорганізмами, а хімічна енергія живильних речовин є основою подальших перетворень.

Загальну оцінку взаємодії вхідних потоків і біохімічного синтезу виконано з рівнем глибокого розуміння перебігу процесів, починаючи від відомого рівняння Гей-Люсака, схеми спиртового бродіння по Ембдену-Мейєргофу-Парнасу і форм бродіння відкритих К.Нейбергом [35]. Першою формою бродіння є нормальне спиртове бродіння з одержанням C_2H_5OH і CO_2 . Друга форма – це бродіння у присутності бісульфіту для отримання гліцерину, а третій формі відповідає бродіння у присутності бікарбонату натрію. Проте на відміну від цих процесів термодинамічні та фізичні наслідки синтезу діоксиду вуглецю представлені помітно обмежено [30, 31].

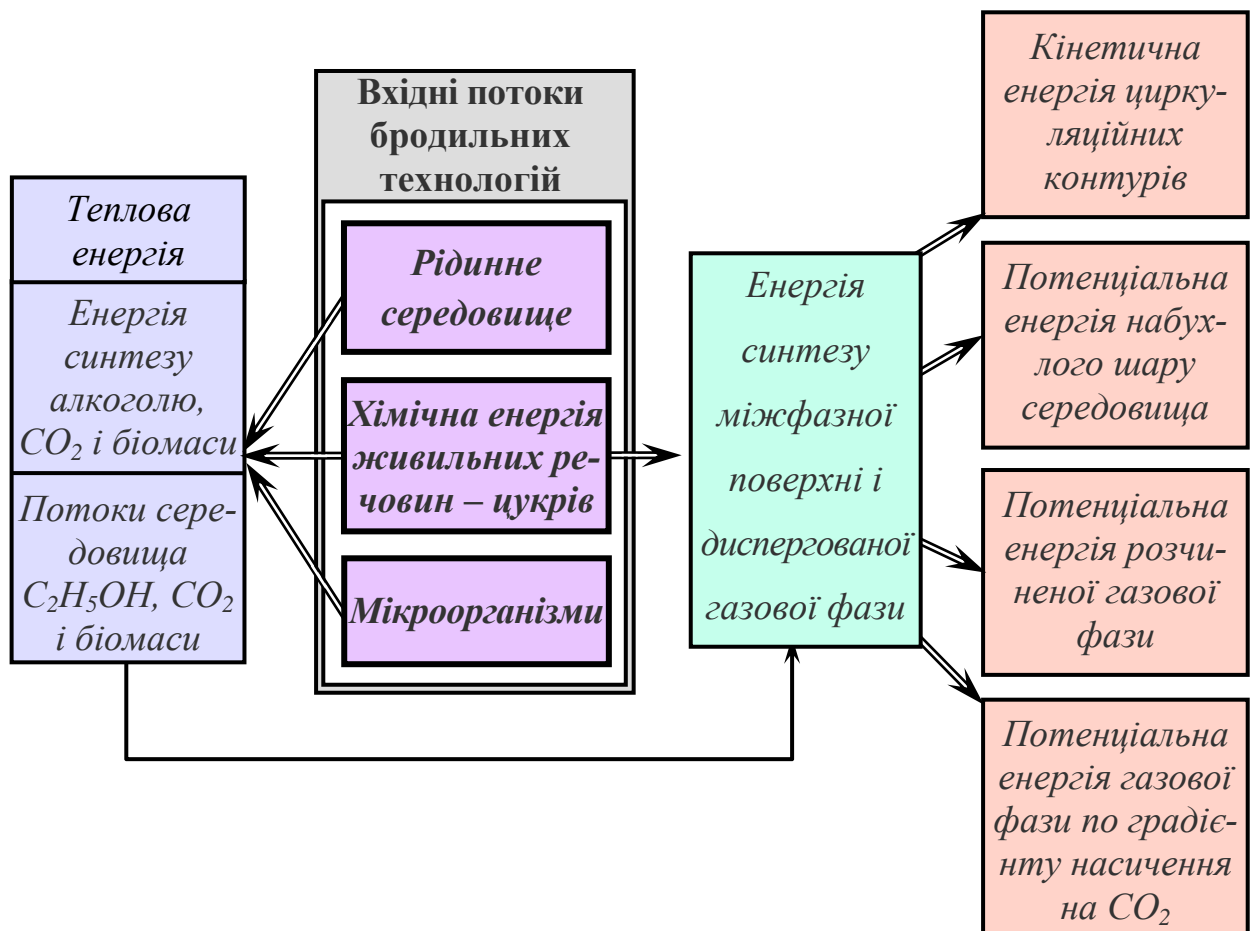


Рис. 3.1. Схема трансформацій матеріальних і енергетичних потоків анаеробного бродіння

Очевидно, що за умови анаеробного бродіння газова фаза представлена діоксидом вуглецю, динаміка синтезу якого пов'язана з організацією технологічного процесу, що є цілком визначеним і при цьому в режимах перехідних процесів виникає повисотна нерівномірність вмісту розчиненого CO_2 завдяки гідростатичному тиску.

Аеробні процеси частіше пов'язані з прискореним синтезом біомаси і супроводжуються технічними заходами для подавання в рідинну фазу кисню, оскільки дріжджі здатні асимілювати лише його розчинену форму.

Аерація середовищ здійснюється подаванням і диспергуванням в них повітря. Оскільки режими аерації регламентуються концентраціями розчиненого кисню, споживач якого присутній в середовищі, то за таких умов неми-

нуче до сягається повне насичення його азотом.

Однак при цьому азот як складова повітря не просто проходить "транзитом" рідинну фазу, а у значній кількості на поверхні поділу фаз присутні масообмінні процеси по кисню, діоксиду вуглецю і азоту. Якщо при цьому спрямованість потоку кисню цілком визначена в напрямку від газової фази до рідинної, то потоки азоту на поверхні поділу фаз можуть бути різнонаправленими. Такими різнонаправленими можуть бути і потоки CO_2 .

Спряженість названих трьох потоків на поверхнях поділу фаз впливає на інтенсивність масообмінних процесів, однак рушійні фактори при цьому у першому наближенні будемо визначати на основі закону Генрі.

Очевидно, що рівень складності масообмінних процесів на поверхнях мікробіологічних клітин суттєво більший, однак з врахуванням того, що питома поверхня цього масообміну переважає міжфазну поверхню не менше як на три порядки, ця частина віднесена за межі дисертаційної роботи.

Між тим існують можливості впливу на середовища з метою інтенсифікації масообмінних процесів за рахунок використання енергетичних потенціалів, названих в схемі по рис. 3.1. Оцінка можливостей їх реалізації визначає перелік задач цього розділу, а саме:

- гідродинамічні параметри середовищ та інтенсифікація масообмінних процесів;
- фізичне підґрунтя в оцінці потенціалів розчинених газів;
- характеристика і параметри вторинного бродіння виноматеріалів;
- визначення інженерних параметрів використання енергетичних потенціалів;
- енергетичні трансформації в процесах бродіння пива.

3.1. Фізичне підґрунтя потенціалів розчинених газів

Практично не використовуваним людством залишається потенціал, який є результатом взаємодії гравітаційного поля і атмосфери Землі. Наслід-

ком такої взаємодії є розчинене в гідросфері повітря, що регламентується законами природи, які визначають впливи на розчинність складових атмосфери.

Відомо, що розчинність газів визначається законом Генрі, за яким стала насичення є пропорційною парціальному тиску газу на поверхні поділу фаз [31]:

$$c_n = k_r P,$$

де k_r – константа Генрі, числове значення якої залежить від фізико-хімічних властивостей рідинної і газової фаз і температури рідинного середовища.

Вказівкою на існування потужного потенціалу розчинених у гідросфері газів є відоме явище, пов'язане з порушенням стану механічної і термодинамічної рівноваги на поверхні поділу фаз у зв'язку з проходженням великих морських суден. Взаємодія корпусів суден, режими їх обтікання водою і, особливо, взаємодія з рушійними гвинтами супроводжується утворенням ма-

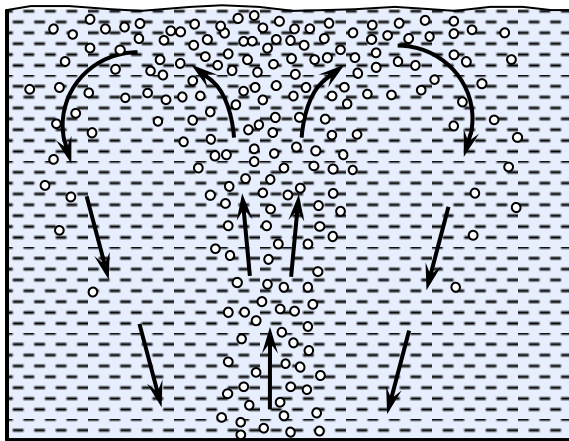


Рис. 3.2. Схема до утворення циркуляційних контурів в газонасиченій гідросфері

сивів бульбашок з розчиненої газової фази і частково з атмосфери (рис. 3.2). Зона з порушеною умовою термодинамічної рівноваги супроводжує трасу переміщення судна, а газова фаза, яка поповнюється за рахунок циркуляційних потоків і підведення глибинних шарів води, може існувати до кількох діб. Зародження і існування циркуляційних контурів пов'язане з локальним порушенням однорідності поля гідростатичних тисків, а їх енергетична підтримка забезпечується утворенням диспергованої газової фази.

Механізм насичення глибинних шарів води має двостадійність. На

першому етапі – це розчинення повітря на границі поділу фаз, а на другому – дифузія за рахунок градієнта сталої насичення c_n , яка зростає зі збільшенням глибини h . Присутність розчиненого повітря в гідросфері є загальновизнаною, однак інформація щодо рівнів насичення відчутно обмежена. У зв'язку з існуванням підводного рослинного світу і гідробіонтів та процесів окислення органічних речовин, очевидно, що за показником насичення має переважати азот. Однак з точки зору інтересів оцінки енергетичного потенціалу це має обмежений вплив на систему.

