

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИ,  
МОЛОДІ ТА СПОРТУ

НАЦІОНАЛЬНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ  
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

# **ХАРЧОВА ПРОМИСЛОВІСТЬ**

НАУКОВИЙ  
ЖУРНАЛ

Заснований у 1965 р.

## **№ 11**

Київ НУХТ 2011

## **УДК 664(04)(082)**

Висвітлено результати науково-дослідних робіт з технології харчових продуктів, хімічних, біохімічних, мікробіологічних процесів, апаратів, обладнання, автоматизації харчових виробництв та економіки харчової промисловості.

Розрахований на наукових та інженерно-технічних працівників харчової промисловості.

### **Редакційна колегія:**

**А.І. Соколенко**, доктор технічних наук,  
професор — головний редактор;  
**В.М. Таран**, доктор технічних наук,  
професор — заступник головного редактора;  
**С.В. Токарчук**, кандидат технічних наук,  
відповідальний секретар;  
**Л.Ю. Арсеньєва**, доктор технічних наук, професор;  
**О.Ф. Буляндра**, доктор технічних наук, професор;  
**А.О. Заїнчковський**, доктор економічних наук, професор;  
**А.П. Ладанюк**, доктор технічних наук, професор;  
**Л.В. Левандовський**, доктор технічних наук, професор;  
**В.М. Логвін**, доктор технічних наук, доцент;  
**В.М. Марченко**, кандидат технічних наук, доцент;  
**Т.Л. Мостенська**, доктор економічних наук, професор;  
**В.І. Оболкіна**, доктор технічних наук, старший науковий співробітник;  
**В.А. Піддубний**, доктор технічних наук, професор;  
**Т.П. Пирог**, доктор біологічних наук, професор;  
**І.О. Сінгаєвський**, доктор економічних наук, професор;  
**М.П. Сичевський**, доктор економічних наук, доцент;  
**О.П. Сологуб**, доктор економічних наук, професор;  
**О.Ю. Шевченко**, доктор технічних наук, професор;  
**Є.В. Штефан**, кандидат технічних наук, доцент.

### **Видання подається в авторській редакції**

Схвалено вченою радою НУХТ, протокол № 10 від 25.03.10 р.

Адреса редакції: 01601 Київ-33, вул. Володимирська, 68  
Тел.: (044) 289-19-04, 287-96-95

---

## **ЗМІСТ**

### **Процеси та обладнання**

<b>Максименко І.Ф., Бойко О.О., Осауленко Ю.В.</b> Теплові потоки варочного відділення пивзаводів .....	6
<b>Халайджі В.В., Гавва О.М., Токарчук С.В.</b> Врахування структурно-механічних характеристик пакувальних одиниць при дії на них робочих органів машин групового пакування .....	10
<b>Бойко О.О., Бевз В.В.</b> Особливості технологічних процесів виробництва пива та етилового спирту .....	19
<b>Пушанко М.М., Парахоня А.М.</b> Проблеми екстрагування цукрози в колонних дифузійних установках .....	23
<b>Піддубний В.А., Леус Р.М., Федоренко Л.А.</b> Динаміка процесів вибігу і гальмування в технологічних машинах .....	28
<b>Якимчук М.В.</b> Дослідження зусиль утримання упаковок вакуумними захоплюючими пристроями .....	33
<b>Піддубний В.А., Криворотько В.М., Йовбак В.Д.</b> Вакуумне охолодження рідин і рідиновмістких середовищ .....	39
<b>Якимчук М.В., Гавва О.М., Самойлик А.Є.</b> Дослідження витрат повітря через пористі пакувальні матеріали .....	42
<b>Шевченко О.Ю., Бондар О.А., Шевченко Л.Ю.</b> Аераційні системи пристроїв для аеробного очищення стоків підприємств харчової промисловості .....	46

---

<b>Білецький Е.В., Толчинський Ю.А.</b> Поздовжньо-поперечна течія неньютонівської рідини з в'язкістю, що залежить від швидкості зрушення у щілинному каналі шнекової машини .....	51
<b>Соколенко А.І., Васильківський К.В., Леус Р.М.</b> Оптимізація процесів вибігу і гальмування в двомасових системах .....	60
<b>Метльов С.Г., Овчарук В.О., Вересоцький Ю.І., Бабко Є.М., Ющук І.В.</b> Апаратурно-технологічні схеми виробництва пектиновмісних порошків .....	67
<b>Костюк Є.В., Костюк В.С.</b> Визначення вхідних параметрів системи для реалізації синусоїдального закону зміни прискорення веденої маси .....	72
<b>Якобчук Р.Л., Яровий В.Л.</b> Визначення впливу температури теплоносія на кінцеву вологість пивних дріжджів при сушінні в шарі інертного матеріалу .....	80
<b>Змієвський Ю.Г., Мирончук В.Г., Кучерук Д.Д.</b> Дослідження процесу контактної мембранної дистиляції в процесі виробництва лактози .....	84
<b>Деренівська А.В., Кривопляс-Володіна Л.О., Любімов В.М.</b> Дослідження операції переміщення сформованих картонних пачок з плоскоскладених заготовок карманными носіями в роторних машинах .....	90
<b>Осьмак О.О., Серьогін О.О.</b> Системний підхід до вирішення проблеми газифікації рослинної біомаси .....	95
<b>Шевченко О.Ю., Миколів І.М., Романюк А.М., Шевченко А.О.</b> Енергетичні ресурси матеріальних потоків в харчових технологіях .....	101
<b>Лензіон С.В.</b> Синтез змішувача рідинних та газорідинних потоків для використання у харчових виробництвах і аналіз гідродинамічних параметрів потоку .....	105
<b>Полумбрик М.О.</b> Нанотехнології в харчових продуктах .....	111
<b>Гончаренко Б.М., Лобок О.П.</b> Аналітичне конструювання дискретної системи керування аперіодичним об'єктом з запізнюванням .....	115
<b>Вергелес Г.В. Шиян П.Л., Мудрак Т.О., Фіщенко А.М., Кириленко Р.Г.</b> Вплив температури і рН на гідроліз біополімерів зернових замісів при використанні кислотостійких ферментних препаратів селективної дії .....	119

---

**Економіка**

**М'якшило О.М., Харкянен О.В.** Планування собівартості  
продукції харчового підприємства на основі аналітичних  
моделей OLAP-кубів ..... 124

**Білошицька Г.М., Канінський П.К.** Якість сировини та її роль  
у підвищенні конкурентноспроможності продукції ..... 130

**І.Ф. МАКСИМЕНКО,  
О.О. БОЙКО,  
Ю.В. ОСАУЛЕНКО**

*Національний університет харчових технологій*

## **ТЕПЛОВІ ПОТОКИ ВАРОЧНОГО ВІДДІЛЕННЯ ПИВЗАВОДІВ**

---

Проведено аналіз енергетичних перетворень при варінні та охолодженні пивного сусла. Розраховано виділення енергії при випарюванні та охолодженні сусла, затрати енергії на сушку пивної дробини. Обґрунтовано можливість сушіння пивної дробини з використанням енергії, що відводиться при охолодженні дробини. Розроблено схему теплотехнічного забезпечення для забезпечення цього процесу.

**Ключові слова:** пивна дробина, сусло, енергія, сушіння, охолодження.

Проведен анализ энергетических преобразований при варке и охлаждении пивного сусла. Рассчитано выделение энергии при выпаривании и охлаждении сусла, затраты энергии на сушку пивной дробины. Обосновано возможность сушки пивной дробины с использованием энергии, отводящейся при охлаждении сусла. Разработана схема теплотехнического обеспечения этого процесса.

**Ключевые слова:** пивная дробина, сусло, энергия, сушка, охлаждение.

The analysis of power transformations is conducted at cooking and cooling of beer sucla. A selection energy is expected at evaporation and cooling of sucla, expense of energy on drying of beer pellet. Grounded possibility of drying of beer pellet from the use of energy which is selected at cooling of pellet. The chart of the heating engineering providing is developed for providing of this process.

**Key words:** beer pellet, sucla, energy, drying, cooling.

Варочне відділення пивзаводів характеризується як найпотужніший споживач теплової енергії. Носієм теплового потоку при цьому виступає водяна пара, яка використовується для нагрівання замісу, приготування затору та варіння сусла.

Виробничниками і науковцями розроблено кілька схем, щодо використання енергії вторинної пари, що утворюється при варінні сусла [1—3], у формі замкнутої системи, у який за рахунок механічної або термокомпресії відбувається підвищення температури вторинної пари і повернення її в систему нагрівання сусловарильного апарата. У схемі з відкритою системою тепла енергія конденсації вторинної пари передається проміжному теплоносію (частіше воді), який використовується на потреби виробництва.

Метою цього дослідження є аналіз енергетичних балансів для можливості використання вторинних енергетичних ресурсів (у тому числі і теплової енергії сусла) для потреб сушіння пивної дробини. Останнє набуло актуальності у зв'язку зі зменшенням використання вологості дробини на потреби відгодівлі худоби. Сушіння дробини, як процес, переводить її у продукцію з предовженим терміном використання, а досягнення вологості 12—13 % за рахунок вторинних енергетичних ресурсів є економічно привабливим. Отже у зв'язку з відміченим зробимо оцінку потенціалу вторинних енергетичних ресурсів для підведення енергетичного балансу.

Розрахунки виконаємо у питомому обчисленні на 100 кг помелу. Відомо, що з вказаної кількості подрібненого солоду одержують 5,88 гл пива, при кількості сухих речовин в початковому суслі 12 %, і з деякими наближенням останній показник перенесемо на об'єм

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

сусла. За нормативного показника кількості випару приблизно 10 % числове значення останнього складе:

$$m_b = 588 \cdot 0,1 = 58,8 \text{ кг} . \quad (1)$$

Енергетичні витрати у зв'язку з останнім дорівнюватимуть:

$$Q_{\text{вип}} = m_b r = 58,8 \cdot 2262,6 = 133041 \text{ кДж} , \quad (2)$$

де  $r$  — теплота пароутворення середовища.

Теплова енергія звареного сусла, що може бути повернута за охолодження його до  $t_k = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ , визначається залежністю:

$$Q_{\text{сус}} = m_b c (t_n - t_k) = (588 - 58,8) \cdot 4,19 \cdot 90 = 199560 \text{ кДж} , \quad (3)$$

де  $t_{(n)} \approx 100 \text{ }^\circ\text{C}$  — початкова температура сусла.

Таким чином, загальний потенціал вторинних теплових ресурсів складе:

$$Q_{\text{зар}} = Q_{\text{вип}} + Q_{\text{сус}} = 133041 + 199560 = 332600 \text{ кДж} . \quad (4)$$

Зі 100 кг помелу одержується 130 кг дробини з вологістю 70—80 %. Якщо прийняти кінцеву вологість  $W_{(к)} = 14 \text{ }%$ , то зміна вологості становитиме:

$$\Delta W = 80 - 14 = 66 \text{ }% . \quad (5)$$

Тоді кількість випареної вологи складе:

$$W = 130 \Delta W = 130 \cdot 0,66 = 85,8 \text{ кг} . \quad (6)$$

З енергетичним еквівалентом по дробині:

$$E = W r = 85,8 \cdot 2262,6 = 194131 \text{ кДж} . \quad (7)$$

Порівнюючи останній результат з величиною теплового потенціалу сусла, бачимо, що:

$$Q_{\text{сусл}} \approx E . \quad (8)$$

Це означає, що теплової енергії сусла, яка у більшості випадків скидається у доквілля при охолодженні водою або при використанні холодильних установок, практично достатньо для здійснення сушіння дробини.

Зважаючи на вказану енергетичну доцільність, наступним етапом має бути розробка пропозиції щодо апаратного оформлення такого процесу.

Відпрацьованою схемою при цьому має бути сучасне вирішення виробничої ділянки, на якій передавання дробини у збірники здійснюється гідротранспортером з додаванням води, яка ніяким чином не підвищує енергетичної цінності продукту. Транспортування шнековими конвеєрами супроводжується частковим стіканням рідинної фракції з втратою частини сухих речовин, як і механічне підпресовування.

Разом з тим фільтраційний апарат за своїми конструктивними особливостями цілком міг би виконувати функції сушильної камери. Адже дробина розташована на перфорованих ситах і подавання сушильного агента (повітря) у підситовий простір буде завершуватися рівномірним його розподіленням по всій площині сит. По завершенню сушіння пристрій для видалення дробини здійснює її подавання до розвантажувального люка.

За використання запропонованої схеми практично виключаються втрати сухих речовин з рідинною фракцією, оскільки відокремлення її в гравітаційному полі завершується в режимі фільтрації промивних вод.

Оскільки промивається дробина гарячою водою, то це обумовлює наявність енергетичного потенціалу, який також використовується на процес сушіння. Величина потенціалу визначається залежністю:

$$Q_{\text{сусл}} = 104 c_w \Delta t + 26 c_{c.p.} \Delta t , \quad (9)$$

де  $c_w$  і  $c_{c.p.}$  — відповідно теплоємкості рідинної фракції і сухих речовин;  $\Delta t$  — перепад температур, що відповідають початку і завершенню процесу.

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

Повітря в ролі сушильного агента характеризується такими параметрами, як температура, відносна та абсолютна вологість. Ці параметри можуть бути визначені за діаграмою I-d (рис. 1).

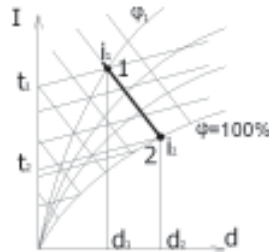


Рис. 1. Діаграма, що відображає процес сушіння дробини

Сушіння є ізоентальпійним процесом, який відображується відрізком 1—2. Тоді кількість води, що відбирається 1 кг повітря становить різницю  $d_2 - d_1$ , а теоретична масова кількість повітря, необхідна для видалення вологої фракції дробини:

$$M_{\text{пов}} = \frac{W}{d_2 - d_1} \quad (10)$$

Очевидно, що осушувальна здатність повітря залежить від його початкових параметрів і збільшення початкової температури за інших рівних умов приводить до збільшення такої здатності. З цієї точки зору бажано мати регульовані діапазони температур, досягнення яких можливе за рахунок співвідношень потоків повітря і суслу. У зв'язку з вимогами технології швидкість охолодження суслу бажано витримувати на заданому рівні, а тому схему доцільно устаткувати проміжними буферними ємкостями для проміжного теплоносія.

На рис. 2 наведено схему, яка дозволяє енергетичний потенціал суслу передати проміжному теплоносію, що збирається у правій буферній ємкості 3. Пропускання теплоносія через калорифер 5 дозволяє передати тепловий потенціал сушильному агенту. Відпрацьований проміжний теплоносій збирається у лівій ємкості 3 і зберігається до наступного циклу. Наявність двох буферних ємкостей дозволяє забезпечити корегування процесу сушіння в часі і не обмежувати технологічні значення швидкості охолодження суслу. Зазначена схема дозволяє накопичувати проміжний теплоносій з температурою 90—95 °С, а температура повітряного потоку може складати 80—85 °С.

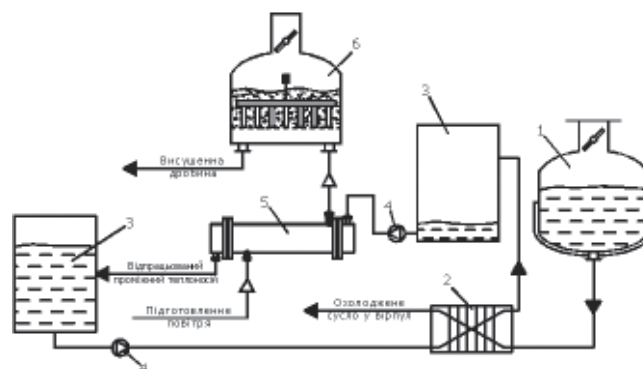


Рис. 2. Схема теплотехнічного забезпечення сушіння дробини  
1 — сушварильний апарат, 2 — пластинчастий теплообмінний апарат, 3 — збірники проміжного теплоносія, 4 — насоси, 5 — калорифер, 6 — фільтраційний апарат



## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

Якщо проміжним теплоносієм обрано воду, то це означає, що її теплоємність і теплоємність сусла близькі за значеннями. Звідси витікає, що об'єми буферних ємкостей проміжного теплоносія мають бути близькими до об'єму сусла.

До числа нетрадиційних ідей, що знайшли реалізацію в цій схемі, слід віднести швидке охолодження сусла, що має здійснюватися в режимі протитоку з проміжним теплоносієм. Завдяки такому режиму, по-перше, досягається передавання запланованого теплового потенціалу і, по-друге, створюється замкнута система використання води, як проміжного теплоносія.

Між тим відомо, що в сучасних схемах охолодження сусла процес супроводжується витратами практично п'ятикратного по відношенню до сусла об'єму води, або комбінацією використання охолоджувальної води з холодильних установок. В запропонованій схемі матеріальні втрати води відсутні окрім разового заповнення замкнутої системи. Також досягається головна мета — одержання сухої дробини.

Окрім названих позитивних наслідків можна очікувати на позитивні ефекти і в процесах освітлення сусла. Як відомо, виконання цієї операції здійснюється у вірпулах за рахунок утворення і осідання в гравітаційному полі білкових зависей. При цьому очевидно, що утворення зависей залежить від температури середовища, і зниження цього показника збільшує швидкість утворення осадів. Разом з тим розташування поверхонь охолодження безпосередньо в середовищі означає наявність локальних об'ємів з різними температурами, а рівно і наявність конвективного перемішування за рахунок опускних і висхідних контурів. Очевидно, що це дестабілізує сидементаційний процес. У зв'язку з цим приходимо до висновку про перспективність активного попереднього охолодження сусла до номінальної температури.

Таким чином, на основі запропонованої системи досягається високий рівень використання енергетичного потенціалу системи і обмежується екологічний вплив на довкілля хоча б у явному вигляді. Останнє зауваження пов'язане з тим, що дещо замаскований вплив все ж має місце викидами відпрацьованого сушильного агенту.

Нагадаємо, що ізоентальпійний процес сушіння супроводжується матеріальним потоком випареної вологи, яка несе в собі енергетичний потенціал пароутворення. Феноменологічні міркування вказують на те, що і у цьому випадку можливим є створення локального контуру енергокористування на основі відновлення осушувальної здатності повітря, однак подальші розробки такого напрямку лежать за межами наукових інтересів цієї статті.

**Висновки.** Виконані теоретичні дослідження і узагальнення дозволяють відмітити наступне:

1. Підрахунки теплових і матеріальних балансів вказують на те, що тепловий потенціал охолоджуваного сусла еквівалентний потенціалу випаровування вологої фракції пивної дробини;
2. Фільтраційний апарат може виконувати функції сушильної камери за рахунок підведення в його підситовий простір сушильного агенту і продування його через шар дробини;
3. Маневрування параметрами сушіння дробини можливе за рахунок встановлення двох буферних ємкостей проміжного теплоносія, завдяки чому досягається створення замкнутої системи проміжного теплоносія і виключаються втрати води на охолодження сусла.
4. Швидкоплинне охолодження сусла в потоці і в режимі протитоку з проміжним теплоносієм дозволяє на 90—95 % використати тепловий потенціал сусла;
5. Подавання у вірпул охолодженого сусла підвищує швидкість утворення білкових зависей і швидкість освітлення сусла;
6. Сушіння дробини безпосередньо у фільтраційному чані забезпечує мінімальні втрати живильних речовин, однак запропонована теплотехнічна схема цілком придатна до використання з різними типами сушарок, в яких повітряні потоки виконують роль сушильного агенту.

## ЛІТЕРАТУРА

1. *Кунце В.* Технология солода и пива / Кунце В. — С.-Петербург: Професия, 2001. — 912 с.
2. *Бурдо О. Г.* Эволюция сушильных установок / Бурдо О. Г. — Одесса: Полиграф, 2010. — 368 с.
3. *Снежкин Ю. Ф.* Энергосберегающие теплотехнологии производ-ства пищевых порошков из вторичных сырьевых ресурсов / Снежкин Ю. Ф., Буряк Л. А., Ховин А. А. — К.: Наукова думка, 2004. — 228 с.

*Одержано редколегією 10.12.2010 р.*

ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

УДК 621.798

**В.В. ХАЛАЙДЖІ**

*ІАЦ "Упаковка"*

**О.М. ГАВВА**, д-р техн. наук,

**С.В. ТОКАРЧУК**, канд. техн. наук

*Національний університет харчових технологій*

## **ВРАХУВАННЯ СТРУКТУРНО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАКУВАЛЬНИХ ОДИНИЦЬ ПРИ ДІЇ НА НИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ МАШИН ГРУПОВОГО ПАКУВАННЯ**

---

Виконано аналіз видів силової дії на пакувальну одиницю з боку робочих органів машин групового пакування. Розроблені математичні моделі переміщення пакувальних одиниць із врахуванням їх структурно-механічних характеристик. Наведено методику визначення реологічних параметрів пакувальних одиниць.

**Ключові слова:** пакувальна одиниця, групове пакування, лінія групового пакування, структурно-механічні характеристики пакувальних одиниць, математичні моделі.

Выполнен анализ видов силового действия на упакованную единицу со стороны рабочих органов машин группового упаковывания. Разработаны математические модели перемещения упаковочных единиц с учетом их структурно-механических характеристик. Приведено методику определения реологических параметров упаковочных единиц.

**Ключевые слова:** упаковочная единица, групповое упаковывание, линия группового упаковывания, структурно-механические характеристики упаковочных единиц, математические модели.

Was executed the analysis of types of the power operating on the cased unit from the side of workings organs of machines for the group packing. The mathematical models of moving of packing units are developed taking into account their structurally-mechanical descriptions. Was considered the method of decision of rheological parameters of packing units.

**Keywords:** packing unit, group packeting, line of the group packeting, structurally-mechanical properties of packing units, mathematical models

Технологічна схема, вид і тип робочих органів машин групового пакування багато в чому залежать від структурно-механічних характеристик пакувальних одиниць. Споживчі упаковки із продукцією, залежно від деформаційних характеристик, умовно поділяють на жорсткі, напівжорсткі та м'які. Деформаційні характеристики пакувальних одиниць залежать від виду пакувального матеріалу, конструкції упаковки та виду продукції (рідка, сипка, в'язка, штучна), що розміщена в упаковці.

Під час переробки споживчих упаковок в лініях групового пакування упаковки, здебільшого, знаходяться на несучих площинах, які і визначають їх положення в просторі. За положеннями в просторі можна виділити горизонтальні і похилі несучі площини, а за кінематичними властивостями — рухомі, нерухомі або такі що мають циклічний характер руху. В деяких

© В.В. Халайджи, О.М. Гавва, С.В. Токарчук, 2011

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

машинах розташування несучих площин або їх кінематичні властивості можуть змінюватися в різних комбінаціях, що викликає відповідну зміну положення упаковок. Здебільшого до всіх несучих площин пред'являють такі основні вимоги: достатня міцність для сприйняття типу упаковки; забезпечення надійного контакту із упаковкою; стійкість до зношування і за потреби мінімальний опір переміщенню упаковки.

Якщо упаковка розташована нерухомо відносно несучої площини, то її силова взаємодія з несучою площиною має характер контактного тиску, розподіленого по опорній поверхні. При переміщенні упаковки по несучій площині до контактного тиску добавляються сили фрикційної взаємодії між опорною поверхнею упаковки і несучою площиною. Під час змінних режимів руху до перерахованої силової дії на упаковку добавляються сили інерції.

Операції перебудови руху упаковок із ряду в ряд, орієнтування, перевантаження, укладання упаковок в транспортну тару здійснюються за допомогою різних за конструктивним виконанням активних і пасивних робочих органів. До найбільш поширених активних робочих органів можна віднести зіштовхувачі; приводні ступки, відсікачі, піднімально-опускні платформи (столи), поворотні касети і платформи.

До пасивних робочих органів здебільшого відносять різного типу напрямні, обмежувальні стінки тощо.

Досить часто під час переміщення упаковок в лініях групового пакування, на них діють одночасно активні і пасивні робочі органи.

Переміщення упаковок досить часто супроводжується ударною взаємодією з конструктивними елементами машин групового пакування.

Врахування всіх перерахованих видів силової взаємодії упаковки з робочими органами дає можливість здійснювати керування процесами переміщення упаковки в лініях групового пакування. поряд із цим силова взаємодія є основною причиною появи небажаних пружних або в'язко-пластичних деформацій упаковки. Таким чином, взаємодія упаковок із конструктивними елементами машин групового пакування, повинна забезпечувати найкращий ефект керування рухом упаковки при одночасному зменшенні до мінімуму небезпеки її пошкодження і деформування.

Сьогодні характерні види взаємодії упаковки із конструктивними елементами машини достатньо повно оцінюються: контактним тиском<sup>4</sup> силами і моментами сил тертя ковзання; силами тертя кочення по роликовій поверхні; критеріями стійкості упаковок на несучих площинах; параметрами ударної дії на упаковки [1].

Тобто під час математичного моделювання переміщення по несучим поверхням структурних елементів групової упаковки — незалежно від того, з яких упаковок вони сформовані (жорсткі, напівжорсткі або м'які), — здебільшого приймають припущення, що упаковки є абсолютно твердими тілами. Таке припущення, особливо для м'яких упаковок з рідкою або сипкою продукцією, призводить до суттєвих похибок під час визначення часових, кінематичних та силових параметрів.

При проектуванні високопродуктивних пакувальних машин неточності тривалості виконань операцій, позиціонування упаковок призводять до зменшення фактичної продуктивності машини і якості виконання операцій.

А тому метою наведених досліджень є встановлення впливу структурно-механічних характеристик пакувальних одиниць на часові, кінематичні і силові параметри операцій переміщення структурних елементів групової упаковки.

У ході попередньо проведених досліджень встановлено, що напівжорсткі і м'які упаковки із сипкою або рідкою продукцією можна представити у вигляді пружного, пружно-пластичного і пластичного тіла [2].

Урахування структурно-механічних характеристик пакувальних одиниць дасть можливість з достатньо високою точністю прогнозувати позиціонування упаковок, а також тривалість виконання операції. Для високопродуктивних машин групового пакування, поряд з обмеженням навантаження на упаковки, позиціонування щодо робочих органів та тривалість виконання операцій є найважливішими параметрами.

Розрахунково-графічні моделі, за умови врахування пружно-пластичних характеристик, будуть мати дещо інший вигляд (порівняно з абсолютно жорстким тілом). У першому наближенні це двомасова

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

дискретна система [3]. Веденою масою здебільшого вважають масу вантажу, що переміщається, а ведучою — приведено масу рухомих елементів приводу і штовхача (рис.1). Зважаючи на суттєву різницю в значеннях жорсткості пружних елементів приводу і упаковки, можна припустити, що ведуча і ведена маса системи під час їхнього спільного руху з'єднані пружними зв'язками та демпфером, які характеризують структурно-механічні характеристики пакувальних одиниць.

Відомо, що пружна сила визначається добутком деформації  $x_1 - x_2$  та коефіцієнта  $c_{12}$  жорсткості. Для багатьох пакувальних матеріалів, а тим більше для відповідної конструкції споживчої упаковки із продукцією значення  $c_{12}$  можна визначити тільки експериментально. Як зазначає автор наукової праці [4], значення модуля пружності  $E$ , від якого функціонально залежить  $c_{12}$ , можна визначити в досить наближеному варіанті. У пружних ланках унаслідок переміщення сипкої, рідкої, в'язкої продукції разом з матеріалом упаковки виникають опори  $b_{12}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)$ , пропорційні відносній швидкості. У випадку застосування м'якої упаковки, у яку паковано сипку, рідку, в'язку продукцію, пластичну деформацію упаковки доречно представляти через тіло Сен-Венана (сухе тертя)  $z_0$ , яке пропорційне межі плинності  $G_T$  споживчої упаковки.

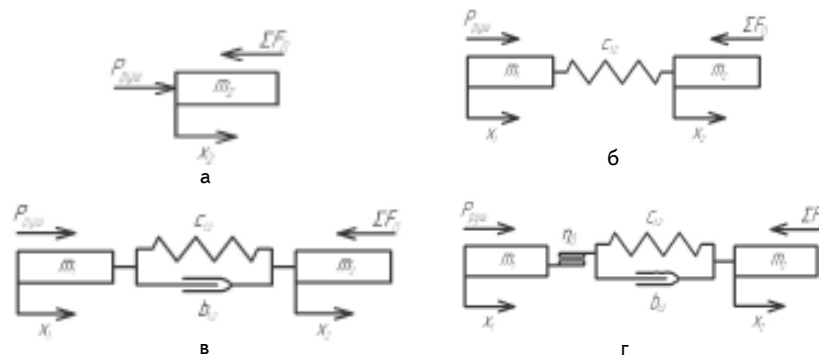


Рис.1. Розрахунково-графічні схеми механізму зштовхування споживчих упаковок з урахуванням їхніх структурно-механічних характеристик: абсолютно жорстке тіло (а), пружне тіло (б), пружно-пластичне тіло (в), пластичне тіло (г)

Для знаходження реологічних коефіцієнтів  $c_{12}$  та  $b_{12}$  можна, з відповідним наближенням, використовувати експериментальні дані ущільнення пакувальної одиниці.

Дослідження ущільнення пакувальної одиниці можна характеризувати як одностороннє деформування в'язкопружної дисперсної системи. Методика визначення реологічних коефіцієнтів  $c_{12}$  та  $b_{12}$  для в'язкопружної дисперсної системи наведена у праці [5]. Відповідно до даної методики за реологічну модель в'язкопружних дисперсних систем прийнято тіло Кельвіна-Фойгта, деформування якого описується рівнянням:

$$\tau = c \times x + b \frac{dx}{dt}, \quad (1)$$

де  $\tau$  — напруга деформування системи, Па;  $x$  — відносна деформація,  $x = \Delta a/a$ ;  $a$  — початкова довжина пакувальної одиниці;  $\Delta a$  — величина деформування упаковки під час прикладання до неї навантаження.

Прийнявши початкові умови:  $t=0$ ,  $x(t)=0$  розв'язок рівняння (1) буде мати вигляд:

$$x(t) = \frac{\tau}{c} \left( 1 - e^{-\frac{c}{b} \times t} \right). \quad (2)$$

Під час проведення експериментальних досліджень визначають тривалість  $t$ , величину відносної деформації  $x(t)$  пакувальної одиниці. В зв'язку із тим, що швидкість стискання зменшується, то відносна деформація  $x$  асимптотично наближається до значення  $\tau/c$  за деякий проміжок часу. Через те що дослідження проводяться при заданому значенні  $\tau$  то  $c = \frac{\tau}{x(t)}$ . Підставивши вихідні дані і значення  $c$  в рівняння (2) можна визначити величину  $b$ .

Переміщення ведучої маси здійснюється під дією рушійної сили  $P_{руш}$ , що створює привод. Опором переміщенню упаковок є сукупність сил тертя  $\sum F_0$  опорної поверхні упаковки по несучим поверхням робочих органів пристрою переміщення. Сили тертя  $\sum F_0$  також залежать від багатьох факторів: стабільності значень коефіцієнтів тертя; відносної швидкості переміщення опорної поверхні упаковки по несучим площинам робочих поверхонь пристрою; центрування упаковки щодо поверхонь контакту з робочими органами.

Для встановлення впливу структурно-механічних характеристик пакувальних одиниць на параметри операцій переміщення спочатку розглянемо дещо спрощені моделі. Для цього припустимо:

рушійна сила  $P_{руш}$  є величиною сталою і достатньою для переміщення упаковок; переміщення упаковок здійснюється по одній нерухомій площині і сила тертя  $\sum F_0$  дорівнює  $m \cdot g \cdot f_0$  ( $m$  — маса структурного елемента групової упаковки;  $f_0$  — коефіцієнт тертя опорної поверхні упаковки по несучій площині;

коефіцієнти жорсткості  $c_{12}$  і демпфірування  $b_{12}$  — величини сталі;

для двомасових моделей рух першої маси  $m_1$  забезпечується приводом із сталою швидкістю  $\dot{x}_1 = V_0$ , тоді  $x_1 = V_0 \cdot t$ ;

переміщення упаковок зіштовхувачем здійснюється на відстань  $l$ ;

на початку переміщення зазор між зіштовхувачем і упаковками відсутній.

Переміщення упаковок зіштовхувачем по нерухомій площині наведено сукупністю двох характерних етапів:

переміщення упаковок зіштовхувачем на відстань  $l$ ;

переміщення упаковок по нерухомій площині під дією залишкової кінетичної енергії.

Рух упаковок на відповідних етапах описується наведеними в табл. 1 рівняннями.

Відповідно до наведених рівнянь, точність позиціонування визначається переміщенням упаковок на II етапі, тому що I етап характеризується точністю позиціонування зіштовхувача і в цій задачі прийнято його перестань  $l$ .

Складові рівнянь, що характеризують деформаційні властивості упаковок на II етапі їхнього руху, сприяють збільшенню шляху руху до зупинки упаковки. Однак такий висновок неоднозначний, тому що параметри  $c_{12}$ ,  $b_{12}$  можуть збільшувати або зменшувати значення  $\dot{x}_2$  в момент, коли упаковка переміститься на відстань  $l$ .

Для визначення точного значення переміщення упаковки зіштовхувачем потрібно виконати розрахунки наведених рівнянь за реальних значень  $c_{12}$  та  $b_{12}$ . Тривалість технологічного процесу  $T_m$  також залежить від значень  $c_{12}$  та  $b_{12}$ .

Значно складніші рівняння для аналізу у випадку, коли сила опору залежить від позиціонування упаковки на несучих поверхнях подавального і магістрального конвеєрів, а також від відносної швидкості проковзування опорної поверхні упаковки по несучим поверхням конвеєрів.

Типовим прикладом такої ситуації може бути переміщення упаковок з подавального на магістральний конвеєр, несучі поверхні яких рухаються сумісно і паралельно [6]. Рівняння, що описують рух упаковок у таких переважувальних пристроях з урахуванням структурно-механічних характеристик упаковки, наведені в табл. 2.

У рівняннях прийнято позначення:  $V_p$ ,  $V_2$  — швидкість переміщення несучої поверхні щодо подавального та магістрального конвеєрів;  $f_p$ ,  $f_2$  — коефіцієнти тертя ковзання опорної поверхні упаковки по напрямним площинам щодо подавального та магістрального конвеєрів;  $V_0$  — швидкість переміщення робочого органа зіштовхувального пристрою.

Одержані рівняння є нелінійними диференціальними, розв'язати які можна лише числовими методами. Для встановлення впливу в кількісному і якісному значенні структурно-механічних характеристик упаковок на параметри операцій їхнього переміщення потрібно виконати машинний багатфакторний експеримент.

