

## ГЛАВА 5

### МЕХАНІЧНІ РОЗРАХУНКИ

#### 5.1. Матеріали для виготовлення ферментерів

Для виготовлення ферментерів використовують найрізноманітніші матеріали. Вибір матеріалу продиктований умовами проведення процесів (стерильне або нестерильне виробництво, під тиском або за нормального тиску тощо). Відомі, наприклад, біореактори для створення яких використовували природні каверни у скелях (виробництво біогазу). Для масових виробництв того самого біогазу або пива застосовують залізобетонні бродильні чани. Недоліком залізобетонних ферментерів є поява в них з часом тріщин, які стають джерелом контамінації і тому не можуть бути використані для виробництв, в яких відбуваються процеси за участю монокультур. Добре відоме використання ємностей з деревини. Так, для традиційних бродильних виробництв (пиво, вино, віскі, коньяк) незамінним матеріалом для дайджестерів є дуб. Скляну апаратуру використовують для вирощування посівних культур (ацетатори у виробництві оцтової кислоти глибинним методом, лабораторна ферментаційна апаратура) і для проведення робочих ферментацій на пілотних установках.

Але найрозповсюдженішим матеріалом є метали: алюміній, мідь і, головним чином, сталь. З алюмінію легко виготовляти найрізноманітніші ємності, але суттєвим його недоліком є неможливість застосування під час миття лужних мийних засобів (соди, тринатрійполіфосфату, які входять до складу сучасних мийних засобів). З міді традиційно виготовляють апаратуру для варіння пивного сусла, куби для перегонки спирту у виробництві коньяку тощо.

Традиційну конструкційну сталь Ст.3 практично не використовують, оскільки вона приводить до зменшення виходу деяких цільових продуктів метаболізму внаслідок утворення

токсичних концентрацій іонів заліза. Так, наприклад, під час ферментації продуцентів у ферментерах, виготовлених зі звичайної конструкційної сталі, вихід пеніциліну зменшується в 1,5 раза, стрептоміцину – вдвічі, а хлортетрациклін не утворюється взагалі. Крім того, культуральні рідини є кородуючими середовищами і за рік товщина стінки ферментера може зменшитись на 0,2–0,4 мм. З часом ця швидкість корозії зменшується внаслідок утворення захисної плівки, але оскільки плівка є пористою, то корозійні процеси повністю не зникають. Тому на внутрішні поверхні стінок ферментерів, виготовлених з цієї марки сталі, обов'язково наносять додатковий антикорозійний захисний шар. Таким матеріалом може бути гума. Для цієї мети розроблені спеціальні розчини високомолекулярних каучуків або використовують рідкі композиції низькомолекулярних каучуків без розчинників, здатні до полімеризації після нанесення їх на поверхні стінок.

Найбільш придатним металевим матеріалом для виготовлення ферментерів та іншого обладнання вважають нержавіючі сталі, наприклад, 0X18H10T, що містить 18 % хрому та 10 % нікелю. Використовують і сталі з меншим вмістом дефіцитного нікелю 0X21H5T, X14Г14H3T та інші. Відоме також застосування економічних двошарових конструкцій з нержавіючої сталі (внутрішній шар) і звичайної конструкційної (зовнішній шар).

## 5.2. Мета і зміст механічних розрахунків

Під час виконання технологічних проектів проводять механічні розрахунки основної апаратури. Як правило, у проектах використовують стандартне обладнання, яке перевіряється з метою визначення придатності його у цьому технологічному процесі і в конкретних умовах. Але можливо, що конструюють нову апаратуру; у такому випадку проводять орієнтовні розрахунки з метою визначення розмірів деталей апаратів і машин, які повинні забезпечити їх міцність і довготривалість, а також визначення енергетичних потужностей приводів.

До основних елементів хімічних (біотехнологічних) апаратів, які підлягають механічним розрахункам, належать корпуси (обичайка), днище, укріплення стінок у зоні отвору, трубні решітки, фланцеві з'єднання, опори апаратів, переміщувальні пристрої та приводи до них тощо.

Методики розрахунків подано у численній літературі, в тому числі [1–3]. Але основними джерелами інформації слід вважати стандартизовані методики розрахунків, наприклад: ГОСТ 14249–73 “Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность”, ОСТ 26–771–73 (методи розрахунку укріплення отворів в обичайках, переходах, у днищі), ОСТ 26–373–71 (методи розрахунку фланцевих з'єднань).