Енергетичний потенціал розчинених у рідинних середовищах газів визначається їх кількістю і тиском в системі, який однак не має фізичних проявів за умови термодинамічної рівноваги. Останнє положення слід розглядати як деяку модифікацію системи, що відображується рівнянням Менделєєва-Клайперона, оскільки його ліва частина у формі PV стосується об'єму V чисто газової фази. Однак параметри правої частини MRT відповідають реальному газу, а в сукупності – його енергетичному потенціалу. Підставу на такий гіпотетичний висновок пояснюємо на тій основі, що прояв енергетичного потенціалу розчиненого газу має місце тільки за умови його десорбції і в результаті суто механічної взаємодії з рідинною фазою. При цьому маса газу в такій енергетичній трансформації залишається рівною або кратною M , а газова стала R і температура T відповідають саме газовій фазі. Посилання на деяку кратність маси M пов'язане з тим, що не весь розчинений газ в режимі десорбції завжди переходить у газову фазу. Таким чином енергія десорбційного виділення розчиненої газової фази

$$E = MRT,$$

а масу утвореної газової фази знайдемо за умовою:

$$M = k_r (P_{(п)} - P_{(к)}) V_p,$$

де $P_{(п)}$ і $P_{(к)}$ – початковий і кінцевий парціальні тиски або фізичні тиски в системі; V_p – об'єм рідинної фази, з якої виділяється розчинений газ.

Очевидно, що створення енергетичних накопичувальних пристроїв по-

требує врахування параметрів розчинності. Впливи температур на розчинність газів відображено в табл. 2.1 [32].

Таблиця 3.1. Розчинність газів у воді $\text{м}^3/\text{м}^3$ за парціального тиску 0,1 МПа

Газ	Температура, °С							
	0	5	10	15	20	25	30	40
Азот	0,0235	0,0209	0,0186	0,0168	0,0154	0,0143	0,0134	0,0118
Кисень	0,0489	0,0425	0,0380	0,0341	0,0310	0,0283	0,0264	0,0231
Водень	0,0215	0,0204	0,0195	0,0198	0,0182	0,0175	0,0170	0,0164
Діоксид вуглецю	1,713	1,425	1,194	1,019	0,878	0,759	0,665	0,530

Співставлення даних табл. 3.1 показує суттєву перевагу за значенням розчинності діоксиду вуглецю. Вказану перевагу тим більш логічно застосувати в бродильних технологіях, або в спеціальних технологіях за рахунок примусового насичення рідинної фази діоксидом вуглецю. Так за десатурації 10 кг CO_2 з 1 м^3 середовища енергетичний потенціал переходу складе:

$$E = 10 \cdot 188,9(273 + 12) = 538365 \text{ Дж.}$$

Якщо процес десатурації складе у часі 10 с, то потужність енергетичної трансформації оцінюється у середньому обчисленні величиною:

$$N = \frac{E}{a} = \frac{538,4}{10} = 53,84 \text{ кВт.}$$

Одержане значення потужності N приблизно на порядок перевищує імпульси енергетичних впливів в класичних технологіях. Створення на основі розчинених газів енергетичних накопичувачів можливе за штучного одержання різних рівнів термодинамічної рівноваги. Важливо, що закон Генрі дає вказівку на їх досягнення в кількісних співвідношеннях. Підвищення тиску CO_2 в системі з сировиною підвищеної вологості означає зростаючий рівень насичення рідинної фракції і зростаючий енергетичний потенціал. Досліди, які стосувалися ягід винограду, бурякової стружки, подрібнених фруктів тощо привели до однозначного висновку про ефективність швидкоплинного скидання

тиску з руйнуванням структур твердої фази на міжклітинному і клітинному рівнях [2, 33-35].

Очікування високого руйнівного рівня десорбції CO_2 з вологої фракції середовищ пов'язується з глибоким проникненням газу у складові середовища, у тому числі і на клітинному рівні.

Фізичне підґрунтя технологій різкого зниження тисків (ТРЗТ) відрізняється від фізичних основ дискретно-імпульсних технологій, хоча за структурною побудовою в отриманні енергетичних впливів вони подібні. В обох випадках передбачається накопичення енергетичного потенціалу з наступним різким переведенням системи в метастабільний стан і до нового стану термодинамічної рівноваги. Аналіз енергетичних потенціалів порівнюваних систем приводить до висновку про їх еквівалентність і наближення потужностей, що реалізуються в НВЧ технологіях.

Відмінністю ТРЗТ-методів порівняно з дискретно-імпульсними технологіями є те, що підвищення їх енергетичних потенціалів супроводжуються різними напрямками зміни температур, оскільки розчинність газів зростає зі зниженням температури, а в ДІТ технологіях збільшенню потенціалів середовищ відповідає зростання температур.

При цьому на увагу в обох випадках заслуговує швидкоплинність зниження енергетичних потенціалів, яка може значно підсилюватися вакуумуванням середовищ. В залежності від рівня входження середовища в незрівноважений стан за показником температури швидкість її зниження може досягати $10 \dots 15 \text{ }^\circ\text{C}$ за секунду і більше на початку процесу з поступовим зменшенням цього показника [36]. Таке швидкісне охолодження досягається за рахунок генерування пари в режимі адіабатного кипіння середовища і стосується всього його об'єму з поправкою на гідростатичний тиск. Особливістю режимів адіабатного кипіння є присутність кавітаційних ефектів, частота появи яких за інших рівних умов залежить від висоти шару рідинної фази, оскільки у зв'язку з гідростатичними тисками верхні шари охолоджуються швидше.

Природа кавітаційних явищ при цьому є традиційною і пов'язаною з конденсацією пари в бульбашках.

Для випадків активної десатурації (дегазації) насичених середовищ можливість кавітаційних ефектів зменшується, оскільки колапс газових бульбашок може пов'язуватися зі збільшенням тиску в системі або зі зменшенням температури, що в умовах ТРЗТ не досягається.

Сучасне апаратне оформлення процесів бродіння і технологій мікробіологічного синтезу зорієнтовані на використання герметичних апаратів, які працюють в умовах підвищених тисків або хоча б за існування в них гідростатичних тисків. Так циліндро-конічні бродильні апарати пивзаводів, акратофори заводів шампанських вин, форфаси пивзаводів, апарати для вирощування мікроорганізмів, для зброджування квасу можуть мати висоту у кілька десятків метрів. Зброджування цукровмістких середовищ означає насичення їх розчиненим діоксидом вуглецю до значень, які відповідають закону Генрі.

При цьому режим насичення має ту особливість, що CO_2 передається в рідинну фазу на молекулярному рівні і лише за досягнення значення сталої насичення c_n стає можливим утворення газової фази. Однак при цьому наявність гідростатичних тисків визначає нерівномірність концентрації розчиненого діоксиду вуглецю. Відповідний концентраційний градієнт формується від початку виділення CO_2 з верхніх шарів середовища, оскільки в більш заглиблених шарах за рахунок гідростатичного тиску насичення поки що не досягається.

3.2. Гідродинамічні параметри та інтенсифікація масообміну в газорідних середовищах

Газорідні середовища з дисперговою газовою фазою в значній кількості представлені в бродильних технологіях та в технологіях, пов'язаних з синтезом мікробних культур. В першому випадку вони будуються як анаеробні, а у другому – як аеробні. Очевидно, що ці особливості визначають при-

роду газу диспергованої фази. За анаеробної системи – це діоксид вуглецю, а за аеробних процесів – це суміш азоту, кисню і діоксиду вуглецю. Хоча фізико-хімічні властивості названих газів різні, однак їх дисперговані у рідинній фазі масиви створюють подібні фізичні поля і подібно реагують на зовнішні збурення систем. Очевидно, що самогенерування газової фази CO_2 у середовищі пов'язане з внутрішнім масообміном, а за аеробних процесів диспергована повітряна фаза генерується за рахунок барботажних або інших процесів. В обох випадках інтенсифікація масообміну пов'язана з гідродинамічним станом середовищ і можливостями впливу на них енергоматеріальними імпульсами. У зв'язку з викладеним розглянемо взаємозв'язки між геометричними характеристиками апаратів і середовищ, гідродинамічними параметрами, механічними імпульсними впливами і масообміном.

Прояв енергетичних наслідків зброджування середовищ відбувається у наступній послідовності.

По-перше, в результаті життєдіяльності мікроорганізмів досягається накопичення в рідинній фазі спирту та діоксиду вуглецю з поступовим наближенням до стану насичення. При цьому час настання такого насичення на CO_2 в перехідному процесі та його числовий показник залежать від величини гідростатичного тиску. У зв'язку з цим зона утворення газової фази у формі бульбашок починається з поверхні рідинної фази і поступово розширюється у бік заглиблення у середовище.

За відомої і програмованої швидкості зброджування середовища можливим є визначення швидкості синтезу CO_2 $dc_H/d\tau$, $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$. Тоді за умови стабільної кількості мікроорганізмів та інших параметрів бродіння записуємо для елементарного шару товщиною dx на висоті x умову (рис. 3.3):

$$\left(\frac{dc_H}{d\tau}\right)_{\tau(x)} = k_r (P_0 + mgx), \quad (3.1)$$

де $\tau_{(x)}$ – час досягнення повного насичення шару на висоті x ; P_0 – зовнішній тиск; m – питома маса рідинної фази.

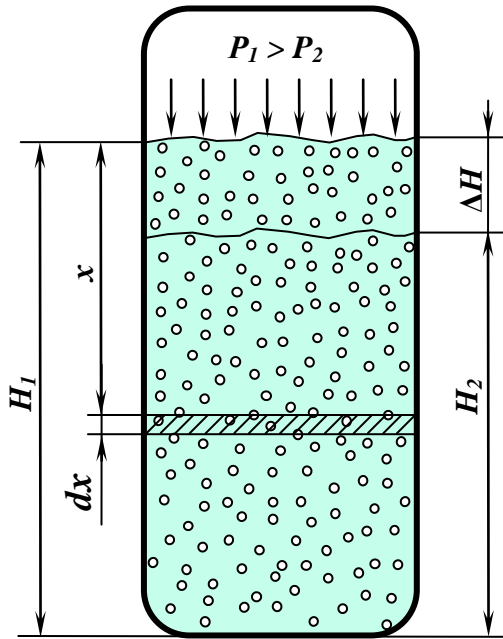


Рис. 3.3. Схема до визначення параметрів квазіпружної газорідинної системи

середовище вміщує в собі певний об'єм газової фази, що відповідає відомому поняттю утримувальної здатності. Останню у експериментальних вимірах визначають різницею рівнів набухлого $H_{\text{наб.}}$ і не набухлого $H_{\text{н.н.}}$ середовища:

$$u = F_{\text{ап}} (H_{\text{наб.}} - H_{\text{н.н.}}),$$

де $F_{\text{ап}}$ – площа поперечного перерізу апарата, м^2 .