Одержані таким чином рівняння регресії дадуть змогу встановити шляхи забезпечення необхідної точності позиціонування та зменшення тривалості технологічного процесу.

Таблиця 1. Рівняння, що описують рух упаковок по нерухомій площині

Вид деформованого тіла	II етап	
	I підетап	II підетап
Абсолютно тверде тіло	$\ddot{x}_2 = \frac{P_{D2H} - gf_0}{m}$ $\dot{x}_2 = \left(\frac{P_{D2H}}{m} - gf_0\right) \cdot t;$ $x_2 = \left(\frac{P_{D2H}}{m} - gf_0\right) \cdot \frac{t^2}{2}$ П.у.: $t = 0; \dot{x}_2 = 0; \ddot{x}_2 = 0$ К.у.: $\dot{x}_2 = 0$	$\dot{x}_2 = -gf_0$ $\ddot{x}_2 = -gf_0 \cdot t + \dot{x}_{2,2H};$ $x_2 = -gf_0 \cdot \frac{t^2}{2} + \dot{x}_{2,2H} \cdot t$ П.у.: $t = 0; \dot{x}_2 = 0; \ddot{x}_2 = \ddot{x}_{2,2H}$ К.у.: $\dot{x}_2 = 0$
	$\ddot{x}_2 = \frac{C_{22}}{m} [V_0(t_{01} + t) - x_2] - gf_0$ $t_0 = \frac{mg \cdot t_0}{C_{22} \cdot V_0}$ П.у.: $t = 0; \dot{x}_2 = 0; \ddot{x}_2 = 0$ К.у.: $\dot{x}_2 = 0$	$T_T = t_1 + t_2$ $\ddot{x}_2 = \frac{C_{22}}{m} [V_0(t_{01} + t_1) - (x_2 + l)] - gf_0$ П.у.: $t = 0; \dot{x}_2 = 0; \ddot{x}_2 = \ddot{x}_{2,2H}$ К.у.: $\dot{x}_2 = V_0(t_{01} + t_1) - l$
Пружне тіло	$\ddot{x}_2 = \frac{C_{22}}{m} [V_0(t_{01} + t) - x_2] - gf_0$ $t_{02} = \frac{mg \cdot t_0 - b \cdot V}{C_{22} \cdot V_0}$ П.у.: $t = 0; \dot{x}_2 = 0; \ddot{x}_2 = 0$ К.у.: $\dot{x}_2 = 0$	$T_T = t_{01} + t_1 + t_{21} + t_{22};$ $\ddot{x}_2 = \frac{C_{22}}{m} [V_0(t_{02} + t_1) - (x_2 + l)] +$ $+ (V_0 - \dot{x}_2) \frac{b_{22}}{m} - gf_0$ П.у.: $t = 0; \dot{x}_2 = 0; \ddot{x}_2 = \ddot{x}_{2,2H}$ К.у.: $\dot{x}_2 = V_0(t_{02} + t_1) - l$
	$\ddot{x}_2 = \frac{C_{22}}{m} [V_0(t_{01} + t_1) - x_2] + (V_0 - \dot{x}_2) \frac{b_{22}}{m} - gf_0$ $t_{02} = \frac{mg \cdot t_0 - b \cdot V}{C_{22} \cdot V_0}$ П.у.: $t = 0; \dot{x}_2 = 0; \ddot{x}_2 = 0$ К.у.: $\dot{x}_2 = 0$	$\ddot{x}_2 = -gf_0$ $\dot{x}_2 = -gf_0 \cdot t + \dot{x}_{2,2H};$ $x_2 = -gf_0 \cdot \frac{t^2}{2} + \dot{x}_{2,2H} \cdot t$ П.у.: $t = 0; \dot{x}_2 = 0; \ddot{x}_2 = \ddot{x}_{2,2H}$ К.у.: $\dot{x}_2 = 0$
Пружно-властичне тіло	$T_T = t_{02} + t_1 + t_{21} + t_{22};$	



Таблиця 2. Рівняння, що описують рух упаковок під час переміщення їх зіштовхувачем з подавального на магістральний конвеєр

Вид деформованого тіла	I етап		II етап		III етап		IV етап	
	2	3	4	5	6			
1	$\ddot{x}_2 = \frac{P_{\text{max}}}{m} - g t_1 \times$ $\times \left[ \frac{\dot{x}_2}{\sqrt{V_1^2 + \dot{x}_2^2}} + \right.$ $\left. + t_1 \cdot \frac{V_1}{\sqrt{V_1^2 + \dot{x}_2^2}} \right]$ <p>П.у.: <math>t = 0; x_2 = 0;</math>  <math>\dot{x}_2 = 0</math>  <math>K.y.: x_2 = \delta</math></p>	$\ddot{x}_2 = \frac{P_{\text{max}}}{m} - g t_1 \times$ $\times \frac{a - x_2}{a} \left[ \frac{\dot{x}_2}{\sqrt{V_1^2 + \dot{x}_2^2}} + \right.$ $\left. + t_1 \cdot \frac{V_1}{\sqrt{V_1^2 + \dot{x}_2^2}} \right] -$ $- g t_2 \cdot \frac{x_2}{a} \left[ \frac{\dot{x}_2}{\sqrt{V_2^2 + \dot{x}_2^2}} + \right.$ $\left. + t_1 \cdot \frac{V_2}{\sqrt{V_2^2 + \dot{x}_2^2}} \right]$ <p>П.у.: <math>t = 0; x_2 = 0;</math>  <math>\dot{x}_2 = 0</math>  <math>K.y.: x_2 = \delta</math></p>	$\ddot{x}_2 = \frac{P_{\text{max}}}{m} - g t_1 \times$ $\times \left[ \frac{\dot{x}_2}{\sqrt{V_2^2 + \dot{x}_2^2}} + \right.$ $\left. + t_1 \cdot \frac{V_2}{\sqrt{V_2^2 + \dot{x}_2^2}} \right]$ <p>П.у.: <math>t = 0; x_2 = 0;</math>  <math>\dot{x}_2 = \dot{x}_{2,\text{max}}</math>  <math>\dot{x}_3 = 0</math></p>	$\ddot{x}_2 = -g t_1 \times$ $\times \left[ \frac{\dot{x}_2}{\sqrt{V_2^2 + \dot{x}_2^2}} + \right.$ $\left. + t_1 \cdot \frac{V_2}{\sqrt{V_2^2 + \dot{x}_2^2}} \right]$ <p>П.у.: <math>t = 0; x_2 = 0;</math>  <math>\dot{x}_2 = \dot{x}_{2,\text{max}}</math>  <math>\dot{x}_3 = 0</math></p>				
Абсолютно тверде тіло								
								$T_1 = t_1 + t_2 + t_3 + t_4; \sum x_2 = a + 2\delta + x_{2,\text{max}}$

ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

Продовження табл. 2

Вид деформованого тіла	I етап		II етап		III етап		IV етап		
	2		3		4		5		
1	$\ddot{x}_2 = \frac{c_{1,2}}{m} \left[ V_0 (t_{01} + t) - x_2 \right] - g f_1 \left[ \frac{\dot{x}_2}{\sqrt{V_1^2 + \dot{x}_2^2}} + f_1 \cdot \frac{V_1}{\sqrt{V_1^2 + \dot{x}_2^2}} \right]$		$\ddot{x}_2 = \frac{c_{1,2}}{m} \left[ V_0 (t_{01} + t_1) - (x_2 + x_{2,1k}) \right] - g f_1 \cdot x \cdot \frac{a - x_2}{a} \left[ \frac{\dot{x}_2}{\sqrt{V_1^2 + \dot{x}_2^2}} + f_1 \cdot \frac{V_1}{\sqrt{V_1^2 + \dot{x}_2^2}} \right] -$		$\ddot{x}_2 = \frac{c_{1,2}}{m} \left[ V_0 (t_{01} + t_1 + t_2) - (x_2 + x_{2,1k} + x_{2,2k}) \right] - g f_2 \cdot \left[ \frac{\dot{x}_2}{\sqrt{V_2^2 + \dot{x}_2^2}} + f_2 \cdot \frac{V_2}{\sqrt{V_2^2 + \dot{x}_2^2}} \right] +$		$\ddot{x}_2 = \frac{c_{1,2}}{m} \left[ V_0 (t_{01} + t_1 + t_2 + t_3) - (x_2 + x_{2,1k} + x_{2,2k} + x_{2,3k}) \right] - g f_2 \cdot \left[ \frac{\dot{x}_2}{\sqrt{V_2^2 + \dot{x}_2^2}} + f_2 \cdot \frac{V_2}{\sqrt{V_2^2 + \dot{x}_2^2}} \right] +$		II підетап 6
Пружне тіло	$t_{01} = \frac{mg \cdot f_1}{c_{1,2} \cdot V_0}$ П.у.: $t = 0; x_2 = 0;$ $\dot{x}_2 = 0$ К.у.: $x_2 = \delta$		$-g f_2 \cdot \frac{x_2}{a} \left[ \frac{\dot{x}_2}{\sqrt{V_2^2 + \dot{x}_2^2}} + f_2 \cdot \frac{V_2}{\sqrt{V_2^2 + \dot{x}_2^2}} \right] +$ П.у.: $t = 0; x_2 = 0;$ $\dot{x}_2 = \dot{x}_{2,1k}$ К.у.: $x_2 = \delta$		$+ f_2 \cdot \frac{V_2}{\sqrt{V_2^2 + \dot{x}_2^2}}$ П.у.: $t = 0; x_2 = 0;$ $\dot{x}_2 = \dot{x}_{2,1k}$ К.у.: $x_2 = \delta$		$+ f_3 \cdot \frac{V_3}{\sqrt{V_3^2 + \dot{x}_2^2}}$ П.у.: $t = 0; x_2 = 0;$ $\dot{x}_2 = \dot{x}_{2,1k}$ К.у.: $x_2 = \delta$		I підетап 5
	П.у.: $t = 0; x_2 = 0;$ $\dot{x}_2 = \dot{x}_{2,1k}$ $x_2 = a$		$T_1 = t_{01} + t_1 + t_2 + t_3 + t_{a,1} + t_{a,2}; \sum x_2 = a + 2\delta + x_{2,3k}$						



Вид деформованого тіла	I етап		II етап		III етап		IV етап			
	2		3		4		5			
1	$\ddot{x}_2 = \frac{c_{1,2}}{m} [V_0(t_{22} + t) - x_2] + (V_0 - \dot{x}_2) \frac{b_{1,2}}{m} - g f_1$ $\times \left[ \frac{\dot{x}_2}{\sqrt{V_1^2 + \dot{x}_2^2}} + f_6 \cdot \frac{V_1}{\sqrt{V_1^2 + \dot{x}_2^2}} \right]$		$\ddot{x}_2 = \frac{c_{1,2}}{m} [V_0(t_{22} + t_1 + t) - (x_2 + x_{2,1k})] + (V_0 - \dot{x}_2) \frac{b_{1,2}}{m} - g f_1$ $\times \left[ \frac{\dot{x}_2}{\sqrt{V_1^2 + \dot{x}_2^2}} + f_4 \cdot \frac{V_1}{\sqrt{V_1^2 + \dot{x}_2^2}} \right]$		$\ddot{x}_2 = \frac{c_{1,2}}{m} [V_0(t_{22} + t_1 + t_2) - (x_2 + x_{2,1k} + x_{2,2k})] + (V_0 - \dot{x}_2) \frac{b_{1,2}}{m} - g f_1$ $\times \left[ \frac{\dot{x}_2}{\sqrt{V_2^2 + \dot{x}_2^2}} + f_5 \cdot \frac{V_2}{\sqrt{V_2^2 + \dot{x}_2^2}} \right]$		$\ddot{x}_2 = \frac{c_{1,2}}{m} [V_0(t_{22} + t_1 + t_2 + t) - (x_2 + x_{2,1k} + x_{2,2k} + x_{2,3k})] + (V_0 - \dot{x}_2) \frac{b_{1,2}}{m} - g f_1$ $\times \left[ \frac{\dot{x}_2}{\sqrt{V_2^2 + \dot{x}_2^2}} + f_5 \cdot \frac{V_2}{\sqrt{V_2^2 + \dot{x}_2^2}} \right]$		$\ddot{x}_2 = -g f_5 \cdot \left[ \frac{\dot{x}_2}{\sqrt{V_2^2 + \dot{x}_2^2}} + f_5 \cdot \frac{V_2}{\sqrt{V_2^2 + \dot{x}_2^2}} \right]$ <p>П.у.: <math>t = 0; x_2 = 0;</math>  <math>\dot{x}_2 = \dot{x}_{2,2k}</math>                  К.у.: <math>\dot{x}_2 = 0</math></p>	
Пружно-еластичне тіло	$t_{22} = \frac{mg \cdot f_6 - b_{1,2} \cdot V_0}{c_{1,2} \cdot V_0}$ <p>П.у.: <math>t = 0; x_2 = 0;</math>  <math>\dot{x}_2 = 0</math>                  К.у.: <math>x_2 = \delta</math></p>		$-g f_5 \frac{x_2}{a} \cdot \left[ \frac{\dot{x}_2}{\sqrt{V_2^2 + \dot{x}_2^2}} + f_5 \cdot \frac{V_2}{\sqrt{V_2^2 + \dot{x}_2^2}} \right]$ <p>П.у.: <math>t = 0; x_2 = 0;</math>  <math>\dot{x}_2 = \dot{x}_{2,1k}</math>                  К.у.: <math>x_2 = a</math></p>		$-g f_5 \frac{x_2}{a} \cdot \left[ \frac{\dot{x}_2}{\sqrt{V_2^2 + \dot{x}_2^2}} + f_5 \cdot \frac{V_2}{\sqrt{V_2^2 + \dot{x}_2^2}} \right]$ <p>П.у.: <math>t = 0; x_2 = 0;</math>  <math>\dot{x}_2 = \dot{x}_{2,2k}</math>                  К.у.: <math>x_2 = \delta</math></p>		$x_2 = \frac{c_{1,2}}{m} [V_0(t_{22} + t_1 + t_2 + t) - (x_2 + x_{2,1k} + x_{2,2k} + x_{2,3k})] + (V_0 - \dot{x}_2) \frac{b_{1,2}}{m} - g f_1$ $\times \left[ \frac{\dot{x}_2}{\sqrt{V_2^2 + \dot{x}_2^2}} + f_5 \cdot \frac{V_2}{\sqrt{V_2^2 + \dot{x}_2^2}} \right]$ <p>П.у.: <math>t = 0; x_2 = 0;</math>  <math>\dot{x}_2 = \dot{x}_{2,2k}</math>                  К.у.: <math>x_2 = a + 2\delta + x_{2,3k}</math></p>			

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

**Висновки.** Результатом виконаних досліджень є розроблені математичні моделі, що описують рух упаковок по несучим поверхням під час їхнього переміщення зіштовхувачем з урахуванням структурно-механічних характеристик споживчих упаковок, заповнених продукцією.

### ЛІТЕРАТУРА

1. *Гавва О.М., Беспалько А.П., Волчко А.І.* Обладнання для групового пакування — К.: ІАЦ «Упаковка», 2007. — 136 с.
2. *Ефремов Н.Ф., Корнилов И.К., Лебедев Ю.М.* Испытание и надежность упаковки — М.: МГУП, 2004. — 112 с.
3. *Данилевский В.А.* Картонная и бумажная тара. — М.: Лесная промышленность, 1979. — 216 с.
4. *Моделювання процесів пакування / Соколенко А.І., Яровий В.Л., Піддубний В.А.* та ін. — Вінниця: Нова книга, 2004. — 272 с.
5. *Гуць В.С., Полевода Ю.А., Коваль О.А.* Визначення структурно-механічних характеристик в'язкопружних дисперсних систем // Упаковка. — 2011. — № 1. — с. 35—40.
6. *Гавва О.М., Халайджі В.В., Волчко А.І.* Диференціація операцій групового пакування // Упаковка. — 2009. — № 6. — С. 35—40.

*Одержана редколегією 24.12.2010 р.*

УДК 621.798

**О.О. БОЙКО,  
В.В. БЕВЗ***Національний університет харчових технологій*

## ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИРОБНИЦТВА ПИВА ТА ЕТИЛОВОГО СПИРТУ

---

Розглянуто особливості процесів виробництва пива та етилового спирту з зернової сировини та меляси. Порівняно технологічні параметри основних етапів виробництва. Оцінені загальні втрати енергії хімічних зв'язків при виробництві пива та спирту. Проведено аналіз енергетичної цінності відходів даних виробництв та доцільності використання їх у тваринництві.

**Ключові слова:** етиловий спирт, пиво, енергія хімічних зв'язків, спиртове бродіння, відходи.

Рассмотрены особенности процессов производства пива и этилового спирта из зернового сырья и мелассы. Сопоставлены технологические параметры основных этапов производства. Оценены суммарные потери энергии химических связей при производстве пива и спирта. Проведен анализ энергетической ценности отходов данных производств и целесообразности использования их в животноводстве.

**Ключевые слова:** этиловый спирт, пиво, энергия химических связей, спиртное брожение, отходы.

The features of processes of production of beer and ethyl spirit are considered from corn raw material and molasses. Comparatively technological parameters of the basic stages of production. The loss of energy of chemical connections is appraised as a result of flowing of alcoholic fermentation, general losses of energy of chemical connections at the production of beer and alcohol. The analysis of power value of wastes of these productions and expedience of utilization of these wastes is conducted in a stock-raising.

**Keywords:** ethyl spirit, beer, energy of chemical connections, alcoholic fermentation, wastes.

В сучасних умовах розвитку виробництва великого значення набуває раціональне використання наявних ресурсів — сировини, палива, води. Для цього необхідно мати чітке уявлення про перетворення, які відбуваються з сировиною при виконанні технологічних операцій, а також про витрати ресурсів для здійснення таких перетворень. На основі аналізу отриманої інформації можливо запроваджувати схеми по рекуперації енергії та додаткового використання виробничих ресурсів [1—3].

Для нашого дослідження було обрано технології, що містять у своєму складі процеси бродіння, а саме виробництво пива за класичною технологією та виробництво спирту з зерна та меляси. При аналізі технологій досліджувалися зміни хімічного складу сировини, енергії хімічних зв'язків, витрати та виділення енергії, потреба в ресурсах (вода, пара тощо).

Під час виробництва продукції з використанням процесу бродіння для отримання кінцевої продукції відбуваються хімічні перетворення в сировині, пов'язані як з перебігом процесів самого бродіння, так і викликані необхідністю технологічної обробки матеріального потоку.

Одним з головних етапів при виробництві спиртовмістних продуктів є перетворення вуглеводнів, що містяться у вигляді складних сполук, у більш прості моно- та дівуглеводні. У

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

виробництві етилового спирту цей процес має назву розварювання, а у виробництві пива — затирання, і відбувається він за різних технологічних параметрів.

При виробництві пива процес затирання відбувається в чотири етапи, під час кожного з яких має місце нагрівання матеріального потоку до певної температури з подальшою витримкою за фіксованої температури. На першому етапі відбувається нагрівання до температури білкової паузи (45—50 °C). При цьому здійснюється розщеплення високомолекулярних білкових сполук до амінокислот та більш простих білків, що потім будуть спожиті дріжджами, на етапі бродіння, а також вплинуть на смак і якість пива. Протягом другого етапу — мальтозної паузи (за температури 62—65 °C) — відбувається розщеплення крохмалю суслу на декстрини під дією в-амілази. На третьому етапі матеріальний потік нагрівається до температури оцукрювання (72—75 °C). В цей час під дією б-амілази відбувається розщеплення декстринів на прості цукри. На останньому етапі потік нагрівається до 78 °C — температури, за якої затор передається на фільтрацію. Це забезпечує зниження в'язкості пивного суслу, що відбувається при підвищенні температури суслу. Передавання не здійснюють за більш високих температур, тому що за більш високої температури деактивується б-амілаза, яка забезпечує при фільтруванні додаткове оцукрювання.

При виробництві спирту процес розварювання протікає в один етап, під час якого матеріальний потік нагрівається до температури оцукрювання (75—85 °C) в апаратах термоферментативної обробки матеріалу, де витримується певний час. Потім матеріальний потік подається до вакуумоцукрювача, де він охолоджується за рахунок адіабатного кипіння та витримується при даній температурі.

Така різниця процесів оцукрювання викликана тим, що при підвищенні температури процес оцукрювання сировини прискорюється, але при цьому утворюються побічні продукти, що погіршують органолептичні властивості кінцевого продукту. Для виробництва спирту наявність побічних продуктів після процесу оцукрення крохмалю не важлива, оскільки відбувається їх відділення від товарного продукту (етилового спирту) на стадії ректифікації, та видалення їх разом з бардою (водовмісних відходів процесу ректифікації). Але це важливо при виробництві пива, коли всі розчиненні у воді речовини та хімічні сполуки, що утворилися на різних етапах переробки продукту, потрапляють до кінцевого продукту.

Під час виробництва спирту зміни, що відбуваються з сировиною, стосуються її хімічного складу, а при протіканні процесу бродіння, ще й зміни енергії хімічних зв'язків. На відміну від виробництва спирту при виробництві пива зміна енергії хімічних зв'язків відбувається при виконанні майже кожної технологічної операції.

При бродінні значна частка енергії хімічних зв'язків сировини зазнає перетворення. Частково вона витрачається на ріст дріжджової маси (збільшення кількості дріжджових клітин) та енергію хімічних зв'язків, отриманих в результаті бродіння, але значна частина виділяється у вигляді теплоти. Так у виробництві спирту з зернової сировини частина теплової енергії, що виділяється при бродінні, складає 31,5 % загальної енергії хімічних зв'язків сировини, що надійшла на переробку; для меляси — 50 %, а у виробництві пива — 10,4 %. Менші втрати енергії хімічних зв'язків при спиртовому бродінні при виробництві пива викликані декількома факторами. Так при виробництві пива 5 % вуглеводнів, що надійшли з зерном, витрачаються на етапі замочування та пророщування солоду, що складає втрату енергії хімічних зв'язків приблизно 11,3 %. Також відбувається вилучення частини матеріального потоку на етапі відділення ростків солоду та фільтрації пива після затирання. Проте загальні втрати енергії хімічних зв'язків сировини при виробництві пива складають 62,6 %, спирту з зернової сировини та меляси — 31,7 % та 50,8 % відповідно. Отже можна зробити висновок, що для спиртового виробництва втрати хімічної енергії при бродінні є головними втратами, а для пивоваріння вони складають приблизно п'яту частину.

Існує також різниця в технологічних параметрах, за яких протікає процес бродіння при виробництві пива та спирту. Так при виробництві пива бродіння протікає в діапазоні температур від 5 до 10 °C, а при виробництві спирту досягається температура 34—36 °C. Це викликано тим, що при збільшенні температури бродіння збільшується концентрація вищих спиртів, ефірів та інших хімічних сполук. При виробництві етилового спирту ці побічні продукти процесу бродіння

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

відділяються від основного продукту на стадії ректифікації, а потім можуть бути реалізовані як окремий продукт. При виробництві пива їх видалення неможливе, при цьому вони викликають погіршення смакових якостей пива.

З підвищенням температури матеріального потоку знижується розчинність вуглекислого газу, а отже збільшується кількість вуглекислоти, що виділяється в процесі бродіння. Також при виділенні вуглекислого газу з матеріального потоку видаляється і частини ароматичних речовин, що теж погіршує смакові властивості пива. Це негативне явище при виробництві пива, оскільки насиченість готового продукту  $\text{CO}_2$  є одним з важливих показників якості, тоді як при виробництві етилового спирту вуглекислий газ майже повністю видаляється зі спирту на стадії ректифікації. Крім того висока концентрація вуглекислого газу в спиртовій бражці погіршує процес ректифікації етилового спирту.

Все вищенаведене обумовлює те, що у пивній промисловості на відміну від спиртової погоджуються із зниженням температури бродіння, хоча це значно збільшує час процесу. Крім того зниження температури бродіння збільшує енергетичні витрати на процес, оскільки потрібне додаткове охолодження матеріального потоку.

Крім втрат енергії хімічних зв'язків вхідного матеріального потоку при протіканні технологічних процесів виробництва кінцевого цільового продукту, відбуваються значні втрати енергії хімічних зв'язків з відходами пивного та спиртового виробництва. До таких відходів можна віднести пивну дробину та ростки солоду при виробництві пива, спиртову барду при виробництві спирту.

Так при пивоварінні з дробиною, що отримується після фільтрування затору, і ростками видаляється відповідно близько 37,5 та 2 % хімічної енергії сировини, що надходить на виробництво. Для спиртового виробництва частина енергії, що видаляється разом з бардою, складає 12,5 і 4,8 % відповідно для зернової сировини та меляси.

Зараз, у більшості випадків, ці продукти вважаються відходами виробництва та скидаються на звалище відходів чи на очисні споруди. Це у свою чергу збільшує виробничі витрати підприємства.

Якщо поглянути на хімічний склад цих продуктів, то можна помітити, що в них присутні білки та жири. Так в пивній дробині білки та жири складають відповідно 28 та 8,2 %, а в барді, отриманій після виробництва спирту з зернової сировини, міститься, у перерахунку на сухі речовини, приблизно 10 % білків, залишків жирів та жирних кислот. Тому доцільніше було б використовувати пивну дробину та спиртову барду для відгодівлі тварин у вигляді збагаченої харчовими речовинами суміші, оскільки вологість даних продуктів складає 75—90 %.

Проблема полягає у тому, що термін придатності до використання згаданих вище продуктів не перевищує кількох діб, а це означає, що для їх реалізації потрібні тісні зв'язки пивоварень та спиртових заводів з тваринними комплексами, або сушіння даних продуктів з подальшою реалізацією їх на ринку кормів.

Проблемою при подальшій переробці спиртової барди є і те, що та її кількість, яка виробляється на окремих вітчизняних спиртових заводах, є недостатньою для забезпечення рентабельного рівня виробництва сухих кормових дріжджів. А варіант з кооперацією кількох спиртозаводів для переробки барди виглядає нереальним, тому барду в умовах сьогодення простіше та вигідніше скидати в каналізацію чи очисні споруди, а не переробляти.

**Висновки.** Виконані теоретичні дослідження дозволяють зробити такі висновки та узагальнення:

1. Визначено та проаналізовано основні втрати енергії хімічних зв'язків сировини;
2. Наведені числові співвідношення дають уявлення щодо енергетичних втрат в технологіях бродіння.
3. Показано доцільність використання відходів спиртового та пивного виробництва у тваринництві.

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

### ЛІТЕРАТУРА

1. *Кунце В.* Технология солода и пива / Кунце В. — Санкт-Петербург: Профессия, 2001. — 912 с.
2. *Технологічна інструкція* по лікєро-горілчаному виробництву: ТІ У 18 4466-94. — Офіц. вид. — К.: Український науково-дослідний інститут спирту і біотехнології продовольчих продуктів (УкрНДІспиртбіопром), 1994. — 318 с.
3. *Технология спирта* / [Яровенко В. Л., Маринченко В. А., Смирнов В. А. и др.]; под ред. Яровенко В. Л. — М.: Колос-Пресс, 2002 — 465 с.

*Одержано редколегією 16.01.2011 р.*

УДК 664.123.4.02

**М.М. ПУШАНКО**, д-р техн. наук,**А.М. ПАРАХОНЯ**, асп.*Національний університет харчових технологій*

## ПРОБЛЕМИ ЕКСТРАГУВАННЯ ЦУКРОЗИ В КОЛОННИХ ДИФУЗІЙНИХ УСТАНОВКАХ

---

Розглянуто причини порушення протитечійності процесу екстрагування в апаратах збільшеної продуктивності. Досліджено характер зношення елементів транспортних систем. Виявлено фактори, що впливають на руйнування лопатей.

**Ключові слова:** лопать, модуль пружності, питоме навантаження.

Рассмотрены причины нарушения противотока процесса экстрагирования в аппаратах увеличенной производительности. Исследовано характер износа элементов транспортных систем. Обнаружено факторы, что воздействуют на разрушения лопастей.

**Ключевые слова:** лопасть, модуль упругости, удельная нагрузка.

Reasons of violation of counterflows of process of extracting in the vehicles of the megascopic productivity are considered. Investigational character of wear of elements of transport systems. Found out factors which influence on destruction of blades.

**Key words:** blade, module of resiliency, specific loading.

Цукрове виробництво належить до крупнотонажних галузей харчової промисловості. На цукрових заводах середньої потужності (3000 т/добу) за годину переробляється 125 тон буряків. В останні два десятиліття намітилась тенденція збільшення продуктивності підприємств по виробництву цукру. У Європі побудовано і будують цукрозаводи, продуктивність яких перевищує середню продуктивність цукрових заводів України у 4...5 разів.

У відповідності до запитів виробництва колективами КБ фірм і заводів машинобудівної промисловості розробляються та впроваджуються машини та апарати збільшеної продуктивності для виконання різних механічних, хімічних, гідравлічних та теплообмінних процесів, що відбуваються на різних ділянках технологічної схеми бурякоцукрового виробництва.

Наприклад, німецька фірма «ВМА» почала виготовляти колонні дифузійні установки продуктивністю 17000 тон буряків на добу, з діаметром колони 13,6 м. та діаметром трубовала 6,0 м.

Спільною рисою конструкційного оформлення транспортних систем в апаратах колонного типу є подібність параметрів компоновки їх складових (лопатей і контрлопатей) по висоті колон. При зміні структурно-механічних властивостей компонентів сокоотружкової суміші незмінність кроків розміщення і кутів установки елементів транспортної системи є однією з причин порушення протитечійності процесу екстрагування.

Розвиток конструкцій колон дифузійних установок полягав у поступовому збільшенні їх робочого простору за рахунок збільшення діаметрів колон і їх висоти та у зміні конструкцій основних елементів транспортних систем (трубовала, лопатей і контрлопатей), розміщених у робочому просторі колон (рис. 1).

Зміна основних габаритних розмірів найбільш поширених в Україні колон наведена в таблиці 1.

ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

Таблиця 1. Габаритні розміри колон продуктивністю 3000 т/добу

Назва, рік випуску	Робочий об'єм, м <sup>3</sup>	Висота корпусу (Н), мм	Діаметр корпусу (D), мм	Діаметр трубовала (dв), мм
КДА-30-66, 1969	208	13320	5000	2000
КДА2-А30, 1982	234	12600	5500	2400
Ж4-ПДБЗ (ЕКА-3), 1991	254	12000	6000	2600
ВМА (Fano, Italy), 1971	218	14350	5500	2400
ВМА (Curico, Chile), 1971	266	17500	5500	2400
ВМА (Hohenay, Austria), 1983	282	18550	5500	2400

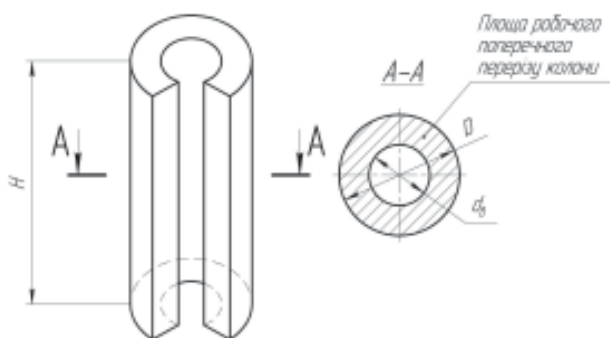


Рис. 1. Конфігурація робочої частини колонних дифузійних апаратів

Транспортні системи наведених колонних дифузійних апаратів укомплектовані лопатями і конрлопатями різних типів і мають суттєві відмінності. Велика кількість цих відмінностей свідчить про пошуки оптимальної конструкції, яка забезпечила б рівномірне протитечійне переміщення складових сокостружкової суміші (сік вниз і стружка вверх) по площі робочого поперечного перерізу колони і по її висоті.

На рис.2 показані типи лопатей з різними формами поперечних перерізів і робочих поверхонь:

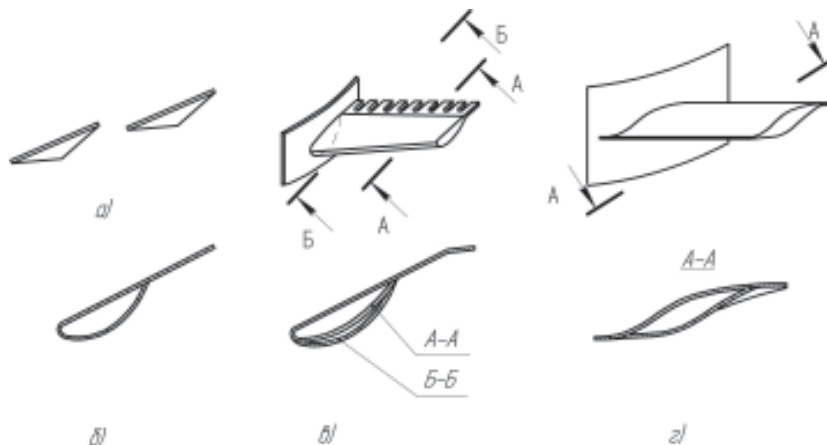


Рис. 2. Конфігурація лопатей транспортних систем колон дифузійних апаратів:  
 а — плоскі трикутного типу; б — каплевидні; в — форми крила літака;  
 г — хвилеподібні

а) — плоскі лопаті трикутного типу в апаратах ВМА та КДА-30-66;  
 б) — капле видні фірми Буккау-Вольф;



## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

*в)* — форми крила літака (пропозиція КТІХП [2]);

*г)* — хвильові, запропоновані співробітниками НУХТ та використані в конструкціях колонних апаратів ЕКА-2 і ЕКА-3 [3].

Маючи просту будову лопатей (рис. 2, *а*)) колони фірми БМА мають громіздку конструкцію транспортних систем, переобтяжену великою кількістю лопатей (понад 200 штук) і контрлопатей. Використання лопатей каплевидної та крилевидної форм з широкими робочими поверхнями дозволило зменшити їх кількість в модернізованих колонних апаратах типу КДА2-А30 до 28 або 30 штук. В транспортних системах таких апаратів використовуються лопаті, показані на рис. 2 *б, в* розміщені в 14 чи 15 рядів по 2 лопаті в кожному.

Опосередковане уявлення про забезпечення раціонального протитечісного режиму переміщення твердої і рідинної фаз сокостружкової суміші можна одержати співставляючи величини різниці концентрацій цукрози в буряковій стружці і екстрагенті.