У розрахунках обирається максимальний тиск, якій може виникати під час експлуатації апарата. Наприклад, ферментацію ведуть за нормального тиску, але під час стерилізації ферментера гострою парою може виникати тиск, що дорівнює тиску насиченої або перегрітої пари. Отже, за розрахунковий тиск слід приймати тиск цієї пари. Те саме стосується і температури. Наприклад, ферментацію ведуть за температури 30 °С, але за розрахункову приймають температуру стерилізації (температуру пари).

### Приклади розрахунків

1. Розрахувати товщину стінки ферментера об'ємом 32 м<sup>3</sup>. Стерилізацію проводять гострою парою 0,3 МПа.

Розраховують за формулою:

$$\delta = \frac{pD}{2\varphi\sigma_{\text{дон}} - p} + C + C_1, \quad (5.1)$$

де  $\delta$  – товщина стінки, м;

$p$  – розрахунковий тиск, МПа (у цьому прикладі  $p = 0,1013 \cdot 3 = 0,3039$  МПа);

$D$  – діаметр апарата, м (припустимо, що обраний ферментер з променевим аератором, що обертається, який має внутрішній діаметр 3,2 м);

$\varphi$  – коефіцієнт міцності повздовжнього зварного шву, який становить 0,7–1 (прийmemo 0,85);

$\sigma_{дон}$  – напруга, що допускається, МПа (для нержавіючої сталі при температурі 132,9 °С, тобто при температурі насиченої пари і стерилізації,  $\sigma_{дон} = 140$  МПа);

$C$  – додавання до розрахункової товщини для компенсації корозії, м;  $C = \Pi \tau_a$ , де  $\Pi$  – корозійна проникливість, м/рік [2] (за відсутності даних можна прийняти, що  $\Pi = 10^{-4}$  м/рік),  $\tau_a$  – амортизаційний термін служби апарата, років (можна прийняти 10 років);

$C_1$  – додаток на закруглення до цілого числа міліметрів.

Розрахунок товщини еліптичного днища ведуть за формулою:

$$\delta = \frac{\rho R}{2\phi\sigma_{дон} - 0,5\rho} + C + C_1, \quad (5.2)$$

де  $R$  – радіус кривизни у верхівки дна (для стандартного днища  $R = D$ ).

Формула (5.2) справедлива, якщо  $1 \geq (\delta - C)D$  та  $H/D \geq 0,2$ , де  $H$  – висота циліндричної частини апарата. Товщина стінки дна не може бути меншою за товщину стінки апарата.

Підставляючи дані у формулу (5.1), одержуємо

$$\delta = \frac{0,3039 \cdot 3,2}{2 \cdot 0,85 \cdot 140 - 0,3039} + 10^{-4} \cdot 10 + 9,087 \cdot 10^{-4} = 0,006 \text{ м} = 6 \text{ мм.}$$

Насправді ферментер має товщину стінки 8 мм, отже, він придатний для використання у цьому технологічному процесі.

**2. Розрахувати діаметр вала перемішувального пристрою ферментера, на який передається потужність 20 кВт, а швидкість обертання мішалки 3 об/с.**

Розраховують обертовий момент  $M_{об}$ :

$$M_{об} = N/\omega, \quad (5.3)$$

де  $N$  – потужність на вала, Вт;  $\omega$  – кутова швидкість обертання вала, рад/с ( $\omega = 2\pi n$ , де  $n$  – швидкість обертання, об/с).

У прикладі

$$M_{об} = 20000/(2 \cdot 3,14 \cdot 3) = 1062 \text{ Н·м.}$$

Мінімальний діаметр вала суцільного перерізу визначають за формулою:

$$d = 1,71 \sqrt[3]{M_{об} / \tau_d} \text{ м,} \quad (5.4)$$

де  $\tau_d$  – напруга, що допускається на скручування, Па (для нержавіючої сталі  $\tau_d = 44 \cdot 10^6$  Па).

