

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ

УКРАИНСКАЯ АССОЦИАЦИЯ ПО АВТОМАТИЧЕСКОМУ УПРАВЛЕНИЮ

**АВТОМАТИКА
АВТОМАТИЗАЦИЯ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ
КОМПЛЕКСЫ И
СИСТЕМЫ**

№ 2(14) 2004

УДК 519.7

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПИВОВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА ЯК ОБ'ЄКТІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Місюра М.Д., Кишенько В.Д.

Технологія виробництва пива складається з багатостадійних неперервно-періодичних процесів різної природи (теплові, масообміну, гідромеханічні, біохімічні), які є складними з точки зору керування. Пивоварне виробництво складається з таких технологічних комплексів [1]:

- комплекс варильного відділення;
- комплекс бродильного відділення;
- відділення доброджування;
- відділення освітлення та розливу.

Згідно з системним підходом до аналізу складної системи [2], в якості якої розглядається пивоварне виробництво, на першому етапі якісного аналізу її структури необхідна розробка ієрархічної структури схеми, що відображає взаємозв'язок окремих рівнів в системі. Такий підхід дозволить виділити основні етапи дослідження технологічних процесів виробництва пива, встановити взаємодію між ними та органічно зв'язати теоретичні та експериментальні дані, що отримані при аналізі кожного рівня системи. Розбиття системи на ієрархічні рівні відповідає окремим блокам загальної математичної моделі. При цьому відбувається послідовна деталізація процесів та явищ від верхніх рівнів до нижчих та узагальнення інформації при русі до більш високих рівнів. Ієрархічна схема, що відповідає даним принципам, представлена на рис. 1.

Технологічні процеси виробництва пива є складними динамічними системами, ефективне керування якими можливе шляхом застосування їх математичних моделей, побудованих на основі теорій нерівноважної термодинаміки, синергетики, коливань та хвилових процесів [2].

Наведемо опис деяких основних технологічних процесів, які відбуваються при виробництві пива. Самий простий процес, якщо не враховувати дифузійні явища, це є процес затирання, який полягає в змішуванні зернопродуктів з водою під дією температури. Рівняння, що характеризує перехідний процес зміни температури в заторному котлі, має такий вигляд:

для заторної маси:

$$M \frac{d\Theta_3}{dt} = kF(\Theta_{\text{п}} - \Theta_3) - k_1 F_1 (\Theta_3 - \Theta_{\text{нав}}); \quad (1)$$

для парової камери:

$$c_{\text{пр}} \frac{d\Theta_{\text{п}}}{dt} + kF(\Theta_{\text{п}} - \Theta_3) = G_{\text{п}} (i - G_{\text{п}} \Theta_{\text{п}}) - k_2 F_2 (\Theta_{\text{п}} - \Theta_{\text{нав}}); \quad (2)$$

де M - загальна теплоємність котла, яка дорівнює сумі теплоємностей заторної маси і металу;

F - поверхня сферичної стінки камери, через яку здійснюється теплопередача від пари до заторної маси;

F_1 - площа дзеркала заторної маси в котлі;

F_2 - поверхня парової камери, через яку відбувається теплопередача в навколишнє середовище;

$\Theta_{\text{п}}$ - температура пари;

Θ_3 - температура заторної маси;

$\Theta_{\text{нав}}$ - температура навколишнього середовища;

k - коефіцієнт теплопередачі від пари до затору;
 k_1 - коефіцієнт теплопередачі з поверхні затору в навколишнє середовище;
 k_2 - коефіцієнт теплопередачі від пари в навколишнє середовище;
 $c_{пр}$ - сумарна теплоємність парового простору в паровій камері і металу;
 $G_{п}$ - витрата пари в парову камеру;
 i - ентальпія насиченої пари, що відповідає температурі $\Theta_{п}$ і тиску в паровій камері.