Утримувальна здатність середовища є важливою гідродинамічною характеристикою, пов'язаною з такими параметрами, як поверхня поділу фаз і приведена швидкість диспергованої газової фази $w_{\text{пр}}$.

Ефект утворення набухлого шару свідчить, що певна частина газорідинної суміші здійснила переміщення у гравітаційному полі проти сил тяжіння. Це означає, що виконана певна робота, величина якої дорівнює потенціальній енергії $m_{\text{наб.}} g \Delta H / 2$, де $m_{\text{наб.}}$ – маса рідинної фази, що входить в набухлу частину шару. З певним наближенням будемо вважати, що об'єм рідинної фази на ділянці ΔH рівний утримувальній здатності. Це припущення дозволяє вирахувати:

Звідси знайдемо:

$$\tau_{(x)} = k_{\text{r}} \frac{P_o + mgx}{dc_{\text{н.}}/d\tau}, \quad (3.2)$$

а час, за якого почнеться генерування газової фази CO_2 у повному об'ємі середовища, визначається за $x = H$. Тоді

$$\tau_{(x)} = k_{\text{r}} \frac{P_o + mgH}{dc_{\text{н.}}/d\tau}. \quad (3.3)$$

По-друге, від моменту початку синтезу диспергованої газової фази розпочинається етап прояву потенціальної енергії набухлого шару газорідинної суміші. Це означає, що се-

$$m_{\text{наб.}} = \alpha \rho_{\text{рід.}}, \quad (3.4)$$

де $\rho_{\text{рід.}}$ – питома маса рідинної фази.

Якщо наступним припущенням вважати, що розподіл рідинної фази в набухлій частині є ізотропним, то потенціальна енергія набухлої частини системи:

$$E_{\text{наб.}} = m_{\text{наб.}} g \frac{\Delta H}{2} = \alpha \rho_{\text{рід.}} g \frac{\Delta H}{2}, \quad (3.5)$$

Розчинений CO_2 має висотний розподіл, що визначає можливість використання відповідного градієнта в якості енергетичного потенціалу. Визначимо загальну кількість діоксиду вуглецю, що перебуває у розчиненому стані. Елементарна по висоті dx ділянка на рівні x (рис. 3.3) вміщує у собі CO_2 у кількості:

$$dM_{\text{CO}_2} = c_{\text{н}} dV = c_{\text{н}} F_{\text{ап.}} dx.$$

Підстановкою $c_{\text{н}}$ одержуємо

$$dM_{\text{CO}_2} = k_{\text{r}} (P + \rho g x) F_{\text{ап.}} dx,$$

а інтегрування цього виразу дозволяє визначити кількість CO_2 для всього се-

$$\begin{aligned} \text{редовища: } M_{\text{CO}_2} &= \int_0^H k_{\text{r}} (P + \rho g x) F_{\text{ап.}} dx = k_{\text{r}} P F_{\text{ап.}} \int_0^H dx + k_{\text{r}} \rho g F_{\text{ап.}} \int_0^H x dx = \\ &= k_{\text{r}} P F_{\text{ап.}} H + k_{\text{r}} \rho g F_{\text{ап.}} \frac{H^2}{2} = k_{\text{r}} F_{\text{ап.}} H (P + 0,5 \rho g). \end{aligned}$$

Знайдений енергетичний і відповідний матеріальний потенціали і відповідна їм структура середовища у динамічному стані зберігаються в період усталеної частини процесу бродіння. Очевидно, що зміни швидкості синтезу CO_2 мають відобразитися на визначених параметра, а також на геометричних параметрах бродильних апаратів.

По-третє, утворення динамічного газорідинного середовища означає присутність циркуляційних контурів. Природа їх появи пов'язана з переміщенням диспергованої газової фази, на що вказують відомі теоретичні та експериментальні визначення абсолютної і відносної швидкостей газової фази. Оскільки

швидкість спливання газових бульбашок визначається різницею рушійних Архімедових сил та сил опору середовища і Архімедові сили пропорційні кубу визначального розміру, а сили опору – квадрату останнього, то це вказує на нелінійність залежності швидкості відносного руху від розмірів газової фази. Проте, в наших дослідженнях слід відмітити лише те положення, що стосовно середовищ з фіксованими параметрами швидкість газової фази також наближено фіксована. Наприклад, для середовищ з характеристиками близькими до води відносна швидкість бульбашок з діаметром 2...6 мм становить 0,25...0,27 м/с. Разом з тим в умовах газонасичених середовищ абсолютні швидкості перевищують відносні у 2-3 рази і більше, що відповідає залежності:

$$w_{\text{абс.}} = w_{\text{від.}} + w_{\text{рід.}}, \quad (3.6)$$

де $w_{\text{рід.}}$ – середня швидкість винесення газової фази в рідинних циркуляційних контурах.

Наявність висхідних гілок циркуляційних контурів означає присутність опускних і те, що такі контури є замкненими і спрацьовують на підвищення однорідності середовищ. Одночасно вкажемо на зв'язок між утримувальною здатністю середовища по газовій фазі і абсолютною швидкістю, що відображується формулою [36]:

$$u = \int_0^{H_{\text{зар.}}} \frac{M'RT}{P + H_{\text{рід.}} - (H - x)} \cdot \frac{dx}{w_{\text{абс.}}}, \quad (3.7)$$

де M' – масовий синтез CO_2 .

Потенціальна енергія газорідинної системи визначається сукупністю $E_{\text{наб.}}$ та енергії стиснутої газової фази. При цьому в пошуках можливостей силових впливів на газорідинну систему слід звернутися до її квазіпружних властивостей [4, 36]. Розподілена у повному об'ємі диспергована газова фаза виконує роль пружної складової, яка відгукується, наприклад, на зміни тисків. При цьому реакція кожної бульбашки незалежно від її координат в середовищі є повноцінним відгуком на зміну тиску у формі змін розмірів і об'єму.

Разом з цим така деформація сукупності бульбашок диспергованої газової фази означає зменшення показника утримувальної здатності, що має супроводжуватися зменшенням набухання ΔH . Зниження тиску до номінального повинно завершитися стабілізацією параметрів на попередньому рівні. Очевидно, що за таких умов результат силового впливу залежить від динаміки зміни останнього і його величини і цілком досяжним є значення, яке приведе дисперговану газову фазу до колапсу. Така ситуація має оцінюватися повним аналогом кавітаційних ефектів з паровою фазою. Оскільки фізичним підґрунтям колапсу газових бульбашок є тиск, то з врахуванням градієнту гідростатичного тиску він буде відбуватися у послідовності, починаючи з нижніх шарів. Таким чином для таких газонасичених середовищ з дисперговою газовою фазою досягається можливість часткового або повного колапсу з аналогом потужних впливів на рівні кавітаційних.

Якщо силові впливи не досягають значень, за яких відбувається колапс газових бульбашок, то система перетворюється на квазіпружну у формі розподіленої маси по вертикальній координаті. Разом з тим за наявності даних щодо утримувальної здатності по газовій фазі стає можливою оцінка рівня деформації середовища по висоті. Це означає досягнення оцінки пружних властивостей системи на рівні приведеної жорсткості (рис. 3.3). Оскільки у відповідності до рисунку квазіпружне середовище підлягає безпосередній силовій дії у напрямку деформації, то поняття жорсткості і приведеної жорсткості співпадають і визначаються відношенням силової дії до деформації ΔH і тоді

$$c = \frac{PF_{\text{ап.}}}{\Delta H} = \frac{(P_2 - P_1)F_{\text{ап.}}}{H_1 - H_2}. \quad (3.8)$$

Очевидно, що значення ΔH залежить від рівня деформації газової фази, а кількісною характеристикою останньої, як було показано, є утримувальна здатність. При цьому в залежності від швидкості зміни тиску $dP/d\tau$ процес стискання може бути наближеним до ізотермічного або до адіабатного. Повільне

стискання відповідає наближенню до ізотермічного процесу, а прискорене – до адіабатного. У роботі [36] визначено квазіжорсткість газорідинного середовища для ізотермічного процесу:

$$c_{із.} = \frac{P_2^2 F_{ап.}^2}{u_1 (P_2 - P_1)}, \text{ Н/м.} \quad (3.9)$$

Змінимо останню умову і перейдемо до адіабатного процесу, за якого

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{u_1}{u_2} \right)^{k_a}. \quad (3.10)$$

де k_a – показник адіабати, звідки

$$u_2 = u_1 \sqrt[k_a]{P_1/P_2}. \quad (3.11)$$

Тоді деформація середовища становитиме:

$$\Delta H = \frac{V_{рід.} + u_1}{F_{ап.}} - \frac{V_{рід.} + u_1 \sqrt[k_a]{P_1/P_2}}{F_{ап.}} = \frac{u_1}{F} \left(1 - \sqrt[k_a]{P_1/P_2} \right). \quad (3.12)$$

Останній вираз з врахуванням (3.8) дозволяє записати квазіжорсткість для адіабатного процесу:

$$c_{ад.} = \frac{(P_2 - P_1) F_{ап.}^2}{u_1 \left(1 - \sqrt[k_a]{P_1/P_2} \right)}. \quad (3.13)$$

Одержані розрахункові формули і результати розрахунків дозволяють відмітити, що квазіжорсткості газорідинних середовищ в обох випадках обернено пропорційні початковій утримувальній здатності і прямо пропорційні квадрату площі поперечного перерізу апарата (середовища). Вплив кінцевого тиску P_2 є більш складним, що відображується сполученням цього показника з початковим тиском в різних комбінаціях (рис. 3.4). Нелінійність ізотермічної жорсткості підтверджена графіками рисунка 3.5 при різних значеннях утримувальної здатності u_1 . Разом з тим збільшення u_1 помітно обмежує обидві форми квазіжорсткості (рис. 3.6). Оцінка комбінацій впливів параметрів u_1 і площі $F_{ап.}$ представлена на рис. 3.5.