Для прикладу, що розглядається,

$$d = 1,71 \sqrt[3]{1062 / 44 \cdot 10^6} = 0,049 \text{ м} = 49 \text{ мм. Стандарт 50 мм.}$$

Для виготовлення вала може використовуватись труба. Використання труби замість суцільного вала дозволяє економити дорогу нержавіючу сталь. Обертовий момент для труби, що допускається, розраховують за формулою

$$M_{об} = 1,6 (d - \delta)^2 \delta \tau_d, \quad (5.5)$$

де  $\delta$  – товщина стінки труби, м.

Для прикладу, що розглядається, приймемо раніше розраховані обертовий момент та зовнішній діаметр вала (труби). Тоді

$$1062 = 1,6 (0,05 - \delta)^2 \delta \cdot 44 \cdot 10^6. \text{ Звідси } \delta \approx 0,0077 \text{ м} = 7,7 \text{ мм.}$$

Звичайно проводять перевірку вала на вібростійкість [3], але практика показала, що при використанні турбінних мішалок стандартних розмірів, при швидкостях обертання 2–4 об/с вали ферментерів є вібростійкими.

**3. Розрахувати потужність електродвигуна для перемішувального пристрою ферментера за прикладами 1 і 2 та обрати стандартний.**

Розрахунок ведуть за формулою:

$$N_e = N/\eta + N_{ум}, \quad (5.6)$$

де  $N_e$  – потужність електродвигуна, кВт;

$N$  – потужність, що передається на перемішування, кВт;

$N_{уш}$  – потужність, що витрачається на здолення тертя в ущільнику вала перемішувального пристрою.

Для ущільників з набиванням

$$N_{уш} = 1,48 p f d^2 n l, \quad (5.7)$$

де  $d$  – діаметр вала мішалки, м;  $p$  – робочий тиск, Па;  $f$  – коефіцієнт тертя вала по м'якому набиванню ущільника;  $l$  – висота ущільникового набивання, м;  $n$  – кількість обертів,  $c^{-1}$ ;  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії (приймається за паспортними даними, становить в середньому 0,85–0,95; прийmemo 0,9).

При застосуванні торцевих ущільнень

$$N_{уш} = 6020 d^{1,3} \text{ Вт}. \quad (5.8)$$

Для прикладу, що розглядається,  $N_{уш} = 6020 \cdot (0,05)^{1,3} = 204 \text{ Вт} \approx 0,2 \text{ кВт}$ .

Отже, потрібна потужність електродвигуна

$$N_e = 20/0,9 + 0,2 = 22,4.$$

Для ферментерів в основному обирають асинхронні двигуни єдиної серії ВАО (або КОМ) з використанням хімічно стійких покриттів або фарб. Отже, для заданих умов потрібно встановити електродвигун ВАО 72-2 з номінальною потужністю 30 кВт [1].

#### 4. Обрати фланець для встановлення кришки люка-лазу діаметром 800 мм у ферментер і перевірити його механічну міцність.

Типи сталевих, чавунних фланців для штуцерів машин апаратів, ємностей залежно від величини умовного проходу і умовного тиску встановлює ГОСТ 1233–67. Він поширюється на умовний прохід від 10 мм ( $D_у10$ ) до 3000 мм ( $D_у3000$ ) і на умовний тиск від 0,1 МПа ( $p_у1,0$ ) до 20 МПа ( $p_у200$ ).

Для цього прикладу потрібен фланець на  $D_у800$  та  $p_у6,0$ , оскільки під час стерилізації тиск в апараті може піднятися до 3 ата (0,304 МПа), а найближче значення стандартного умовного тиску – 0,6 МПа (5,92 ата).

Найрозповсюдженішими типами фланців є плоскі приварні фланці, фланці з конічною шийкою, вільні фланці на приварному кільці і на відбортовці (використовують для апаратури з кольорових металів), а також фланці, відлиті або ковані разом з трубою. Оскільки умови експлуатації апарата не є екстремальними, то не потрібно обирати фланці, що призначаються для відповідальних апаратів (з конічною шийкою, відлиті або ковані). Отже, обираємо фланець плоский приварний.

Конструкції і розміри фланцевих з'єднань сталевих апаратів і судин приймаються за галузевими стандартами ОСТ 26-425–72–ОСТ 26-433–72. Ущільнювальна поверхня може бути гладкою, “виступ – впадина”, “шип – паз”, під лінзову прокладку і під кільцеву прокладку овального перерізу. Оберемо найпростіший фланець з гладкою поверхнею і під плоску прокладку. Фланці можуть бути виконані з одного металу або мати наплавлення захисного металу. Прийmemo, що використовують монометалевий фланець з нержавіючої сталі. Обраний фланець має вигляд і розміри, показані на рис. 5.1.