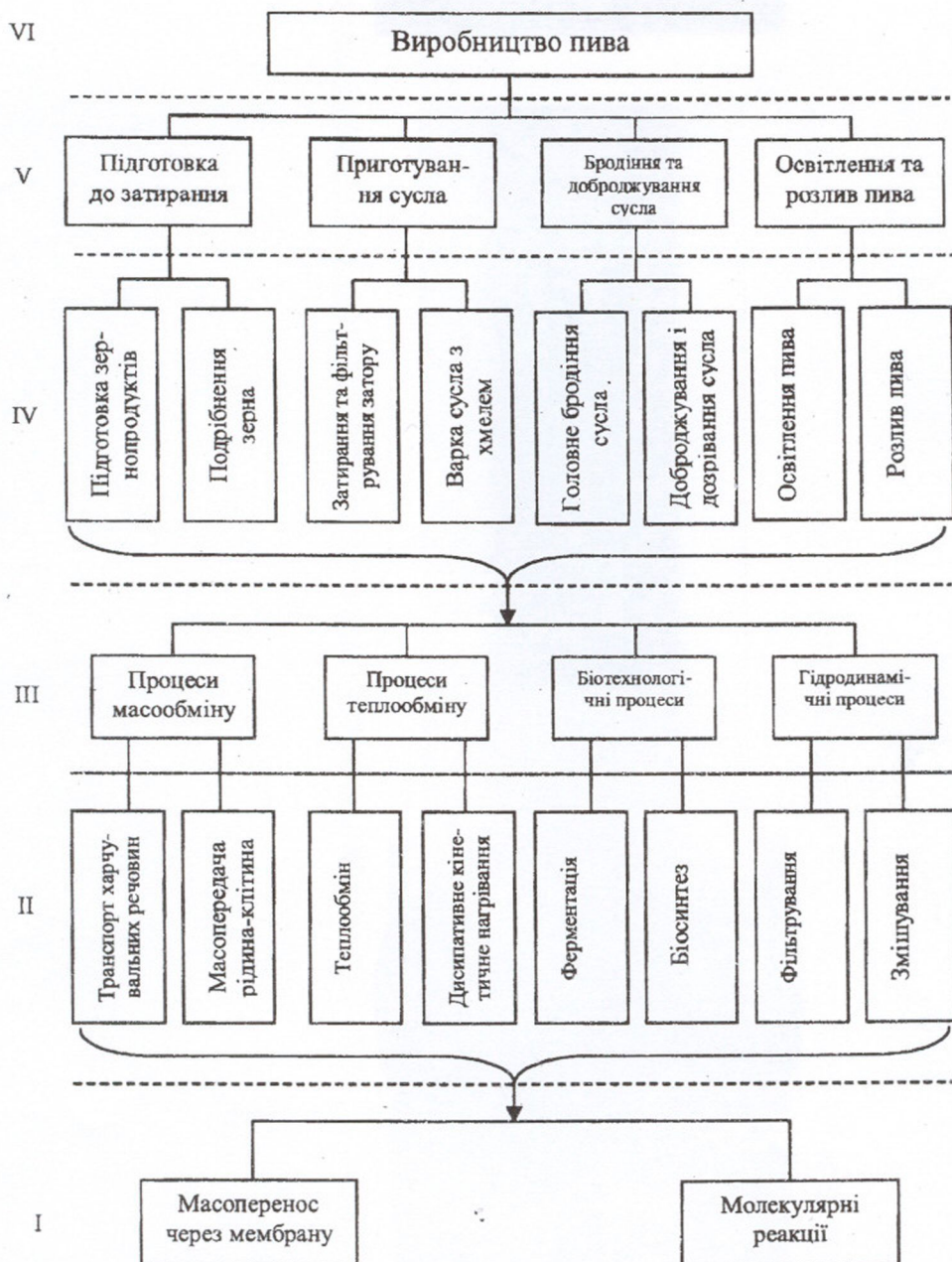


Рис. 1 Ієрархічна багаторівнева схема виробництва пива

Важливим у технології приготування пива є процес фільтрування сусла. Для цього розглянемо деякі особливості руху рідини через пористе середовище. У відповідності з механізмом видалення рідини з осаду процес фільтрування складається з трьох стадій. На першій стадії процесу відбувається витіснення фільтрату з пор осаду в поршневого ре-

жимої. Друга стадія, яка називається проміжною, характеризується одночасним виходом з осаду фільтрату та промивної рідини. Сумісний рух рідини в порах осаду підпорядковується складним гідродинамічним закономірностям та супроводжується поступовим перерозподілом вільного парового простору осаду між фільтратом та промивною рідиною. Коли частка простору, що займає промивна рідина, стане постійною величиною, настає дифузійна стадія вимивання домішок з фільтрату, що знаходяться у вигляді плівки на поверхні частинок та в глухих порах.

В даній роботі формулюється математична модель процесу фільтрування, яка враховує як особливості гідродинаміки течії рідини та фільтрату, так і процес дифузії домішок з фільтрату в рідину.

Представимо об'єм пор осаду V_0 у вигляді суми двох об'ємів $V_0 = V_1 + V_2$, де V_1 – об'єм водопровідних каналів та крупних пор, V_2 – об'єм тонких та глухих пор в міжагрегатному просторі і в самих агрегатних частинок. Весь процес промивки осаду представимо як процес конвективної дифузії. В подальшому припустимо, що осад має стійку структуру, однорідний по товщині та може характеризуватися деякою ефективною пористістю ϵ , яка постійна за час всього процесу.