Виконаємо порівняльну оцінку квазіжорсткостей в ізотермічному і адіабатному процесах за допомогою відповідних розрахунків.

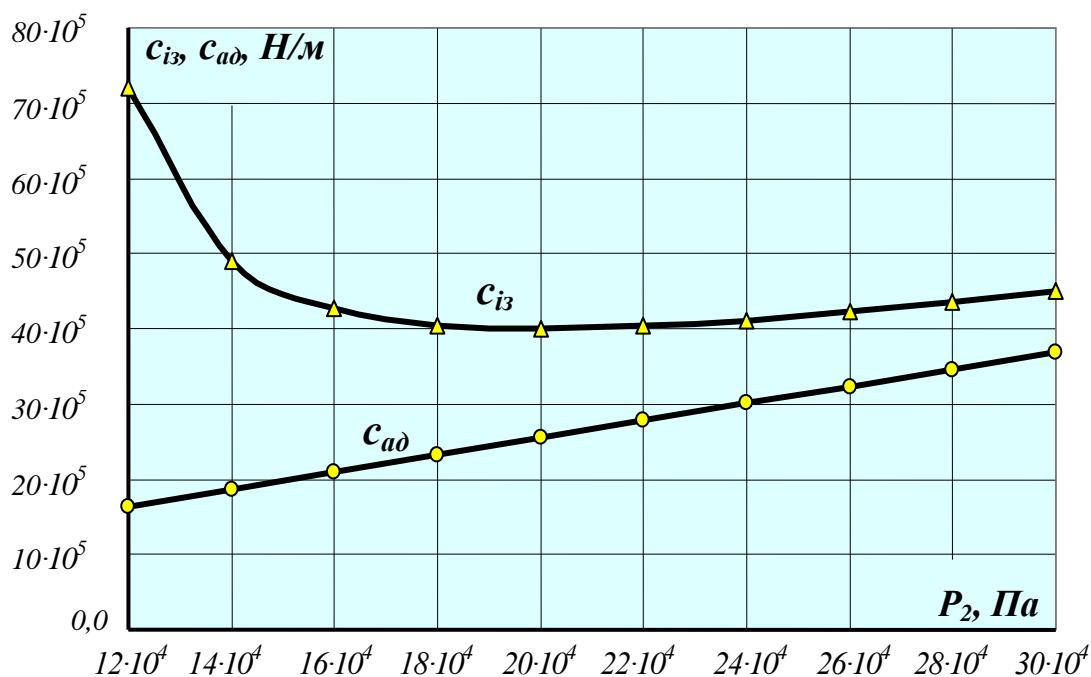


Рис. 3.4. Графіки порівняльних значень жорсткостей газорідних середовищ c_{iz} та c_{ad} при $u_1 = 0,1 \text{ м}^3$

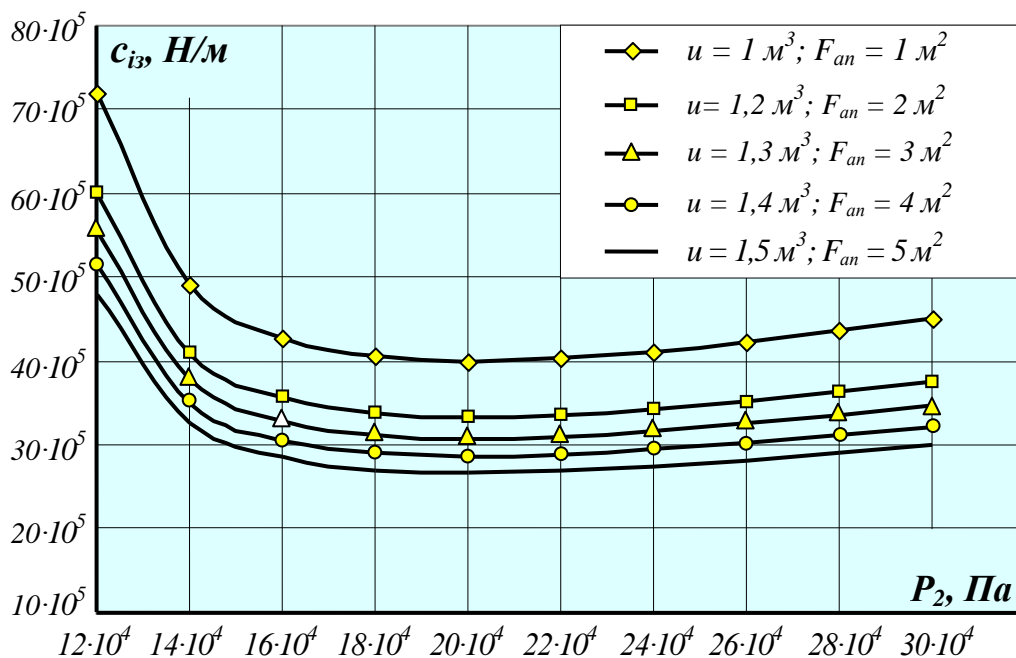


Рис. 3.5. Залежності ізотермічних жорсткостей від тисків P_2 при різних значеннях утримувальної здатності u та площі перерізу F_{an}

В розрахункових системах, які стосуються пружних і квазіпружних

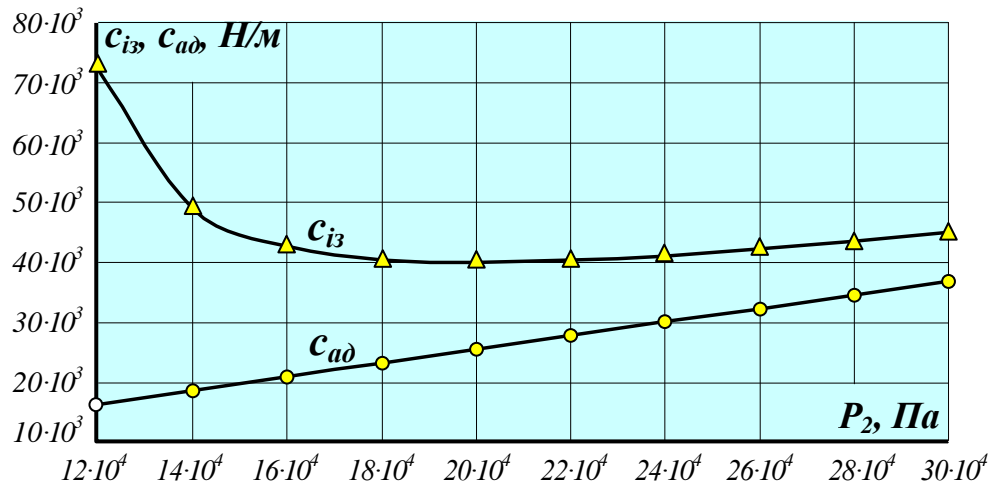


Рис. 3.6. Значення квазіжорсткостей газорідних середовищ при утримуваній здатності $u_1 = 10 \text{ м}^3$, тиску $P_1 = 100000 \text{ Па}$, площі перерізу $F_{\text{ан}} = 1 \text{ м}^2$ та показнику адиабати $k_a = 1,4$

систем в коливальних процесах присутні приведені маси. Останні визначаються на основі принципу еквівалентності кінетичних енергій. Для випадку розподіленої маси газорідної системи скористаємося принципом Релея і визначимо її приведену масу:

$$m_{\text{пр}} = \frac{m}{3}. \quad (3.14)$$

При визначенні приведеній масі і квазіжорсткості системи одержуємо можливість перейти до її розрахункової моделі (рис. 3.7).

Повернувшись до умов (3.13) та (3.9), відмітимо, що перехід від ізотермічного процесу до адиабатного супроводжується різними числовими значеннями жорсткостей з кратністю, що вкладається у 1,5-2 одиниці. Очевидно, що такий результат є очікуваним, однак важливим є те, що за прийнятих фізичних параметрів в обох випадках жорсткості є сталими величинами.

Окрім того маємо засвідчити важливий і принциповий факт, який стосу-

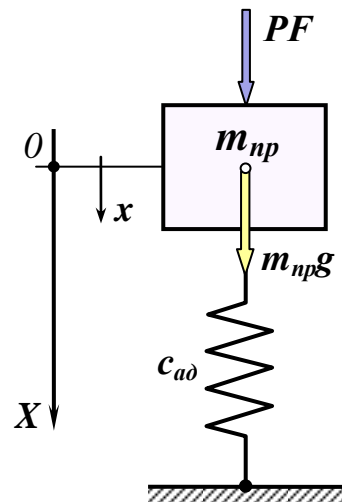


Рис. 3.7. Розрахункова модель системи

Окрім того маємо засвідчити важливий і принциповий факт, який стосу-

ється можливість визначення частоти власних коливань f квазіпружної системи:

$$f = \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}}, c^{-1}. \quad (3.15)$$

Відмічене означає, що досягається можливість реалізації пульсаційних впливів у квазіпружних системах з наближенням до резонансних явищ. Оскільки співвідношення жорсткості і маси визначає частоту власних коливань, то це дає можливість вказати на параметри впливу з точки зору інтересів оцінки системи в цілому. До таких параметрів впливів відносяться різниця і співвідношення тисків, геометрія апарата і утримувальна здатність. Останнє означає вплив швидкості генерування діоксиду вуглецю в середовищі і можливість впливу за рахунок рециркуляційного повернення CO_2 . Таке повернення разом з продовженням генерування діоксиду вуглецю в системі може забезпечувати різні значення утримувальної здатності у бік їх збільшення незалежно від швидкості зброджування середовища. Для поглибленої оцінки впливів утримувальної здатності звернемося до аналізу системи, математичне відображення якої запишемо у формі рівняння:

$$m_{\text{пр}} \ddot{x} = F_{\text{ап.}} P_2 + m_{\text{пр}} g - c_{\text{ад.}} x. \quad (3.16)$$