Проби сокостружкової суміші з колон апаратів КДА-15-66 і Буккау-Вольф відбирались через крани діаметром 50 мм., встановлені на відстані 430 мм. від горизонтального сита і 1,4 м. один від одного до відмітки 8,4 м. Результати численних аналізів показали [4], що середня різниця концентрацій цукрози в стружці і екстрагенті становить 0,45 %. Проте в окремих випадках, особливо при роботі колони в режимах зі зниженими значеннями питомого навантаження, ця різниця не є сталою величиною. Оскільки це відбувається при постійній частоті обертання трубовала з лопатами 0,735 1/хв. і зміні колової швидкості по довжині лопаті в межах 0,075...0,15 м/с, такі дані свідчать про суттєву як, поздовжню так і поперечне перемішування сокостружкової суміші. Їх наявність зменшує рушійну силу процесу екстрагування, продуктивність колони і збільшує втрати цукрози в жомі.

Збільшення продуктивності колонних дифузійних установок за рахунок збільшення діаметра колон і їх висоти при збереженні незмінності параметрів установки лопатей і контрлопатей по висоті корпусу є причиною збільшеного перемішування сокостружкової суміші і погіршення якісних показників дифузійного соку.

На інтенсивність перемішування крім конструктивних факторів значний вплив має зміна структурно-механічних властивостей сокостружкової суміші. На рис. 3 наведено характер зміни модуля пружності  $E$  (МПа) сокостружкової суміші по висоті колони в чотирьох зонах, (*а*) та зміну величини питомого навантаження (*б*) в цих же зонах.

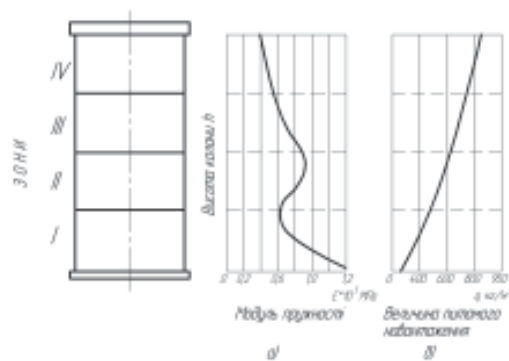


Рис. 3. Графіки зміни модуля пружності та величини питомого навантаження:

*а* — зміна модуля пружності сокостружкової суміші в різних зонах по висоті колони; *б* — зміна величини питомого навантаження по висоті колони

Виділені чотири зони залежності  $E(h)$  показують, що модуль пружності, з урахуванням зміни властивостей сокостружкової суміші і параметрів технологічного режиму роботи, неоднаковий по висоті колони. Суттєву різницю модуля пружності в зонах колони викликає зміна реологічних властивостей стружки та величини питомого навантаження сокостружкової

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

суміші. В I зоні відбувається завантаження колони сокостружковою сумішшю з середнім співвідношенням стружка екстрагент в межах 1:4 відповідно. Це обумовлює малу величину питомого навантаження нижньої зони колони — 340...350 кг/м<sup>3</sup>. За таких умов модуль пружності стружки становить  $0,6 \cdot 10^5 \dots 1,2 \cdot 10^5$  МПа. Транспортуючись по висоті I зони величина питомого навантаження поступово збільшується, а модуля пружності зменшується. В II зоні спостерігається різке збільшення  $E$ , що пояснюється зміною реологічних властивостей стружки під впливом теплової обробки. По висоті III та IV зон величина модуля пружності поступово падає. Питоме навантаження поступово збільшується по всій висоті колони. В нижній частині колони 300—350 кг/м<sup>3</sup>, у верхній частині 750—850 кг/м<sup>3</sup>. Це ускладнює роботу дифузійних апаратів, приводить до інерційних змін в процесі екстрагування.

Техніко-економічні показники цукрового заводу багато в чому визначаються надійною роботою колонної дифузійної установки. Досвід експлуатації дифузійних апаратів колонного типу показав, що близько 30% всіх поломок відбувається за рахунок виходу з ладу транспортних систем. Їх ремонт та усунення у виробничий період потребує великих витрат та при наявності одного апарату веде до тривалого простою заводу.

Елементи транспортних систем зазвичай виготовляють із конструкційних сталей марки Ст3 або нержавіючої сталі 12Х18Н10Т (ЄКА) Працюючи в умовах знакозмінних механічних навантажень і змінних показників рН середовища такі системи швидко зношуються.

Нами була проведена робота по обстеженню ряду дифузійних колон на Лохвицькому (КД2-А30), Саливківському (ЄКА-3) та Узинському (КД2-А30) цукрових заводах.

Величину зношення робочих поверхонь вимірювали товщиноміром ультразвуковим А 1207 з вмонтованим п'єзоелектричним перетворювачем. Похибка вимірів, згідно паспортним даним приладу, складає 0,1 мм. (в діапазоні 0,6—300 мм.).

Методика проведення обстежень передбачала визначення товщини стінок лопатей в різних місцях (рис.4) Лопаті замірялися вздовж лобової кромки на відстані 50-100 мм. від неї в трьох точках: перший замір на відстані 50—100 мм. від валу, другий в середній частині лопаті, третій на відстані 50—100 мм. від її краю.

Результати замірів показали, що зношення лопатей транспортних систем колонних дифузійних апаратів має нерівномірний характер та змінюється як по висоті так і по діаметру колонія Зміна товщини металу окремих лопатей показано на рис.4, а та рис. 5, а. Узагальнена зміна товщини лопатей має прямолінійний характер (рис. 4, б та рис. 5, б). На це мають вплив різні механічні та хімічні фактори. До механічних відносяться: контакт лопатей з сокостружковою сумішшю, різниця кількості контактів початкових та крайніх точок лопаті та зміна питомого навантаження по діаметру колони. До хімічних — зміна впливності рН.

Сокостружкова суміш, що подається з ошпарювача, являє собою агресивне середовище, в якому присутні домішки у вигляді піску, землі, глини та інших елементів, що не були відділені від буряків в процесі очищення та відмивання. Тертя стружки також сприяє абразивному зношенню.

Дію механічних факторів пояснимо розглянувши рух початкової (біля валу) та крайньої точок лопаті і знайдемо відстані які вони проходять за один оберт. В апараті ЄКА-3 наприклад, діаметр колони 6 м., діаметр вала 2,6 м. Початкова точка проходить свій шлях по колу довжиною 8,164 м., а крайня 18,5м. Отже крайня точка проходить в 2,27 рази довший шлях ніж початкова.

За рахунок зміни швидкостей по діаметру колони відбувається зміна питомого навантаження, яке збільшує силові навантаження на елементи транспортної системи, що також впливає на швидкість їх механічного зношення.

Вимірювання величини зношення лопатей по висоті колони також показало його нерівномірний характер (рис. б). Серед факторів, що викликають такі зміни найвпливовішими є зміна питомого навантаження зміна модуля пружності. Спостерігається подібність графіків зношення лопатей з графіком зміни модуля пружності шару стружки. Звідси можна зробити висновки, що зміна модуля пружності має суттєвий вплив на характер зношення металу лопатей в процесі виробництва.

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

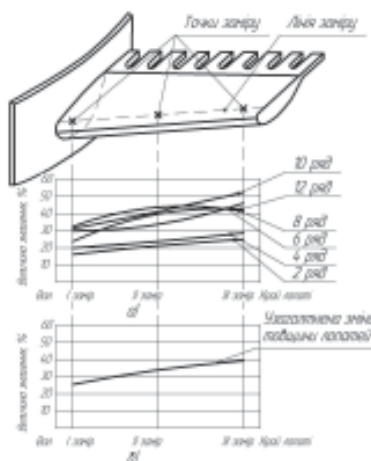


Рис. 4. Характер зношення лопатей колонного дифузійного апарата КД2-А30 на Лохвицькому цукровому заводі:

- а — зміна товщини лопатей по їх довжині;  
б — узагальнена зміна товщини металу лопатей

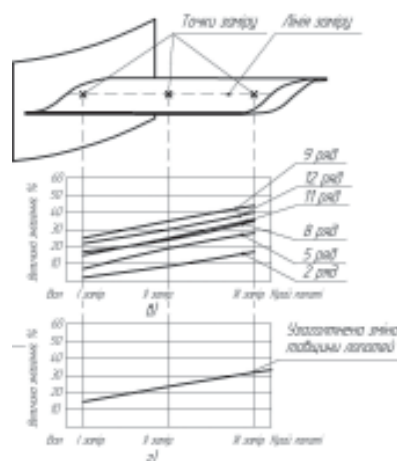


Рис. 5. Характер зношення лопатей колонного дифузійного апарата ЕКА-3 на Саливківському цукровому заводі:

- а — зміна товщини лопатей по їх довжині;  
б — узагальнена зміна товщини металу лопатей

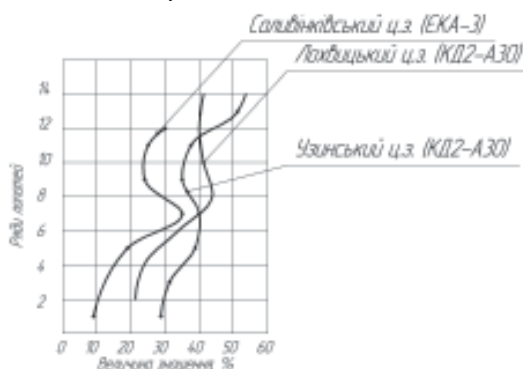


Рис. 6. Графічна залежність величини зношення товщини металу лопатей по висоті колони

**Висновки.** Зміна продуктивності колони потребує дотримання раціонального співвідношення між її діаметром та висотою з використанням транспортних систем, які б забезпечували рівномірне питоме навантаження об'єму апарата по висоті та його діаметрі.

### ЛІТЕРАТУРА

1. *Верхола Л.А., Пушанко Н.Н., Василенко С.М., Табурчак В.Г.* Энергосберегающие направления модернизации колонных диффузионных установок. // Сахар. — 2010. — №8. — с. 34—40.
2. *Пушанко Н.Н.* Совершенствование процесса экстрагирования и его аппаратного оформления в свеклосахарном производстве. Дисс. докт. техн. наук. — К.: КТИПП. — 1983. — 383 с.
3. *Серёгин А.А.* Колонные диффузионные установки нового поколения ЭКА // Сахар — 2004. — №1. — с. 35—39.
4. *Прилуцкий И.И.* Основные факторы, влияющие на процесс диффузии в колонных аппаратах // Пищевая промышленность ЦИНТИ 62. — №8 — с. 5—8.

Одержана редколлегією 17.01.2011 р.

ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

УДК 621.8

**В.А. ПІДДУБНИЙ**, д-р техн. наук,

**Р.М. ЛЕУС**,

**Л.А. ФЕДОРЕНКО**

*Національний університет харчових технологій*

## ДИНАМІКА ПРОЦЕСІВ ВИБІГУ І ГАЛЬМУВАННЯ В ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИНАХ

Виконано аналіз і розроблено математичні моделі щодо процесів вибігу і гальмування в технологічних машинах, розрахункові схеми яких представлені двомасовими системами.

**Ключові слова:** динаміка, вибіг, гальмування, рівняння руху, переміщення, опір.

Выполнен анализ и получены математические модели процессов выбега и торможения в технологических машинах, расчетные схемы которых представлены двухмассовыми системами.

**Ключевые слова:** динамика, выбег, торможение, уравнения движения, перемещения, сопротивление.

The analysis and derived mathematical models of coasting and braking technology machines, computational schemes which are shown two-mass systems.

**Keywords:** dynamics, coasting, braking, the equations of motion, movement, resistance.

В сучасних машинах використовують механічне, електромеханічне або електричне гальмування. За умови механічного гальмування кінетична енергія механізмів машин переходить в роботу сил тертя [1, 2].

Використовуються з числа видів електрогальмування такі як динамічне, зверхсинхронне і гальмування противмиканням.

У зв'язку з поширенням частотних перетворювачів і можливості зміни частот обертання роторів асинхронних електродвигунів одержано нові можливості в організації режимів вибігу і гальмування технологічних машин.

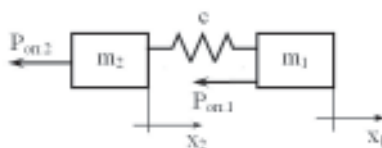


Рис. 1. Розрахункова схема до режим вибігу двомасової системи

Гальмівні пристрої механічної дії поділяються:

1. За призначенням — на стопорні (ті, що зупиняються і утримують механізми у стані спокою) і спускні, які обмежують швидкість руху;
2. За конструктивним виконанням робочих частин — на стрічкові, колодкові, дискові тощо;

© В.А. Піддубний, Р.М. Леус, Л.А. Федоренко, 2011

3. За взаємодією робочих поверхонь при відсутності зовнішнього робочого зусилля — на замкнуті, в яких поверхні тертя постійно притиснуті одна до одної і гальмування припиняється під дією зовнішньої сили, та відкриті (розімкнуті), в яких поверхні нормально не притиснуті і для гальмування необхідні зовнішні зусилля;

4. За видом керування — на автоматичні і керовані.

До числа вимог стосовно таких пристроїв відносяться достатній за величиною гальмівний момент, можливість підтримання заданого закону гальмування, швидке замикання і розмикання, надійність і нескладність влаштування тощо [3, 4].

Завданням цього теоретичного дослідження визначено розробку математичних моделей процесів вибігу і гальмування.

Розглянемо кілька випадків режимів вибігу і гальмування машин на прикладі двомасової моделі.

**Вибіг двомасової системи за наявності сил опору  $P_{on.1}$  та  $P_{on.2}$ .** Режим вибігу настає від моменту відключення рушійної сили, коли ведуча і ведена маси мають швидкість усталеного руху (рис. 1). Тоді рівняння руху мас  $m_1$  і  $m_2$  записуються у формі:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = -c(x_1 - x_2) - P_{on.1}; \\ m_2 \ddot{x}_2 = c(x_1 - x_2) - P_{on.2}. \end{cases} \quad (1), (2)$$

Перетворимо останню систему до рівняння пружних сил і приведемо її до виду

$$\ddot{x}_1 + \frac{c}{m_1}(x_1 - x_2) = -\frac{P_{on.1}}{m_1}; \quad (3)$$

$$\ddot{x}_2 - \frac{c}{m_2}(x_1 - x_2) = -\frac{P_{on.2}}{m_2}. \quad (4)$$

Віднімемо від умови (3) умову (4)

$$\ddot{x}_1 - \ddot{x}_2 + \left(\frac{c}{m_1} + \frac{c}{m_2}\right)(x_1 - x_2) = \frac{P_{on.2}}{m_2} - \frac{P_{on.1}}{m_1} \quad (5)$$

і помножимо всі складові рівняння (5) на жорсткість системи  $c$ :

$$c(\ddot{x}_1 - \ddot{x}_2) + c \frac{cm_2 + cm_1}{m_1 m_2} (x_1 - x_2) = c \left( \frac{P_{on.2}}{m_2} - \frac{P_{on.1}}{m_1} \right). \quad (6)$$

Оскільки відомо, що

$$c(x_1 - x_2) = P_{np} \quad \text{і} \quad c(\ddot{x}_1 - \ddot{x}_2) = \ddot{P}_{np},$$

то

$$\ddot{P}_{np} + \frac{c(m_2 + m_1)}{m_1 m_2} P_{np} = c \left( \frac{P_{on.2}}{m_2} - \frac{P_{on.1}}{m_1} \right). \quad (7)$$

Запишемо початкові умови системи:

$$t_{(n)} = 0; \quad x_{(n)1} = 0; \quad x_{(n)2} = -P_{on.2}/c; \quad \dot{x}_{(n)1} = V; \quad \dot{x}_{(n)2} = V;$$

$$P_{np(n)} = c(x_{(n)1} - x_{(n)2}) = P_{on.2}; \quad \dot{P}_{np(n)} = c(\dot{x}_{(n)1} - \dot{x}_{(n)2}) = 0.$$

Розв'язання рівняння (7) записуємо у формі

$$P_{np} = A \sin \sqrt{\frac{c(m_1 + m_2)}{m_1 m_2}} t + B \cos \sqrt{\frac{c(m_1 + m_2)}{m_1 m_2}} t + \frac{P_{on.2} m_1 - P_{on.1} m_2}{m_1 + m_2}. \quad (8)$$

Знайдемо сталі інтегрування  $A$  і  $B$ , підставляючи вибрані початкові умови

$$P_{on.2} = B + \frac{P_{on.2} m_1 - P_{on.1} m_2}{m_1 + m_2};$$

ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

$$B = P_{on,2} - \frac{P_{on,2}m_1 - P_{on,1}m_2}{m_1 + m_2}; \quad A = 0. \quad (9)$$

Тоді остаточно одержуємо

$$P_{пр} = \left( P_{on,2} - \frac{P_{on,2}m_1 - P_{on,1}m_2}{m_1 + m_2} \right) \cos \sqrt{\frac{c(m_1 + m_2)}{m_1 m_2}} t + \frac{P_{on,2}m_1 - P_{on,1}m_2}{m_1 + m_2}. \quad (10)$$

Для знаходження екстремальних значень  $P_{пр}$  виконаємо диференціювання останнього рівняння:

$$\dot{P}_{пр} = \left( P_{on,2} - \frac{P_{on,2}m_1 - P_{on,1}m_2}{m_1 + m_2} \right) \sqrt{\frac{c(m_1 + m_2)}{m_1 m_2}} \sin \sqrt{\frac{c(m_1 + m_2)}{m_1 m_2}} t_{ек} = 0. \quad (11)$$

Звідси витікає, що

$$\sin \sqrt{\frac{c(m_1 + m_2)}{m_1 m_2}} t_{ек} = 0; \quad \sqrt{\frac{c(m_1 + m_2)}{m_1 m_2}} t_{ек} = 0; \pi; 2\pi \dots$$

Таким чином, екстремальне пружне навантаження в режимі вільного вибігу мас  $m_1$  і  $m_2$  відповідає значенням

$$t_{ек} = 0; \quad t_{ек} = \pi \sqrt{\frac{m_1 m_2}{c(m_1 + m_2)}} \dots$$

В першому випадку маємо

$$P_{пр,ек} = P_{on,2}$$

а у другому —

$$P_{пр,ек} = -P_{on,2} + 2 \frac{P_{on,2}m_1 - P_{on,1}m_2}{m_1 + m_2}. \quad (12)$$

Як бачимо, друге екстремальне значення  $P_{пр}$  залежить від співвідношення величин опорів  $P_{on,1}$ ,  $P_{on,2}$  та мас  $m_1$  і  $m_2$ .

Якщо до числа задач дослідження процесів вибігу відноситься визначення координат переміщення  $x_1$  та  $x_2$ , то систему рівнянь (1) та (2) слід перетворити до двох рівнянь четвертого порядку. Для цього виконаємо подвійне диференціювання вказаних рівнянь:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + c \dot{x}_1 - c \ddot{x}_2 &= 0; \\ m_2 \ddot{x}_2 - c \dot{x}_1 + c \ddot{x}_2 &= 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Додаючи рівняння (1) до рівняння (2) маємо

$$m_1 \ddot{x}_1 + m_2 \ddot{x}_2 = P_{on,1} - P_{on,2}. \quad (14)$$

Звідси

$$\ddot{x}_1 = \frac{-P_{on,1} - P_{on,2}}{m_1} - \frac{m_2 \ddot{x}_2}{m_1}; \quad (15)$$

$$\ddot{x}_2 = \frac{-P_{on,1} - P_{on,2}}{m_2} - \frac{m_1 \ddot{x}_1}{m_2}. \quad (16)$$

Виконаємо підстановку залежностей (15) та (16) в умови (13)

$$m_1 \ddot{x}_1 + c \dot{x}_1 + c \left( \frac{P_{on,1} + P_{on,2}}{m_2} + \frac{m_1 \ddot{x}_1}{m_2} \right) = 0;$$

$$\ddot{x}_1 + \frac{c \dot{x}_1}{m_1} + \frac{c \ddot{x}_1}{m_2} = -\frac{c(P_{on,1} + P_{on,2})}{m_1 m_2};$$

ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

$$\ddot{x}_1 + \frac{c(m_1+m_2)}{m_1 m_2} \dot{x}_1 = -\frac{c(P_{on.1}+P_{on.2})}{m_1 m_2}; \quad (17)$$

$$\ddot{x}_2 + \frac{c}{m_2} \left( \frac{P_{on.1}+P_{on.2}}{m_1} + \frac{m_2 \ddot{x}_2}{m_1} \right) + \frac{c \dot{x}_2}{m_2} = 0;$$

$$\ddot{x}_2 + \frac{c(m_1+m_2)}{m_1 m_2} \dot{x}_2 = -\frac{c(P_{on.1}+P_{on.2})}{m_1 m_2}. \quad (18)$$

Розв'язання рівнянь (17) і (18) потребує додаткових початкових умов. Знайдемо їх за відомих

$$x_{(n)1}=0; \quad x_{(n)2} = -P_{on.2}/c; \quad \dot{x}_{(n)1}=\dot{x}_{(n)2}=V;$$

$$\begin{aligned} \ddot{x}_{(n)1} &= -\frac{c}{m_1} (x_{(n)1} - x_{(n)2}) - \frac{P_{on.1}}{m_1} = -\frac{c}{m_1} \left( 0 - \frac{P_{on.2}}{c} \right) - \frac{P_{on.1}}{m_1} = \\ &= \frac{P_{on.2}}{m_1} - \frac{P_{on.1}}{m_1} = \frac{P_{on.2} - P_{on.1}}{m_1}; \end{aligned}$$

$$\ddot{x}_{(n)2} = \frac{c}{m_2} \left( 0 - \frac{P_{on.2}}{c} \right) - \frac{P_{on.2}}{m_2} = 0; \quad \ddot{x}_{(n)1} = 0; \quad \ddot{x}_{(n)2} = 0.$$

На рис. 2 та 3 наведено результати розрахунків по визначенню  $P_{np}$  за формулою (10) за різних співвідношень мас  $m_1$  та  $m_2$ . Відмітимо, що за подібної взаємодії максимальні пружні навантаження не перевищують величини  $P_{np.2}$ .

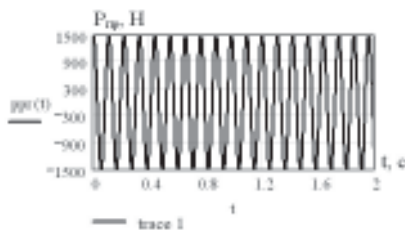


Рис. 2. Графіки залежності  $P_{np} = P_{np}(t)$  за значень  $m = 100$  кг;  $m_2 = 150$  кг;  $P_{on.1} = 1000$  Н;  $P_{on.2} = 1500$  Н;  $c = 200000$  Н/м

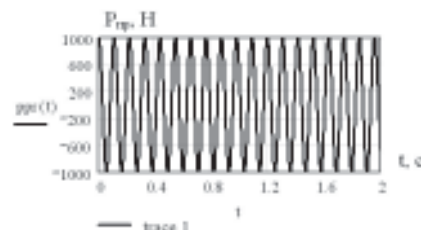


Рис. 3. Графіки залежності  $P_{np} = P_{np}(t)$  за значень  $m_1 = 150$  кг;  $m_2 = 100$  кг;  $P_{on.1} = 1500$  Н;  $P_{on.2} = 1000$  Н;  $c = 200000$  Н/м

**Висновки.** Виконані дослідження режимів вибігу в двомасових схемах дозволяють відмітити наступне.

1. За необхідності визначення пружних навантажень в системі вихідна система з двох диференціальних рівнянь руху ведучої і веденої мас доцільно трансформувати до диференційного рівняння пружних сил.
2. У випадку необхідності визначення кінематичних параметрів розв'язанню підлягає початкова система рівнянь руху.
3. В режимі вибігу системи на її власну частоту коливань впливають ведуча і ведена маси та жорсткість їх пружного зв'язку.
4. Взаємодія між масами за вибігу супроводжується навантаженнями пружного елемента, які не перевищують величину сили опору переміщення веденої маси.

**ЛІТЕРАТУРА**

1. Кодра Ю.В., Стоцько З.А. Технологічні машини. Розрахунок і конструювання. — Львів: “Львівська політехніка”, — 2004. — 468 с.

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

2. Берник П.С., Стоцько З.А., Паламарчук І.П. та ін. Механічні процеси і обладнання переробного та харчового виробництва. — Львів: “Львівська політехніка”, — 2004. — 336 с.
3. Соколенко А.І., Яровий В.Л., Піддубний В.А. та ін. Моделювання процесів пакування. — Вінниця: Nova knuha, — 2004. — 272 с.
4. Комаров М.С. Динамика механизмов и машин. — М.: Машиностроение, — 1969. — 296 с.

*Одержано редколегією 20.01.2011 р.*



УДК 621.87

М.В. ЯКИМЧУК, канд. техн. наук  
Національний університет харчових технологій

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗУСИЛЬ УТРИМАННЯ УПАКОВОК ВАКУУМНИМИ ЗАХОПЛЮЮЧИМИ ПРИСТРОЯМИ

---

В статті розглядається математична модель для визначення зусиль утримання упаковок вакуумними захоплюючими пристроями в роботизованих лініях для укрупнення вантажних одиниць. Визначено вплив матеріалів присосок, їх розмірів, величини вакууму та товщини стінок на зусилля утримання упаковок. Отримані результати можна використовувати для розрахунку та вибору вакуумних захоплюючих пристроїв.

**Ключові слова:** вакуумні захоплюючі пристрої, зусилля утримання, присоска, величина вакууму, групова упаковка.

В статье рассматривается математическая модель для определения усилий удержания упаковок вакуумными захватывающими устройствами в роботизованных линиях для укрупнения грузовых единиц. Определено влияние материалов присосок, их размеров, величины вакуума и толщины стенок на усилия удержания упаковок. Полученные результаты можно использовать для расчета и выбора вакуумных захватывающих устройств.

**Ключевые слова:** вакуумные захватные устройства, усилия удержания, присоска, величина вакуума, групповая упаковка.

In this paper we consider a mathematical model to determine the holding force packages with vacuum clamping device in robotic lines for the consolidation of cargo units. The influence of materials suckers, their size, the magnitude of vacuum and wall thickness of the efforts of retention packages. The results can be used for the calculation and selection of vacuum clamping device.

**Key words:** vacuum grippers, retention efforts, sucker, the magnitude of the vacuum.

Сьогодення пакувальної галузі характеризується розробкою та використанням великої номенклатури упаковок, які мають різні форми, розміри, маси, фізичні та механічні характеристики матеріалів з яких вони виготовлені, оригінальні споживчі елементи. Для укрупнення вантажних одиниць з різних по типорозміру упаковок, значної номенклатури продукції, та необхідності переналадження системи при зміні форм, розмірів, ваги, циклу укладання використовуються роботизовані комплекси.

Одним із основних модулів промислових роботів є захоплюючі пристрої. Захоплюючі пристрої здійснюють захоплення та утримування в певному положенні об'єкт переміщення і використовуються як змінні елементи промислових роботів. Всі захоплюючі пристрої умовно, в залежності від класифікаційних ознак, поділяються на групи (рис. 1). Кожна група розрізняється способом контактування робочих органів з елементами упаковки. До їх числа відносяться механічний, камерний, вакуумний, магнітний, комбінований та пасивний способи.

Механічні і камерні захоплюючі пристрої працюють за рахунок притискаючих зусиль та сил тертя. Робочими елементами в таких пристроях є губки, пальці, кліщі, важелі або гумові камери. В якості утримуючих пристроїв використовують захоплюючі пристрої важільного,

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

важільно-плунжерного, клино-плунжерного, рейково-важільного, кулісно-важільного і клино-важільного самоцентруючого типу. Між приводом захоплюючого пристрою і його робочим органом, який контактує з об'єктом, встановлюють допоміжні пружні елементи. Пружні елементи, у вигляді спеціальних тросів, пасових або ланцюгових передач забезпечують передачу крутного моменту та рушійної сили.

В особливу групу виділяються підтримуючі механічні захоплюючих пристроїв. В них для утримання об'єкта використовуються спеціальні рухомі поверхні, які за рахунок механічного переміщення потрапляють під днища упаковок або в спеціальні отвори чи виступи, які є конструктивними складовими упаковок. Робочими елементами в таких пристроях здебільшого є лопатки, вилки, перфоровані площини, петлі, гаки, стулки. Вакуумні та магнітні захоплюючі пристрої працюють за рахунок сил, природа яких базується на явищах електростатичного притягування, адгезії, ежекції.

За видом керування захоплюючі пристрої умовно поділяють на чотири групи:

1. Некеровані: захоплення об'єктів в таких пристроях відбувається за рахунок постійних сил, утворених за допомогою пружинних механічних пристроїв, постійних магнітів тощо. Для відриву об'єктів від захоплюючої головки необхідно прикласти до об'єкту силу, більшу за силу утримання.

2. Командні захоплюючі пристрої: конструкція таких пристроїв забезпечує захват та звільнення упаковок лише за попередньою командою, отриманою від додаткового робочого органу. До додаткових органів відносяться пневмоциліндри, електродвигуни, електромагнітні котушки і тощо.

3. Програмовані захоплюючі пристрої: конструкція таких пристроїв може забезпечити зміну зусилля притискання, корегування положення виконавчих органів у відповідності з попередньо заданими розмірами упаковок. Контроль та зміна параметрів досягається програмним забезпеченням та спеціальними робочими органами з можливістю контролю за рахунок датчиків зворотного зв'язку.

4. Адаптовані захоплюючі пристрої: такі пристрої в своїй конструкції містять різні давачі, які формують інформацію про процес захоплення, визначають форму упаковок, його масу, зусилля притискання, крок між упаковками та їх положення під час транспортування.

Захоплюючий пристрій може виконувати наступний вид руху: плоско паралельний, поступальний, обертальний.

Вимоги до захоплюючих пристроїв умовно можна поділити на дві групи:

загальні та спеціальні [3]. До загальних вимог відносять надійність захоплення та утримання об'єкту, неможливість пошкодження його товарного виду чи часткового руйнування упаковки. Спеціальні вимоги пов'язані з особливістю технологічного процесу та виробничих умов формування групової упаковки. В разі, якщо групова упаковка формується з виробів різної форми або маси, для її переміщення застосовують універсальні захоплюючі пристрої або захоплюючі пристрої, що мають змінні робочі органи.

Проведений аналіз конструкцій захоплюючих пристроїв показав, що найбільш вживаними є пневматичні захоплюючі пристрої, а серед них домінують пристрої, в яких для утримання упаковок використовується вакуум.

Такі пристрої є найбільш універсальними щодо вимог форм та матеріалу об'єкту захоплення та прості в експлуатації і конструкції. Сам пристрій та система керування ним складається лише із двох основних елементів — присосок та пристрою для отримання вакууму. Матеріал присосок вибирають в залежності від виду матеріалу упаковки, форми її поверхні та режиму роботи. Для отримання вакууму використовують компресор або вакуумний генератор. Вибір пристрою утворення вакууму залежить від глибини вакууму та його витрат. Так великі витрати по вакуумуванню забезпечує компресор, а невеликі — вакуумний генератор.

За результатами проведених досліджень можна стверджувати, що основним недоліком вакуумних захоплюючих пристроїв є можливість відриву упаковок в процесі їх переміщення. Відриви можливі лише за умови надмірного впливу кінематичних та динамічних навантажень, величини яких перевищують допустимі, а також у випадку, коли замала сила утримання. Для не уможливлення відриву, як правило, обмежують кінематичні та динамічні параметри процесу переміщення, що суттєво зменшує продуктивність обладнання або збільшують величину зусилля захоплення.



## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

Метою даної роботи є дослідження зміни зусилля захоплення упаковки вакуумними захоплюючими пристроями в залежності від величини тиску та геометричних розмірів присосок

Так під час переміщення упаковки на неї з боку присоски діють наступні сили (рис.2) сила переміщення  $N$ , сила тертя ковзання між упаковкою та присоскою  $F_{тер}$ , сила адгезії упаковки з присоскою  $A$ . Одночасно на упаковку додатково діють сили, які прагнуть відірвати або зрушити її відносно присоски. Це сила тяжіння  $G$  упаковки, сили інерції  $J_u$ , сила опору  $W$  повітря і сила пружності  $Q_y$  присоски.

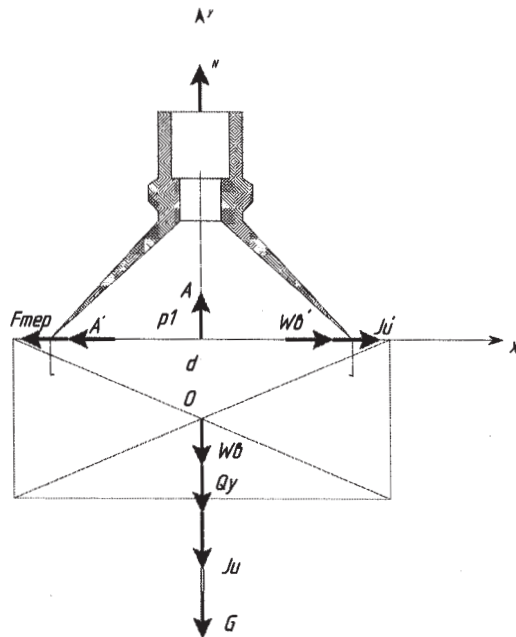


Рис. 2. Схема сил в дії процесі захоплення упаковки вакуумною присоскою

Умова надійного переміщення упаковки має вигляд:

$$N > G + J_u + W_B + Q_y - A \quad (1)$$

Вплив сил інерції  $J_u$  та опору повітря  $W_B$  не повинні зрушувати вантаж відносно кромки присоски. Умова переміщення з урахуванням додаткового опору має вигляд:

$$\mu N > J_u + W_B - A', \quad (2)$$

де  $\mu$  — коефіцієнт тертя між кромкою присоскою та упаковкою;  $A'$  — сила адгезії між присоскою та упаковкою у напрямі зрушення.

Теоретичне зусилля захоплення визначається, як

$$TN = (p_a - p_1)S_3, \quad (3)$$

де,  $p_1$  — тиск всередині порожнини захвату;  $p_a$  — тиск довкілля;  $S_3$  — площа зрізу захвату у місці стикання з виробом

Якщо підставити умови (1) і (2) в рівняння (3) з якого визначимо, величину перепаду тиску в порожнині присосок під час перенесення упаковки :

$$p_a - p_1 \geq \frac{1}{S_3} (G + J_u + Q_y + \frac{J_u + W_B}{\mu} + W_B - A') \quad (4)$$

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

Якщо за умовами роботи вакуумного захоплюючого пристрою зрушуюче зусилля з упаковкою відсутнє, що може мати місце, наприклад, в робото технічних комплексах під час підйому упаковки з невеликою швидкістю то для такого випадку необхідна різниця тиску визначається з формули:

$$p_a - p_1 \geq \frac{1}{S_3} (G + J_H + Q_y + W_B - A) \quad (5)$$

З рівнянь (4) і (5) видно, що величина сил, які протидіють силам, що прагнуть відірвати упаковку від присоски або зсунути її, пропорційні площі присоски  $S_3$ , а за наявності додаткової рушійної сили ще і коефіцієнту тертя  $\mu$ .