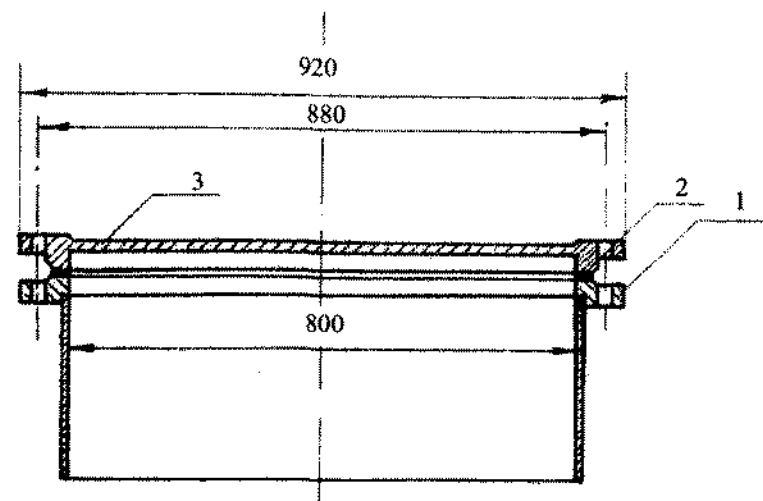


Рис. 5.1. Розміри стандартного фланця, обраного за прикладом 4:  
1 – фланець; 2 – прокладка; 3 – кришка

Для закріплення кришки до обраного фланця стандартом передбачено використання 32 болтів з діаметром різі М20.

Перевірка надійності кріплення кришки проводиться у такій послідовності.

За робочих умов розрахункове зусилля на розтяг у болтах визначають за формулою:

$$P_6 = \frac{\pi D_n^2}{4} p + P_n, \quad (5.9)$$

де  $D_n$  – середній діаметр ущільнення (для прикладу, що розглядається,  $D_n = (841+811)/2 = 826$  мм = 0,826 м);  $p$  – робочий тиск ( для прикладу  $p = 0,304$  МПа);  $P_n$  – розрахункова сила осевого стискування поверхней, що ущільнюються, в робочих умовах, яка необхідна для забезпечення герметичності, МПа.

Силу стискування прокладки прямокутного перерізу визначають за формулою

$$P_n = \pi D_n b k p, \quad (5.10)$$

де  $b$  – ефективна ширина прокладки, при цьому  $b = b_0$ , якщо  $1 \text{ см} \geq b_0$ ,  $b = \sqrt{b_0}$ , якщо  $b < 1 \text{ см}$  ( $b_0$  – дійсна ширина прокладки; в прикладі, що розглядається  $b_0 = 0,3$  м);  $k$  – коефіцієнт, який залежить від матеріалу прокладки (для гуми – 1, для фторопласту, пароніту, шкіри – 2,5; прийmemo, що використовується фторопласт). Тоді

$$P_n = 3,14 \cdot 0,826 \cdot \sqrt{0,3} \cdot 2,5 \cdot 0,304 = 1,08 \text{ МПа.}$$

$$P_6 = \frac{3,14 \cdot (0,826)^2}{4} \cdot 0,304 + 1,08 = 1,24 \text{ МПа.}$$

Кількість болтів  $z$  визначають за формулою

$$z = P_6 / \sigma_6 F_6, \quad (5.11)$$

де  $\sigma_6$  – напруга, що допускається (для сталі Ст.3 за температури 132,9 °С ця величина становить 132 МПа);  $F_6$  – площа перерізу болта (для прикладу, що розглядається, ця величина становить  $(3,14 \cdot 0,02^2)/4 = 0,000314 \text{ м}^2$ ).

Отже,

$$z = 1,24 / (132 \cdot 0,000314) = 29,91 \text{ штук.}$$

Оскільки стандартний фланець має 32 болти, то можна вважати, що він придатний до застосування у цих умовах.