Перепишемо цю умову у формі, придатній до інтегрування:

$$\ddot{x} + \frac{c_{\text{ад.}}}{m_{\text{пр}}} x = \frac{F_{\text{ап.}} P_2}{m_{\text{пр}}} + g. \quad (3.17)$$

У результаті маємо однорідне диференціальне рівняння другого порядку, розв'язання якого залежить від представлення параметрів його правої частини. У першому наближенні будемо вважати, що перехід тиску в системі від значення P_1 до P_2 здійснюється миттєво. За таких умов рівняння (3.17) визначається як лінійне, а його розв'язання визначається коренями його характеристичного рівняння:

$$r^2 + \frac{c_{\text{ад.}}}{m_{\text{пр}}} = 0. \quad (3.18)$$

Оскільки корені останньої умови є уявними

$$r_{1,2} = \pm i \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}}, \quad (3.19)$$

то розв'язання диференціального рівняння (3.17) має вид:

$$x = A \sin \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} \tau + B \cos \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} \tau + \frac{F_{ап.} P_2}{c_{ад.}} + \frac{gm_{пр}}{c_{ад.}}, \quad (3.20)$$

де сталі інтегрування А та В визначаються за початкових умов:

$$\tau_{(п)} = 0; \quad x_{(п)} = \frac{F_{ап.} P_1}{c_{ад.}} + \frac{gm_{пр}}{c_{ад.}}; \quad \dot{x}_{(п)} = 0. \quad (3.21)$$

Така система оцінюється, як попередньо навантажена тиском P_1 і силою тяжіння. Підстановка початкових умов у рівняння (3.20) дозволяє записати:

$$\frac{F_{ап.} P_1}{c_{ад.}} + \frac{gm_{пр}}{c_{ад.}} = B + \frac{F_{ап.} P_2}{c_{ад.}} + \frac{gm_{пр}}{c_{ад.}} \quad (3.22)$$

або

$$B = \frac{F_{ап.} P_1}{c_{ад.}} - \frac{F_{ап.} P_2}{c_{ад.}}. \quad (3.22)$$

Для визначення сталої інтегрування А виконаємо диференціювання рівняння (3.20):

$$\dot{x} = A \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} \cos \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} \tau - B \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} \sin \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} \tau; \quad (3.23)$$

Тоді

$$A \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} = 0; \quad A = 0. \quad (3.24)$$

Підстановка сталих інтегрування дозволяє записати:

$$x = \frac{F_{ап.} P_2 + gm_{пр}}{c_{ад.}} + F_{ап.} \frac{P_1 - P_2}{c_{ад.}} \cos \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} \tau. \quad (3.25)$$

При цьому швидкість деформування системи:

$$\dot{x} = F_{ап.} \frac{P_2 - P_1}{c_{ад.}} \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} \sin \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} \tau = \frac{(P_2 - P_1) F_{ап.}}{\sqrt{m_{пр} c_{ад.}}} \sin \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} \tau. \quad (3.26)$$

З форми запису умови (3.26) видно, що деформація середовища за показником швидкості відповідає синусоїдальному закону і максимуму швид-

кості відповідає значення аргументу:

$$\sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} \tau_{max} = \frac{\pi}{2}. \quad (3.27)$$

Звідси час досягнення максимальної швидкості

$$\tau_{max} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m_{пр}}{c_{ад.}}}. \quad (3.28)$$

Разом з тим прирівнювання (3.26) до нуля дозволяє знайти час досягнення екстремуму в переміщенні x :

$$\tau_{екс.} = \pi \sqrt{\frac{m_{пр}}{c_{ад.}}}. \quad (3.29)$$

Звідси максимальне переміщення приведеної маси:

$$\begin{aligned} x_{екс.} &= \frac{F_{ап.} P_2 + gm_{пр}}{c_{ад.}} + \frac{(P_1 - P_2) F_{ап.}}{c_{ад.}} \cos \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} \pi \sqrt{\frac{m_{пр}}{c_{ад.}}} = \\ &= \frac{F_{ап.} P_2 + gm_{пр}}{c_{ад.}} + \frac{F_{ап.} (P_1 - P_2)}{c_{ад.}} \cos \pi = \\ &= \frac{F_{ап.} P_2 + gm_{пр}}{c_{ад.}} + \frac{F_{ап.} (P_2 - P_1)}{c_{ад.}} = \frac{2F_{ап.} P_2 + gm_{пр} - F_{ап.} P_1}{c_{ад.}}. \end{aligned} \quad (3.30)$$

Підстановка значення квазіжорсткості (умова (3.13)) дозволяє записати:

$$x_{екс.} = \frac{(2F_{ап.} P_2 + gm_{пр} - F_{ап.} P_1) u \left(1 - k_a \sqrt{\frac{P_1}{P_2}} \right)}{(P_2 - P_1) F_{ап.}^2}. \quad (3.31)$$

За умови нехтування впливом диспергованої газової фази на гідростатичний тиск надалі будемо вважати, що він визначається висотною координатою тільки рідинної фази:

$$P_{г.с.} = \rho g H_{рід.} \quad (3.32)$$

Звідси витікає можливість визначення тиску в кожному з перерізів середовища на рівні $H_{рід.}$:

$$P_H = P_2 + \rho g H_{рід.} \quad (3.33)$$

Оскільки гідростатичний тиск у кожному фізичному шарі залишається незмінним в режимі деформацій газорідних середовищ, то це означає, що загальні зміни в них є лише відгуком на зміну зовнішнього тиску.

Раніше було зазначено, що в запропонованій моделі прийнята умова миттєвого переходу в зовнішньому тиску від значення P_1 до P_2 . Практична її реалізація можлива за двох умов, які стосуються загального об'єму надрідинної фази в апараті і можливостей швидкоплинного подавання стиснутого газу з підтриманням стабілізованого тиску об'єму змінної величини. З числа діючого обладнання до названих умов є бродильні апарати (акратофори) у виробництві шампанських вин. Об'єм вільної фази в них наближається до 1...3 % від загального об'єму апарата, а присутність, наприклад, ресивера зі стиснутим CO_2 може забезпечити умову швидкоплинної стабілізації тиску на величині P_2 . Очевидно, що подібні системи можуть забезпечувати різні варіації фізичних впливів. Так збільшення тиску означає зростання розчинності газу у відповідності до закону Генрі. Адже утворення диспергованої газової фази за бродіння відбувається на межі її рівноваги з розчиненим CO_2 у рідинній фазі, а тому можливим є порушення такого стану. Рівень порушення може бути таким, який приведе до колапсу бульбашок газової фази, що є фізичним аналогом кавітаційних ефектів. витримка середовища під досягнутим тиском P_2 може бути цілком запланованою і такою, яка залежить від очікуваних технологічних і мікробіологічних ефектів. Однак витримка зі стабілізованим тиском в системі можлива лише після завершення перехідного коливального процесу в квазіпружній системі. Час перебігу перехідного процесу в значній мірі визначається дисипативними властивостями системи, а також законами силових впливів на неї. Очевидно, що тиск P_2 може бути представленим лінійною або нелінійною функцією часу, утримувальної здатності, фізико-хімічних параметрів середовищ тощо. Якщо тиск P_2 вважати лінійною функцією часу, то умову (3.16) трансформуємо до форми:

$$m_{\text{пр}} \ddot{x} = F_{\text{ап.}} P_2(\tau) + m_{\text{пр}} g - c_{\text{ад.}} x, \quad (3.34)$$

де $P_2(\tau)$ – лінійна функція у формі $P_2 = b_0\tau$ або $P_2 = b_0\tau + b_1$; $[b_0] = \text{Па/с}$; $[b_1] = \text{Па}$ коефіцієнти з зазначеними розмірностями.

Відповідною підстановкою отримуємо

$$\ddot{x} + \frac{c_{ад.}}{m_{пр}}x = F_{ап.} \frac{b_0}{m_{пр}}\tau + F_{ап.} \frac{b_1}{m_{пр}} + g. \quad (3.35)$$

$$\text{Тоді } x = A_1 \sin \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}}\tau + B_1 \cos \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}}\tau + \frac{F_{ап.} b_1}{c_{ад.}} + \frac{m_{пр}g}{c_{ад.}} + \frac{F_{ап.} b_0 \tau}{c_{ад.}}. \quad (3.36)$$

Нехай початковим умовам також відповідає рівняння (3.21). За їх використання знайдемо сталі інтегрування A_1 та B_1 :

$$\begin{aligned} \frac{F_{ап.} P_1}{c_{ад.}} + \frac{m_{пр}g}{c_{ад.}} &= B_1 + \frac{F_{ап.} b_1}{c_{ад.}} + \frac{m_{пр}g}{c_{ад.}}, \\ B_1 &= \frac{F_{ап.} P_1}{c_{ад.}} - \frac{F_{ап.} b_1}{c_{ад.}} = \frac{F_{ап.}}{c_{ад.}}(P_1 - b_1). \end{aligned} \quad (3.37)$$

Диференціювання (3.36) дозволяє записати:

$$\dot{x} = A_1 \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} \cos \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}}\tau - B_1 \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} \sin \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}}\tau + \frac{F_{ап.} b_0}{c_{ад.}}. \quad (3.38)$$

$$\text{Тоді } 0 = A_1 \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} + \frac{F_{ап.} b_0}{c_{ад.}}; \quad A_1 = -\frac{F_{ап.} b_0}{c_{ад.}} \sqrt{\frac{m_{пр}}{c_{ад.}}}. \quad (3.39)$$

Підстановка значень сталих інтегрування дозволяє записати:

$$\begin{aligned} x &= \frac{F_{ап.}}{c_{ад.}}(P_1 - b_1) \cos \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}}\tau - \frac{F_{ап.} b_0}{c_{ад.}} \sqrt{\frac{m_{пр}}{c_{ад.}}} \sin \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}}\tau + \\ &+ \frac{F_{ап.} b_1}{c_{ад.}} + \frac{m_{пр}g}{c_{ад.}} + \frac{F_{ап.} b_0 \tau}{c_{ад.}}. \end{aligned} \quad (3.40)$$

У відповідності до обраної фізичної і математичної моделі визначимо силові фактори, що стосуються квазіпружного елемента:

$$\begin{aligned} P_{пр} = c_{ад.}x &= F_{ап.} (P_1 - b_1) \cos \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}}\tau - F_{ап.} b_0 \sqrt{\frac{m_{пр}}{c_{ад.}}} \sin \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}}\tau + \\ &+ F_{ап.} b_1 + m_{пр}g + F_{ап.} b_0 \tau. \end{aligned} \quad (3.41)$$

Величина $P_{пр}$ в останній умові має розмірність сили і відображує математичну форму моделі. Вона стосується присутності інерційних властивостей системи, хоча їх можливо врахувати через прискорення диференціюванням (3.38):

$$\ddot{x} = A_1 \frac{c_{ад.}}{m_{пр}} \sin \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} \tau - B_1 \frac{c_{ад.}}{m_{пр}} \cos \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} \tau + \frac{F_{ап.} b_o}{c_{ад.}}. \quad (3.42)$$

Тоді діючі сили інерції в системі відображуються залежністю:

$$P_i = m_{пр} \ddot{x} = -A_1 c_{ад.} \sin \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} \tau - B_1 c_{ад.} \cos \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} \tau + \frac{m_{пр} F_{ап.} b_o}{c_{ад.}}. \quad (3.43)$$

Відмінність виразу (3.43) від (3.41) пояснюється тим, що в останньому випадку відсутні статичні складові навантажень.