Результати експерименту довели, що еластична присоска має меншу вантажопідйомність в порівнянні з жорсткою такого ж розміру. Пояснюється це тим, що дійсна (ефективна) площа  $S_{31}$  присоски менша за геометричну площу поверхні зрізу за рахунок ущільнюючого пояска на поверхні контакту присоски з вантажем, який забезпечує герметичність порожнини. Для такої присоски зусилля захоплення визначається з виразу:

$$N_1 = S_3(p_a - p_1) = \frac{\pi(d - 2b)^2}{4} (p_a - p_1), \quad (6)$$

де  $d$  — діаметр зовнішньої кромки захвату;  $b$  — ширина ущільнюючого поясочка.

Для визначення ефективної площі присосок була побудована експериментальна установка рис. 3. Конструкція установки складається з корпусу 4, в якому встановлено прозоре листове скло 2, до якого знизу кріпилася присоска 1. Вакуум для установки забезпечував ежектор 6 через систему трубопроводів. Глибину вакууму вимірювали за допомогою вакуумметра 5. Для визначення зміни розмірів контакту присоски під час роботи, на склі були закріплені дві лінійки 3. Конструкція установки додатково передбачала прикладання зусилля відриву до присоски з можливістю його регулювання за допомогою гвинтової пари 8. Величина зусилля відриву вимірювалась динамометром 7.

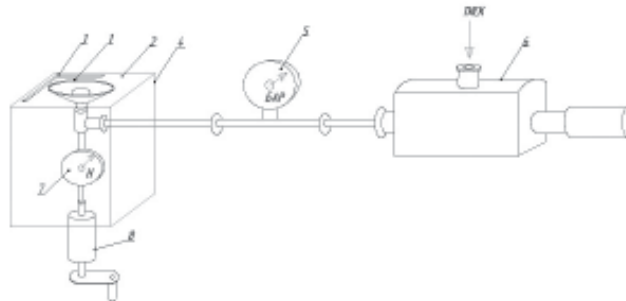


Рис. 3. Схема експериментальної установки

У порожнину присоски подавали рідину чорного кольору. При включенні вакууму присоска притискалась до скла, а рідина давала чітке зображення вакуумованої площі і ущільнюючого поясочка.

При збільшенні відривного зусилля, змінювалася поверхня контакту присоски зі склом а відповідно і площа, яка фіксувалася.

Результати дослідження представлені у вигляді графіка на рис. 4 який показує залежність зміни ефективного діаметру  $d_e$  та діаметру зрізу присоски при різному значенні вакууму. Суцільною лінією на графіку показана зміна діаметрів присосок, виготовленої з жорсткої гуми, а штриховою — для присосок з м'якої гуми.

Було зроблено порівняльну характеристику теоретичних та експериментальних даних зусиль захоплення при різних значеннях вакууму. Результати аналізу представлено в таблиці. Для експериментів було задіяно два типи присосок з діаметром 36 міліметрів, що відрізнялись товщиною стінок захоплюючої частини і маркою гуми.

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

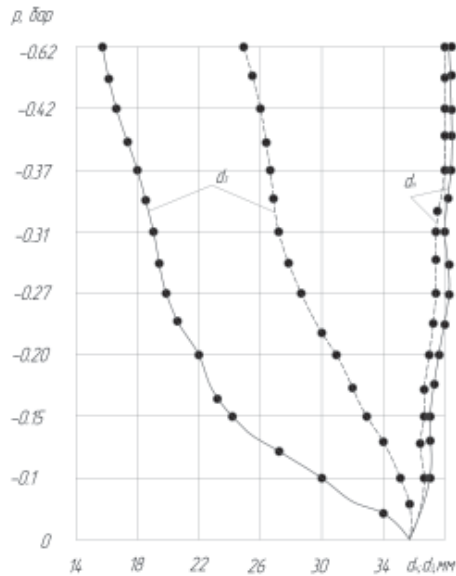


Рис. 4. Графіки зміни ефективного і зовнішнього діаметрів присосок як функція вакууму

Таблиця. Значення відривних зусиль, Н

Фактичне відривне зусилля, Н	Тип I жорсткий матеріал			Тип II м'який матеріал		
	Розрідження в порожнині захвату, бар.					
	-0.2	-0.4	-0.6	-0.2	-0.4	-0.6
10	11,1	10,8	10,3	9,3	9,2	8,3
15	16,5	—	—	14,1	—	—
20	—	22,6	22	—	19,1	19,9
30	—	—	—	—	31,3	29,8
35	—	35,3	36,4	—	—	—

**Висновки.** Таким чином проведені дослідження показали, що для надійного захоплення та утримання упаковок, ущільнюючий поясок присосок повинен мати ширину, яка задовольняє умову  $b > (0,08 \div 0,12)d$ . Ефективна площа присоски повинна задовольняти умову  $S_3 > (0,6 - 0,7)d^2$ . Дійсна величина сили захоплення менша за теоретичну і знаходиться в межах:

$$N_1 = (0,6 \div 0,7)N.$$

Вказані відхилення сили слід враховувати коефіцієнтом запасу  $K = \frac{N_1}{N}$ , який знаходиться в межах 1,3—1,4.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Бабич А.В., Баранов А.Г., Калабин И.В. и др. Промышленная робототехника: Под редакцией Шифрина Я.А. — М.: Машиностроение. — 1982. — 415 с.
2. Шахинпур М. Курс робототехники: Пер. с англ. — М.; Мир. — 1990. — 527 с.
3. Фу К., Гансалес Ф., Лик К. Робототехника: Перевод с англ. — М. Мир. — 1989. — 624 с.

Одержано редколегією 25.01.11 р.

УДК 663.62

**В.А. ПІДДУБНИЙ**, д-р техн. наук,  
**В.М. КРИВОРОТЬКО**, канд. техн. наук,  
**В.Д. ЙОВБАК**

*Національний університет харчових технологій*

## **ВАКУУМНЕ ОХОЛОДЖЕННЯ РІДИН І РІДИНОВМІСТКИХ СЕРЕДОВИЩ**

Виконано аналіз фізичного підґрунтя і наслідків вакуумування рідинних і рідиновмістких середовищ. Розроблено математичну модель динаміки охолодження вакуумованих середовищ.

**Ключові слова:** вакуум, адіабатне кипіння, охолодження, модель, термодинаміка, рівновага.

Проведен анализ физических основ и последствий вакуумирования жидкостных и влагосодержащих сред. Разработана математическая модель динамики охлаждения вакуумированных сред.

**Ключевые слова:** вакуум, адиабатное кипение, охлаждение, модель, термодинамика, равновесие.

The analysis of physical principles and the consequences of pumping out the liquid-liquid and water-containing environments. A mathematical model of the dynamics of cooling evacuated environments.

**Keywords:** vacuum, adiabatic boiling, cooling, model, thermodynamics, equilibrium.

Термодинамічні параметри фазових переходів речовин виступають в ролі реперних рівнів, за яких довільна зміна тиску або температури стає неможливою [1—3].

Наприклад, вода в рідинному стані може існувати в певних межах тисків і кожному значенню останнього відповідає температура переходу з рідинного стану в паровий. При цьому енергетичний потенціал визначається температурою і швидкоплинність його зміни супроводжується певною інерційністю і залежить від коефіцієнта теплопередавання системи, поверхні теплопередавання і температурного напору. Коефіцієнт теплопередавання у значній кількості випадків лімітується коефіцієнтами тепловіддачі  $b_1$  та  $b_2$ , максимальні значення яких досягаються в режимах фазових переходів, що відображає, наприклад, вибір термодинамічних параметрів холодильних циклів, організації системи нагрівання і кип'ятіння середовищ в апаратах з сорочками тощо. Однак навіть в умовах реалізації теплообміну з фазовими переходами швидкість зміни енергетичного потенціалу оброблюваного середовища і його температури певним чином лімітовані [1]. Інші можливості з точки зору порушення термодинамічної рівноваги систем стосуються такого параметра, як тиск. Останній без особливих термодинамічних ускладнень можливо швидкоплинно нарощувати або знижувати. Проте нарощування тиску стан термодинамічної нерівноваги віддаляє, а за різкого зниження досягається нестабільний стан з наступним етапом адіабатного кипіння рідини з генеруванням парової фази [2]. Використання режимів накопичення енергетичних теплових потенціалів з наступним досягненням режимів адіабатного генерування парової фази покладені в основу відомих дискретно-імпульсних технологій, хоча це не єдиний приклад. Подібні переходи і трансформації енергетичних і матеріальних потоків мають місце в технологіях розварювання крохмалевмісткої сировини в спиртовій галузі, при одержанні екструзійних продуктів, в інших спеціальних технологіях.

Переведення рідинних або вологовмістких середовищ в режими адіабатного генерування парової фази супроводжуються найбільш високими з числа відомих потужностями енергетичних

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

трансформацій [1—2]. Це означає можливість швидкісного охолодження середовищ, динаміка якого визначається глибиною входження в нерівноважний стан. Оскільки генерування парової фази здійснюється за рахунок енергетичного потенціалу середовища, то його температура стрімко знижується. Перебіг таких енергетичних трансформацій супроводжується потужностями, які щонайкраще на порядок перевищують інші технології енергетичних перетворень систем.

Взаємодія утворюваної парової фази з компонентами середовищ визначає цільові перетворення останніх, досягається руйнування складових органічного і неорганічного походження на рівнях, що наближаються до клітинних, у тому числі і на рівнях летальних ефектів по мікрофлорі.

Сукупність фізичних явищ, що супроводжують перебування середовищ в стані термодинамічної нерівноваги, привели до поширення вакуумних технологій як складових основної технології, так і завершальних стадій виробництва, пов'язаних з вакуумним упаковуванням продукції.

Таким чином, зниження тисків в рідинних системах або у вологонасичених середовищах нижче критичних, які відповідають режимам фазових переходів, означає можливість переведення рідинної фракції у метастабільний стан. З точки зору створення умов зберігання якісних показників оброблюваної сировини є сполучення параметрів, за яких відбуваються процеси адіабатного кипіння з температурами в діапазоні 30—70 °С.

В значній кількості харчових технологій існує необхідність прискореного охолодження сировинних потоків, у тому числі і за рахунок використання вакуумних технологій. Однак стосовно режимів адіабатного кипіння термодинамічні трансформації середовищ в їх аналітичному моделюванні потребують доповнень.

У зв'язку з викладеним метою цього дослідження обрано визначення динаміки охолодження рідинних або вологовмістких середовищ за рахунок переведення їх рідинної фази в режими адіабатного кипіння.

Важливим показником всякого процесу є рушійний фактор. Для випадку адіабатного кипіння середовища рушійний фактор визначається глибиною входження в нерівноважний стан, що визначається різницею початкової  $t_{(n)}$  і кінцевої  $t_{(к)}$  температури середовища, яка відповідає температурі кипіння за досягнутого зниженого тиску. При цьому кінцева температура  $t_{(к)}$  є стабілізованим параметром, а плинна температура  $t$  змінюється в межах від  $t_{(n)}$  до  $t_{(к)}$ . Це означає, що за час процесу рушійний фактор зменшується, і це накладає відповідний вплив на систему та інтенсивність генерування вторинної пари і швидкість охолодження.

Розроблено в загальному описі математичну модель охолодження середовища.

Як відмічалось, має місце зниження його температури від  $t_{(n)}$  до  $t_{(к)}$ . припустимо, що в деякий момент часу  $\phi$  температура середовища складає величину  $t$  і перебільшує значення  $t_{(n)}$  на величину  $t - t_{(n)}$ .

Разом з тим відомо, що нескінченно мала кількість теплоти —  $dQ$  на проміжку елементарного часу  $dt$ , передана генерованій парі, пов'язані співвідношенням

$$-dQ = k (t - t_{(к)}) dt, \quad (1)$$

де  $k$  — стала, яка визначається фізико-хімічними властивостями середовища.

При цьому кількість теплової енергії, що втрачається середовищем при охолодженні його в діапазоні температур від  $t$  до  $t_{(к)}$ , визначається рівнянням:

$$Q = mc (t - t_{(к)}), \quad (2)$$

де  $m$  — маса середовища;  $c$  — теплоємність середовища, яку будемо рахувати сталою.

Диференціювання умови (2) приводить до виду

$$dQ = mc dt. \quad (3)$$

Підстановкою значення  $dQ$  в умову (1) одержуємо

$$-mc dt = k (t - t_{(к)}) dt. \quad (4)$$

Перепишемо рівняння (4) у формі



$$\frac{mc}{k} \cdot \frac{dt}{(t - t_{(k)})} = d\tau \quad (5)$$

і виконаємо його інтегрування

$$\frac{mc}{k} \ln(t - t_{(k)}) = \tau + C. \quad (6)$$

Сталу інтегрування  $C$  знайдемо за початкових умов

$$\tau_{(n)} = 0; \quad t = t_{(n)}. \quad (7)$$

Тоді підстановкою початкових умов визначаємо

$$C = -\frac{mc}{k} \ln(t_{(n)} - t_{(k)}). \quad (8)$$

У загальному вигляді динаміка охолодження моделюється умовою

$$\frac{mc}{k} \ln(t - t_{(k)}) = \tau - \frac{mc}{k} \ln(t_{(n)} - t_{(k)}). \quad (9)$$

Віднімаючи від умови (6) залежність (8), одержуємо:

$$\tau = \frac{mc}{k} \ln \frac{t_{(n)} - t_{(k)}}{t - t_{(k)}}. \quad (10)$$

Розв'язання умови (10) відносно  $t$  дозволяє знайти закон охолодження середовища

$$t = t_{(k)} + (t_{(n)} - t_{(k)}) e^{-\frac{k\tau}{mc}}. \quad (11)$$

Реалізація рівняння (11) в прогнозних розрахунках можлива за наявності значень константи  $k$ . Визначення її можливе на основі експериментальних досліджень, в яких плинний час  $\tau$  фіксується одночасно з плинною температурою  $t$  і тоді:

$$k = \frac{mc}{\tau} \ln \frac{t_{(n)} - t_{(k)}}{t - t_{(k)}}. \quad (12)$$

З формалізованої залежності (10) видно, що для виконання умови  $t - t_{(k)}$  час  $\tau \rightarrow \infty$ . Такий результат є наслідком закладеного в основу моделі фізичного підґрунтя, за якого рушійний фактор  $t - t_{(k)}$  безперервно зменшується. В реальних процесах слід дотримуватися умови  $t > t_{(k)}$ .

**Висновки.** Виконані аналітичний огляд і теоретичне дослідження особливостей охолодження вакуумованих середовищ дозволяють відмітити наступне.

1. Вакуумні технології придатні для швидкоплинного охолодження значної номенклатури рідинних або вологовмістких середовищ за рахунок адіабатного утворення в них парової фази.

2. Обробка сировини рослинного або тваринного походження за умови генерування в ній пари супроводжується руйнуванням структур на міжклітинному і навіть клітинному рівнях. В останньому випадку досяжними стають летальні ефекти по мікрофлорі, яка присутня в середовищі.

3. Одержана математична модель закону охолодження середовищ дозволяє здійснювати оцінку перспектив використання вакуумних технологій.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Соколенко А.І., Шевченко О.Ю., Піддубний В.А. та ін. Фізико-хімічні методи обробки сировини і стабілізація харчових продуктів. — К.: Люксар. — 2009. — 454 с.

2. Соколенко А.І., Шевченко О.Ю., Піддубний В.А. Інтенсифікація масообмінних процесів в харчових і мікробіологічних технологіях. — К.: Люксар. — 2008. — 443 с.

3. Гейнце В. Введение в вакуумную технику. Пер. с нем. под ред. Л.А. Леви-тиной. — Т. 1. — М.: Мир, 1960. — 511 с.

Одержано редколегією 25.01.2011 р.

**М.В. ЯКИМЧУК**, канд. техн. наук,  
**О.М. ГАВВА**, д-р техн. наук,  
**А.Є. САМОЙЛИК**

*Національний університет харчових технологій*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВИТРАТ ПОВІТРЯ ЧЕРЕЗ ПОРИСТІ ПАКУВАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

Розроблена математична модель повітропроникності пористих пакувальних матеріалів. Адекватність математичної моделі реальним процесам перевірено експериментальними дослідженнями.

Отримані результати досліджень рекомендовані для застосування під час виконання розрахунків та вибору елементів вакуумних захоплюючих пристроїв пакувального обладнання.

**Ключові слова:** пористий пакувальний матеріал, повітропроникність, упаковка, картон, математичні моделі, витрати повітря.

Разработана математическая модель воздухопроницаемости пористых упаковочных материалов. Адекватность математической модели реальным процессам проверено экспериментальными исследованиями.

Полученные результаты исследований рекомендованы для применения при выполнении расчетов и выбора элементов вакуумных захватывающих устройств упаковочного оборудования.

**Ключевые слова:** пористый упаковочный материал, воздухопроницаемость, упаковка, картон, математические модели, расход воздуха.

A mathematical model for air permeability of porous packaging materials. The adequacy of mathematical models to real processes tested by experimental studies.

The results obtained are recommended for use in performing the calculations and the choice of the elements of vacuum gripping device packaging equipment.

**Keywords:** porous packaging material, breathable, packaging, cardboard, mathematical models of air flow.

Сьогодення пакувальної індустрії характеризується розробкою та використанням великої номенклатури пакувальних матеріалів, які мають різну масу, суттєво відрізняються між собою фізико-хімічними та механічними характеристиками та здатністю забезпечити умови виготовлення оригінальної та функціональної споживчої упаковки для будь-якого харчового продукту.

Упаковки, залежно від здатності зберігати форму, умовно розділяють на дві групи: жорсткі та м'які. Жорсткими називають такі упаковки, які під дією зовнішнього навантаження зберігають початкову форму та розміри. Як правило, найбільш поширеним матеріалом із якого виготовляють жорсткі упаковки є картон. Однією із характеристик картону, як об'єкту переміщення вакуумними захоплюючими пристроями є його пористість, яку можна характеризувати повітропроникністю. Величина повітропроникності картону суттєво впливає на подальше його використання, як пакувального матеріалу, та на конструктивне виконання робочих органів пакувальних машин, особливо при застосуванні вакуумних захоплюючих пристроїв.

Метою даної роботи було аналітично дослідити витрати повітря через матеріали упаковок, які мають пористу структуру.

Для розрахунку параметрів газового потоку через пористий об'єкт були прийняті такі припущення: реальний об'єкт (упаковка) був замінений пластинкою постійної товщини  $b_{om}$ , яка

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

рівномірно пронизана системою капілярів (Рис. 1); пластинка є досить жорсткою; переміщення повітря в порах об'єкта та проміжку  $h_{p6}$  є ламінарним; термодинамічний процес зміни стану повітря в порах об'єкта є ізотермічним.

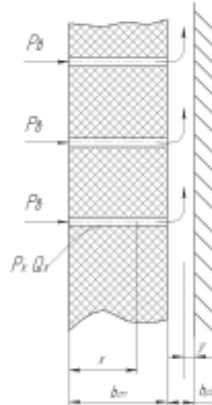


Рис. 1. Схема для розрахунку витрат повітря через плоский пористий матеріал

Об'ємні витрати  $Q_x$  повітря через капіляр у точці  $x$  капіляра можна визначити за формулою, що адекватна виразу для переміщення рідини, що не стискається [1]:

$$Q_x = -\frac{\pi \cdot r_{кп}^4}{8 \cdot \mu_a} \frac{dP_x}{dx}, \quad (1)$$

де  $r_{кп}$  — радіус капіляра, м;  $\mu_a = 1,71 \cdot 10^{-5} + 4,94 \cdot 10^{-8}t$  — коефіцієнт динамічної в'язкості повітря, кг/(с·м);  $t$  — температура повітря, °C;  $\frac{dP_x}{dx}$  — градієнт тиску повітря у точці  $x$  капіляра.

Внаслідок пружних властивостей повітря об'ємна витрата та похідна  $\frac{dP_x}{dx}$  є величинами змінними по довжині капіляра. Для визначення градієнта тиску використовуємо умову сталості масової витрати:

$$Q_x \cdot \rho_x = \text{const}, \quad (2)$$

де  $\rho_x$  — питома маса повітря у точці  $x$  капіляра, кг/м<sup>3</sup>.

Коливання температури повітря при його переміщенні через пористу заготовку незначні, тому справедливе ізотермічне співвідношення [2]:

$$\frac{\rho_x}{P_x} = \frac{1}{R \cdot T_a} = \text{const}, \quad (3)$$

де  $P_x$  — абсолютний тиск повітря у перерізі  $x$  капіляра, Па;  $R = 287,14$  Дж/(кг·К) — газова стала для повітря;  $T_a$  — абсолютна температура атмосферного повітря, К.

Отже, рівняння нерозривності ізотермічного газового потоку в капілярі має вигляд:

$$Q_x \cdot P_x = -\frac{\pi \cdot r_{кп}^4}{8\mu_a} \cdot \frac{dP_x}{dx} \cdot P_x = \text{const}, \quad (4)$$

тобто диференціальна частина рівняння (4) має вигляд

$$\frac{dP_x}{dx} \cdot P_x = \text{const}. \quad (5)$$

Інтегрування рівняння (5) з урахуванням граничних умов  $x=0, P_x=P_a$ ; та  $x=b_{ом}; P_x=P_a$  дає можливість знайти розподіл тиску по довжині капіляра

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

$$P_x^2 = \frac{P_r^2 - P_a^2}{b_{ом}} \cdot x + P_a^2. \quad (6)$$

Тоді похідна

$$\frac{dP_x}{dx} = \frac{P_r^2 - P_a^2}{2 \cdot P_x \cdot b_{ом}}. \quad (7)$$

Підставивши вираз (7) у формулу (1), знайдемо об'ємну витрату повітря через переріз  $x$  капіляра:

$$Q_x = \frac{\pi \cdot r_{кп}^4}{16\mu_d \cdot b_{ом}} \cdot \frac{P_a^2 - P_r^2}{P_x}. \quad (8)$$

З останньої формули можна зробити висновок, що об'ємна витрата повітря  $dQ_n$  на виході з елементарної площадки  $dS$  пористого об'єкту пропорційна різниці квадратів тисків на вході та на виході з нього і визначається за рівнянням (9):

$$dQ_n = \frac{\xi}{\mu_d \cdot b_{ом}} \cdot \frac{P_a - P_r}{P_r} dS, \quad (9)$$

де  $\xi$  — коефіцієнт пропорційності, що характеризує проникність пакувального матеріалу заготовки,  $m^2$ .

Якщо задатись площею заготовки, то об'ємну витрату повітря  $Q_e$  можна визначити з рівняння

$$Q_e = \frac{\xi}{\mu_d \cdot b_{ом}} \cdot \frac{P_e^2 - P_a^2}{P_e} \cdot S_e, \quad (10)$$

За таких умов з рівняння (10) можна визначити коефіцієнт пропорційності  $\xi$ , що характеризує проникність матеріалу

$$\xi = \frac{Q_e \cdot b_{ом} \cdot \mu_d}{S_e} \cdot \frac{P_e}{P_e^2 - P_a^2}. \quad (11)$$

Об'ємну витрату повітря  $Q_e$  для картонних матеріалів було визначити також експериментально за допомогою лабораторної установки Messmer Buchel K513 (Рис. 2). В основу роботи установки покладено дослідження повітропроникності методом Бендтсена, що відповідає загальноприйнятим вимогам для таких пристроїв у відповідності до стандарту ISO 5636-3.



Рис. 2. Загальний вигляд лабораторної установки Messmer Buchel K513 для визначення повітропроникності повітря через пористі матеріали

Повітропроникність картону за Бендтсеном визначалась як середня величина повітряного потоку через паперовий зразок, що був затиснений між металевим кільцем і гумовою прокладкою. Площа поверхні картону, що досліджувався становила  $10\text{cm}^2$ . Металеve кільце притискали до поверхні картону спеціальним пристроєм, забезпечуючи тиск  $100\text{кПа}$ . Далі через кільце подавали стиснене повітря з абсолютним тиском  $P_e$  межах  $140..150\text{кПа}$ . Повітря пропускали через товщину заготовки з подальшим вимірюванням його кількості на виході з неї.

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

В таблиці наведено порівняльну характеристику аналітичних та експериментальних значень витрат повітря через поверхню пористих картонних матеріалів.

### Аналітичні та експериментальні значення повітропроникності картону

Марка картону	Технічна характеристика		Повітропроникність, мл/хв.		Похибка, %
	маса, 1 м <sup>2</sup> г	товщина, мм	експеримент	аналітична	
хром — ерзац макулатурний марки Н першого сорту по ТУ У 05509659-008-2000	300±15	0,40±0,02	62	64	3,2
макулатурний марки НМ ТУ У 21.1 - 05509659-008-2001	290±15	0,40±0,02	77	74	3,9
тарний макулатурний К <sup>Т</sup> - 25 ТУ У 21.1 - 05509659-026:2005	175±10	0,38±0,03	139	144	3,59
для площинних шарів гофрованого картону К— 2 ГОСТ 7420 — 89	175±12	0,35±0,03	122	118	3,3
макулатурний марки ММ ТУ У 21.1- 05509659-020-2001	310±15	0,40±0,02	78	75	3,8
Папір для гофрування Б-2	125±6	0,35±0,02	86	89	3,5%

Експериментальні результати повітропроникності підтвердили адекватність математичної моделі реальним процесам.

**Висновки:** Результати виконаних досліджень можна рекомендувати проектним і машинобудівним підприємствам і організаціям для використання під час створення ефективних зразків вакуумних захоплюючих пристроїв при виконанні технологічних операцій з пористими пакувальними матеріалами.

### ЛІТЕРАТУРА

1. *Дмитриев В.Н., Градецкий В.Г.* Основы пневмоавтоматики. — М.: Машиностроение, 1973. — 360 с.
2. *Дейч М.Е.* Техническая газодинамика. — М.: - Энергия, 1974. — 592с.

*Одержана редколлегією 25.01.2011 р.*

**О.Ю. ШЕВЧЕНКО**, д-р. техн. наук,  
**О.А. БОНДАР**,  
**Л.Ю. ШЕВЧЕНКО**, к-т. біол. наук  
*Національний університет харчових технологій*

## **АЕРАЦІЙНІ СИСТЕМИ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ АЕРОБНОГО ОЧИЩЕННЯ СТОКІВ ПІДПРИЄМСТВ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ**

Запропоновано нове конструктивне оформлення аераційних систем в пристроях для аеробного очищення стоків, визначено енергетичні співвідношення і геометричні параметри самовсмоктувальних аераторів.

**Ключові слова:** аерація, стоки, ежектор, масообмін, самовсмоктувальний аератор-диспергатор, аеробне очищення.

Предложено новое конструктивное оформление аэрационных систем в устройствах для аэробной очистки стоков, определены энергетические соотношения и геометрические параметры самовсасывающих аэраторов.

**Ключевые слова:** аэрация, стоки, эжектор, массообмен, самовсасывающий аэратор-диспергатор, аэробная очистка.

A new constructive design of aeration systems in devices for aerobic wastewater treatment, defined power ratio and geometric parameters samovsmoktivalnyh aerators.

**Key words:** aeration, drainage, ejector, exchange, self-priming aerator- dispersant, aerobic purification.

В системах водопостачання в харчовій промисловості вода використо-вується як сировина, тепловий агент в теплообмінних апаратах, для миття вхідних сировинних потоків, транспортування сировини, для санітарно-побутових потреб тощо. При цьому великі витрати води призводять до необхідності в забезпеченні зворотного водокористування.

Наприклад, у виробництві рідинного діоксиду вуглецю на м'ялясно-спиртових заводах за прямоточних систем водокористування утворюється 40,5 м<sup>3</sup> стічних вод в перерахунок на 1 т продукту, тоді як оборотна система водозабезпечення дозволяє зменшити об'єм стоків майже у 7 разів.

Для харчових виробництв стало традиційним використання механічних, хімічних, фізико-хімічних і біологічних способів очищення стічних вод. Вибір способу очищення залежить від кількості стоків, виду і концентрації забруднень, необхідного рівня очищення, місця розташування підприємства тощо [1, 2].

*Біологічні способи очищення* здійснюються спеціальними мікроорганізмами, здатними окислити забруднювачі стоків до мінеральних речовин. За аеробного очищення використовують активний мул — змішану культуру різних систематичних груп — бактерій, актиноміцетів, грибів, водоростей і членисто-ногих. При цьому основу біомаси складають бактерії. Завдяки тому, що розміри мікроорганізмів малі і загальна поверхня 1 г сухої біомаси складає біля 100 м<sup>2</sup>, очищення стоків відбувається швидко.

Однак відносно велика загальна поверхня контактування мікроорганізмів з середовищем не може розв'язати всі проблеми, оскільки існують певні обмеження по доставці в останне

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

кисню. При цьому необхідним є виконання певного балансу за рівнями БСК або ХСК та подовження часу перебігу обробки середовищ з врахуванням можливостей аераційних систем.

У зв'язку з викладеним завданням даного дослідження є оцінка енергетичних співвідношень і геометричних параметрів самовсмоктувальних аераційних систем.

*Самовсмоктувальні аератори.* До числа самовсмоктувальних відносяться ежектори — аератори і аератори, що створюють розрідження в системах за рахунок взаємодії рухомих частинок з рідинним середовищем.

Принциповою відмінністю цих типів аераторів є те, що диспергування газової фази в рідинній відбувається безпосередньо в їх робочих органах. Оскільки тут має місце взаємодія між потоками за високої концентрації енергії, то результатом останнього є високий рівень дисперсності газової фази. Підвищення енергетичного рівня взаємодії між фазами забезпечує високі і надвисокі швидкості генерування міжфазної поверхні. Саме тому ежекційні масообмінні апарати на протязі останніх 40—50 років визнаються як найбільш ефективні з числа відомих.

У зв'язку з особливостями їх застосування використовуються різні назви: ежектори, інжектори, струминні апарати тощо. Очевидно, що найбільш узагальнюючою для них є остання назва.

Принципова схема струминного апарата наведена на рис. 1, основними елементами якого є робоче сопло, приймальна камера, камера змішування і дифузور.

Процеси, характерні для струминних апаратів підлягають дії трьох за-конів: а) збереження

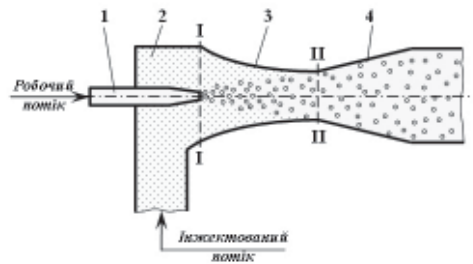


Рис. 1. Схема струминного апарата: 1 — робоче сопло; 2 — приймальна камера; 3 — камера змішування; 4 — дифузор

енергії; б) збереження маси; в) збереження імпульсів.

Названим законам відповідають рівняння:

$$i_p + u i_{in} + i_{zm} = (1 + u) i_{zm}, \quad (1)$$

де  $i_p$ ,  $i_{in}$  та  $i_{zm}$  — ентальпії робочого, інжектованого і змішаного потоків, кДж/кг;  $u = M_{in}/M_p$  — коефіцієнт інжекції, тобто відношення масового інжектованого потоку до масового робочого.

Закону збереження маси відповідає рівняння:

$$M_{zm} = M_p + M_{in}, \quad (2)$$

а закону збереження імпульсів —

$$M_p \omega_{p_i} + M_{in} \omega_{in_i} - (M_p + M_{in}) \omega_{II} = p_{II} f_{II} + \int_{f_i}^f pdf - (p_{p_i} f_{p_i} + p_{in_i} f_{in_i}), \quad (3)$$

де  $M_p$ ,  $M_{in}$ ,  $M_{zm}$  — відповідні масові потоки, кг/с;  $\omega_{p_i}$ ,  $\omega_{in_i}$ ,  $\omega_{II}$  — швидкості робочого та інжектованого потоків на вході в камеру змішування і змішаного потоку в перерізі II—II;  $P_{p_i}$ ,  $P_{in_i}$ ,  $P_{II}$  — статичні тиски робочого та інжектованого потоків у вхідному перерізі I—I і змішаного потоку в перерізі II—II, Па;  $f_{p_i}$ ,  $f_{in_i}$ ,  $f_{II}$  — площі перерізів вхідних робочого та інжектованого потоків та змішаного потоку, м<sup>2</sup>;  $\int_{f_i}^f pdf$  — інтеграл імпульсу сил на бічну поверхню камери змішування між перерізами I—I та II—II.

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

За ізобарного процесу в камері змішування кількість руху на виході з неї змішаного потоку дорівнює сумі кількостей руху вхідних потоків:

$$(M_{p.} + M_{ін.}) \omega_{\parallel} = M_{p.} \omega_{p.} + M_{ін.} \omega_{ін.} \quad (4)$$

звідки

$$\omega_{\parallel} = \frac{M_{p.} \omega_{p.} + M_{ін.} \omega_{ін.}}{M_{p.} + M_{ін.}} \quad (5)$$

Особливістю взаємодії робочого та інжектованого потоків є питомі втрати на удар, які визначаються залежністю:

$$\Delta N = N_{p.} + N_{ін.} - N_{\parallel} = \frac{1}{2} \frac{M_{p.} M_{ін.}}{M_{p.} + M_{ін.}} (\omega_{p.} - \omega_{ін.})^2$$

де  $N_{p.}$ ,  $N_{ін.}$ ,  $N_{\parallel}$  — відповідно потужності потоків.

Визначена потужність  $N_{\parallel}$  змішаного потоку визначає рівень придатності ежектора для здійснення аерації середовищ, у тому числі і за показником тиску, який ним створюється. Так маємо:

$$N_{\parallel} = N = \frac{M_{зм.} \omega^2}{2}, \quad (6)$$

де  $N$  та  $\omega$  — відповідно потужність і швидкість змішаного потоку на виході з ежектора.

Разом з тим:

$$N = PV_{зм.}; \quad (7)$$

$$V_{зм.} = \frac{M_{зм.}}{\rho_{зм.}}; \quad (8)$$

$$\rho_{зм.} = \frac{M_{зм.}}{V_{зм.}} = \frac{M_{p.} + M_{ін.}}{V_{p.} + V_{ін.}} = \frac{M_{p.} + uM_{ін.}}{\rho_{p.} + \rho_{ін.}} \quad (9)$$

Тоді одержуємо:

$$p = \frac{N}{V_{зм.}} = \frac{N\rho_{зм.}}{M_{зм.}} = \frac{N}{M_{зм.}} \cdot \frac{M_{p.} + uM_{ін.}}{\rho_{p.} + \rho_{ін.}} \quad (10)$$

Одержані розрахункові залежності дають можливість за вихідними даними, що стосуються аераційної системи визначити енергетичні співвідношення і геометричні параметри ежектора-аератора.