Опис процесу витіснення фільтрату промивною водою записують рівнянням Колмогорова

$$D \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} - v \frac{\partial f}{\partial x} - \frac{\partial f}{\partial t} = 0; \quad (3)$$

де D – коефіцієнт, що характеризує ступінь розмивання границі розділу рідин по мірі її переміщення через шар осаду;
 $f = V_1/V_0$ – відносна частка перерізу осаду;
 x – просторова координата.

Одночасно з витісненням фільтрату в тих порах і каналах, які заповнені промивною рідиною, починається процес конвективної дифузії в повздовжньому напрямку сумісно з переносом домішок, що вимиваються з глухих в проточні пори.

Цей процес можливо описати рівнянням матеріального балансу у вигляді

$$-D_1 f \frac{\partial^2 c_1}{\partial x^2} + v \frac{\partial c_1}{\partial x} + f \frac{\partial c_1}{\partial t} = k(c_1 - c_2); \quad (4)$$

$$(1-f) \frac{\partial c_2}{\partial t} = k(c_2 - c_1); \quad (5)$$

де D_1 – коефіцієнт повздовжнього переміщення в об'ємі V_1 ; k – коефіцієнт переносу (обміну) між проточними та глухими порами осаду; c_1 – концентрація домішок в промивній воді в об'ємі V_1 ; c_2 – концентрація фільтрату в глухих порах.

Коефіцієнт D_1 відображається як ефект нерівномірності профілю швидкостей промивної води по перерізу осаду через випадкового характеру форми та положення каналів, так як вплив молекулярної дифузії в повздовжньому напрямку.

Для спрощення задачі аналіз будемо проводити на основі лінійної моделі фільтрування. Крім того припускаємо, що осад сформувався. На практиці формування осаду відбувається в період відстоювання оцукреного затору в фільтр-чані, а при фільтруванні пива маємо наливний фільтруючий шар з діатоміту.

У випадку використання моделі фільтрування для оптимізації розрахункова модель записується в такому вигляді [4]:

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = b \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}; \quad (6)$$

$$P(z;0) = P_1 \frac{z^2}{h^2}; \quad (7)$$

$$P(0; \tau) = 0, \quad (8)$$

де P – перепад тиску фільтрувальної перегородки;

$\bar{b}$ – параметричний коефіцієнт;

h – товщина шару осаду;

z – просторова координата.

Прийнято припущення, що в сформованому осаді в початковий момент параболічний закон зміни тиску в товщині осаду (7).

Опускаючи математичні перетворення, отримуємо математичний опис процесу фільтрування при постійному перепаді тиску:

$$P(z, \tau) = P_1 \frac{z}{h} - \frac{8P_1}{\pi^3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp\left(-\frac{\pi^2(n-1)}{h^2} \cdot \bar{b}\tau\right)}{(2n-1)} \cdot \sin \frac{\pi n}{h} z. \quad (9)$$

Найбільш складною стадією в пивоварному виробництві є процес бродіння. До теперішнього часу запропоновано багато моделей, які описують цей процес [3, 5-6]. До того ж вони мають певні особливості для кожного біотехнологічного процесу окремо і пивоварне виробництво не є виключенням. Складність процесу бродіння полягає не тільки в біохімічному механізмі його протікання, але й супутніх йому масообмінних процесах, що пов'язано із наявністю поверхні розділу твердої та рідкої фази.

Розроблена модель, що враховує зміну біомаси, цукру та етилового спирту

$$x_a + x_{B3} = \text{const} = 0.48x_0$$

$$\frac{dx_a}{dt} = 0.0589(0.48x_0 - x_a) \quad (10)$$

$$\frac{dx_{B3}}{dt} = -\dot{x}_a = -0.0589x_{B3}$$

$$\frac{dx_a}{dt} = \mu_x x_a - 0.0058x_a + \mu_L x_{B3} \quad (11)$$

$$\frac{dx_{oc}}{dt} = 0.1996x_m \quad \mu_x = \frac{0.0115s}{0.5s_0 + e} \quad (12)$$

$$\frac{ds}{dt} = \mu_s x_a \quad \frac{de}{dt} = \mu_a f x_a \quad (13)$$

$$f = 1 - \frac{e}{0.5s_0}; \quad \mu_s = \frac{0.4672s}{k_s + s}; \quad \mu_a = \frac{0.3004s}{3.2098 + s} \quad (14)$$

де x_0 – початкова концентрація біомаси;

x_{B3} – концентрація загальної зваженої біомаси;

x_a – концентрація загальної активної біомаси;

x_m – концентрація загальної мертвої біомаси;

x_{oc} – концентрація біомаси, що осіла;

s_0 – початкова концентрація цукру;

s – концентрація цукру;

e – концентрація етанолу;

Результат моделювання (10-14) наведений на рис.2 – рис.4.