Вплив на систему змінного тиску $P_2 = P_2(\tau)$ потребує певного обмеження через величину $P_2 = P_{max}$ або через час τ .

Для можливості порівнянь припустимо, що максимальні значення P_2 в обох випадках співпадають. Окрім того припустимо, що час досягнення

$P_2 = P_{2max}$ співпадає з часом досягнення екстремуму першого випадку, у

якому $\tau_{екс.} = \pi \sqrt{\frac{m_{пр}}{c_{ад.}}}$. Тоді співвідно-

шення, з яких маємо визначити параметри b_o і b_1 , знайдемо з наступних

міркувань, відображених на графіку $P_2 = P_2(\tau)$ на рис. 3.8.

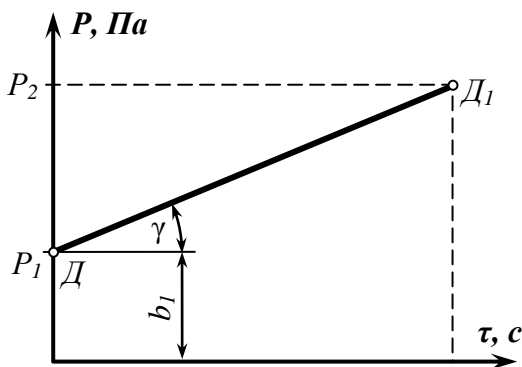


Рис. 3.8. Графік до визначення закону зміни тиску

Положення точки D_1 на графіку

визначаємо перетином лінії тиску

P_2 і визначеного часу $\tau_{екс.}$. Оскільки зміни тиску починаються від величини

P_1 , то положення точки D на ординаті визначає величину b_1 . Таким чином

$b_1 = P_1$. Тоді маємо:

$$\operatorname{tg}\gamma = (P_2 - P_1) / \tau_{\text{екс.}} \quad \text{і звідси} \quad b_0 = \operatorname{tg}\gamma = (P_2 - P_1) / \tau_{\text{екс.}}$$

За визначених величин b_0 та b_1 умова (3.40) записується у формі:

$$x = -\frac{F_{\text{ап.}}(P_1 - P_2)}{c_{\text{ад.}} \tau_{\text{екс.}}} \sqrt{\frac{m_{\text{пр}}}{c_{\text{ад.}}}} \sin \sqrt{\frac{c_{\text{ад.}}}{m_{\text{пр}}}} \tau + \frac{F_{\text{ап.}} P_1}{c_{\text{ад.}}} + \frac{m_{\text{пр}} g}{c_{\text{ад.}}} + \frac{F_{\text{ап.}}(P_2 - P_1)}{c_{\text{ад.}} \tau_{\text{екс.}}} \tau. \quad (3.44)$$

Як бачимо, за умови рівності $b_1 = P_1$ з рівняння (3.40) виключається косинусоїдальна складова.

У відповідності до залежності (3.44) на рис. 3.9 наведено складові, які відображують деформацію квазіпружного середовища.

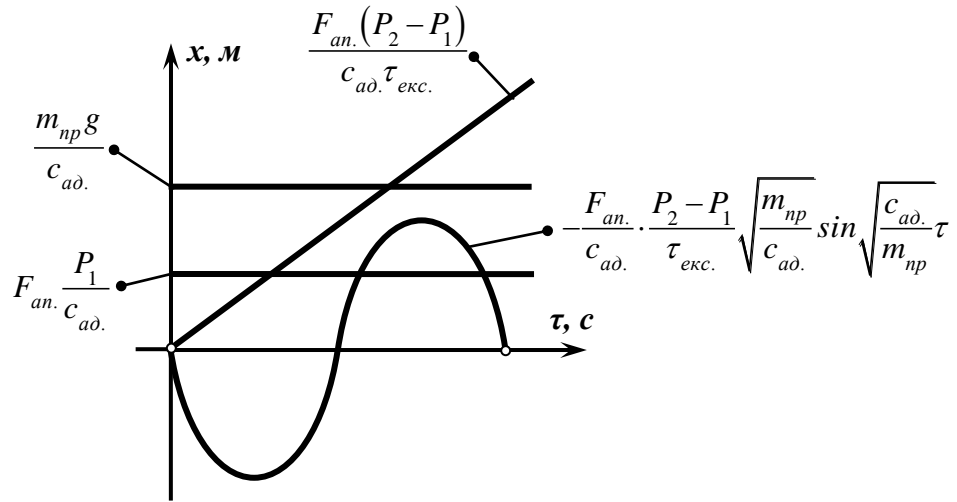


Рис. 3.9. Графік складових деформації квазіпружного середовища

У тому числі тут присутні дві статичні та дві динамічні складові і при цьому досягнення екстремальної деформації настає суттєво пізніше, ніж у попередньому випадку. Для знаходження часу її досягнення запишемо:

$$\dot{x} = -\frac{F_{\text{ап.}}}{c_{\text{ад.}}} \cdot \frac{P_1 - P_2}{\tau'_{\text{екс.}}} \cos \sqrt{\frac{c_{\text{ад.}}}{m_{\text{пр}}}} \tau'_{\text{екс.}} + \frac{F_{\text{ап.}}(P_2 - P_1)}{c_{\text{ад.}} \tau'_{\text{екс.}}} = 0. \quad (3.45)$$

Розв'язання цієї умови відносно $\tau'_{\text{екс.}}$ дає відповідь на питання стосовно часу досягнення максимальної деформації середовища.

Важливим з числа можливих відгуків системи на зростання тиску в газовому середовищі, як відмічалось раніше, буде прояв у формі кавітації. Оче-

видно, що підвищення тиску в системі супроводжується підвищенням розчинності CO_2 і максимальному насиченню при бродінні відповідає нижній шар середовища. Для нього записуємо

$$c_{\text{нmax}} = k_{\text{r}}(P_1 + \rho gH). \quad (3.46)$$

де k_{r} – константа Генрі.

Виконання швидкоплинного розчинення диспергованої газової фази можливе за умови

$$c_{\text{нmax}} \leq c_{\text{нкав}}. \quad (3.47)$$

або

$$k_{\text{r}}(P_2 + \rho gH) > k_{\text{r}}(P_1 + \rho gH). \quad (3.48)$$

де $c_{\text{нкав}}$ відповідає насиченню кавітації.

Оскільки генерування газової фази здійснюється у самому середовищі, то це означає, що газова і рідинна фази за показником вмісту CO_2 знаходяться у стані термодинамічної рівноваги, а тому всяке збільшення тиску у системі приводить спочатку до припинення виділення CO_2 , а потім до зворотного розчинення диспергованої газової фази. Умовою перебігу таких процесів є підтримання риску P_2 у газовому надрідинному просторі. Наступне його зниження до величини P_1 зі швидкістю, яка переважає швидкість деформації середовища, приводить до ефекту розширення стиснутої газової фази і зростання рівня. Наступний етап зростання тиску приведе до повторної реакції середовища.

Очевидно, що перепади зовнішнього тиску доцільно здійснювати з частотою, близькою до частоти власних коливань квазіпружної системи. У зв'язку з цим підвищення точності визначення останньої має важливе значення, а тому до фізичної і математичної моделей слід ввести параметри, що відображують дисипативні властивості середовищ. При цьому умова (3.16) буде змінена до форми:

$$\ddot{x} + \frac{c_{\text{ад.}}}{m_{\text{пр}}} \dot{x} + \frac{r}{m_{\text{пр}}} x = \frac{F_{\text{ап.}} P_2}{c_{\text{ад.}}} + g. \quad (3.49)$$

Звідси витікає, що коефіцієнт затухання $\delta = r/2m_{\text{пр}}$ пропорційний шви-

дкості деформації квазіпружного середовища. При цьому циклічна частота вільних коливань системи за відсутності сил тертя дорівнює:

$$\omega_0 = \sqrt{c_{ад.}/m_{пр}}. \quad (3.50)$$

Випадку затухаючих коливань відповідає умова $\delta < \omega_0$. Характеристичне рівняння умови (3.49) записується у формі:

$$\lambda^2 + 2\delta\lambda + \omega_0^2 = 0, \quad (3.51)$$

з якої одержуємо відповідні корені:

$$\lambda_{1,2} = -\delta \pm i\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}, \quad (3.52)$$

При дійсних коренях характеристичного рівняння розв'язання (3.49) записується як

$$x = e^{-\delta\tau} \left(A_0 \sin \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \tau + B_0 \cos \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \tau \right) + \frac{F_{ап.} P_2}{\omega_0^2 m_{пр}} + \frac{g}{\omega_0^2}. \quad (3.53)$$

Початкові умови мають вид: $\tau_{(п)} = 0; \quad x_{(п)} = \frac{m_{пр}g}{c}; \quad \dot{x}_{(п)} = 0,$