Особливістю перебігу процесів при цьому є те, що газова фаза в приймальну камеру потрапляє без попереднього стискування. Це означає, що температура її не перевищує температуру повітря навколишнього середовища або навіть менша за неї за рахунок розрідження і явище термошоку в цьому випадку місця не має.

Іншим різновидом масообмінного апарату, що досліджувався є самовсмоктувальний аератор-диспергатор. Його схему наведено на рис. 2.

На корпусі 1 аеротенка монтується електромеханічний привод, вихідним елементом якого є трубовал 2. Нижня частина останнього виконана у формі колектора 3, на якому у радіальних напрямках змонтовані здвоєні порожнинні лопаті, які у поперечних перерізах мають форму аеродинамічних профілів, повернутих випуклими частинами одна до одної з поздовжніми каналами на випуклих поверхнях. Трубовал, колектор і лопаті утворюють ротор, за обертання якого рідинний потік потрапляє в міжлопатеви простір. Завдяки аеродинамічному профілю його швидкість наростає до рівня, за якого в зоні поздовжніх каналів утворюється розрідження і починається засмоктання повітря через лопаті, колектор і трубовал. Взаємодія рідинного і перехресного з ним газового потоків супроводжується високим рівнем диспергування газової фази в рідинній. По своїй фізичній суті профіль перерізу лопатей нагадує форму ежектора-



## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

аератора, а енергонасиченість процесу залежить від колових швидкостей набігання потоку. Проте важливою перевагою відносно ежекторного аератора у цьому випадку є те, що обробці підлягає зона обертання лопатей, а не локальна зона, в якій ежектор змонтовано.

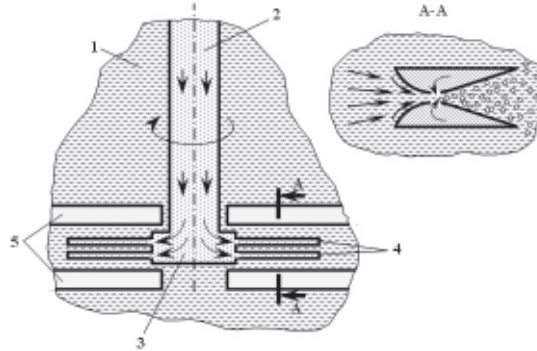


Рис. 2. Схема аератора-диспергатора:  
1 — аеротенк; 2 — трубовал; 3 — колектор; 4 — лопаті;  
5 — радіальні перегородки

Особливістю взаємодії потоків є надзвичайно високий рівень дисперсності газової фази, за якого швидкість спливання бульбашок настільки мала, що зі склянки газорідної суміші газова фаза виходить лише за кілька хвилин.

Розрахунок по визначенню потужності приводу аераційної системи пов'язаний з визначенням опору рідинної системи:

$$P_{\text{оп.}} = \xi F \frac{\rho \omega^2}{2},$$

де  $F$  — площа проекції лопатей на площину, перпендикулярну напрямку швидкості їх руху.

В обертальному русі колова швидкість лопатей є змінною, а тому розрахунок будемо вести за середнім її значенням. Середній радіус лопатей (рис. 3) визначимо за умовою:

$$r_c = r_1 + \frac{r_2 - r_1}{2}. \quad (11)$$

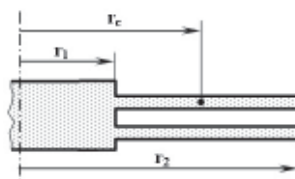


Рис. 3. Розрахункова схема до визначення  $r_c$

Розрахункова колова швидкість:

$$\omega_{\text{роз.}} = \omega r_c, \quad (12)$$

де  $\omega$  — кутова швидкість ротора.

Тоді

$$P_{\text{оп.}} = \xi F \frac{(\omega r_c)^2 \rho}{2},$$

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

а момент опору:

$$M_{\text{оп.}} = P_{\text{оп.}} r_c = \xi F r_c \frac{(\omega r_c)^2 \rho}{2}. \quad (13)$$

Потужність на валу ротора:

$$N_{\text{рот.}} = M_{\text{оп.}} \omega = \xi F \frac{(\omega r_c)^3 \rho^2}{2}. \quad (14)$$

**Висновки.** 1. Принципове значення з точки зору інтересів доставки в рідинне середовище кисню має ступінь дисперсності в ньому газової фази, а енергія взаємодії рідинної і газової фаз визначається швидкістю їх контактування. 2. Запропоновано нові конструктивні рішення аераційних систем.

### ЛІТЕРАТУРА

1. *Никитин Г.А., Павлюк Д.М.* Совместная биохимическая очистка нефтесодержащих сточных вод и сточных вод производства синтетических жирных кислот // *Химия и технология воды.* — 1982. — №4. — с. 272—274.
2. *Цыганков С.П.* Биологическая очистка сточных вод предприятий пищевой промышленности. М.: — Агропромиздат — 1988. — 165 с.

*Одержано редколлегією 26.01.2011 р.*

УДК 532. 135; 532.5

**Е.В. БІЛЕЦЬКИЙ**, канд. техн. наук, доц.,  
*Харківський торговельно-економічний інститут КНТЕУ*  
**Ю.А. ТОЛЧИНСЬКИЙ**, канд. техн. наук, доц.,  
*Національний технічний університет «ХПІ»*

## ПОЗДОВЖНЬО – ПОПЕРЕЧНА ТЕЧІЯ НЕНЬЮТОНІВСЬКОЇ РІДИНИ З В'ЯЗКІСТЮ, ЩО ЗАЛЕЖИТЬ ВІД ШВИДКОСТІ ЗРУШЕННЯ У ЩІЛИННОМУ КАНАЛІ ШНЕКОВОЇ МАШИНИ

Розглянуто питання математичного моделювання двохмірної поздовжньо-поперечної течії ступеневої рідини у щілинному каналі шнекової машини. Одержані рівняння дають можливість проводити моделювання в'язкопластичних течій з різними значеннями швидкостей стінок та профілями.

**Ключові слова:** в'язкопластична рідина, куєттовська течія, швидкість зрушення, реологічна модель, щілинний канал, шнекова машина.

Рассмотрен вопрос математического моделирования двухмерного продольно-поперечного течения степенной жидкости в щелевом канале шнековой машины. Полученные уравнения позволяют проводить моделирование вязкопластических течений с различными значениями скоростей стенок и профилями.

**Ключевые слова:** вязкопластическая жидкость, куэтовское течение, скорость сдвига, реологическая модель, щелевой канал, шнековая машина.

The problem of mathematical modeling of two-dimensional transverse-longitudinal flow of staid fluid in the slot channel of the screw machine has been studied. The equations obtained make it possible to simulate viscoplastic flows with various values of walls velocity and profiles.

**Keywords:** viscoplastic fluid, Couette flow, shear rate, rheological model, slot channel, screw machine.

Рух нелінійних рідин є частиною гідродинаміки ламінарних або стоксових течій. Такий рух відіграє важливу роль у процесах та апаратах харчової й хімічної технологій. Рідини з великими значеннями в'язкості рухаються у каналах робочих камер шнекових машин [1—5]. Такі машини дуже поширені у харчовій та хімічній технології. Популярність таких машин пояснюється тим, що вони є засобом впливу на матеріал, що рухається в них у дуже широкому діапазоні значень параметрів впливу таких як тиск, швидкість зрушення, температура, ступінь перемішування, дисперсність та ін. [2—5]. Рідини з малими значеннями в'язкості також знаходять застосування як теплоносії, як у оболонках шнекових машин так і у оболонках інших апаратів харчової й хімічної технологій. У всіх випадках рідини, в'язкість яких визначається швидкістю зрушення, відрізняються великою різноманітністю своїх реологічних властивостей. Рух кожної з рідин необхідно окремо розглядати у каналах стандартної геометрії.

Щоб уникнути такої можливості необхідно взяти до уваги ту обставину, що кожна в'язкість, яка залежить тільки від швидкості зрушення, являє собою деяку функцію другого інваріанта тензора швидкості деформацій [6—8]. Вважаючи цю функцію гладкою й безперервною, її можна

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

апроксимувати лінійними функціями, тобто виконати кусково-лінійну апроксимацію [9, 10]. Оскільки цю операцію можна виконати завжди, то замість того, щоб рішати безліч окремих задач течії для різних рідин, достатньо рішити задачу для однієї єдиної рідини, закон течії якої визначається в'язкістю, яка лінійно залежить від кореня квадратного другого інваріанта тензора швидкості деформацій. Течію такої рідини необхідно розглядати у стандартному каналі, який необхідно взяти прямокутної форми певної довжини, стінки в якому рухаються довільно відносно одна одної. Канал такої форми, з такими рухомими стінками добре показує канали у робочій камері шнекової машини [1—5]. Рух стінок каналів, з яких складається робоча камера такої машини, виникає у результаті відносного руху черв'яків і корпусу машини [1—5]. Сам канал формується поверхнями черв'яків та внутрішньою поверхнею корпусу машини [1—5]. Рідина, що тече у такому каналі, переміщається завдяки різниці тиску вздовж і поперек каналу й захопленням рідини поверхнями черв'яка, що рухаються за рахунок прилипання рідини до них. З названих причин реальний рух рідини у прямокутному каналі є тривимірним. Цей рух можна умовно поділити на поздовжній — вздовж довжини каналу та поперечний. Поперечна течія є циркуляцією, інтенсивність якої залежить від поперечних складових швидкостей стінок каналу. Метою рішення будь-якої задачі про течію рідини є визначення значень тиску й вектора швидкості кожної точки усередині каналу [11, 12]. Тривимірні течії вивчаються, як правило, численними методами. Одержувана при цьому інформація має велику точність. Її узагальнення з метою виділення впливу окремих параметрів вимагає аналізу великого обсягу числової інформації. Форма подання результатів такого впливу носить описовий характер і виконується з великими погрешностями. Можливий інший підхід до проблеми побудови картини тривимірної течії. Він має за своїм змістом рішення простої, але зберігає усі важливі параметри течії, задача в аналітичній формі. Звичайно така задача одномірна. Потім за допомогою евристичних методів композиції на основі результатів рішення одномірної задачі будується тривимірне рішення задачі. Таке рішення має меншу точність, чим чисельне, зате дозволяє досліднику одержати фізично обґрунтовані комбінації параметрів на відміну від випадкових комбінацій описового характеру, які виходять при чисельному рішенні задачі. Рішення, основані на аналітичних засобах мають більшу методичну цінність, і можуть використовуватися іншими дослідниками при рішенні інших задач. Як спосіб вивчення руху нелінійних рідин автори дотримуються аналітичного підходу з подальшою композицією. Базовим завданням при цьому є поняття про куеттовську течію у щільному каналі. Прямокутний канал і граничні умови, які створюють у ньому тривимірну течію, наведені на рис. 1.

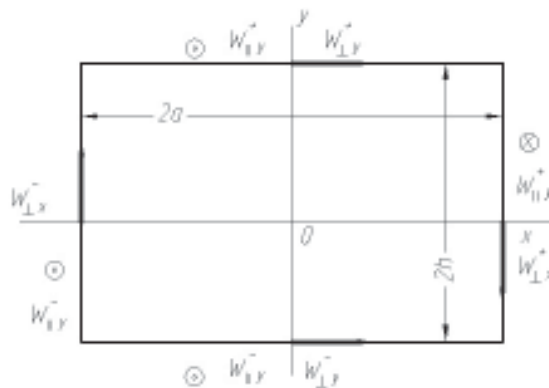


Рис. 1. Прямокутний канал і граничні умови тривимірної течії в каналі  
 $W_{1y}^{\pm}$  — значення поздовжньої швидкості на стінках каналу; нормальних до осі OY;  
 $W_{2x}^{\pm}$  — значення поздовжньої швидкості на стінках каналу; нормальних до осі OX;  
 $W_{1x}^{\pm}, W_{2y}^{\pm}$  — значення поперечних швидкостей на границях каналу.

Граничні умови для базового завдання куеттовської течії зображені на рис. 2.

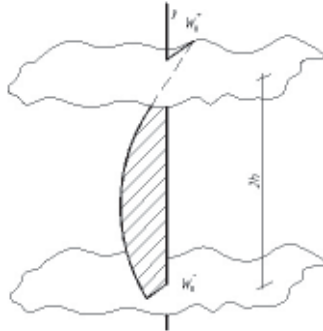


Рис. 2. Фрагмент щілинного каналу та граничні умови

Знання величин тиску й швидкості у кожній внутрішній точці каналу дає можливість обчислити такі величини як витрати течії, дисипативне тепловиділення, швидкість зрушення й зрушувальні напруги. Витрати є найважливішою режимною характеристикою шнекової машини, дисипативне тепловиділення впливає на всі властивості рідини, що рухається в каналі, швидкість зрушення визначає ступінь перемішування в рідині, а напруга зрушення визначає дисперсність матеріалу, моделлю якого є рідина, що розглядається, та інтенсивність механофізичних і механохімічних перетворень у матеріалі.

Поля тиску швидкості цілком залежать від граничних умов на стінках каналу. Саме ці умови визначаються конструкцією робочої камери через кут підйому гвинтової лінії черв'яка і його кроку, а також швидкістю обертання вала машини [1—5].

У цій роботі розглядається поздовжньо-поперечна течія у щілинному каналі як композиція двох суто поздовжніх течій вздовж і поперек каналу. Ці течії разом із граничними умовами зображені на рис. 3.

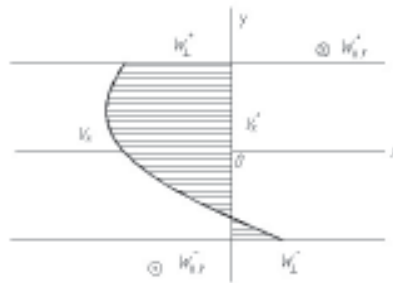


Рис. 3. Поперечна складова подовжньо поперечного плинн у граничні умови

Якщо вісь  $oz$  направити вздовж довжини каналу, вісь  $ox$  — поперек каналу, і вісь  $oy$  по нормалі до стінок каналу, то рівняння течії записуються у такому виді:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu (i_2) \frac{\partial v_z}{\partial y} \right]; \quad i_2 = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^2; \quad (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu (i_2) \frac{\partial v_x}{\partial y} \right]; \quad v_z = v_z(y); \quad v_x = v_x(y)$$

у якому  $v_x$ ,  $v_y$  — компоненти вектора швидкості течії;  $\mu$  — неньютонівська в'язкість рідини;  $i_2$  — другий інваріант тензора швидкості деформацій [6—8].

ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

Як в'язкість  $\mu$  буде використовуватися вираження такого виду:

$$\mu(\dot{i}_2) = \alpha + \beta\sqrt{\dot{i}_2}, \quad (2)$$

у якому  $\alpha$  і  $\beta$  — постійні визначені з досвіду і є константами речовини. Для приведення рівнянь (1) до рівнянь щільного плинину необхідно оцінити величини похідних, що входять у  $\dot{i}_2$  для того, щоб виразити величину  $\dot{i}_2$  тільки через  $\partial v_z / \partial y$  або тільки через  $\partial v_x / \partial y$ . Найпростіші оцінки мають такий вид:

$$\frac{\partial v_x / \partial y}{\partial v_z / \partial y} = \frac{W_{\perp}^+ - W_{\perp}^-}{W_{\parallel}^+ - W_{\parallel}^-} \equiv \kappa, \quad (3)$$

у якому  $W_{\parallel}^{\pm}$  — значення поздовжньої швидкості на верхній і нижній стінках відповідно;  $W_{\perp}^{\pm}$  — значення поперечних швидкостей на верхній і нижній стінках відповідно. Після підстановки (3) в (1) виходять такі два рівняння:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \left( \alpha + \beta\sqrt{(1 + \kappa^2)} / 2 \left| \frac{\partial v_z}{\partial y} \right| \right) \frac{\partial v_z}{\partial y} \right\}; \\ \frac{\partial P}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \left( \alpha + \beta\sqrt{(1 + \kappa^2)} / 2\kappa^2 \left| \frac{\partial v_x}{\partial y} \right| \right) \frac{\partial v_x}{\partial y} \right\}; \end{aligned} \quad (4)$$

Рівняння (4) являють собою два окремих рівняння поздовжньої течії, але з різними значеннями граничних швидкостей. Якщо у першому рівнянні для величин  $\beta\alpha$  і  $\beta\sqrt{(1 + \kappa^2)} / 2$  ввести позначення  $\alpha_z$  і  $\beta_z$ , а у другому рівнянні для величин  $\alpha$  і  $\beta\sqrt{(1 + \kappa^2)} / 2\kappa^2$  — позначення  $\alpha_x$  і  $\beta_x$ , то ці рівняння необхідно рішати незалежно одне від одного. Для подальших побудов потрібно обчислити швидкості  $v_z(y)$  і  $v_x(y)$  і відповідні їм величини витрат  $\dot{V}_z$  і  $\dot{V}_x$ . Такі обчислення виконані у роботі [13]. Можна вжити до задачі (4), результати записують у такому виді [13]:

$$\begin{aligned} v_z^+(y) &= \frac{\alpha_z(h-y)}{2\beta_z} + \left( \frac{\alpha_z^2}{4\beta_z^2} + \frac{y-y_z^*}{\beta_z} \frac{\partial P}{\partial z} \right)^{3/2} \frac{2}{3} \frac{\beta_z}{\partial P / \partial z} - \left( \frac{\alpha_z^2}{4\beta_z^2} + \frac{h-y_z^*}{\beta_z} \frac{\partial P}{\partial z} \right)^{3/2} \frac{2}{3} \frac{\beta_z}{\partial P / \partial z} + W_{\parallel}^+, \\ v_z^-(y) &= \frac{\alpha_z(h+y)}{2\beta_z} + \left( \frac{\alpha_z^2}{4\beta_z^2} + \frac{y_z^*-y}{\beta_z} \frac{\partial P}{\partial z} \right)^{3/2} \frac{2}{3} \frac{\beta_z}{\partial P / \partial z} - \left( \frac{\alpha_z^2}{4\beta_z^2} + \frac{h+y_z^*}{\beta_z} \frac{\partial P}{\partial z} \right)^{3/2} \frac{2}{3} \frac{\beta_z}{\partial P / \partial z} + W_{\parallel}^-, \\ v_x^+(y) &= \frac{\alpha_x(h-y)}{2\beta_x} + \left( \frac{\alpha_x^2}{4\beta_x^2} + \frac{y-y_x^*}{\beta_x} \frac{\partial P}{\partial x} \right)^{3/2} \frac{2}{3} \frac{\beta_x}{\partial P / \partial x} - \left( \frac{\alpha_x^2}{4\beta_x^2} + \frac{h-y_x^*}{\beta_x} \frac{\partial P}{\partial x} \right)^{3/2} \frac{2}{3} \frac{\beta_x}{\partial P / \partial x} + W_{\perp}^+, \\ v_x^-(y) &= \frac{\alpha_x(h+y)}{2\beta_x} + \left( \frac{\alpha_x^2}{4\beta_x^2} + \frac{y_x^*-y}{\beta_x} \frac{\partial P}{\partial x} \right)^{3/2} \frac{2}{3} \frac{\beta_x}{\partial P / \partial x} - \left( \frac{\alpha_x^2}{4\beta_x^2} + \frac{h+y_x^*}{\beta_x} \frac{\partial P}{\partial x} \right)^{3/2} \frac{2}{3} \frac{\beta_x}{\partial P / \partial x} + W_{\perp}^-. \end{aligned} \quad (5)$$

У цих формулах величини  $y_z^*$  й  $y_x^*$  — координати екстремумів профілів швидкостей  $v_z(y)$  і  $v_x(y)$  відповідно. Ці координати визначаються з умови безперервності у цих точках двох пар галузей профілів швидкості  $v_z^{\pm}$  й  $v_x^{\pm}$ .

Інтегрування виражень (5) у межах від  $-h$  до  $+h$  дає витрати поздовжньої й поперечної течій  $\dot{V}_z$ ,  $\dot{V}_x$ . Вирази для  $\dot{V}_z$  й  $\dot{V}_x$  такі:

$$\begin{aligned} \dot{V}_z &= W_{\parallel}^+(h-y_z^*) + W_{\parallel}^-(h+y_z^*) + \frac{\alpha_z}{2\beta_z} (h^2 + y_z^{*2}) + \frac{4}{15} \frac{\beta_z}{\partial P / \partial z} \left\{ \left( \frac{\alpha_z^2}{4\beta_z^2} + \frac{h-y_z^*}{\beta_z} \frac{\partial P}{\partial z} \right)^{5/2} + \right. \\ &+ \left. \left( \frac{\alpha_z^2}{4\beta_z^2} + \frac{h+y_z^*}{\beta_z} \frac{\partial P}{\partial z} \right)^{5/2} - 2 \left( \frac{\alpha_z^2}{4\beta_z^2} \right)^{5/2} \right\} - \frac{2}{3} \frac{\beta_z}{\partial P / \partial z} \left\{ \left( \frac{\alpha_z^2}{4\beta_z^2} + \frac{h-y_z^*}{\beta_z} \frac{\partial P}{\partial z} \right)^{3/2} + \right. \\ &+ \left. \left( \frac{\alpha_z^2}{4\beta_z^2} + \frac{h+y_z^*}{\beta_z} \frac{\partial P}{\partial z} \right)^{3/2} \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
 & + \left( \frac{\alpha_z^2}{4\beta_z^2} + \frac{h + y_z^*}{\beta_z} \frac{\partial P}{\partial z} \right)^{3/2} \cdot (h + y_z^*) \Bigg\}, \\
 \dot{V}_x = & W_1^+(h - y_x^*) + W_1^-(h + y_x^*) + \frac{\alpha_x}{2\beta_x} (h^2 + y_x^{*2}) + \frac{4}{15} \frac{\beta_x}{\partial P / \partial x} \left\{ \left( \frac{\alpha_x^2}{4\beta_x^2} + \frac{h - y_x^*}{\beta_x} \frac{\partial P}{\partial x} \right)^{5/2} + \right. \\
 & \left. + \left( \frac{\alpha_x^2}{4\beta_x^2} + \frac{h + y_x^*}{\beta_x} \frac{\partial P}{\partial x} \right)^{5/2} - 2 \left( \frac{\alpha_x^2}{4\beta_x^2} \right)^{5/2} \right\} - \frac{2}{3} \frac{\beta_x}{\partial P / \partial x} \left\{ \left( \frac{\alpha_x^2}{4\beta_x^2} + \frac{h - y_x^*}{\beta_x} \frac{\partial P}{\partial x} \right)^{3/2} + \right. \\
 & \left. + \left( \frac{\alpha_x^2}{4\beta_x^2} + \frac{h + y_x^*}{\beta_x} \frac{\partial P}{\partial x} \right)^{3/2} \right\} \cdot (h + y_x^*) \Bigg\},
 \end{aligned}$$

Найбільший інтерес викликають течії з  $y_x^*$ ,  $y_z^*$ , що знаходяться в інтервалі  $(-h, +h)$ . Для таких значень вираження (6) можна трохи спростити, розклавши складові, взяти у фігурні дужки в ряд Тейлора за величиною  $(y_x^* \partial P / \partial x) / \beta_x$  й величиною  $(y_z^* \partial P / \partial z) / \beta_z$ . Зберігаючи тільки складові нульового й першого порядку малості за величинами розкладання можна прийти до таких виражень для  $\dot{V}_z$  й  $\dot{V}_x$ :

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_z = & W_{\parallel}^+(h - y_z^*) + W_{\parallel}^-(h + y_z^*) + \frac{\alpha_z}{2\beta_z} (h^2 + y_z^{*2}) + \frac{8}{15} \left( \frac{\beta_z}{\partial P / \partial z} \right)^2 \left[ \left( \frac{\alpha_z^2}{4\beta_z^2} + \frac{h - y_z^*}{\beta_z} \frac{\partial P}{\partial z} \right)^{5/2} - \right. \\
 & \left. - \left( \frac{\alpha_z^2}{4\beta_z^2} \right)^{5/2} \right] - \frac{2}{3} \frac{\beta_z}{\partial P / \partial z} \left[ 2h \left( \frac{\alpha_z^2}{4\beta_z^2} + \frac{h}{\beta_z} \frac{\partial P}{\partial z} \right)^{3/2} + 3y_z^{*2} \frac{1}{\beta_z} \frac{\partial P}{\partial z} \left( \frac{\alpha_z^2}{4\beta_z^2} + \frac{h}{\beta_z} \frac{\partial P}{\partial z} \right)^{1/2} \right] \quad (7)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_x = & W_{\perp}^+(h - y_x^*) + W_{\perp}^-(h + y_x^*) + \frac{\alpha_x}{2\beta_x} (h^2 + y_x^{*2}) + \frac{8}{15} \left( \frac{\beta_x}{\partial P / \partial x} \right)^2 \left[ \left( \frac{\alpha_x^2}{4\beta_x^2} + \frac{h - y_x^*}{\beta_x} \frac{\partial P}{\partial x} \right)^{5/2} - \right. \\
 & \left. - \left( \frac{\alpha_x^2}{4\beta_x^2} \right)^{5/2} \right] - \frac{2}{3} \frac{\beta_x}{\partial P / \partial x} \left[ 2h \left( \frac{\alpha_x^2}{4\beta_x^2} + \frac{h}{\beta_x} \frac{\partial P}{\partial x} \right)^{3/2} + 3y_x^{*2} \frac{1}{\beta_x} \frac{\partial P}{\partial x} \left( \frac{\alpha_x^2}{4\beta_x^2} + \frac{h}{\beta_x} \frac{\partial P}{\partial x} \right)^{1/2} \right]
 \end{aligned}$$

Використання умов безперервності для швидкостей  $v_x^*$ ,  $v_z^*$  дозволяє виразити величини  $y_x^*$ ,  $y_z^*$  через параметри течії  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\kappa$ ,  $\partial P / \partial z$  і  $\partial P / \partial x$ ,  $h$ . Лінеаризувавши умови безперервності для координат екстремумів поздовжньої й поперечної течії виходять такі вираження:

$$y_z^* = - \frac{W_{\parallel}^+ - W_{\parallel}^-}{\frac{\alpha_z}{\beta_z} - 2 \left( \frac{\alpha_z^2}{4\beta_z^2} + \frac{h}{\beta_z} \frac{\partial P}{\partial z} \right)^{1/2}}; \quad y_x^* = - \frac{W_{\perp}^+ - W_{\perp}^-}{\frac{\alpha_x}{\beta_x} - 2 \left( \frac{\alpha_x^2}{4\beta_x^2} + \frac{h}{\beta_x} \frac{\partial P}{\partial x} \right)^{1/2}}. \quad (8)$$

Грунтуючись на даних про течії, відтворених формулами (5) + (8) можна побудувати вектор швидкості загальної поздовжньо-поперечної течії у щільному каналі. Із всієї численності подібних течій спеціальний інтерес викликає поздовжньо-поперечні течії, у яких покладена деяка умова на величину поперечного градієнта тиску при довільній величині поздовжнього градієнта. Тут корисно розглянути два таких випадки: перший — коли положення екстремумів компонентів швидкості збігаються; другий — коли величина поперечної витрати дорівнює нулю. Перший випадок описує течії, у яких величина швидкості має абсолютний екстремум, і він — єдиний. Другий випадок описує циркуляційну поперечну течію. Такій течії реально відповідає наявність на безмежному віддаленні один від одного другої пари непроникних стінок. Саме цей, останній випадок, можна використовувати для побудови поля поздовжньо-поперечної течії у прямокутному каналі зі стінками, що рухаються. Розглядається перший випадок. Для нього умова збігу величин (8) приводить до такого вираження для величини поперечного тиску, з якого випливає, що  $\partial P / \partial x = \kappa \cdot \partial P / \partial z$ .



## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

У другому випадку необхідно розглядати рівняння  $\dot{V}_x = 0$  як рівняння для величини  $\partial P / \partial x$ . Це дуже складне нелінійне рівняння. Вивчення аналітичними засобами його рішення виявляється можливим у двох граничних випадках: перший — коли  $\alpha_x = 0$ ; другий — коли  $\beta_x = 0$ . У першому випадку виходить ньютонівська постійна в'язкість, а сама поперечна течія є ньютонівська. Для такої течії профіль швидкості має такий вид:

$$v_x(y) = \frac{W_+^+(h+y)}{2h} + \frac{W_-^-(h-y)}{2h} - \frac{(h^2 - y^2)}{2\alpha_x} \frac{\partial P}{\partial x}. \quad (9)$$

Умова рівності нулю витрат течії зі швидкістю (9) для величини поперечного градієнта тиску приводить до такого його вираження:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{3}{2} \frac{\alpha_x (W_+^+ + W_-^-)}{h^2}. \quad (10)$$

У випадку, коли  $\alpha_x = 0$  для  $\partial P / \partial x$  виходить таке рівняння:

$$W_+^+(h - y_x^*) + W_-^-(h + y_x^*) - \frac{6}{15} \left( \frac{1}{\beta_x} \frac{\partial P}{\partial x} \right)^{1/2} [(h - y_x^*)^{5/2} + (h + y_x^*)^{5/2}] = 0. \quad (11)$$

Якщо це рівняння лінеаризувати по величині  $y_x^*$  й використовувати вираження (8) у спеціальному випадку, коли  $\alpha_x = 0$ , то рівняння (11) перетвориться у квадратне щодо величини  $(\partial P / \partial x)^{1/2}$  рівняння такого виду:

$$\frac{\partial P}{\partial x} - \frac{5}{4} \frac{\beta_x^{1/2}}{h^{3/2}} (W_+^+ - W_-^-) \left( \frac{\partial P}{\partial x} \right)^{1/2} - \frac{5}{4} \frac{\beta_x}{h^3} (W_+^+ - W_-^-)^2 = 0. \quad (12)$$

Рішаючи це рівняння, необхідно вибрати з двох рішень одне зі знаком плюс перед коренем квадратним. Це рішення записується у такому виді:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\beta_x}{h^3} (W_+^+ - W_-^-)^2 \frac{225}{64}. \quad (13)$$

Користуючись граничними вираженнями (10) і (13) можна скласти загальне вираження для  $\partial P / \partial x$  у випадку, коли  $\alpha_x \neq 0$ ,  $\beta_x \neq 0$ . Таке вираження має такий вид:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{3}{2} \alpha_x \frac{(W_+^+ + W_-^-)}{h^2} \cdot \left( \frac{\alpha_x}{\alpha_x + \beta_x} \right)^m + \frac{\beta_x}{h^3} (W_+^+ - W_-^-)^2 \frac{225}{64} \cdot \left( \frac{\beta_x}{\alpha_x + \beta_x} \right)^n, \quad (14)$$

де  $m$  і  $n$  — постійні, які визначаються експериментальним шляхом або при чисельному рішенні задачі. Необхідно звернути увагу на такі особливості вираження (14) як залежність поперечного градієнта тиску і від суми, і від різниці поперечних швидкостей стінок та залежність від різниці поздовжніх граничних швидкостей, яка попадає в (14) через параметр  $k$  (див. формулу (3)). Рішення (14) є якісним. Більш ретельне дослідження умови  $\dot{V}_x = 0$  необхідно проводити також у двох граничних випадках:

$$1. \frac{\alpha_x^2}{4\beta_x^2} \gg \frac{h \mp y_x^*}{\beta_x} \frac{\partial P}{\partial x}; \quad 2. \frac{\alpha_x^2}{4\beta_x^2} \ll \frac{h \mp y_x^*}{\beta_x} \frac{\partial P}{\partial x}. \quad (15)$$

Для цих двох випадків є малий параметр. У першому випадку — це відношення правої й лівої частин нерівності, а в другому — це відношення лівої й правої частин нерівності. Якщо виконати розкладання рівняння  $\dot{V}_x = 0$  за цим параметром аж до третього порядку включно, то для цих випадків вираження для  $\partial P / \partial x$  не будуть відрізнятися від тих, які дані в (9) і (13), а загальне вираження, узагальнюючи обидва ці випадки буде відрізнятися від (14) тим, що як зшиваючі множники використовуються такі вираження:

$$\frac{\alpha_x^2 / 4\beta_x^2}{\alpha_x^2 / 4\beta_x^2 + (h \partial P / \partial x) / \beta_x} \quad \text{и} \quad \frac{(h \partial P / \partial x) / \beta_x}{\alpha_x^2 / 4\beta_x^2 + (h \partial P / \partial x) / \beta_x}. \quad (16)$$



Для найпростішого вираження, коли  $m = n = 1$  для  $P(x)$  виходить квадратне рівняння, а якщо  $m$  і  $n$  не дорівнюють одиниці, то — рівняння більш високих ступенів. Доказ викладених фактів тут не наводиться у зв'язку з тим, що вимагає дуже громіздких обчислень.

Можна одержати приблизне рішення рівняння  $\dot{V}_x = 0$  щодо величини  $\partial P / \partial x$  інакше. Для цього необхідно порівняти ньютонівську й неньютонівську течії. Щоб порівняння було можливим, необхідне рішення (9) представити у формі, використовуючи вираження профілю швидкості  $u_x$  через дві галузі  $u_x^+$  й  $u_x^-$  і точку екстремуму  $y_x^*$ . Виявив структуру такого рішення можна у вираженні (7) у четвертому й п'ятому доданках використовувати в якості  $\partial P / \partial x$  його значення, знайдене з рішення ньютонівської задачі про течію. Таке значення дається формулою (10), у якій замість  $a_x$  необхідно підставляти середнє значення в'язкості  $\mu(l_2)$ , взяте з формули (1). Тоді, залишаючи незмінним перші два доданки у рівнянні  $\dot{V}_x = 0$  щодо величини  $y_x^*$  можна прийти до лінійного рівняння. Враховуючи, що величина  $y_x^*$  дається вираженням (8), відносно  $\partial P / \partial x$  виходить розв'язане рівняння.