Рис.2 Зміна концентрації біомаси

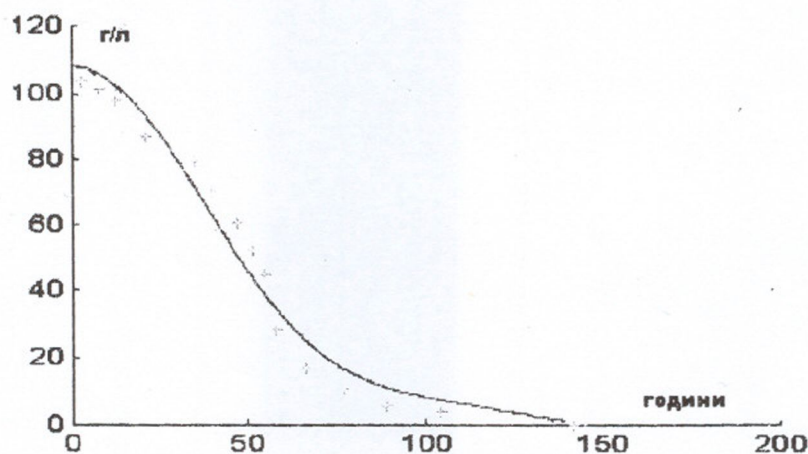


Рис. 3 Зміна концентрації цукру

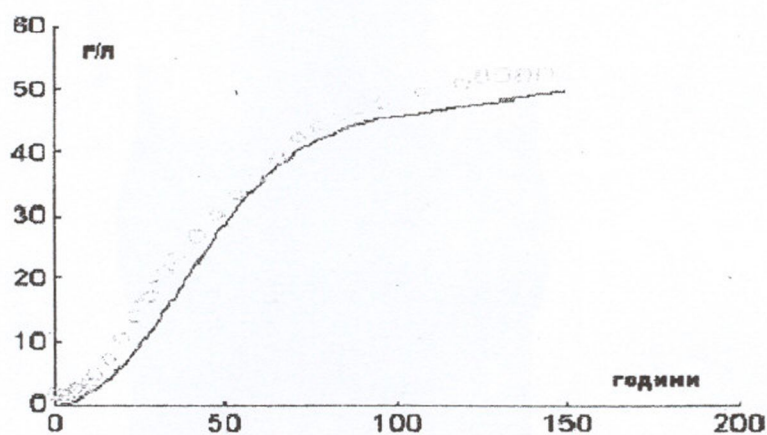


Рис. 4 Зміна концентрації етанолу

Таким чином, представлені математичні моделі дозволять дослідити технологічні процеси з використанням ентропійного та синергетичного підходів до оцінки стану складної системи, що дозволить виявити явища самоорганізації та утворення дисипативних структур, визначити аттрактори. Це відкриває широкі можливості в розв'язку задач прогнозування властивостей, явищ, процесів, оптимізації та управління в пивоварному ви-

робництві, знаходження нових ефективних технічних рішень в умовах, коли використання традиційних методів зустрічає деякі труднощі.

In article the structure of a technological complex of manufacture of beer is resulted and mathematical models of processed in the given technology are described. Possibility of their use is shown in problem of the automatisisation.

1. Домарецький В. А. Технологія солода та пива: Підручник для студентів вищих навчальних закладів освіти. – Київ: Урожай, 1999. – 544 с.: ил.
2. Кафаров В. В., Дорохов И. Н., Кольцова Э. М. Системный анализ процессов химической технологии: Энтропийный и вариационный методы неравновесной термодинамики в задачах химической технологии. М.: Наука, 1990. – 500 с.: ил.
3. Моделирование биохимических реакторов /В. В. Кафаров, А. Ю. Винаров, Л. С. Гордеев. – М.: Лесная промышленность, 1979. – 342 с.
4. Федоткин И. М., Гулый И. С. Математическое моделирование, теория технологических процессов и их интенсификации: Учебное пособие. – Киев: Арктур-А, 1998. – 416 с.
5. Моделирование и оптимизация микробиологических процессов спиртового производства /В.Л.Яровенко, Л.А.Ровинский. – М.: Пищ. пром-сть, 1978. – 247с.
6. Автоматизация биотехнологических процессов: Автоматический контроль, оптимизация и управление /Ю.-К. Ю. Станишкис, Д.Я. Левишаускас, Р.И. Симутис, У.Э. Виестур, М.Ж. Кристапсонс; Под. ред. У.Э. Виестура. Рига: Зинатне, 1992. – 348 с.