*Примітка: повний розрахунок нестандартного фланця містить посібник [3].*

### 5. Розрахувати опори для ферментера об'ємом 32 м<sup>3</sup>

Розрахунок можна вести за рекомендаціями літератури [1–3]. Оскільки відношення висоти апарата до діаметра менше 5 і, крім того, апарат встановлюють у приміщенні на фундамент, то доцільно використати опору у вигляді стійки, що зображена на рис. 5.2, а, хоча можуть бути застосовані і циліндричні опори для апаратів колонного типу. Лапи для апаратів, що підвішуються між поверххами, та стійки, нормовані галузевим стандартом ОСТ 26-665–72, а циліндричні опори – стандартом ОСТ 26-467–72. Орієнтовну масу апарата можна визначити за формулою [5]:

$$G = 950V^{0,71} \text{ кг,}$$

де  $V$  – повний об'єм ферментера, м<sup>3</sup>.

Отже,

$$G = 950 \cdot 32^{0,71} = 11130 \text{ кг.}$$

Під час гідравлічних випробувань ферментер повністю заповнюють водою. Отже, повна маса апарата становить 43130 кг, а вага – 0,423 МН.

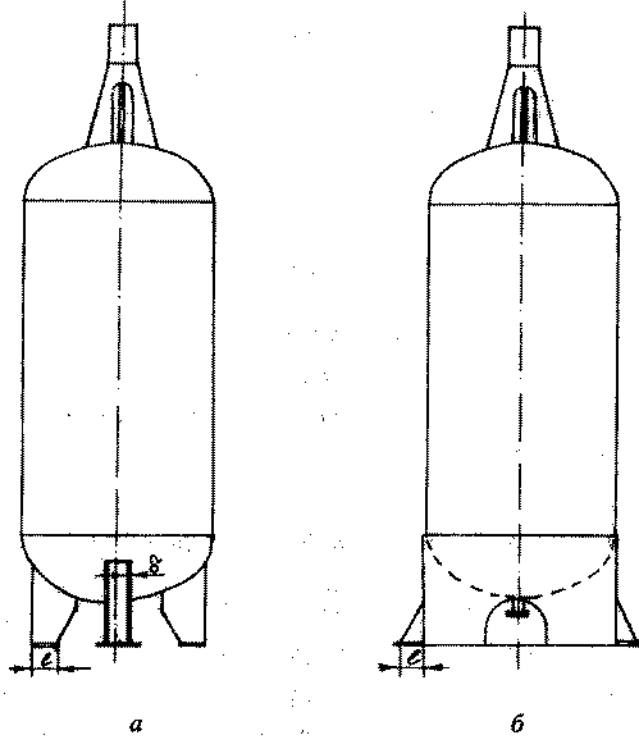


Рис. 5.2. Рекомендовані опори для ферментерів:  
а – опори у вигляді стійки; б – циліндрична опора

Подальші розрахунки проводимо за методикою [3].

Прийmemo, що встановлено 4 стійки, кількість ребер на одній стійці – 2, як показано на рис. 5.2, а (стійка може мати і одне ребро), виліт лапи  $l = 0,3$  м.

Товщину ребра розраховують за формулою:

$$\delta = \frac{2,24G}{knzl\sigma_{с.д}} + C + C_1, \quad (5.12)$$

де  $n$  – кількість опор (4);  $z$  – кількість ребер (2);  $l$  – виліт опори (приmemo 0,2 м);  $\sigma_{с.д}$  – напруга на стискання, що допускається (можна прийняти 100 МПа);  $k$  – коефіцієнт, який орієнтовно на початку розрахунків приймають 0,6. Значення  $C$  та  $C_1$  такі самі, як у формулі (5.1).

Отже,

$$\delta = \frac{2,24 \cdot 0,423}{0,6 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 0,2 \cdot 100} + 0,001 + 0,00013 = 0,011 \text{ м} = 11 \text{ мм.}$$

Відношення  $l/\delta = 0,2/0,11 \approx 18$ . За графіком (рис. 5.3) знаходимо дійсне значення  $k = 0,4$ . Отже, потрібний перерахунок товщини ребра. При  $k = 0,4$  нове значення  $\delta$  становить

$$\delta = \frac{2,24 \cdot 0,423}{0,4 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 0,2 \cdot 100} + 0,001 + 0,000195 = 0,016 \text{ м} = 16 \text{ мм.}$$