Дотримуючись цього плану, швидкість ньютонівської течії із в'язкістю  $\mu$ , яка відповідає тим же граничним умовам, виражається такими формулами:

$$v^+(y) = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} [(h - y_x^*)^2 - (h - y_x^*)^2] + W_{\perp}^+; \quad (17)$$

$$v^-(y) = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} [(y_x^* - y)^2 - (h + y_x^*)^2] + W_{\perp}^-.$$

Для профілю (17) вираження  $y_x^*$  й витрати  $\dot{V}_x$  приймають такий вид:

$$y_x^* = - \frac{(W_{\perp}^+ - W_{\perp}^-) \mu}{2h \partial P / \partial x}, \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_x = & W_{\perp}^+(h - y_x^*) + W_{\perp}^-(h + y_x^*) + \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \left[ \frac{(h - y_x^*)^3}{3} - (h - y_x^*)^3 \right] + \\ & + \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \left[ \frac{(h + y_x^*)^3}{3} - (h + y_x^*)^3 \right], \end{aligned}$$

у якому для більшої наочності при порівнянні з (7) залишені не перетвореними множники при  $\partial P / \partial x$ . Якщо доданки з  $\partial P / \partial x$  позначити через  $F_{N'}$ , то для знаходження величин  $y_x^*$  і  $\partial P / \partial x$  виходить така система рівнянь:

$$\begin{cases} (W_{\perp}^+ + W_{\perp}^-)h + F_{N'} = (W_{\perp}^+ - W_{\perp}^-)y_x^* \\ y_x^* = - \frac{(W_{\perp}^+ - W_{\perp}^-) \mu}{2h \partial P / \partial x} \end{cases} \quad F_{N'} = F_{N'}(h, y_x^*, \partial P / \partial x, \mu). \quad (19)$$

Точно таке ж подання може бути записано і для неньютонівської течії. Система рівнянь у цьому випадку має такий вид:

$$\begin{cases} (W_{\perp}^+ + W_{\perp}^-)h + F_{nN} = (W_{\perp}^+ - W_{\perp}^-)y_x^* \\ y_x^* = - \frac{(W_{\perp}^+ - W_{\perp}^-)}{\frac{\alpha_x}{\beta_x} - 2 \left( \frac{\alpha_x^2}{4\beta_x^2} + \frac{h}{\beta_x} \frac{\partial P}{\partial x} \right)^{1/2}} \end{cases} \quad (20)$$

у якому  $F_{nN}$  позначена сума доданків з формул для поперечної витрати  $\dot{V}_x$ , усіх, крім перших двох. Уважаючи величину  $F_{nN}$  відомою, з (20) легко знайти невідоме  $\partial P / \partial x$ , що дорівнює:

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\alpha_x}{2h} \cdot \frac{(W_{\perp}^+ - W_{\perp}^-)^2}{(W_{\perp}^+ + W_{\perp}^-)h + F_{nN}} + \frac{\beta_x}{4h} \cdot \left[ \frac{(W_{\perp}^+ - W_{\perp}^-)^2}{(W_{\perp}^+ + W_{\perp}^-)h + F_{nN}} \right]^2, \quad (21)$$

$$F_{nN} = F_{nN} \left( \frac{\alpha_x}{\beta_x}, \frac{h}{\beta_x} \frac{\partial P}{\partial x}, h, y_x^{*2} \right).$$

Якщо у величину  $F_{nN}$ , визначаючи з формули (7) за умови  $\dot{V}_x = 0$  підставити значення  $\partial P / \partial x$  з неньютонівської задачі з постійною в'язкістю, то можна буде знайти значення  $\partial P / \partial x$  для неньютонівської течії. Виразення (21) володіє тією властивістю, що якщо  $\beta_x \rightarrow 0$ , то залишається перший доданок, у якому виконується така гранична відповідність:  $F_{nN}(\beta_x \rightarrow 0) \rightarrow F_N$ , так, що для  $\partial P / \partial x$  виходить неньютонівське вираження (10).

**Висновки.** З представлених обчислювань одержано опис двовірної поздовжньо-поперечної течії у щілинному каналі нелінійної рідини, суть якого складається в композиції цієї течії з двох чисто поздовжніх течій. Встановлено вид профілів поздовжньої й поперечної складових швидкості.

Обчислено витрати течії й визначені координати екстремальної точки профілів швидкості. Для циркуляційної течії у поперечному напрямку запропоновані два способи обчислення поперечного градієнта тиску, що основані на граничних випадках співвідношення величин параметрів в'язкості й на властивостях ньютонівської течії, в'язкість якої є середньою у проміжку  $(-h, +h)$ . До недоліку останнього способу обчислень необхідно віднести те, що цей спосіб не підходить для течій, у яких обидві поперечні граничні швидкості дорівнюють нулю. У всіх побудовах даної роботи використовувався параметр  $\kappa$ , що визначається формулою (3). При рівності якої-небудь пари швидкостей на стінках цей параметр втрачає своє значення. Цій ситуації відповідають суто напірні течії. Поздовжня напірна течія має значення. Поперечна напірна течія також має значення. Але якщо розглядається поперечна циркуляція як спеціальний випадок поздовжньої течії вздовж осі  $Ox$ , то без руху стінок у поперечному напрямку поперечний градієнт тиску не виникає. Якщо ж поперечні рухи стінок однакові за величиною, то градієнт поперечного тиску виникає; і користуватися визначенням (3) не можна. Резюмуючи (підсумовуючи) сказане, можна зробити висновок про те, що способи побудови поля швидкості, викладені в даній роботі, придатні для течій з неоднаковими значеннями швидкостей стінок і не дуже опуклими (увігнутими) профілями швидкості. Випадки дуже нерівномірних профілів і однакових величин швидкостей на стінках каналу вимагають окремого розгляду. Це буде зроблено в окремій статті авторів.

Ще один висновок даної роботи полягає в тому, що формули (5) для профілю  $v_z$ ,  $v_x$  являють собою сполучення функцій такого виду:

$$v_{z(x)} = a + by + (cy + d)^{3/2}, \quad (22)$$

у якому  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  — коефіцієнти, що залежать від товщини каналу, градієнта тиску й параметрів рівняння стану. Як показано у роботі авторів, ці функції являють собою сплайни з яких у кінцевому їхньому числі може бути складений будь-який профіль швидкості [13]. Тоді функція профілю швидкості у цій статті є конкретним прикладом кінцевого елемента, якому відповідає рівняння стану з в'язкістю за формулою (2) [14, 15].

## ЛІТЕРАТУРА

1. Герман Х. Шнековые машины в технолгии. — Л.: Химия. Лен. Отд. 1975. — 229 с.
2. Тадмор З., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров. — М.: Химия. 1984. — 628 с.
3. Ясногородский А.Я., Звездин А.Г. Многоцелевые двухшнековые машины для перерабатывающих технологий. — Харьков.: Прапор. 2006. — 184 с.
4. Торнер Р.В. Теоретические основы переработки полимеров. — М.: Химия. 1977. — 464 с.
5. Бернхардт Э. Переработка пластических масс. — М.: Химия. 1965. — 746 с.

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

6. *Уилкинсон У.А.* Неньютоновские жидкости. — М.: Мир. 1964. — 216 с.
7. *Фрейденталь А., Гейрингер Х.* Математические теории неупругой сплошной среды. — М.: ГИТТЛ. 1962. — 432 с.
8. *Спенсер Э.* Теория инвариантов. — М.: Мир. 1974. — 156 с.
9. *Н.С. Березин, П.П. Жидков* Методы вычислений. т.1. — М.: Издательство Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1978. — 632 с.
10. *Фихтенгольц Г.М.* Курс дифференциального и интегрального исчисления. Том 1.— М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1966. — 608 с.
11. *Попов Д.Н., Пананотти С.С., Рябинин М.В.* Гидромеханика: — М.: Изд-во МВТУ. 2002. — 383 с.
12. *Фабер Т.Е.* Гидроаэродинамика. — М.: Постмаркет. 2001. — 559 с.
13. *Деклу Ж.* Метод конечных элементов. — М.: Мир. 1976. — 95 с.
14. *Митчелл, Уэйт Р.* Метод конечных элементов для уравнений с частными производными. — М.: Мир. 1981. — 216 с.

*Одержано редколлегією 6.02.2011 р.*

**А.І. СОКОЛЕНКО**, д-р техн. наук,  
**К.В. ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ**, канд. техн. наук,  
**Р.М. ЛЕУС**, здоб.  
*Національний університет харчових технологій*

## ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ВИБІГУ І ГАЛЬМУВАННЯ В ДВОМАСОВИХ СИСТЕМАХ

---

Визначено співвідношення між кінематичними та силовими параметрами в процесах гальмування на прикладі двомасових динамічних моделей. Вказано на можливість реалізації законів руху. Знайдені підходи для оптимізації процесів гальмування в технологічному обладнанні.

**Ключові слова:** динаміка, вибіг, гальмування, закон руху, кінематичні параметри, силові параметри.

Определены соотношения между кинематическими и силовыми параметрами в процессах торможения на примере двухмассовых динамических моделей. Указано на возможность реализации законов движения. Найдены подходы для оптимизации процессов торможения в технологическом оборудовании.

**Ключевые слова:** динамика, выбег, торможение, закон движения, кинематические параметры, силовые параметры.

The correlation between the kinematic and force parameters during braking for example of two-mass dynamic models. Specified on the possibility of laws of motion. Found approaches to optimize the braking process in production equipment.

**Keywords:** dynamics, ran out, braking the law of motion, kinematic parameters, power parameters.

Загальні положення динаміки машин вказують на важливість вибору за конів руху ведучої маси в організації процесів гальмування в системі з двох мас.

При цьому є три варіанти:

варіанту 1 відповідає випадок, за якого плинні координати переміщення ведучої і веденої мас співпадають. Оскільки перебіг часу вибігу також має співпадати для обох мас, то це означає рівність їх швидкостей і прискорень;

варіант 2 — це випадок з випередженням в процесі вибігу ведучої маси, в якому слід очікувати збільшення пружного навантаження системи;

варіанту 3 відповідає сповільнений режим вибігу ведучої маси порівняно з вибігом веденої маси, при цьому прогнозується зменшення пружного навантаження.

Відомо, що в процесі вибігу накопичена кінетична енергія веденої маси може перетворюватися в потенціальну енергію деформації пружного елемента або витрачатися як робота на подолання сил опору. Різні сполучення таких енергетичних витрат відповідають трьом вищезазваним варіантам. В першому за відсутності деформації пружного елемента кінетична енергія веденої маси витрачається на подолання сил опору. В другому варіанті кінетична енергія веденої маси витрачається як на подолання сил опору, так і частково переходить в потенціальну енергію деформації пружного елемента. За ситуації по варіанту 3 кінетична енергія веденої маси також повністю витрачається як робота проти сил опору [1—4].

Завданням цього дослідження визначено пошук кінематичних параметрів переміщення ведучих і ведених мас, за яких досягається обмеження динамічних складових навантажень в режимах вибігу і гальмування двомасових систем.

Розглянемо перший варіант гальмування. Для цього визначимо співвідношення параметрів, які забезпечують його реалізацію.

Оскільки існують можливості досягнення різних законів руху ведучої маси, то для наближення і навіть повного співпадіння з законами руху веденої маси, слід здійснити прогностичну оцінку системи.

Перехід кінетичної енергії рухомої маси в потенціальну енергію пружного елемента пов'язується співвідношенням

$$\frac{mV^2}{2} = \frac{P_{\text{прмакс}}^2}{2c} \quad (1)$$

Звідси максимальне пружне навантаження

$$P_{\text{прмакс}} = V\sqrt{mc} \quad (2)$$

Остання формула відповідає амплітуді динамічної складової ударного навантаження в двомасовій системі, а також випадкам динамічних навантажень, в яких мав місце стрибок швидкості на величину  $V$  в русі ведучої маси.

В режимі усталеного руху веденої маси має місце рівність сили опору  $P_{\text{он}}$  і пружної сили  $P_{\text{пр}}$ . Від початку вибігу системи в першому варіанті величина  $P_{\text{он}}$  залишається сталою, має місце рівність координат переміщення ведучої та веденої мас.

$$x_1(t) = x_2(t) \quad (3)$$

За таких умов маємо  $P_{\text{он}} \neq \text{const}$ , оскільки рівняння руху веденої маси

$$m_2\ddot{x}_2 = P_{\text{пр}} - P_{\text{он}} \neq 0,$$

бо в протилежному випадку мали б  $\dot{x}_2 = \text{const}$ , що не відповідає режиму вибігу.

Таким чином, для реалізації умови вибігу за першим варіантом з врахуванням, що  $P_{\text{пр}} = \text{const}$  необхідно змінювати силу опору. Тоді рівняння руху буде мати наступний вид

$$m_2\ddot{x}_2 = P_{\text{пр}} - P_{\text{он}}(t) \quad (4)$$

Оскільки в цьому випадку прискорення  $\ddot{x}_2 = \ddot{x}_1$ , то звідси

$$m_2\ddot{x}_1 = P_{\text{пр}} - P_{\text{он}}(t); P_{\text{он}}(t) = P_{\text{пр}} - m\ddot{x}_1 \quad (5)$$

Очевидно, що реалізація вказаного закону  $P_{\text{он}} = P_{\text{он}}(t)$  можлива деякою мірою в стаціонарних механізмах з фіксованими положеннями в яких має починатися організований режим вибігу.

Якщо залежність  $P_{\text{он}} = P_{\text{он}}(t)$  визначена певним чином на рівні конструктивного рішення, то можна виконати поставлені умови за рахунок коректив до закону  $x_1 = x_1(t)$ .

Розглянемо, наприклад, одне з можливих конструктивних рішень з додатковим пружним упором, що має жорсткість пружного елемента  $c_d$  (рис. 1).

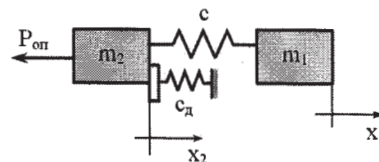


Рис. 1. Схема до реалізації першого варіанту вибігу системи з додатковим пружним упором

ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

Тоді маємо

$$m_2 \ddot{x}_2 = P_{np} - c_A x_2 - P_{on}, \text{ або}$$

$$\ddot{x}_2 + \frac{c_A}{m_2} x_2 = \frac{P_{np} - P_{on}}{m_2}. \quad (6)$$

Оскільки умовами етапу вибігу визначено, що  $P_{np} = P_{on}$ , то рівняння (6) перетворюємо до форми

$$\ddot{x}_2 + \frac{c_A}{m_2} x_2 = 0. \quad (7)$$

Початкові умови останнього рівняння:

$$x_{2(n)} = 0; \quad \dot{x}_{2(n)} = V. \quad (8)$$

Розв'язок рівняння (7) шукаємо у вигляді

$$x_2 = A \sin \sqrt{\frac{c_A}{m_2}} t + B \cos \sqrt{\frac{c_A}{m_2}} t. \quad (9)$$

Продиференціювавши останнє рівняння, маємо

$$\dot{x}_2 = A \sqrt{\frac{c_A}{m_2}} \cos \sqrt{\frac{c_A}{m_2}} t - B \sqrt{\frac{c_A}{m_2}} \sin \sqrt{\frac{c_A}{m_2}} t. \quad (10)$$

Підстановкою початкових умов одержуємо

$$B = 0; \quad A = V \sqrt{\frac{m_2}{c_A}}. \quad (11)$$

Таким чином остаточно маємо

$$x_2 = V \sqrt{\frac{m_2}{c_A}} \sin \sqrt{\frac{c_A}{m_2}} t. \quad (12)$$

Надаючи ведучій масі закон руху  $x_1(t) = x_2(t)$ , реалізуючи перший варіант режиму вибігу системи і, таким чином закон руху ведучої маси має бути:

$$x_1 = V \sqrt{\frac{m_2}{c_A}} \sin \sqrt{\frac{c_A}{m_2}} t. \quad (13)$$

Важливо, що вказаний закон (13) реалізується достатньо нескладними засобами (рис. 2). Нехай ведучий елемент 1 обертається з кутовою швидкістю  $\omega$ , а тяга 2, що веде ведучу масу, встановлена на радіусі R.

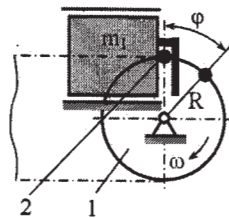


Рис. 2. Схема механізму до реалізації закону руху ведучої маси (формула (13))

При цьому виконується співвідношення



$$R = V \sqrt{\frac{m_2}{c_A}} \quad \text{та} \quad \omega = \sqrt{\frac{c_A}{m_2}}.$$

Припустимо, що за конструктивними вимогами необхідно одержати значення  $R = 0,06$  м при відомому значенні  $V = 0,2$  м/с та  $m_2 = 100$  кг.

Тоді

$$\omega = \frac{V}{R} = \frac{0,2}{0,06} = 3,33 \text{ с}^{-1}; \quad c_A = \omega^2 m_2 = 1110 \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

Реалізації першого варіанту вибігу системи можна досягти також за рахунок введення в неї додаткового зв'язку порівняно високої жорсткості (рис. 3.). Такий зв'язок одержується за рахунок двох ланок, які між собою та масами  $m_1$  та  $m_2$  утворюють шарніри А, В та С.

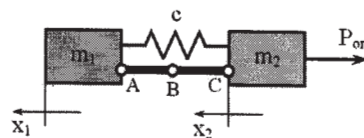


Рис. 3. Схема до двомасової моделі з додатковим жорстким зв'язком

Положення ланок на одній лінії досягається під час навантаження пружного елемента максимальним значенням  $P_{пр}$ . Від цього моменту обидві маси рухаються як одне ціле, в тому числі і під час гальмування та вибігу.

Однак за таких умов система має надлишок потенціальної енергії деформації пружного елемента

$$\Delta E = \frac{P_{пр.дин}^2}{c},$$

де  $P_{пр.дин}$  — пружна динамічна складова навантаження пружного елемента.

Звільнення системи від цього надлишку можливе за умови виведення шарніру В з так званого „мертвого” положення. В результаті пружна сила стає більшою за силу опору  $P_{он}$  і рівень деформації пружного елемента зменшується. При цьому можливими є випадки, коли звільнення від надлишкової потенціальної енергії здійснюється в режимі руху обох мас або відбувається після зупинки ведучої маси.

Для визначення співвідношень параметрів в першому випадку ведучій масі необхідно задати закон руху. Обираємо, наприклад, рівносповільнений рух, і тоді запишемо

$$x_1 = V_0 t - \frac{at^2}{2};$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = c(x_1 - x_2) - P_{он}$$

або відповідними перетвореннями одержуємо

$$\ddot{x}_2 + \frac{c}{m_2} x_2 = \frac{c}{m_2} V_0 t - \frac{ca}{2m_2} t^2 - \frac{P_{он}}{m_2}. \quad (14)$$

Початкові умови останнього рівняння:

$$t_{(n)} = 0; \quad x_{2(n)} = -\frac{P_{он} + P_{дин}^{max}}{c}; \quad \dot{x}_{2(n)} = V_0. \quad (15)$$

Розв'язання рівняння (14) запишемо у формі

ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

$$x_2 = A \sin \sqrt{\frac{c}{m_2}} t + B \cos \sqrt{\frac{c}{m_2}} t + V_0 t - \frac{at^2}{2} + \frac{am_2}{c} - \frac{P_{оп}}{c},$$

а сталі інтегрування знайдемо підстановкою початкових умов, тоді:

$$A = 0; B = -\frac{P_{дин}^{max} + am_2}{c}.$$

Остаточно маємо

$$x_2 = V_0 t - \frac{P_{дин}^{max} + am_2}{c} \cos \sqrt{\frac{c}{m_2}} t - \frac{at^2}{2} + \frac{am_2}{c} - \frac{P_{оп}}{c}; \quad (16)$$

$$\dot{x}_2 = V_0 + \frac{P_{дин}^{max} + am_2}{c} \sqrt{\frac{c}{m_2}} \sin \sqrt{\frac{c}{m_2}} t - at; \quad (17)$$

$$\ddot{x}_2 = \frac{P_{дин}^{max} + am_2}{m_2} \cos \sqrt{\frac{c}{m_2}} t - a. \quad (18)$$

В умовах керованого руху ведучої маси час завершення її переміщення знайдемо з умови

$$\dot{x}_{2(k)} = V_0 - at_{(k)} = 0; \quad t_{(k)} = \frac{V_0}{a}. \quad (19)$$

Час зупинки веденої маси слід розшукувати з умови (17), прирівнявши  $\dot{x}_2 = 0$ :

$$\dot{x}_2 = 0 = V_0 + \frac{P_{дин}^{max} + am_2}{c} \sqrt{\frac{c}{m_2}} \sin \sqrt{\frac{c}{m_2}} t_{(k)} - at_{(k)}. \quad (20)$$

Визначимо навантаження пружного елемента

$$P_{пр} = c(x_1 - x_2) = c \left( V_0 t - \frac{at^2}{2} - V_0 t + \frac{P_{дин}^{max} + am_2}{c} \cos \sqrt{\frac{c}{m_2}} t + \frac{at^2}{2} - \frac{am_2}{c} + \frac{P_{оп}}{c} \right) = P_{оп} + (P_{дин}^{max} + am_2) \cos \sqrt{\frac{c}{m_2}} t - am_2. \quad (21)$$

Максимальне пружне навантаження при цьому складає що відповідає початку вибігу.

$$P_{пр, max} = P_{оп} + P_{дин}^{max}, \quad (22)$$

Рівняння (14)–(22) відповідають умові взаємодії мас  $m_1$  та  $m_2$ , за якої вони знаходяться у стані вибігу. Якщо досягається умова  $t_{(k)}^I \neq t_{(k)}^{II}$ , то слід розглядати другий етап взаємодії. За формальними ознаками він подібний до випадку, за якого ведуча маса зупинена за деякого значення  $x_1 = x_{1(k)}$ .

Розглянемо найскладніший випадок, при якому  $x_1 = x_{1(k)}$ . Тоді рівняння руху веденої маси

$$m_2 \ddot{x}_2 = -cx_2 - P_{оп}$$

або

$$\ddot{x}_2 + \frac{c}{m_2} x_2 = -\frac{P_{оп}}{m_2}. \quad (23)$$

Розв'язанням останнього рівняння є вираз

$$x_2 = A_1 \sin \sqrt{\frac{c}{m_2}} t + B_1 \cos \sqrt{\frac{c}{m_2}} t - \frac{P_{оп}}{c}. \quad (24)$$

За початкових умов, що відповідають запису (15) одержуємо



ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

$$-\frac{P_{оп} + P_{дин}}{c} = B_1 - \frac{P_{оп}}{c}; \quad B_1 = -\frac{P_{дин}^{max}}{c}. \quad (25)$$

Продиференціювавши вираз (24), запишемо першу похідну:

$$\dot{x}_2 = A_1 \sqrt{\frac{c}{m_2}} \cos \sqrt{\frac{c}{m_2}} t - B_1 \sqrt{\frac{c}{m_2}} \sin \sqrt{\frac{c}{m_2}} t. \quad (26)$$

Тоді сталі інтегрування:

$$V_0 = A_1 \sqrt{\frac{c}{m_2}}; \quad A_1 = V_0 \sqrt{\frac{m_2}{c}}; \quad (27)$$

Остаточно маємо наступні вирази:

$$x_2 = V_0 \sqrt{\frac{m_2}{c}} \sin \sqrt{\frac{c}{m_2}} t - \frac{P_{дин}^{max}}{c} \cos \sqrt{\frac{c}{m_2}} t - \frac{P_{оп}}{c}; \quad (28)$$

$$\dot{x}_2 = V_0 \cos \sqrt{\frac{c}{m_2}} t + \frac{P_{дин}^{max}}{c} \sqrt{\frac{c}{m_2}} \sin \sqrt{\frac{c}{m_2}} t; \quad (29)$$

$$\ddot{x}_2 = -V_0 \sqrt{\frac{c}{m_2}} \sin \sqrt{\frac{c}{m_2}} t + \frac{P_{дин}^{max}}{c} \cdot \frac{c}{m_2} \cos \sqrt{\frac{c}{m_2}} t. \quad (30)$$

Пружне навантаження при цьому становить

$$P_{пр} = P_{дин}^{max} \cos \sqrt{\frac{c}{m_2}} t + P_{оп} - V_0 \sqrt{m_2 c} \sin \sqrt{\frac{c}{m_2}} t. \quad (31)$$

Графічну ілюстрацію складових пружного навантаження за рівнянням (31) наведено на рис. 4. Косинусоїдальна складова, як бачимо, має амплітуду  $P_{дин}^{max}$ , яка досяглася в режимі пуску системи. Очевидно, що величина  $P_{дин}^{max}$  залежить від умов останнього, однак найгіршими є умови ударного навантаження, за якими

$$P_{дин}^{max} = V_0 \sqrt{m_2 c}.$$

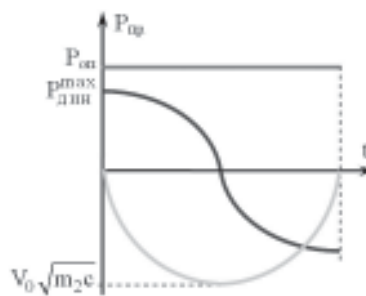


Рис. 4. Складові пружного навантаження

Тоді одержуємо

$$P_{пр} = V_0 \sqrt{m_2 c} \cos \sqrt{\frac{c}{m_2}} t + P_{оп} - V_0 \sqrt{m_2 c} \sin \sqrt{\frac{c}{m_2}} t + P_{оп}. \quad (32)$$

Знайдемо час досягнення максимального пружного навантаження:

$$\dot{P}_{пр} = 0 = -V_0 \sqrt{m_2 c} \sqrt{\frac{c}{m_2}} \sin \sqrt{\frac{c}{m_2}} t_{екс} - V_0 \sqrt{m_2 c} \sqrt{\frac{c}{m_2}} \cos \sqrt{\frac{c}{m_2}} t_{екс};$$

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

$$t_{\text{екс}}=0.$$

Звідси максимальне пружне навантаження

$$P_{\text{пр}}^{\text{max}}=V_0\sqrt{m_2c}+P_{\text{оп}}. \quad (33)$$

Час вибігу маси  $m_2$  знайдемо за формулою (29), прирівнявши  $\dot{x}_2 = \dot{x}_{2(\kappa)}=0$ :

$$V_0\cos\sqrt{\frac{c}{m_2}}t = -\frac{P_{\text{дин}}}{c}\sqrt{\frac{c}{m_2}}\sin\sqrt{\frac{c}{m_2}}t. \quad (34)$$

Перетворивши маємо:

$$\text{tg}\sqrt{\frac{c}{m_2}}t_{(\kappa)} = -\frac{V_0\sqrt{cm_2}}{P_{\text{дин}}}.$$

Тоді кінцевий час дорівнює

$$t_{(\kappa)} = -\text{arctg}\frac{\frac{V_0\sqrt{cm_2}}{P_{\text{дин}}}}{\sqrt{\frac{c}{m_2}}}. \quad (35)$$

**Висновки.** Виконаний аналіз динаміки вибігу і гальмування двомасових систем дозволяє відмітити наступне.

1. Співвідношення між кінетичною енергією рухомих мас і потенціальною енергією деформації пружних зв'язків між веденою і ведучою масами дозволяють визначити екстремуми їх навантажень.

2. Обмеження в динамічних навантаженнях пружних зв'язків можуть досягатися силовими впливами на ведучу або на ведену маси.

3. Запропоновані аналітичні залежності дозволяють прогнозувати силові взаємодії за динамічного синтезу двомасових систем в частині, що відповідає організації їх вибігу і гальмування.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Комаров М.С. Динамика механизмов и машин. — М.: Машиностроение. — 1969. — 296 с.
2. Соколенко А.І., Яровий В.Л., Васильківський К.В. та ін. Моделювання процесів пакування. — Вінниця: Nova knuha. — 2004. — 272 с.
3. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. — М.: Физматгиз. — 1959. — 439 с.
4. Кодра Ю.В., Стоцько З.А. Технологічні машини. Розрахунок і конструювання. — Львів: Львівська політехніка. — 2004. — 468 с.

Одержана редколегією 07.02.2011 р.

УДК 664.292

**С.Г. МЕТЛЬОВ****В.О. ОВЧАРУК**, канд. техн. наук**Ю.І. ВЕРЕСОЦЬКИЙ**, канд. техн. наук**Є.М. БАБКО**, канд. техн. наук**І.В. ЮЩУК***Національний університет харчових технологій*

## АПАРАТУРНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ СХЕМИ ВИРОБНИЦТВА ПЕКТИНОВІСНИХ ПОРОШКІВ

---

Наведено результати дослідження існуючих способів отримання сушених харчових порошків та започатковано розроблення нових технологічних схем виробництва сухих пектиновмісних екстрактів.

**Ключові слова:** сушені харчові порошки, пектиновмісні екстракти.

Приведены результаты исследования существующих способов получения сушеных пищевых порошков и начата разработка новых технологических схем производства сухих пектиносодержащих экстрактов.

**Ключевые слова:** сушеные пищевые порошки, пектиносодержащие экстракты.

The results of research of existent methods of receipt of the dried food powders are resulted and development of new flowsheets of production of dry pectin containing extracts is begun.

**Keywords:** dried food powders, pectin containing extracts.

В різноманітних плодах, коренеплодах та в одерев'янілих клітинах міститься вуглеводний комплекс, що має кислі властивості [3]. Цей комплекс називають пектиновими речовинами.

Пектин (або пектиновмісний напівфабрикат), як товарний продукт — звичайно сухий препарат або рідкий екстракт, що виробляється за різними технологічними схемами. Як правило, в усіх схемах його отримання наявні такі основні стадії:

- підготовка рослинної пектиновмісної сировини до процесу екстрагування пектинових речовин (промивка, подрілення, пресування);
- гідроліз-екстрагування пектинових речовин;
- очищення рідкого пектинового екстракту (сепарування, фільтрування);
- відділення пектину з розчину, якщо це передбачається (осаджування аліфатичними спиртами або солями полівалентних металів);
- сушіння та подрілення пектину або пектиновмісного напівфабрикату.

Основною метою роботи є провести аналіз існуючих апаратурно-технологічних схем виробництва пектиновмісних порошків для подальшого їх удосконалення, дослідити та визначити оптимальні режими отримання пектиновмісних екстрактів за допомогою розпилювального методу сушіння.

Підготовка до процесу екстрагування висушеної рослинної сировини, зокрема, сухих яблучних вичавок, полягає в їх одноразовій або дворазовій промивці водою температурою 10—20 °С.

Для гідролізу протопектинової фракції використовують різні кислоти: соляну, сірчану, азотну, лимонну, оцтову та фосфорну.

© С.Г. Метльов, В.О. Овчарук, Ю.І. Вересоцький, Є.М. Бабко, І.В. Ющук, 2011

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

Найчастіше використовують соляну кислоту, оскільки вона активніше впливає на процес гідролізу протопектину, що обумовлює її порівняно невеликі витрати. Проте соляна кислота агресивна стосовно металів.

При отриманні пектину з яблучних вичавок та цитрусових плодів перевага надається азотній кислоті, яка до того ж менш летка. Проте, при гідролізі азотною кислотою в подальшому збільшуються витрати хімічних реактивів (гідроокису алюмінію, хлористого алюмінію), що позначається не собівартості готового продукту.

Для поліпшення органолептичних показників використовують сірчану кислоту, яка має відбілюючий ефект (сприяє освітленню пектинових екстрактів). Крім того, консервуюча дія сірчаної кислоти дозволяє збільшити тривалість зберігання пектинового гідролізата. Тривалість гідролізу доходить до 10—30 годин; її можна зменшити, зменшенням рН середовища та збільшенням температури процесу. Однак, використання цих кислот значно погіршує умови праці та призводить до ускладнення апаратурного оформлення процесу отримання пектинових речовин.

Таким чином, аналіз літературних даних показує, що при кислотному гідролізі пектину доцільно використовувати соляну або фосфорну кислоту.

Основними факторами, що визначають швидкість гідролізу, є температура, рН середовища та тривалість процесу.

Після закінчення екстрагування проводять розділення твердої (знепектиненої рослинної сировини) та рідкої (пектинового екстракту) фаз фільтруванням.

Отриманий екстракт очищують сепаруванням з наступною фільтрацією через шар кізельгуру, перліту, активованого вугілля, або обробкою екстракту ферментним препаратом *Aspergillus oryzae*, що розщеплює крохмаль та протеїни [4].

З освітленого екстракту пектинові речовини виділяють осадженням аліфатичними спиртами, або солями полівалентних металів: хлористим алюмінієм, хлористим кальцієм, сульфатом алюмінію, калієвим галуном. Кращі якісні показники готового пектину отримані при осадженні хлористим алюмінієм. Проте, розчинення безводного хлористого алюмінію поєднано з використанням герметизованого обладнання та уловлюванням пари хлористого водню, що утворюється при розчиненні. З цієї причини частіше в якості осаджувача обирають етиловий спирт.

Отриманий осад пектину відділяють від маточного розчину фільтруванням з наступним пресуванням осаду до вологості 70—76 %, або центрифугуванням.

Пектиновий осад подрібнюють та направляють на очистку для зниження зольності готового продукту та отримання пектину з різними якісними і технологічними показниками.

Очищений пектин потім сушать до кондиційної вологості при температурі 55—80 °С на протязі 5—6 годин [1]. Висушений пектин подрібнюють до порошку з розміром часток 250 мкм, просіюють та упаковують.

У випадках, коли за технологічною схемою передбачається виробництво не чистого пектину, а пектиновмісного напівфабрикату (порошку) освітлений пектиновий екстракт подається безпосередньо на випарювання та сушіння. Для сушіння пектиновмісних екстрактів доцільно використовувати розпилювальні

сушарки (рис. 1.). В переважній більшості для сушіння рідких продуктів в промисловості використовуються установки з дисковим розпиленням [2, 5].

При розпилювальному способі тривалість сушіння та час перебування матеріалу в сушильній камері складає 5—30 с. в залежності від виду видалення висушеного продукту із сушарки.

Як сушильний агент в розпилювальних установках застосовують повітря з температурою 160—180 °С, що лімітується наявним обладнанням — паровими котлами, тиск в яких у більшості випадків не перевищує 1,3 МПа. Лише деякі підприємства оснащені парогенераторами, які дозволяють подавати в калорифер пару під тиском 1,8 МПа.

Широке розповсюдження отримали сушарки зі змішаним подаванням повітря, які відрізняються компактністю, простотою і надійністю в експлуатації. Недолік цих сушарок — більш низька, порівняно з прямоочними сушарками, якість готового продукту.