а сталим інтегрування A_0 та B_0 відповідають умови:

$$A_0 = - \frac{\delta \left(\frac{m_{пр}g}{c_{ад.}} - \frac{F_{ап.} P_2}{\omega_0^2 m_{пр}} - \frac{g}{\omega_0^2} \right)}{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}}; \quad (3.54)$$

$$B_0 = \frac{m_{пр}g}{c_{ад.}} - \frac{F_{ап.} P_2}{\omega_0^2 m_{пр}} - \frac{g}{\omega_0^2}. \quad (3.55)$$

Звідси частота власних коливань:

$$f = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}} - \frac{r}{2m_{пр}}}, \quad (3.56)$$

а з врахуванням (3.13) записуємо:

$$f = \sqrt{\frac{F_{ап.}^2 (P_2 - P_1)}{\sqrt{u_1 \left(1 - k_3 \sqrt{\frac{P_1}{P_2}} \right) m_{пр}}}} - \frac{r}{2m_{пр}}}. \quad (3.57)$$

Максимальній деформації середовища відповідає час $\tau_{\text{екс.}}$, який визначається з умови:

$$e^{-\delta\tau_{\text{екс.}}} \left(A_0 \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \cos \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \tau_{\text{екс.}} - B_0 \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \sin \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \tau_{\text{екс.}} \right) - \delta e^{-\delta\tau_{\text{екс.}}} \left(A_0 \sin \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \tau_{\text{екс.}} + B_0 \cos \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \tau_{\text{екс.}} \right) = 0. \quad (3.58)$$

За визначеного часу $\tau_{\text{екс.}}$ досягається максимальна силова дія на квазіпружний елемент системи

$$c_{\text{ад.}} x_{\text{max}} = e^{-\delta\tau_{\text{екс.}}} \left(c_{\text{ад.}} A_0 \sin \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \tau_{\text{екс.}} + c_{\text{ад.}} B_0 \cos \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \tau_{\text{екс.}} \right) + \frac{c_{\text{ад.}} P_2 F_{\text{ап.}}}{\omega_0^2 m_{\text{пр}}} + \frac{c_{\text{ад.}} g}{\omega_0^2}. \quad (3.59)$$

В останній умові маємо динамічну складову навантаження і дві статичні. Їх співвідношення визначає величину коефіцієнта динамічності:

$$k_{\text{дин.}} = \frac{c_{\text{ад.}} e^{-\delta\tau_{\text{екс.}}} \left(A_0 \sin \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \tau_{\text{екс.}} + B_0 \cos \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \tau_{\text{екс.}} \right)}{F_{\text{ап.}} \left(\frac{c_{\text{ад.}} P_2}{\omega_0^2 m_{\text{пр}}} + \frac{c_{\text{ад.}} g}{F_{\text{ап.}} \omega_0^2} \right)}. \quad (3.60)$$

Припинення дії тиску P_2 і зниження його до P_1 супроводжується реакцією системи, яка моделюється рівнянням:

$$\ddot{x} + \frac{r}{m_{\text{пр}}} \dot{x} + \frac{c}{m_{\text{пр}}} x = g. \quad (3.61)$$

Йому відповідає етап розширення середовища і для співвідношення $\delta < \omega_0$ маємо розв'язання:

$$x = e^{-\delta\tau} \left(A_1 \sin \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \tau + B_1 \cos \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \tau \right) + \frac{g}{\omega_0^2}. \quad (3.62)$$

$$\dot{x} = e^{-\delta\tau} \left(A_1 \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \cos \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \tau - B_1 \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \sin \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \tau \right) - \delta e^{-\delta\tau} \left(A_1 \sin \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \tau + B_1 \cos \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \tau \right). \quad (3.63)$$

Початкові умови другого етапу відповідають кінцевим першого:

$$\tau_{(п)}^{\text{II}} = 0; \quad x_{(п)}^{\text{II}} = x_{(к)}^{\text{I}} = x_{\text{max}}; \quad \dot{x}_{(п)}^{\text{II}} = \dot{x}_{(к)}^{\text{I}} = 0. \quad (3.64)$$

$$\text{Звідси} \quad B_1 = x_{\text{max}} - \frac{g}{\omega_0^2}; \quad (2.65)$$

$$A_1 = \frac{x_{\text{max}} - g/\omega_0^2}{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}}. \quad (3.66)$$

Завершенню другого етапу відповідає умова $\dot{x}_{(к)}^{\text{II}} = 0$ і відповідний час $\tau_{(к)}^{\text{II}}$ визначається з рівняння:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{(к)}^{\text{II}} = 0 = e^{-\delta\tau_{(к)}^{\text{II}}} & \left(A_1 \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \cos \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \tau_{(к)}^{\text{II}} - B_1 \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \sin \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \tau_{(к)}^{\text{II}} \right) - \\ & - \delta e^{-\delta\tau_{(к)}^{\text{II}}} \left(A_1 \sin \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \tau_{(к)}^{\text{II}} + B_1 \cos \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \tau_{(к)}^{\text{II}} \right). \end{aligned} \quad (3.67)$$

Оскільки час $\tau_{\text{екс.}}$, визначений з рівняння (3.58), відповідає часу першого етапу $\tau_{(к)}^{\text{I}}$, то сумарний час перебігу першого і другого етапів складе:

$$\tau_{\text{сум}} = \tau_{(к)}^{\text{I}} + \tau_{(к)}^{\text{II}}. \quad (3.68)$$

Сполучення параметрів квазіпружних систем може бути суттєво різним і у тому числі таким, який відповідає умові $\delta > \omega_0$ і тоді за уявних коренів (3.51) має місце аперіодичне згасання, за якого

$$x = C_1 e^{-(\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2})\tau} + C_2 e^{-(\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2})\tau} + \frac{P_2 F_{\text{ап.}}}{\omega_0^2 m_{\text{пр}}} + \frac{g}{\omega_0^2}, \quad (3.69)$$

де C_1 та C_2 – сталі інтегрування.

Відповідними перетвореннями одержуємо:

$$C_1 = \frac{m_{\text{пр}} g}{c_{\text{ад.}}} - \frac{g}{\omega_0^2} - C_2; \quad (3.70) \quad C_2 = \frac{\frac{m_{\text{пр}} g}{c_{\text{ад.}}} - \frac{g}{\omega_0^2}}{1 - \frac{\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}}{\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}}}. \quad (3.71)$$

Час стискання середовища $\tau_{(к)}^{\text{I}}$ знайдемо з умови:

$$\dot{x} = -(\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}) C_1 e^{-(\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2})\tau_{(к)}^{\text{I}}} - (\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}) C_2 e^{-(\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2})\tau_{(к)}^{\text{I}}} = 0, \quad (3.72)$$

що дозволяє знайти кінцеві умови першого етапу і записати та розв'язати рівняння руху на другому етапі:

$$x = C_3 e^{-(\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2})\tau_{(к)}^I} + C_4 e^{-(\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2})\tau_{(к)}^I} + \frac{g}{\omega_0^2}. \quad (3.73)$$

За початкових умов $\tau_{(п)}^{II} = 0$; $x_{(п)}^{II} = x_{\max}$; $\dot{x}_{(п)}^{II} = 0$ маємо:

$$C_3 = x_{\max} - C_4 - \frac{g}{\omega_0^2}; \quad C_4 = \frac{(\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}) \left(x_{\max} - \frac{g}{\omega_0^2} \right)}{2\sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}}. \quad (3.74)$$

Час завершення другого етапу знайдемо ітераціями з формули:

$$\frac{m_{пр}g}{c} = C_3 e^{-(\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2})\tau_{(к)}^I} + C_4 e^{-(\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2})\tau_{(к)}^I} + \frac{g}{\omega_0^2}. \quad (3.75)$$

За наявності інформації щодо часу перебігу першого і другого етапів загальний час $\tau_{сум}$ визначається залежністю виду (3.68). Це означає можливість визначення частоти зовнішніх енергоматеріальних імпульсів з наближенням до умов виникнення резонансу.

До числа переваг методу створення імпульсних впливів над газорідним середовищем є те, що завдяки властивостям дії гідростатичних тисків, відображених у законі Паскаля, фізичний вплив стосується всього об'єму середовища в просторовій системі координат. Такий результат суттєво відрізняється від спроб накладання пульсацій у локальних зонах середовищ у формі генерування гідромеханічних впливів.

Феноменологічні міркування вказують на те, що реалізація підвищеного тиску над середовищем супроводжується хвилею розповсюдження в середовищі у напрямку, протилежному переміщенню диспергованої газової фази. очевидно, що це має супроводжуватися деформацією всієї сукупності бульбашок на користь інтенсифікації масообмінних процесів на поверхні поділу фаз і на зміну напрямку переходу CO_2 в рідинну фазу. Разом з тим другий етап, пов'язаний зі зниженням тиску, також означає інтенсифікацію масообміну.

Дещо по іншому слід оцінювати фізику впливів енергоматеріальних

імпульсів на газорідинні середовища, що перебувають у стадії аеробних процесів у присутності диспергованої фази повітря. Метою таких процесів є інтенсифікація підведення у рідинну фазу розчиненого кисню та відведення синтезованого діоксиду вуглецю. Додатковим завданням аерації середовищ може бути участь газової фази у стабілізації температур на відміну від анаеробних процесів.

Та обставина, що результативність аерації культуральних середовищ оцінюється матеріальним балансом доставки в них кисню і споживанням його мікроорганізмами, вказує на доцільність створення умов, за яких рушійний фактор масообміну мав би якомога більше значення у формі різниці між сталою насичення киснем $c_{\text{нO}_2}$ і плинною концентрацією $c_{\tau\text{O}_2}$. Логіка цього твердження відображується відомою формулою Ньютона:

$$\frac{dM_{\text{O}_2}}{d\tau} = k_{\text{O}_2} F (c_{\text{нO}_2} - c_{\tau\text{O}_2}), \quad (3.76)$$

де $\frac{dM_{\text{O}_2}}{d\tau}$ – швидкість розчинення кисню в одиниці об'єму; k_{O_2} – коефіцієнт масопередачі; F – міжфазна поверхня в одиниці об'єму середовища.