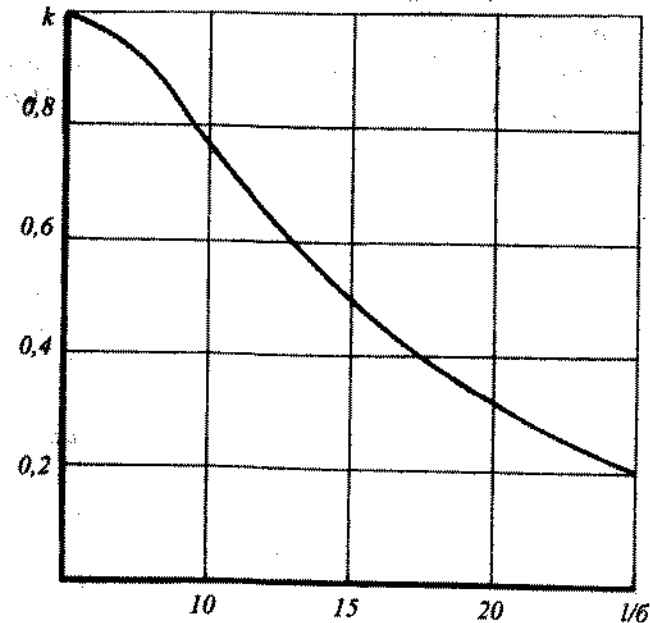


Рис. 5.3. Графік для визначення коефіцієнта  $k$  у рівнянні (5.12)

Нове відношення  $l/\delta = 12,5$ . При цьому значенні  $k = 0,65$ . Знову виявляється велика розбіжність. Приmemo значення  $k = 0,5$ . Нове значення  $\delta = 13$  мм. Перевірка значення  $k$  за графіком теж дає значення, близьке до 0,5.

## Список літератури до глави 5

1. Альперт Л.З. Основы проектирования химических установок: Учеб. пособие для техникумов. – Изд. 2-е, доп. и перераб. – М.: Высш. школа, 1976. – 272 с.
2. Лащинский А.А., Толчинский А.Р. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры: Справочник. – Л.: Машиностроение, 1970. – 752 с.
3. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию / Под ред. Ю.И. Дытнерского. – М.: Химия, 1983. – 272 с.
4. Криворот А.С. Конструкция и основы проектирования машин и аппаратов химической промышленности. – М.: Машиностроение, 1976. – 376 с.
5. Федосеев К.Г. Процессы и аппараты биотехнологии в химико-фармацевтической промышленности. – М.: Медицина, 1969. – 199 с.

## ГЛАВА 6

### ПЕРЕДФЕРМЕНТАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ

#### 6.1. Підготовка живильного середовища

Для того, щоб розпочати ферментацію, вихідну сировину зважують або відміряють об'ємним пристроєм, роблять певну суміш, за необхідності проводять оброблення цієї суміші з метою хімічних перетворень субстратних речовин. Наприкінці процесу приготування живильне середовище, як правило, стерилізують.

Кожний конкретний мікробіологічний процес має свої особливості на стадії приготування живильного субстрату. Насамперед це пов'язано з вибором вуглецевмісної речовини, яку застосовують у цьому процесі. У деяких випадках процеси підготовки живильного середовища є домінуючими у загальному процесі виробництва. Наприклад, у виробництві спирту з крохмалевмісних продуктів останні треба оцукрювати за допомогою природних амілолітичних ферментів солоду чи штучно одержаних бактеріальних або грибних амілолітичних препаратів. Отже, основне виробництво супроводжується доволі складним допоміжним. Те саме стосується і виробництва кормових дріжджів з рослинної сировини, яку потрібно гідролізувати і очистити від токсичного для дріжджів фурфурола та інших органічних речовин, що негативно впливають на вирощування дріжджів. Культивування кормових дріжджів на парафінах супроводжується виробництвом цих парафінів з газових фракцій методом утворення комплексів нормальних парафінів з сечовиною. За складністю і апаратуронасиченістю це виробництво значно випереджає основне виробництво культивування дріжджів. Приготування пивного суслу не менш важливий і відповідальний процес, ніж бродіння та доброджування пива. Значні труднощі викликає очищення меляси у виробництві хлібопекарських дріжджів.