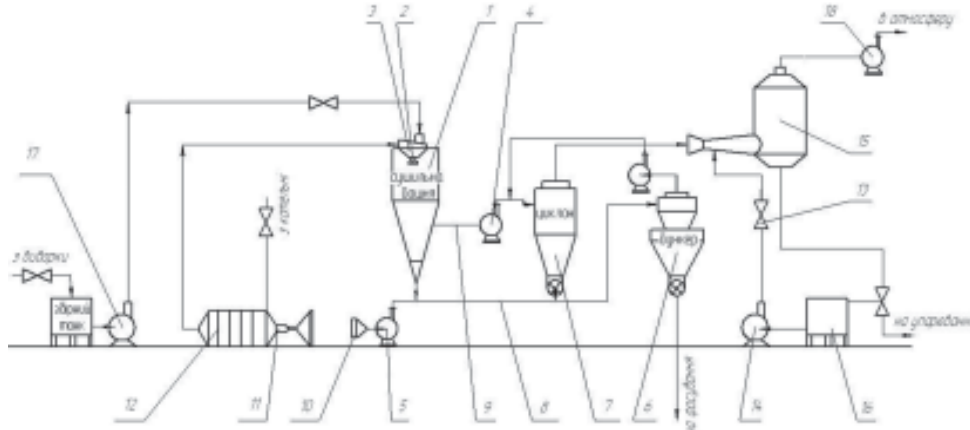


Рис. 1. Прямоточна дискова розпилювальна установка:

- 1 — сушильна башта; 2 — розпилювач; 3 — повітрерозподілювач; 4 — вентилятор для відсмоктування відпрацьованого повітря; 5 — вентилятор для транспортування сухого порошка; 6 — розвантажувальний циклон; 7 — батарея циклонів; 8 — пневмотранспортна лінія; 9 — трубовід для відсмоктування відпрацьованого повітря; 10 — фільтр; 11 — вентилятор для нагнітання повітря у калорифер; 12 — паровий калорифер; 13 — клапан; 14 — насос для подачі у скруббер; 15 — скруббер; 16 — ємкість; 17 — насос для подачі продукту в сушильну башту; 18 — вентилятор для відведення відпрацьованого повітря в атмосферу

В останні роки для сушіння рідких харчових продуктів використовують прямоточні сушильні установки, як правило, вертикальні, хоча відомі сушарки з горизонтальним розміщенням сушильної камери.

В них сушильний агент при вході стикається з рідкими розпилюваними частками і, перемішуючись у спільному потоці з ними, частково зволожується та охолоджується. При цьому якість продукту змінюється незначно.

Донедавна вважалося, ще найкращим способом очистки повітря є циклонний, тому в харчовій промисловості найбільше розповсюдження отримали сушильні установки з циклонною очисткою відпрацьованого повітря. Кількість циклонів сушильної установки коливається в залежності від її продуктивності, а також від типу циклону. Знаходять застосування сушильні установки, в яких відпрацьоване повітря очищають через рукавні фільтри. В останні роки почали приділяти значну увагу розробці сушильних установок, в яких відпрацьоване повітря фільтрується через шар сухого продукту підвищеної вологості. Більш широке розповсюдження набувають сушильні установки з очисткою повітря за допомогою скрубберів (рис. 2). Хоча сушарки з паровими повітрянагрівачами широко використовуються в техніці сушіння харчо-вих продуктів, в останні роки все більш значну частку серед сушарок, що випускаються, починають займати установки з вогневими по-вітрянагрівачами рекуперативного типу. З метою використання тепло-ти відпрацьованого повітря зростає застосування сушильних установок із спеціальними рекуператорами (регенераторами).

Прикладом одноступневої розпилювальної сушарки є установка AI-OPЧ [44]. За роки промислової експлуатації виявлені її недоліки: невдала компоновка обладнання — нагнітальний та витяжний вентилятори, розміщені на підлозі, в зв'язку з чим збільшена довжина повітропроводів, застосована велика кількість відводів, що збільшує опір руху повітря; кількість циклонів (4 шт.) недостатня для проходу повітря в повному обсязі (22-24 тис. м<sup>3</sup>/год); петлеподібна конструкція патрубку, що відводить повітря з сушарки, створює додатковий опір руху повітря; наявність скребкового механізму для видалення сухого продукту з сушильної камери перешкоджає сушінню продукту до проміжної вологості (6—9 %) та збільшенню продуктивності установки.

Тривале використання установок AI-OPЧ показало, що більшість з них не можуть забезпечити потрібну продуктивність. Це пов'язано як з конструктивними недоліками, так і з низькими технічними показниками витяжного вентилятора та парового калорифера.

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

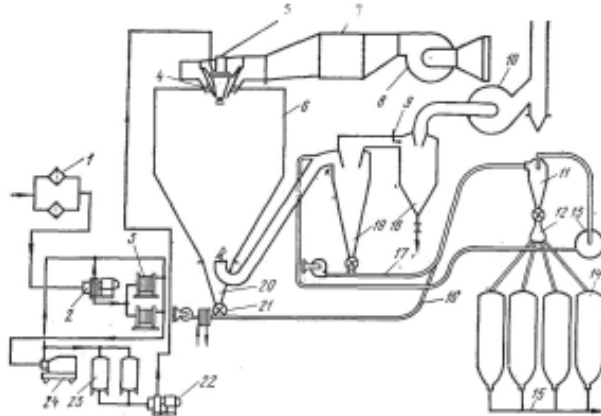


Рис. 2. Принципова схема сушильної установки зі скруберами

- 1 — фільтр; 2 — шестеренчастий насос; 3 — пластинчастий підігрівник;  
 4 — повітророзподільувач; 5 — розпилювач; 6 — сушильна башта; 7 — калорифер;  
 8, 10 — вентилятори; 9 — форсунка; 11 — розвантажувальний циклон; 12 — розподільувач;  
 13 — вентилятор для пневмотранспортної лінії; 14 — бункера; 15 — аерозольтранспортуюча лінія; 16 — пневмотранспортуюча лінія; 17 — пневмотранспортуюча лінія для циклонної фракції сухого молока; 18 — скрубер; 19 — циклон; 20 — перехідник; 21 — шлюзовий живильник; 22 — насос; 23 — ємкість; 24 — гомогенізатор

В НПО «Продмаш» розроблені сушильні установки AI-OP2Ч та AI-OP3. В цих установках відсутні деякі недоліки установки AI-OP4: поліпшена компоновка обладнання, значно спрямлені повітропроводи.

Перевагами сушильної установки AI-OP2Ч є: заміна скребкового збирального механізму системою «повітряна мітла» (пневмозабирач); розміщення нагнітального вентилятора та калорифера на одному рівні з повітророзподільником сушильної камери, а витяжного вентилятора в безпосередній близькості від фільтрів; обмежена висота (7,5 м). Все це забезпечує сталі витрати повітря (в об'ємі біля 20—22 тис. м<sup>3</sup>/год) в сушарці, що сприяє збільшенню її продуктивності до 60 кг випарованої вологи за годину. Але поряд з перевагами, вона має такі недоліки, як невдала компоновка повітропроводів, паровий калорифер старого типу (як у сушарки AI-OP4).

Для оснащення підприємств малої потужності розроблено сушильну установку AI-OP3 продуктивністю 150 кг випарованої вологи за годину. За своєю конструкцією вона аналогічна установці AI-OP2Ч. Відмінною є використання замість фільтру циклона для очистки відпрацьованого повітря та оснащення установкою мокрого пилловловлювання — скрубером.

Перевагою установок AI-OP2Ч та AI-OP3 є відмова від скребкового збирального механізму, і, як результат, практично повне виключення тривалого контакту сухих часток з гарячою поверхнею сушильної камери, що дозволяє усунути перегрів продукту та погіршення його розчинності.

Поряд з сушильними установками малої (AI-OP3) та середньої продуктивності (AI-OP2Ч), підприємства харчової промисловості оснащені більш потужними установками, наприклад, РС-1000, БРА-4, продуктивністю 1100 кг/год (рис. 3).

Недоліками їх є невдала компоновка обладнання на лінії подавання повітря в сушильну камеру, де через розташування нагнітаючого вентилятора вище калорифера повітропровід має чотири відводи. Аналогічно виконано повітропровід від циклонів до витяжного вентилятора, хоча навіть при даній конструкції агрегату цей повітропровід може бути значно спрямлений.

Недоліком сушильної установки РС — 1000 є також великі втрати сухого продукту з відпрацьованим повітрям (8—10 кг/год і більше) через потрапляння великої частини готового продукту в циклони (біля 50%). Великі труднощі при експлуатації пов'язані з наявністю пригару, який утворюється у верхній частині сушарки на вході гарячого повітря.

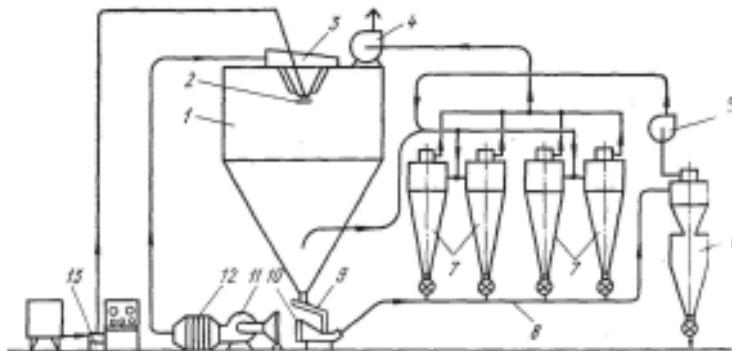


Рис. 3. Принципова схема сушарки РСМ-1000:

- 1 — сушильна камера; 2 — розпилювач; 3 — повіторозподільувач;  
 4 — витяжний вентилятор; 5 — додатковий вентилятор; 6 — бункер-накопичувач;  
 7 — циклони; 8 — пневмотранспортуюча лінія; 9 — вібрлоток; 10 — фільтр;  
 11 — нагнітаючий вентилятор; 12 — паровий калорифер; 13 — насос

Серед розпилювальних сушарок установки «Ніро-Атомайзер» є найбільш досконалими як по конструктивному виконанню, так і по експлуатаційним якостям .

На підприємствах харчової промисловості широко використовуються розпилювальні сушарки і інших типів: ЦТ, «Нема» (Німеччина); РСМ — 5000 (Чеська Республіка); вітчизняні сушарки, в тому числі форсуночного типу ОСВ-І продуктивністю 1100 кг випареної вологи за годину.

**Висновки.** Наведено основні переваги та недоліки існуючих апаратурно-технологічних схем виробництва харчових порошків та викладено аналіз літературних джерел. Це дало змогу авторам започаткувати роботу по вивченню можливостей розроблення нових безвідходних технологій виробництва сушених екстрактів із вмістом пектину.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Андреев В.В., Науменко И.В. Пармакова Л.П. Способы получения и применения различных типов яблочного пектина // ЦНИИЭИ Пищепром . Серия 4. Консервная, овоще-сушильная и пищекопцентратная промышленность. Обзорная информация. — 1981. — Вып. 16. — 31 с.
2. Вересоцький Ю.І. Удосконалення розпилювального способу сушіння молочної сироватки: Автореф. дис... канд. техн. наук: /УДУХТ. — К., 2001. — 18с.
3. Грысс З. Использование отходов плодовоошной и консерв-ной промышленности. — М.: Пищевая промышленность. 1974. — 278 с.
4. Дарманьян П. М., Дарманьян Е. Б., Ревеко Н. Б. и др. Иссле-дование отходов моркови как сырья для производства пектина. Пищевая промышленность. — М.: ЦНИИЭИПищепром. Серия 4. Консервная овощесушительная и пищекопцентратная промышленность: Науч.-техн.реф. сб. — 1981. — Вып. 5. — С. 12 — 15.
5. Овчарук В.О. Оптимізація процесу сушіння екстрактів із вмістом пектину: Автореф. дис... канд. техн. наук: /УДУХТ. — К., 1998. — 25 с.

Одержана редколегією 9.02.2011 р.



Є.В. КОСТЮК, асп.,

В.С. КОСТЮК, канд. техн. наук

Національний університет харчових технологій

## ВИЗНАЧЕННЯ ВХІДНИХ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ СИНУСОЇДАЛЬНОГО ЗАКОНУ ЗМІНИ ПРИСКОРЕННЯ ВЕДЕНОЇ МАСИ

На основі двомасової моделі досліджено динаміку перехідних процесів в системах переміщення вантажів. Визначено аналітичні залежності кінематичних та динамічних параметрів ведучої маси в часі за яких ведена маса та система в цілому відтворить абсолютно безударний режим роботи.

**Ключові слова:** динаміка, перехідний процес, рівняння руху, параметри системи.

На основании двухмассовой модели исследовано динамику переходных процессов в системах перемещения грузов. Получено аналитические зависимости кинематических и динамических параметров ведущей массы во времени при которых ведомая масса и система в целом воспроизведет абсолютно безударный режим работы.

**Ключевые слова:** динамика, переходной процесс, уравнение движения, параметры системы.

On the principles of double-mass model was investigated dynamics of transients in the systems of loads moving. Were received an analytical dependences in time of kinematic and dynamic parameters of driving mass for which a driven mass and a system as a whole will reproduce absolutely uniform working conditions.

**Keywords:** dynamics, transient, equation of motion, parameters of the system.

Зазвичай у динаміці машин розв'язується задача, яка передбачає визначення результату впливу на вихідні параметри системи. Тобто виконується перевірка фактичних значень на їх допустимість, як правило, з точки зору міцності елементів системи.

Пропонується розглянути зворотну задачу, а саме визначити, які вхідні параметри потрібно задати, щоб отримати бажаний результат. В межах двомасової моделі бажаним результатом будемо вважати абсолютно безударний режим руху веденої маси під час перехідного процесу. Такий режим можна вважати реалізованим за умови зміни прискорення за синусоїдальним законом. Необхідно визначити, при якому законі руху ведучої маси ведена маса буде рухатись за синусоїдальним законом. Також визначимо залежності за якими потрібно задавати рушійну силу для отримання означеного закону руху веденої маси.

В якості об'єкта дослідження використаємо реально діючий екземпляр пакувального обладнання, що використовується для укладання рулонів на лінії виготовлення комбінованого пакувального матеріалу на ДП Тетра-Пак Україна, а саме просторовий робот-укладчик Gantry Area — 120.

Розглянемо випадок горизонтального переміщення каретки робота із рулоном, тобто один з елементів робочого ходу. Така операція в циклограмі роботи машини обмежена часом  $T$  та шляхом  $S$ . Як і будь-яке інше переміщення означена операція передбачає комбінування усталеного руху та перехідних процесів. Частка тривалості перехідних процесів у повній тривалості операції переміщення визначається циклограмою і становить величину  $k$ .



Операція горизонтального переміщення складається з наступних етапів:

0 — навантаження пружного елемента, розгін ведучої маси;

I — розгін веденої маси;

II — усталений рух;

III — гальмування веденої маси;

IV — гальмування ведучої маси.

Нульовий етап строго не лімітований по часу і параметрам виконання, але має складати незначну частку технологічної операції переміщення, яка обмежена циклограмою роботи пристрою.

Перший етап передбачає рух ведучої маси до моменту, коли  $P_{np} = P_{on}$ . При цьому ведена маса нерухома. Нерівністю сили опору у стані спокою та під час руху нехтуємо. Оскільки заданим є закон руху веденої маси на I етапі, то пропустимо 0 етап і почнемо розв'язання задачі саме з розгону веденої маси.

Для позначення кінематичних і динамічних параметрів ведучої та веденої мас на різних етапах будемо застосовувати подвійний індекс. Перша цифра позначатиме належність тій чи іншій масі, а друга — етап, якому відповідає цей параметр.

З метою отримання графічних залежностей будемо використовувати наступні числові значення параметрів системи, які відповідають реальній конструкції робота-укладчика:

$$c = 30000 \text{ Н/м};$$

$$m_1 = 100 \text{ кг};$$

$$m_2 = 1200 \text{ кг};$$

$$S = 3 \text{ м};$$

$$T = 6 \text{ с};$$

$$k = 0,7;$$

$$P_{on} = 235 \text{ Н};$$

$$v_2^{ном} = 0,77 \text{ м/с};$$

$$a_2^{max} = A = 0,58 \text{ м/с}^2,$$

де  $c$  — жорсткість зубчастих пасів;  $m_1$  — ведуча маса (приведена);  $m_2$  — ведена маса (приведена);  $k$  — частка перехідних процесів у загальній тривалості операції переміщення;  $P_{on}$  — сила опору;  $v_2^{ном}$  — швидкість усталеного руху веденої маси;  $a_2^{max}$  — максимальне прискорення веденої маси (амплітуда синусоїди).

**Розгін веденої маси (I етап).** Початкові умови для веденої маси:

$$x_{2n} = 0; \quad v_{2n} = 0; \quad a_{2n} = 0.$$

$$P_{np} = P_{on} = 235 \text{ Н};$$

При цьому  $P_{np} = cx_{10}$ , звідки

$$x_{10} = \frac{P_{np}}{c} = \frac{235}{30000} = 0,0078 \text{ м} \approx 8 \text{ мм}.$$

Система рівнянь руху на I етапі має вигляд:

$$\begin{cases} m_1 a_{11} = P_{пуш} - c(x_{11} - x_{21}); \\ m_2 a_{21} = c(x_{11} - x_{21}) - P_{он}. \end{cases} \quad (1)$$

З другого рівняння визначаємо  $x_{11}$

$$x_{11} = x_{21} + \frac{(m_2 a_{21} + P_{он})}{c}. \quad (2)$$

В отриманому виразі  $x_{21}$  та  $a_{21}$  задані умовою задачі і описуються наступними залежностями в часі:

$$a_{21}(t) = A \sin(\omega t); \quad (3)$$

$$x_{21}(t) = -\frac{A}{\omega^2} \sin(\omega t) + \frac{A}{\omega} t, \quad (4)$$

де амплітуда  $A$  та частота  $\omega$  визначаються наступними залежностями:

ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

$$A = \frac{2\pi \cdot S}{k(2-k)T^2};$$

$$\omega = \frac{2\pi}{kT}.$$

Підставивши вирази (3) та (4) в рівняння (2) отримуємо залежність переміщення ведучої маси в часі

$$\begin{aligned} x_{11}(t) &= x_{21}(t) + \frac{(m_2 a_{21}(t) + P_{on})}{c} = \\ &= -\frac{A}{\omega^2} \sin(\omega t) + \frac{A}{\omega} t + \frac{(m_2 A \sin(\omega t) + P_{on})}{c} = \\ &= A \sin(\omega t) \left( \frac{m_2}{c} - \frac{1}{\omega^2} \right) + \frac{A}{\omega} t + \frac{P_{on}}{c}. \end{aligned} \quad (5)$$

Двічі продиференціювавши рівняння (5) отримуємо  $v_{11}$  та  $a_{11}$

$$\begin{aligned} v_{11}(t) &= \frac{d}{dt} x_{11}(t) = -\frac{A}{\omega} \cos(\omega t) + \frac{A}{\omega} + \frac{m_2 A \omega}{c} \cos(\omega t) = \\ &= A \cos(\omega t) \left( \frac{m_2 \omega}{c} - \frac{1}{\omega} \right) + \frac{A}{\omega}; \\ a_{11}(t) &= \frac{d^2}{dt^2} x_{11}(t) = A \sin(\omega t) - \frac{m_2 A \omega^2}{c} \sin(\omega t) = \\ &= A \sin(\omega t) \left( 1 - \frac{m_2 \omega^2}{c} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Рівняння (6) є першою частиною розв'язку поставленої задачі. Воно описує закон руху ведучої маси при якому прискорення веденої буде змінюватись за синусоїдою.

З першого рівняння системи (1) знаходимо  $P_{руш}$  і підставляємо в нього вирази (4), (5) та (6), отримуємо залежність рушійної сили в часі:

$$\begin{aligned} P_{руш}^I(t) &= m_1 a_{11} + c(x_{11} - x_{21}) = m_1 a_{11} + c \left( x_{21} + \frac{(m_2 a_{21} + P_{on})}{c} - x_{21} \right) = \\ &= m_1 a_{11} + m_2 a_{21} + P_{on} = m_1 \left( A \sin(\omega t) \left( 1 - \frac{m_2 \omega^2}{c} \right) \right) + m_2 A \sin(\omega t) + P_{on} = \\ &= A \sin(\omega t) \left( m_1 \left( 1 - \frac{m_2 \omega^2}{c} \right) + m_2 \right) + P_{on}. \end{aligned} \quad (7)$$

Графічна інтерпретація отриманих залежностей кінематичних параметрів представлена на рис. 1.

Як бачимо з графіків для забезпечення синусоїдального закону руху веденої маси на етапі розгону ведуча маса також має прискорюватись за синусоїдальним законом, проте з іншою амплітудою. Причому її початкова швидкість має відрізнятись від нуля, а кінцева має бути меншою за значення кінцевої швидкості веденої маси.

Графіки силового навантаження представлені на рис. 2.

Очевидно, що рушійна сила відрізняється від навантаження пружного елемента на величину інерційної складової ведучої маси, а сила пружності — на величину сили опору від інерційної складової веденої маси. Отже фізичний зміст математичної моделі не порушується.

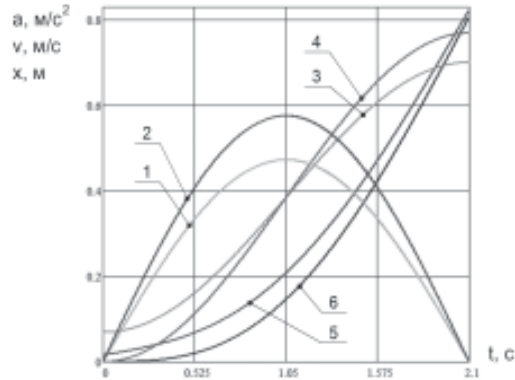


Рис. 1. Кінематичні параметри етапу розгону:  
1, 2 — прискорення, 3, 4 — швидкості, 5, 6 — переміщення  
ведучої та веденої мас відповідно

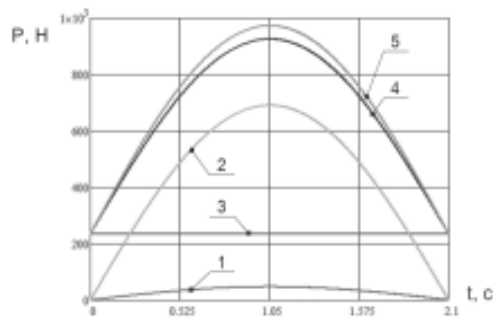


Рис. 2. Динамічні параметри етапу розгону:  
1, 2 — сили інерції ведучої та веденої мас відповідно; 3 — сила опору;  
4 — зусилля в пружному елементі; 5 — рушійна сила

**Усталений рух (II етап).** Етап усталеного руху веденої маси передбачає реалізацію наступних залежностей:

$$a_{22}(t) = 0; \quad (8)$$

$$v_{22}(t) = v_2^{\text{НОМ}} = \text{const}; \quad (9)$$

Користуючись підстановкою, використаною при розрахунку законів руху на етапі розгону можна довести, що рівності (8) та (9) можуть бути справедливими лише за умови, що

$$a_{12}(t) = a_{22}(t) = 0;$$

$$v_{12}(t) = v_{22}(t) = v_2^{\text{НОМ}} = \text{const};$$

Використовуючи відомі числові значення, отримуємо графічне представлення етапу усталеного руху. Співставлення графіків кінематичних параметрів на межі I та II етапів представлено на рис. 3.

Оскільки лінії прискорень та швидкостей ведучої і веденої мас співпадають, для наочності вони представлені пунктиром. Бачимо, що на межі переходу до усталеного руху присутній стрибок швидкості ведучої маси на скінченну величину. Ця обставина свідчить про наявність жорсткого удару. Прискорення в цій точці теоретично повинно мати нескінченну величину. Недоцільність використання подібної комбінації законів руху очевидна, оскільки метою розв'язання поставленої задачі є отримання безударного режиму роботи механізму.

ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

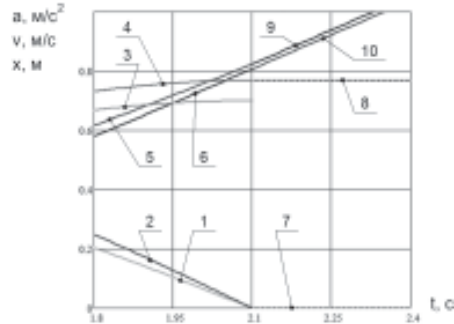


Рис. 3. Кінематичні параметри на межі етапів розгону і усталеного руху: 1, 2 — прискорення, 3, 4 — швидкості, 5, 6 — переміщення ведучої та веденої мас відповідно на I етапі; 7 — прискорення, 8 — швидкості на II етапі; 9, 10 — переміщення ведучої та веденої мас відповідно на II етапі

Не змінюючи на даному етапі дослідження початкових умов і параметрів роботи механізму, а також не усуваючи етап усталеного руху, розглянемо III етап руху — гальмування ведучої маси.

**Гальмування веденої маси (III етап).** Гальмування передбачає зміну прискорення веденої маси також за синусоїдою. Виходячи з початкових умов на цьому етапі, а саме  $a_{23n} = a_{22k} = 0$ ,  $v_{23n} = v_{22k} = v_2^{ном}$ ,  $x_{23n} = x_{22k}$ , будемо мати наступні аналітичні залежності зміни прискорення, швидкості та переміщення веденої маси (умова задачі):

$$a_{23}(t) = -A \sin\left(\omega\left(t - T + \frac{\pi}{\omega}\right)\right); \tag{10}$$

$$v_{23}(t) = -\frac{A}{\omega} \cos\left(\omega\left(t - T + \frac{\pi}{\omega}\right)\right) + \frac{A}{\omega};$$

$$x_{23}(t) = \frac{A}{\omega^2} \sin\left(\omega\left(t - T + \frac{\pi}{\omega}\right)\right) + \frac{A}{\omega}t + S - \frac{AT}{\omega}. \tag{11}$$

Користуючись системою рівнянь руху на III етапі, яка має вигляд

$$\begin{cases} m_1 a_{13} = P_{руш} - c(x_{13} - x_{23}); \\ m_2 a_{23} = c(x_{13} - x_{23}) - P_{он}, \end{cases} \tag{12}$$

виражаємо з другого рівняння невідомий параметр, тобто  $x_{13}$ :

$$x_{13} = x_{23} + \frac{(m_2 a_{23} + P_{он})}{c}. \tag{13}$$

Підставляючи вирази (10) та (11) в рівняння (13) отримуємо залежність переміщення ведучої маси в часі:

$$\begin{aligned} x_{13}(t) &= x_{23}(t) + \frac{(m_2 a_{23}(t) + P_{он})}{c} = \\ &= \left(\frac{A}{\omega^2} \sin\left(\omega\left(t - T + \frac{\pi}{\omega}\right)\right) + \frac{A}{\omega}t + S - \frac{AT}{\omega}\right) + \\ &+ \left(\frac{-m_2 A}{c} \sin\left(\omega\left(t - T + \frac{\pi}{\omega}\right)\right) + \frac{P_{он}}{c}\right) = \\ &= A \sin\left(\omega\left(t - T + \frac{\pi}{\omega}\right)\right) \left(\frac{1}{\omega^2} - \frac{m_2}{c}\right) + \frac{A}{\omega}(t - T) + S + \frac{P_{он}}{c}. \end{aligned} \tag{14}$$

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

Послідовно диференціюючи рівняння (14), знаходимо залежності зміни швидкості та переміщення ведучої маси:

$$\begin{aligned} v_{13}(t) &= \frac{d}{dt} x_{13}(t) = \frac{A}{\omega} \cos\left(\omega\left(t - T + \frac{\pi}{\omega}\right)\right) + \frac{A}{\omega} - \frac{m_2 A \omega}{c} \cos\left(\omega\left(t - T + \frac{\pi}{\omega}\right)\right) = \\ &= A \cos\left(\omega\left(t - T + \frac{\pi}{\omega}\right)\right) \left(\frac{1}{\omega} - \frac{m_2 \omega}{c}\right) + \frac{A}{\omega}; \\ a_{13}(t) &= \frac{d^2}{dt^2} x_{13}(t) = -A \sin\left(\omega\left(t - T + \frac{\pi}{\omega}\right)\right) + \frac{m_2 A \omega^2}{c} \sin\left(\omega\left(t - T + \frac{\pi}{\omega}\right)\right) = \\ &= A \sin\left(\omega\left(t - T + \frac{\pi}{\omega}\right)\right) \left(\frac{m_2 \omega^2}{c} - 1\right). \end{aligned} \quad (15)$$

З першого рівняння системи (12) знаходимо  $P_{руш}$  і підставляємо в нього вирази (11), (14) та (15), отримуємо залежність рушійної сили в часі:

$$\begin{aligned} P_{руш}^{III}(t) &= m_1 a_{13} + c(x_{13} - x_{23}) = m_1 a_{13} + c\left(x_{23} + \frac{(m_2 a_{23} + P_{он})}{c} - x_{23}\right) = \\ &= m_1 a_{13} + m_2 a_{23} + P_{он} = m_1 A \sin\left(\omega\left(t - T + \frac{\pi}{\omega}\right)\right) \left(\frac{m_2 \omega^2}{c} - 1\right) - \\ &- m_2 A \sin\left(\omega\left(t - T + \frac{\pi}{\omega}\right)\right) + P_{он} = \\ &= A \sin\left(\omega\left(t - T + \frac{\pi}{\omega}\right)\right) \left(m_1 \left(\frac{m_2 \omega^2}{c} - 1\right) - m_2\right) + P_{он}. \end{aligned}$$

Графічна інтерпретація отриманих залежностей кінематичних параметрів представлена на рис. 4.

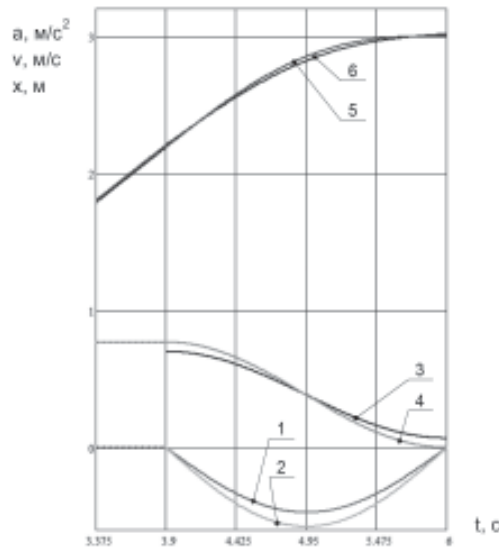


Рис. 4. Кінематичні параметри на етапі гальмування веденої маси:  
1, 2 — прискорення, 3, 4 — швидкості, 5, 6 — переміщення  
ведучої та веденої мас відповідно

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

Як бачимо з рис. 4 графіки кінематичних залежностей на етапі гальмування симетричні етапу розгону. На межі етапів усталеного руху та гальмування також спостерігається стрибок швидкості ведучої маси, що є недопустимим. Деяку відмінність має графік переміщення ведучої маси  $x_{13}(t)$ . Спостерігається його коливання відносно  $x_{23}(t)$ . Окрім цього після завершення III етапу ведучу масу потрібно гальмувати.

Графіки силового навантаження на III етапі представлені на рис. 5.

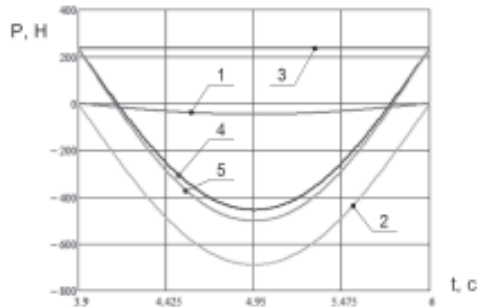


Рис. 5. Динамічні параметри етапу гальмування:  
1, 2 — сили інерції ведучої та веденої мас відповідно; 3 — сила опору; 4 — зусилля в пружному елементі; 5 — рушійна сила.

Графічні залежності силових навантажень елементів системи на етапі гальмування також симетричні етапу розгону. Фізичний зміст системи рівнянь руху збережено.

Зважаючи на стрибки швидкості ведучої маси, що маємо на межах етапів, доцільно виключити етап усталеного руху з циклограми роботи пристрою, поділивши при цьому загальну тривалість виконання операції переміщення порівну між етапами розгону і гальмування. За таких умов коефіцієнт тривалості перехідних процесів  $k$  буде рівним одиниці і його можна виключити з розрахунку. Графіки розрахованих залежностей кінематичних і динамічних параметрів за умови відсутності усталеного руху представлені на рис. 6 та 7.

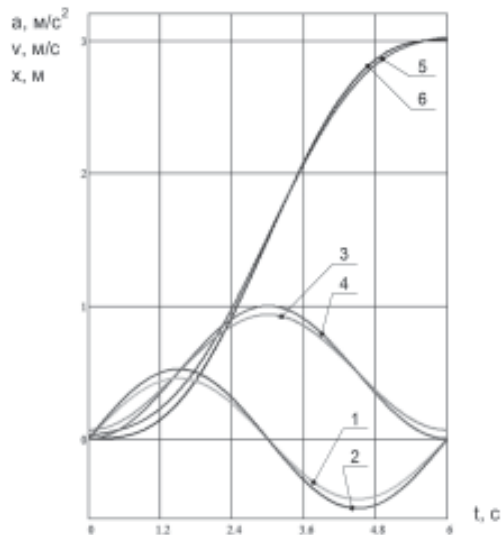


Рис. 6. Кінематика системи за відсутності етапу усталеного руху:  
1, 2 — прискорення, 3, 4 — швидкості, 5, 6 — переміщення ведучої та веденої мас відповідно

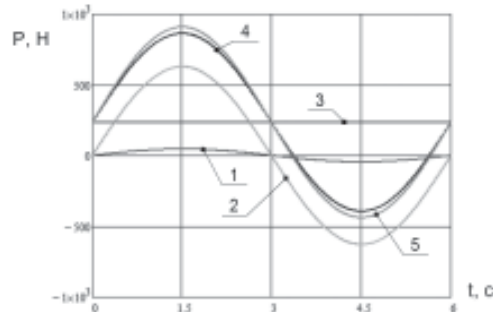


Рис. 7. Динаміка системи за умови відсутності етапу усталеного руху:  
 1, 2 — сили інерції ведучої та веденої мас відповідно; 3 — сила опору;  
 4 — зусилля в пружному елементі; 5 — рушійна сила

**Висновки.** Поставлена задача розв'язана. Отримано аналітичні залежності рушійної сили в часі за яких кінематика системи абсолютно точно відтворить синусоїдальний закон зміни прискорення веденої маси. Тобто досягнуто безударний режим роботи системи. Також встановлено, які закони руху при цьому буде мати ведуча маса.

Визначено, що поставлені умови не можна виконати за наявності етапу усталеного руху, оскільки при цьому виникають жорсткі удари. Результати представлені аналітично та графічно на основі розрахунків для реальної машини.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Соколенко А.І., Яровий В.Л., Піддубний В.А., Васильківський К.В., Шевченко О.Ю. Моделювання процесів пакування. / За редакцією Соколенка А.І./ Підручник. — Вінниця: Нова Книга, 2004. — 272 с.
2. Голубенцев А.Н. Динамика переходных процессов в машинах со многими массами. — М.: Машгиз, 1959. — 145 с.
3. Янг Д.Ф. Робототехника. — Л.: Машиностроение, 1979. — 304 с.
4. Gantry Area. Operating Instructions — Njstved: C&H SYSTEM A/S Denmark, 2007 — 39 p.