Показник $c_{\text{нO}_2}$ визначається характеристиками газової та рідинної фаз і їх термодинамічними і фізико-хімічними параметрами. У зв'язку з цим для обраних умов величина $c_{\text{нO}_2}$ повинна рахуватися незмінною і максимальною, а стосовно плинної концентрації $c_{\tau\text{O}_2}$ відмітимо наступне.

З точки зору інтересів підвищення ефективності аерації середовищ вказану різницю доцільно мати якомога більшою за рахунок обмеження $c_{\tau\text{O}_2}$. Однак таке обмеження має бути чітко регламентованим з точки зору інтересів мікробіологічного забезпечення. Наприклад, в технологіях синтезу хлібопекарських дріжджів значення $c_{\tau\text{O}_2}$ пропонується підтримувати біля 25 % від стану насичення. Це означає, що першому етапу збільшення тиску відповідає зростання величини $c_{\text{нO}_2}$ і, одночасно, зменшення міжфазної поверхні.

Окрім того зростає коефіцієнт масопередачі як реакція на зміну гідродинамічного режиму.

Відмічений дуалізм впливу змінних тисків на швидкість розчинення кисню у зв'язку зі змінами параметрів F та $c_{\text{H}_2\text{O}_2}$ заслуговує на поглиблене вивчення, однак воно лежить за межами цього дослідження.

ВИСНОВКИ

Феноменологічний аналіз особливостей створення і використання газорідинних середовищ показав перспективи поглиблення інформації щодо динамічних і енергетичних потенціалів, основним джерелом яких є газотримувальна здатність, що створюється примусовим введенням в рідинну фазу газової фази з наступним диспергуванням або за рахунок самогенерування діоксиду вуглецю в режимах анаеробного бродіння.

Процеси енерго- і масообмінних процесів супроводжуються сукупністю рушійних факторів і факторів опору, приведення яких до раціональних сполучень визначає перспективи удосконалення технологій.

Сукупність завдань по темі дослідження виконана у повному обсязі, а саме:

1. Здійснено оцінку присутності і можливостей трансформацій структури, кінематики, динаміки і енергетичних параметрів як складових газорідинних систем.
2. Виконано порівняння особливостей процесів зброджування середовищ в різних технологіях.
3. Виконано оцінку енергоекономічної ефективності технологій, основаних на використанні газорідинних середовищ.
4. Розроблено пропозиції методів підвищення енергоекономічної ефективності технологій анаеробного бродіння.

Література

1. Яровенко В.Л. Справочник по производству спирта. Сырье, технология та технологичный контроль / В.Л. Яровенко и др. М.: Легкая и пищевая промышленность. 2010. 336 с.
2. Піддубний В.А. Наукові основи і апаратурне оформлення перехідних процесів харчових і мікробіологічних виробництв: дис. ... докт. техн. наук: 05.18.12 / Піддубний Володимир Антонович; НУХТ. К., 2007. 421 с.
3. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. М.: Высшая школа, 1980. 367 с.
4. Піддубний В.А. Енергетичне підґрунтя тепло- і масообміну в харчових технологіях // Харчова промисловість. 2008. № 6. С. 80-83.
5. Кунце В. Технология солода и пива. Пер. с нем. С.-Петербург: Профессия, 2001. 912 с.
6. Енергетичні трансформації і енергозбереження в харчових технологіях: монографія / А.І. Соколенко та ін. К.: Фенікс, 2012. 484 с.
7. Справочник специалиста пищевых производств. Книга 2. Теплофизические процессы. Энергосбережение / А.И. Соколенко и др.; Под ред. А.И. Соколенко. К.: АртЭк, 2003. 432 с.
8. Шиян П.Л., Сосницький В.В., Олійнічук С.Т. Інноваційні технології спиртової промисловості. Теорія і практика: монографія. К.: ВД "Асканія", 2009. 424 с.
9. Макаров А.С. Производство шампанского. Симферополь: Таврия, 2008. 416 с.
10. Агеева Н.М. Физико-химические и биотехнологические основы повышение 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.

11. Доминэ А. Вино. Новое издание дополненное и переработанное; пер. с франц. Германия. KONEMANN, 2005. 926 с.
12. Бабич Н.И. Проблемы повышения качества вин // Вестник "Крымское качество". 2006. Вып. 2 (8). С. 120-122.
13. Ковалев Н.Н. Технология игристых вин. К.: Преса України, 2007. 432 с.
14. Авакянц С.П. Биохимические основы технологии шампанского. М.: Пищевая промышленность, 1980. 352 с.
15. Кишковский, З.Н. Исследование процессов термической обработки вин с целью установления и обоснования рациональных режимов: автореф. дисс. ... докт. техн. наук / Кишковский Збигнев Николаевич; МТИПП. М., 1966. 44 с.
16. Кишковский З.Н., Мержаниан А.А. Технология вина. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. 504 с.
17. Технологические правила виноделия в 2-х томах. Т. 1: Общие положения. Тихие вина / Под ред. Г.Г. Валуйко и В.А. Загоруйко. Симферополь: Таврида, 2006. 488 с.
18. Зотин В.С. Физико-химическое обоснование и совершенствование вин, перенасыщенных диоксидом углерода: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: спец. 05.18.01 "Технология обработки, хранения и переработки злаковых, бобовых культур, крупяных продуктов, плодоовощной продукции и виноградарства" / Зотин Вячеслав Сергеевич; Краснодар, 2002. 24 с.
19. Технологические правила виноделия в 2-х томах. Т. 2: Игристые вина. Коньяки. Плодово-ягодные вина / Под ред. Г.Г. Валуйко и В.А. Загоруйко. Симферополь: Таврида, 2006. 288 с.
20. Родопуло А.К. Биохимия шампанского производства / А.К. Родопуло. – М.: Пищепромиздат, 1975. 352 с.
21. Патент 101222 UA, МПК C12G 1/06 (2006.01). Лінія для виробництва ігристого вина / Лензіон В.Й., Соколенко А.І., Лензіон С.В.; заявник Національний університет харчових технологій. № а201104853; заявл.

- 19.04.2011; опубл. 11.03.2013, Бюл. № 5, 2013 р.
22. Енергетичні трансформації і енергозбереження в харчових технологіях: монографія / А.І. Соколенко та ін. К.: Фенікс, 2012. 484 с.
 23. Лензійон С.В. Розвиток методів розрахунку і обладнання транспортно-технологічних систем у виробництві шампанських вин: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 / Лензійон Сергій Валентинович; НУХТ. К., 2011. 139 с.
 24. Патент на винахід 103969 UA, МПК С12Р 7/06 (2006.01), С12G 3/00 Система оцукрення замісу за одностадійною схемою / Чагайда А.О., Соколенко А.І., Бойко О.О.; заявник Національний університет харчових технологій. № а201210541; заявл. 06.09.2012; опубл. 10.12.2013, Бюл. № 23, 2013 р.
 25. Патент на винахід 104081 UA, МПК С12Р 7/06, С12G 3/00 (2006.01). Система низькотемпературного розварювання та оцукрювання замісу / Чагайда А.О., Соколенко А.І., Бойко О.О.; заявник Національний університет харчових технологій. № а201210540; заявл. 06.09.2012; опубл. 25.12.2013, Бюл. № 24, 2013 р.
 26. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. К.: Наукова думка, 1988. 725 с.
 27. Патент на винахід 103440 UA, МПК С12G 3/10 (2006.01), В01D 3/10 (2006.01), С12С 7/22 (2006.01). Система зброджування сусла у виробництві етанолу / Соколенко А.І., Піддубний В.А., Максименко І.Ф.; заявник Національний університет харчових технологій. № а201212910; заявл. 13.11.2012; опубл. 10.10.2013, Бюл. № 19, 2013 р.
 28. Патент на винахід 104271 UA, МПК С12F 3/08, С12М 1/00 (2006.01). Бродильний апарат / Піддубний В.А., Альохін Д.І.; заявник Національний університет харчових технологій. № а201305635; заявл. 30.04.2013; опубл. 10.01.2014, Бюл. № 1, 2014 р.
 29. Патент на корисну модель 87594 UA, МПК С12F 3/08 (2006.01). Бродильний апарат / Піддубний В.А., Вінніченко І.М., Криворотько В.М.; за-

- явник Національний університет харчових технологій. № u201311131; заявл. 18.09.2013; опубл. 10.02.2014, Бюл. № 3, 2014 р.
30. Пирог Т.П. Загальна мікробіологія. К.: НУХТ, 2010. 632 с.
 31. Глинка Н.Л. Общая химия: учебное пособие для ВУЗов. 23-е изд., испр. / Под ред. В.А. Рабиновича. Л.: Химия, 1983. 704 с.
 32. Справочник химика. М., Л.: «Химия», 1965. Т. 3. 1005 с.
 33. Патент України на винахід 83132 UA, МПК C13D 1/00 (2006.01). Система підготовки стружки до дифузійного процесу / Соколенко А.І., Піддубний В.А., Шевченко О.Ю., Піддубний Ю.А., Котенко М.М., Максименко І.Ф.; заявник Національний університет харчових технологій. № a200611507; заявл. 01.11.2006; опубл. 10.06.2008, Бюл. № 11, 2008 р.
 34. Патент на винахід 85414 UA, МПК C13D 1/00 (2009.01). Система для одержання дифузійного соку / Соколенко А.І., Піддубний В.А., Шевченко О.Ю., Піддубний Ю.А., Котенко М.М., Максименко І.Ф.; заявник Національний університет харчових технологій. № a200611504; заявл. 12.05.2008; опубл. 26.01.2009, Бюл. № 2, 2009 р.
 35. Патент на винахід 97895 UA, МПК C12C 7/00 (2006.01), F04F 5/20 (2006.01). Варильний агрегат для пива / Соколенко А.І., Козодой Ю.А., Піддубний В.А.; заявник Національний університет харчових технологій. № a201013165; заявл. 05.11.2010; опубл. 26.03.2012, Бюл. № 6, 2012 р.
 36. Піддубний В.А., Криворотько В.М., Йовбак В.Д. Вакуумне охолодження рідин і рідиновмістких середовищ // Харчова промисловість. 2011. № 10. С. 246-248.