Одержана редколегією 10.02.2011 р.

ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

УДК 663.1.047, 663.48

**Р.Л. ЯКОБЧУК**, канд. техн. наук,

**В.Л. ЯРОВИЙ**, канд. техн. наук

*Національний університет харчових технологій*

## **ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ ТЕПЛОНОСІЯ НА КІНЦЕВУ ВОЛОГІСТЬ ПИВНИХ ДРІЖДЖІВ ПРИ СУШІННІ В ШАРІ ІНЕРТНОГО МАТЕРІАЛУ**

Визначено залежність кінцевої температури теплоносія від параметрів процесу та її вплив на сушіння пивних дріжджів у вібропсевдозрідженому шарі інертного матеріалу.

**Ключові слова:** інерт, теплоносій, плівка, пивні дріжджі, зневоднення.

Определена зависимость конечной температуры теплоносителя от параметров процесса и ее влияние на сушение пивных дрожжей в вибропсевдоожижном слое инертного материала.

**Ключевые слова:** инерт, теплоноситель, пленка, пивные дрожжи, обезвоживание.

The dependence of the final coolant temperature on the parameters of the process and its effect on drying beer yeast in vibropsevdozridzhenomu layer of inert material.

**Keywords:** inert, coolant, lamina, brewer's yeast, dehydration.

В зв'язку з подальшим зростанням виробництва сухих продуктів із вторинної сировини харчових виробництв актуальним стає питання розроблення ефективного малогабаритного обладнання з достатньою продуктивністю для сушіння рідких та пастоподібних термочутливих продуктів, створення нової високотемпературної технології сушіння термочутливих рідких продуктів, що викликано рядом суттєвих недоліків існуючого обладнання: високою собівартістю, великими габаритами і розмірами, низьким термічним коефіцієнтом корисної дії.

Застосування методу сушіння рідких продуктів (суспензій і розчинів) у вібропсевдозрідженому шарі інертних частинок дозволяє інтенсифікувати процес тепломасообміну, підвищити початкову температуру теплоносія, досягти однорідності зрідженого шару, інтенсивного та направленного перемішування його.

Процес сушіння суспензій і розчинів у вібропсевдозрідженому шарі інертних частинок характеризується усталеним розподіленням частинок по температурі та по товщині плівки рідкого продукту, яка їх покриває. Таке розподілення устанавлюється в результаті послідовної зміни циклів нагрівання інертної частинки та її охолодження до певного значення рівноважної температури у факелі розпилювання рідкого продукту, циклічному зростанні та сколюванні плівки.

Забезпечення рівномірного вібропсевдозрідженого шару дозволяє отримувати температуру теплоносія на виході із сушарки близькою до рівноважної, що суттєво зменшує втрати енергії, підвищує ефективність процесу та дозволяє визначитись з параметрами його для ефективного управління при отриманні заданої кінцевої вологості висушеного продукту.

Першочерговою задачею є визначення залежності температури теплоносія на виході із сушильної камери від його швидкості та кінцевої вологості пивних дріжджів для забезпечення регулювання процесу сушіння в автоматичному режимі.

З аналізу літературних джерел [1, 2] випливає, що в подібних процесах існує функціональна залежність між кінцевою вологістю продукту  $W$  та кінцевою температурою теплоносія  $t_2$ .

© Р.Л. Якобчук, В.Л. Яровий, 2011



## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

Для вирішення поставленої задачі необхідно визначитись з механізмом плівкоутворення та подрібнення плівки, масообміном при сушінні плівки продукту на поверхні інертної частинки та тривалість процесу.

Так при зневодненні суспензій і розчинів у вібропсевдозрідженому шарі інертних частинок рідкий продукт за допомогою форсунок подається в шар і розподіляється тонкою плівкою на поверхні інертних частинок. Плівка зневоднюється і при досягненні кінцевого вологовмісту подрібнюється в результаті процесів сколювання або подрібнення. Інтенсивність першого процесу визначає величина сил адгезії між плівкою і поверхнею інертних частинок, а другого — силами когезії в плівці і аутогезійною взаємодією між шарами, що утворилися в результаті багаторазових покриттів. В якості інертного матеріалу було використано кубики фторопласту, так як адгезія до його поверхні досить мала.

Зростання товщини плівки в проміжках між сколюваннями визначається витратою продукту  $G$ , що розпилюється, і площею поверхні інертних часток. При цьому функціональна залежність товщини плівки  $d$  за часом визначається умовами, при сушінні на інертних частинках кубічної форми:

$$d\delta / dt = G / (\rho_d \times n_0 \times \delta \times a^2), \quad (1)$$

$$0 \leq \tau \leq \tau_m,$$

де  $\rho_d$  — густина пивних дріжджів, кг/м<sup>3</sup>;  $n_0$  — кількість інертних частинок в апараті;  $a$  — сторона куба інертної частинки, м;  $\tau_m$  — максимальна тривалість покриття частинки інертного матеріалу плівкою продукту, с.

Інтегрування співвідношення (1) дозволяє одержати функціональну залежність  $\tau = \tau(\delta)$ :

$$\tau(\delta) = (6a^2 \times n_0 \times \rho_d / G)\delta, \quad (2)$$

$$0 \leq \tau \leq \tau_m,$$

та значення середньої товщини плівки, м

$$\bar{\delta} = \int_0^{\tau_m} \delta \times \phi(\delta) d\delta = G / (f_s \times \rho_d \times 6a^2 \times n_0), \quad (3)$$

де  $f_s$  — частота, з якою поверхня частинок інерту звільняється від плівки ( $f_s = 1/\tau$ ).

При розрахунку теплового потоку в елементі шару необхідно враховувати тепловий опір сухої плівки, а також нерівномірність нагрівання часток інертного матеріалу. Нагріваючись, частинки акумулюють теплоту, яку віддають на випаровування, потрапляючи в факел розпилу вологого продукту. У факелі розпилу частинки охолоджуються до рівноважної температури випаровування, обумовленої параметрами теплоносія і рідкого продукту. Подальше зневоднювання вологої плівки проходить за рахунок підведення теплоти від теплоносія. При цьому температура вологої плівки дорівнює рівноважній температурі випаровування, а тепломасообмін визначається тільки міжфазним переносом.

Як відзначено вище, плівка продукту, нанесена на поверхню інертних частинок, подрібнюється по досягненні кінцевого вологовмісту. Поверхня інертної частинки може не звільнятися за один цикл (у проміжок часу між послідовними нанесеннями продукту на поверхню частки). У цьому випадку плівка свіжого продукту наноситься на поверхню, покриту зневодненою плівкою, нанесеної раніше. Тому опір дифузії при сушінні визначається не всією товщиною плівки, а лише останнім покриттям. Дифузійним опором останнього покриття, з якого відбувається випаровування, можна знехтувати, оскільки товщина його дорівнює 0,15 — 0,20 мм. У зв'язку із цим як кінетичне рівняння можна використати рівняння для зовнішнього масообміну при сушінні тонкої плівки продукту на поверхні інертної частки:

$$dm_s / (dt) = -\beta \{6a^2 / [R(t_h + 273)]\} [p_n - \bar{p}_n], \quad (4)$$

де  $m_s$  — маса вологи, що випаровує з поверхні, кг;  $\beta$  — коефіцієнт масообміну, м/с;  $R$  — газова стала парів води, Дж/(кг·К);  $t_h$  — середнє значення температури приграничного шарі

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

біля поверхні частинки, °С;  $p_n$  — парціальний тиск парів води над плівкою продукту, Па;  $\bar{p}_n$  — середній по апарату парціальний тиск парів води (у повітрі), Па.

Перейдемо у рівнянні (4) від параметра  $m_b$ , що визначає масу вологи, яка випаровується з поверхні, до поточного значення вологовмісту  $U$ . Оскільки  $m_b = m_c \cdot U$ ,

$$dm_b/(d\tau) = m_c [dU/(d\tau)], \quad (5)$$

де  $m_c$  — маса сухого продукту, що одноразово попадає на поверхню інертної частки в факелі розпилю, кг.

Ця величина не міняється протягом одного періоду сушіння, оскільки вологий продукт не здатний до подрібнення. Величину  $m_c$  можна визначити через параметр розподілу  $\phi_n$ , що характеризує розподілення вологого продукту по поверхні сухих частинок і є масою вологого продукту, що одноразово зв'язана одиницею площі поверхні інертних часток у факелі розпилення продукту

$$m_c = 6a^2 \cdot \phi_n / (1 + U_0), \quad (6)$$

де  $U_0$  — початковий вологовміст пивних дріжджів.

З урахуванням виразів (5) і (6) рівняння (4) можна записати у вигляді

$$\frac{dU}{d\tau} = - \frac{\beta(1 + U_0)}{\phi_n R(t_h + 273)} [p_n - \bar{p}_n]. \quad (7)$$

Рішення рівняння (7) проводиться при  $t_T = \bar{t}_T$ , відповідно температура інертних частинок і середня температура інертних частинок. При цьому помилка від заміни поточного значення температури інертного матеріалу її середнім значенням не перевищує 3 %.

Інтегрування рівняння дозволяє визначити час, протягом якого плівка досягне кінцевого вологовмісту  $U_k$ ,

$$\tau_c = \frac{\phi_n R(t_h + 273)}{\beta(1 + U_0)} \int_{U_0}^{U_k} \frac{dU}{p_n - \bar{p}_n}. \quad (8)$$

Вологовміст повітря на виході з агрегату  $X_{\text{вих}}$  може бути визначений з енергетичного балансу для елементарного об'єму теплоносія (9). При цьому вологовмістом повітря на вході можна знехтувати, %.

$$X_{\text{вих}} = \frac{c_n(t_1 - t_2)}{r + U_0 c(t_1 - t_2)/(U_0 - U_k)}, \quad (9)$$

де  $t_2$  — температура теплоносія на виході з апарату, °С

При проектуванні сушильних установок з вібропсевдозрідженим шаром інертних тіл необхідно знати можливі значення температур теплоносія на вході  $t_1$  і на виході  $t_2$ . Вони визначаються заданим вологовмістом готового продукту, який у висушеному стані у вигляді порошку виноситься з апарату з відпрацьованим теплоносієм. При цьому вологовміст готового продукту  $U_k$  і відпрацьованого теплоносія однаковий.

Зв'язок між кінцевим вологовмістом продукту і температурою теплоносія на вході і на виході можна представити:

$$t_1 = t_2 + \frac{0,622 p_n}{c_n [p_\Sigma - p_n]} \left[ r + \frac{U_k c}{U_0 - U_k} (t_2 - t_1) \right]. \quad (10)$$

де  $p_\Sigma$  — тиск сумарний пари води та повітря на виході із апарату, Па.

При цьому першочерговою задачею є знаходження і визначення функціональної залежності між кінцевою температурою теплоносія, його швидкістю та кінцевою вологістю пивних дріжджів.

Результати проведених досліджень наведені у таблиці.

**Значення кінцевої вологості пивних дріжджів від швидкості теплоносія при початковій його температурі 140 °С, %**

Швидкість теплоносія, м/с	Кінцева температура теплоносія, °С					
	55	60	65	70	75	80
2,8	9,37	8,42	7,57	6,89	6,42	5,53
	9,61	8,53	7,69	7,05	6,31	5,96
	9,64	8,4	7,78	7,03	6,44	6,18
3	8,95	7,95	7,15	6,55	5,98	5,56
	8,76	7,98	7,26	6,48	5,92	5,49
	9,02	8,01	7,22	6,65	6,07	5,51
3,2	8,35	7,48	6,75	6,20	5,63	5,21
	8,36	7,53	6,80	6,11	5,69	5,14
	8,46	7,49	6,79	6,17	5,57	5,22

Аналіз отриманих результатів експериментів та їх опрацювання дав можливість отримати функціональну залежність  $t_2 = f(v, W)$ :

$$t_2 = 683,49 \cdot v^{-0,74} \cdot W^{-0,78}, \quad (11)$$

де  $t_2$  — кінцева температура теплоносія (відпрацьованого повітря), °С;  $v$  — швидкість теплоносія, м/с;  $W$  — кінцева вологість продукту, %.

Залежність (1) отримана в наступних межах —  $2,8 \leq v \leq 3,2$ ,  $5 \leq W \leq 13$ .

Доцільність застосування вібропсевдозрідженого шару підтверджується рівномірним висушуванням всієї маси матеріалу, ліквідацією застійних зон і локальних перегрівів, що в комплексі значно поліпшило якість висушеного продукту.

**Висновок.** Встановлено функціональні залежності температури теплоносія на виході із сушильної камери від його швидкості та кінцевої вологості пивних дріжджів. Отримана залежність надає можливість застосування автоматичного регулювання процесу сушіння, при контролюванні температури відпрацьованого повітря  $t_2$ , що забезпечує кінцеву вологість сухого продукту в заданих межах, тобто дозволяє отримувати висушений продукт з сталими якісними показниками.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Куцакова, В.Е. Интенсификация тепло- и массообмена при сушке пищевых продуктов / В.Е. Куцакова, А.Н. Богатырев. — М.: Агропромиздат, 1987. — 236 с.
2. Гельперин, Н.И. Основы техники псевдоожижения / Н.И. Гельперин, В.Г. Айнштейн, В.Б. Кваша. — М., 1984. — 664 с.
3. Якобчук, Р.Л. Дослідження закономірності кінетики сушіння пивних дріжджів / Р.Л. Якобчук, В.Л. Яровий, К.Д. Малецька // Наук. пр. НУХТ. — 2007. — № 20. — С. 35—38.
4. Якобчук, Р.Л. Дослідження кута змочування та поверхневого натягу дріжджів пивних / Р.Л. Якобчук, І.В. Житнецький, В.Л. Яровий // Харчова промисловість. — 2008. — № 6. — С. 15—17.
5. Якобчук, Р.Л. Дослідження термічних та фізико-хімічних властивостей дріжджів пивних / Р.Л. Якобчук, В.Л. Яровий // Наук. пр. НУХТ, 2006. — № 18. — С. 52—53.

*Одержано редколегією 11.02.11 р.*

ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

УДК 66.081.6: 637.142.2

**Ю.Г. ЗМІЄВСЬКИЙ**, канд. техн. наук,

**В.Г. МИРОНЧУК**, д-р техн. наук

*Національний університет харчових технологій*

**Д.Д. КУЧЕРУК**, д-р хім. наук

*Інститут колоїдної хімії та хімії води ім. А.В. Думанського НАН України*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КОНТАКТНОЇ МЕМБРАННОЇ ДИСТИЛЯЦІЇ В ПРОЦЕСІ ВИРОБНИЦТВА ЛАКТОЗИ

Представлені результати досліджень розділення молочної сироватки контактною мембранною дистиляцією (КМД) з метою отримання концентрованих розчинів лактози. Встановлено залежності питомої продуктивності мембран МФФК-3 в межах вмісту сухих речовин від 5 до 58 %.

**Ключові слова:** контактна мембранна дистиляція, лактоза, молочна сироватка

Представлены результаты исследований разделения молочной сыворотки контактной мембранной дистилляцией (КМД) с целью получения концентрированных растворов лактозы. Установлены зависимости удельной производительности мембран МФФК-3 в диапазоне сухих веществ от 5 до 58 %.

**Ключевые слова:** контактная мембранная дистилляция, лактоза, молочная сыворотка

The results of studies of separation of whey direct contact membrane distillation (DCMD) to obtain concentrated solutions of lactose. The obtained dependencies of the mass flux of membranes MFFK-3 in the range of dry matter from 5 to 58 %.

**Keywords:** direct contact membrane distillation, lactose, whey

На підприємствах молочної промисловості при виробництві білково-жирових продуктів (сир кисломолочний, сир твердий, казеїн) близько 90 % від об'єму переробленого молока переходить у молочну сироватку. Незважаючи на цінність компонентів (сироваткові білки, лактоза), що входять до її складу, молочна сироватка на переважній більшості підприємств зливається у каналізацію. Це пов'язано з використанням застарілих енергоємних технологій, які відомі більше 40 років [1].

Виробництво лактози передбачає проведення наступних етапів обробки молочної сироватки: освітлення (відділяються залишки казеїнового пилу та молочного жиру), очищення від баластних сполук (відділяються сироваткові білки, мінеральні речовини), згущення (збільшення концентрації лактози у розчині), отримання готового продукту (кристалізація лактози або висушування розчину). Останнім часом на перших двох і частково на третьому етапах все частіше застосовують мембранні процеси, а саме: мікро-, ультра-, нанофільтрацію, зворотний осмос, електродіаліз. Проте жоден з названих процесів не дозволяє отримувати висококонцентровані розчини з вмістом сухих речовин 50—60 %, як цього вимагає технологічний регламент. Тому на фінішному етапі згущення традиційно застосовують випарювання під вакуумом. Для цього використовують різні одно- та багатокорпусні вакуум-випарні установки, які за умовами кипіння можна поділити на циркуляційні та плівкові [2].

Останнім часом інтенсивно розвивається процес мембранної дистиляції (МД), про що свідчить збільшення кількості публікацій, присвячених дослідженням даного процесу [3]. Це

© Ю.Г. Змієвський, В.Г. Мирончук, Д.Д. Кучерук, 2011

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

пов'язано з наступними перевагами: можливість концентрувати цільові компоненти до межі їх розчинності при невисоких температурах, відсутність в робочих камерах надлишкових тисків та розрідження (окрім вакуумної мембранної дистиляції), простота конструкцій установок, розвинута площа масообміну тощо. При контактній мембранній дистиляції (КМД) розчин, що концентрується (оскільки він має вищу температуру, для простоти будемо називати його «гарячим» та використовувати індекс 1 при позначенні його параметрів), та пермеат (відповідно «холодний» розчин та індекс 2 при позначенні його параметрів) контактують з гідрофобною пористою мембраною, але з різних сторін. Оскільки пори не змочуються рідкою фазою і мембрана не впливає на рівновагу «рідина-пар», створюється основна рушійна сила — різниця тисків пари «гарячого» та «холодного» теплоносіїв. В результаті розчинник випаровується в середину пори мембрани, переноситься до холодного розчину, де і конденсується. Таким чином, у разі концентрування нелетких речовин, парціальним тиском яких можна знехтувати, через мембрану переноситься лише розчинник (у нашому випадку — це вода).

Аналіз наукових публікацій показує, що дуже мало досліджень присвячено розділенню компонентів молочної сироватки КМД. В роботі [4] експериментально доведено, що після відділення білкових сполук з молочної сироватки, можна за допомогою контактної мембранної дистиляції отримати розчин з вмістом лактози до  $300 \text{ г} \cdot \text{дм}^{-3}$ . Зроблені також спроби [5] сконцентрувати сироваткові білки. Однак, низька питома продуктивність, а саме  $1,7\text{—}0,312 \text{ дм}^3 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$  у межах масової частки сухих речовин  $6,5\text{—}29 \%$  не дозволяють рекомендувати даний процес для промислових умов. Очевидно, що це пов'язано із змочуванням пор мембрани, адже сироваткові білки являються поверхнево-активними речовинами. Так, при концентруванні мембранною дистиляцією молока з наявним у ньому молочним жиром та білковими фракціями [6] спостерігалось паралельне зниження питомої продуктивності та селективності мембран. Тому відділення поверхнево-активних речовин є необхідною умовою для ефективного згущення лактози.

**Метою представленої роботи** було: встановлення залежності питомої продуктивності мембрани від вмісту сухих речовин та розміщення мембрани відносно поля гравітаційних сил.

**1. Методи досліджень та лабораторні установки.** Для досліджень процесу КМД було обрано гідрофобні пористі мембрани марки МФФК-3 («Владіпор», Росія) з середнім розміром пор  $0,45 \text{ мкм}$  [7], які мають найбільшу продуктивність в порівнянні з іншими мембранами серії МФФК [8]. Даний тип мембран має достатню термічну і хімічну стійкість, а також пористість в межах  $80\text{—}85 \%$  [7]. Вони характеризуються асиметричністю пористої структури по перерізу мембрани. В зв'язку з цим на процес КМД впливає орієнтація мембрани по відношенню до камери концентрування. Оптимальним вважається [8], коли активний шар розміщений в бік гарячої камери, тому в усіх експериментах ми дотримувались такого положення мембрани. Нами встановлено, що селективність мембран МФФК-3 по хлориду натрію (NaCl) в процесі КМД більше  $99,7 \%$  [9].

### 1.1 Підготовка розчинів перед КМД.

**1.1.1 Модельні розчини лактози** готували шляхом розбавлення кристалічної харчової лактози у дистильованій воді з температурою  $323 \pm 5 \text{ К}$ .

**1.1.2 Молочну сироватку**, отриману на промисловому підприємстві при виробництві сиру кисломолочного, спочатку очищали від залишків молочного жиру та казеїнового пилу мікрофільтрацією. Для цього використовували циркуляційну установку з фільтрувальним елементом (ВССФ, Aquafilter) патронного типу і діаметром пор  $5 \text{ мкм}$ . Циркуляція молочної сироватки по замкнутому контуру дозволяла формувати на поверхні фільтрувального елемента динамічну мембрану та затримувати зазначені компоненти. Сироватку відбирали після  $20\text{—}25$  циклів. Далі фільтрат пастеризували, нагріваючи до  $345 \pm 2 \text{ К}$  з витриманням протягом  $15\text{—}20 \text{ с}$  та наступним різким охолодженням до температури  $288\text{—}293 \text{ К}$ . Сироваткові білки відділялись за допомогою типової ультрафільтраційної циркуляційної установки з плоскими мембранами УПМ-50 («Владіпор», Росія) круглої форми загальною площею  $2,35 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$ .

В зв'язку з тим, що ультрафільтраційні мембрани не затримують близько  $5 \%$  наявних у молочній сироватці білкових сполук, останні в процесі контактної мембранної дистиляції під дією температури денатурують та осідають на поверхні мембран, що знижує ефективність процесу розділення. Тому, для відділення залишків білкових сполук, фільтрат, отриманий на

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

стадії ультрафільтрації нагрівали до температури 333 К, витримували 20 хв та фільтрували через фільтрувальний папір.

1.2 *Лабораторна установка для проведення досліджень* складалась з двох циркуляційних контурів: «гарячого» та «холодного». Її схема та принцип дії детально описані у роботі [9]. В залежності від мети експерименту «гарячий» розчин подавали у верхню або у нижню камеру мембранної комірки, яку розташовували у різних положеннях відносно поля гравітаційних сил (встановлювали горизонтально чи вертикально). Об'ємна швидкість розчинів складала 0,025 дм<sup>3</sup>/с. В даній роботі використовували два типи мембранних комірок: круглої та прямокутної форми. Кругла використовувалась при розділенні модельних розчинів лактози, а прямокутна — при розділенні ультрафільтратів молочної сироватки.

2. **Результати та їх обговорення.** Відомо, що поверхнево-активні речовини, до яких відносяться білкові сполуки та молочний жир, сприяють гідрофілізації поверхні гідрофобних мембран, що призводить до проникнення рідкої фази у пори і припинення процесу КМД. Тому перед КМД зазначені сполуки відділялись описаним у розділі 1.1.2 способом. На першому етапі, використовуючи модельні розчини лактози визначили питому продуктивність мембран МФФК-3 в залежності від вмісту сухих речовин (рис. 1). Поступове зниження продуктивності  $J$ , що розраховується за формулою 1, пов'язане зі зменшенням активності  $a^w$  води при зростанні концентрації лактози.

$$J = C_m F (p_1 a_1^w - p_2 a_2^w) \quad (1)$$

де  $p_1, p_2$  — парціальний тиск чистої води при температурі  $T_1$  та  $T_2$  відповідно, Па;  $C_m$  — коефіцієнт паропроникності мембрани, кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>·Па<sup>-1</sup>;  $F$  — площа мембрани, м<sup>2</sup>;  $a^w$  — активність води у відповідному розчині.

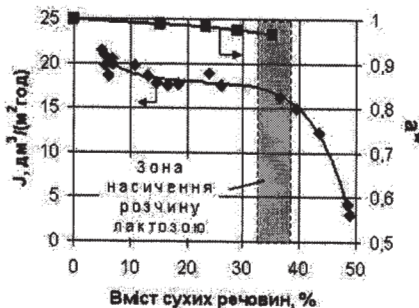


Рис. 1. Залежність питомої продуктивності  $J$  мембрани МФФК-3 та активності  $a^w$  води [10] від вмісту сухих речовин при КМД модельних розчинів лактози.  $T_1=330\pm 2$  К,  $T_2=298$  К, об'ємна швидкість 56 дм<sup>3</sup>/год.

Активність води визначається за відомою формулою 2. Експериментальні значення  $a^w$  для водних розчинів лактози отримано в роботі [10] (рис. 1).

$$a^w = \frac{p^*}{p} \quad (2)$$

де  $p^*$ ,  $p$  — парціальний тиск концентрованого розчину та чистої води відповідно, Па.

Різке зниження питомої продуктивності  $J$  спостерігається при досягненні вмісту сухих речовин 35 % і пояснюється початком кристалізації лактози.

Питома продуктивність  $J$  в межах сухих речовин 5—35 % зменшується швидше, ніж активність  $a^w$  води, що, очевидно, пов'язано з концентраційною поляризацією [11] та зміною теплофізичних властивостей розчину.

Для реальних розчинів наявність мінеральних речовин, органічних кислот тощо, збільшує розчинність лактози, тому за промислових умов, після відділення основної частини нецукрів (білкові сполуки, молочний жир, частина мінеральних речовин), розчини згущують до вмісту сухих речовин 50—60 % (в залежності від чистоти розчину).



## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

Відомо, що при контактній мембранній дистиляції на швидкість масопередачі та питому продуктивність мембрани впливає її розміщення у полі гравітаційних сил (вертикальне, горизонтальне) [8, 12]. Найкращі умови створюються, коли напрямок природної конвекції співпадає з напрямком тепломасопередачі, тобто за розміщення «гарячої» камери під горизонтально розташованою мембраною. У роботі [8] за результатами експериментальних досліджень зроблено висновок, що питома продуктивність мембрани МФФК-3 (по дистильованій воді) при її вертикальному розміщенні має проміжне значення між максимальною (горизонтальне розміщення, гаряча камера знизу) та мінімальною (горизонтальне розміщення, гаряча камера зверху) питомою продуктивністю. При створенні промислових установок плоско-паралельного типу, необхідно враховувати вищезазначене. Адже за даними роботи [8] при горизонтальному розташуванні мембран 50 % їх робочої площі будуть мати найбільшу питому продуктивність, а інші 50 % відповідно найменшу.

Як бачимо з рис. 2, питома продуктивність мембрани МФФК-3 при вертикальному та горизонтальному (коли гаряча камера зверху) розміщенні співпадають. На основі отриманих результатів можна зробити висновок, що мембранно-дистиляційні установки з горизонтальним розміщенням мембран (за умов використання мембран МФФК-3) матимуть більшу продуктивність. Тому наступні експерименти проводились при горизонтальному розміщенні мембрани.

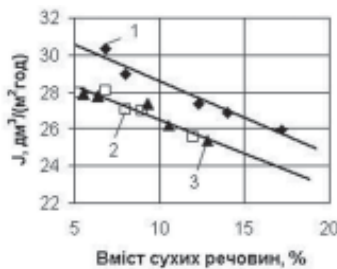


Рис. 2. Зміна питомої продуктивності мембран МФФК-3 в залежності від вмісту сухих речовин ультрафільтрату молочної сироватки при КМД: 1 — горизонтальне розміщення мембранної комірки, «гаряча» камера знизу, 2 — горизонтальне розміщення мембранної комірки, «гаряча» камера зверху, 3 — вертикальне розміщення мембранної комірки.  $T_1=333$  К,  $T_2=298$  К.

Як видно з рис. 3, на початку процесу розділення, коли вміст сухих речовин у молочній сироватці (після відділення білкових сполук ультрафільтрацією) приблизно 5 %, питома продуктивність в середньому на 12 % вище, якщо «гаряча» камера знаходиться під мембраною, а не над нею. Проте ця розбіжність зменшується пропорційно збільшенню масової частки сухих речовин, що, очевидно, пов'язано із підвищенням в'язкості розчину. Останнє явище уповільнює перенесення речовини природною конвекцією у об'ємі робочої камери [13] і тому при досягненні у молочній сироватці 35—40 % сухих речовин положення «гарячої» камери відносно мембрани практично не впливає на питому продуктивність.

Для пояснення експериментально встановленого факту було розраховане значення  $Gr \cdot Pr$  (формула 4), значення якого представлені в таблиці. Відомо [13], що критичне значення  $Gr \cdot Pr_{кр}$  знаходиться в межах  $7 \cdot 10^5$ , перевищення якого вимагає враховувати природну конвекцію, а режим руху в такому випадку не є ламінарним.

$$Gr \cdot Pr = \frac{g \beta_1 \Delta T d_e^3 \rho_1 C_1}{\nu_1 \lambda_1} \quad (3)$$

де  $Gr$  — критерій Грасгофа;  $Pr$  — критерій Прандтля;  $g$  — прискорення земного тяжіння,  $m \cdot s^{-2}$ ;  $\beta$  — коефіцієнт термічного розширення,  $K^{-1}$ ;  $d_e$  — еквівалентний діаметр, м;  $\rho_1$  — густина,  $kg \cdot m^{-3}$ ;  $C_1$  — теплоємність,  $Dж \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ;  $\nu$  — кінематична в'язкість,  $m^2 \cdot s^{-1}$ ;  $\lambda$  — теплопровідність,

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

$\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ ,  $\Delta T = |T_m - T_1|$  (індекс  $m$  та  $1$  — відповідає температурі мембрани та «гарячого» розчину відповідно),  $T_m = 0,5(T_1 + T_2)$ . Фізичні властивості у виразі  $\text{Gr}\cdot\text{Pr}$  вибирали при температурі  $T = 0,5(T_m + T_1)$ . Кінематична в'язкість та густина розраховувались за формулою 4 та 5 [10], коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_1$  та теплоємності  $C_1$  за даними робіт [14, 15]; при розрахунках приймалися  $\lambda_1 = 0,664 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ ,  $C_1 = 3740 \text{ Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ , у зв'язку з відсутністю даних щодо значення коефіцієнта термічного розширення в для нашого розчину, його значення було взяте, як для чистої води [13] і дорівнювало  $\beta_1 = 4,49\cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$ . Формули 4 та 5 були отримані при дослідженні модельних розчинів лактози [10], тому що властивості ультрафільтрату молочної сироватки ще не вивчено в достатній мірі.

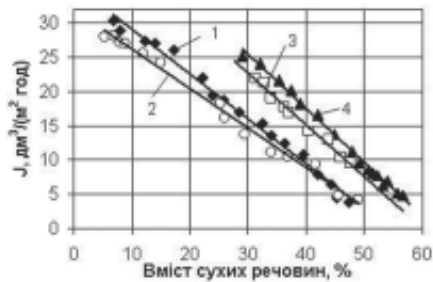


Рис. 3. Зміна питомої продуктивності мембран МФФК-3 в залежності від вмісту сухих речовин ультрафільтрату молочної сироватки при КМД за горизонтального розміщення мембранної комірки: 1 — «гаряча» камера знизу; 2 — «гаряча» камера зверху,  $T_1=333 \text{ К}$ ,  $T_2=298 \text{ К}$ ; 3 — «гаряча» камера знизу,  $T_1=348 \text{ К}$ ,  $T_2=313 \text{ К}$ ; 4 — «гаряча» камера знизу,  $T_1=348 \text{ К}$ ,  $T_2=298 \text{ К}$ .

$$v = \frac{4,674 \cdot 10^{-5} \cdot \exp\left(237,9 \cdot \frac{c}{T_1 - 198,25}\right)}{T_1 - 244,76} \quad (4)$$

$$\rho = 1094,9 + 350,1 \cdot c - 276,8 \cdot c^2 + 154,4 \cdot c^3 - 0,305 \cdot T_1 \quad (5)$$

де  $c$  — концентрація лактози,  $\text{кг}\cdot\text{кг}\text{H}_2\text{O}^{-1}$ ;  $T$  — температура,  $\text{К}$ .

### Залежність $\text{Gr}\cdot\text{Pr}$ від концентрації лактози при $T_1=333 \text{ К}$ , $T_2=298 \text{ К}$

$c$ , %	$v \cdot 10^7$ , $\text{м}^2\text{с}^{-1}$	$\rho$ , $\text{кг м}^{-3}$	$\text{Pr}$	$\text{Gr} \cdot 10^{-4}$	$\text{Gr}\cdot\text{Pr} \cdot 10^{-4}$
5	6,50	1011	3,70	1,927	7,131
10	7,25	1029	4,20	1,548	6,504
15	8,20	1047	4,84	1,211	5,855
20	9,43	1066	5,66	0,9157	5,183
25	11,03	1085	6,74	0,6693	4,51
30	13,22	1105	8,23	0,4658	3,831
35	16,24	1126	10,29	0,3086	3,177

Незважаючи на те, що  $\text{Gr}\cdot\text{Pr} < 7 \cdot 10^5$  (табл.) очевидно, що природна конвекція впливає на тепло- та масоперенесення, особливо при початковому вмісті сухих речовин. Адже, як видно з таблиці, значення  $\text{Gr}\cdot\text{Pr}$  при вмісті сухих речовин 5 % у 2,25 рази більше, ніж при 35 %. Причиною такого явища є збільшення в'язкості розчину у 2,5 рази при зростанні частки розчинених речовин.

Якщо порівняти рушійну силу, а саме різницю тисків пари при однаковій різниці температур, але різній середній температурі, то отримаємо наступне: при  $\Delta T = 35 \text{ К}$ ,  $\Delta p = 16390 \text{ Па}$ , якщо  $T_1 = 333 \text{ К}$ ,  $T_2 = 298 \text{ К}$ ;  $\Delta p = 30500 \text{ Па}$ , якщо  $T_1 = 348 \text{ К}$ ,  $T_2 = 313 \text{ К}$ . Це пояснює різну питому продуктивність за умови однакового значення  $\Delta T$  (лінія 1 та 3 рис. 3). Збільшення перепаду температур призводить до збільшення температурної поляризації та теплових втрат.



## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

Наприклад, при  $\Delta T = 50 \text{ K}$  ( $T_1 = 348 \text{ K}$ ,  $T_2 = 298 \text{ K}$ ) та  $\Delta T = 35 \text{ K}$  ( $T_1 = 348 \text{ K}$ ,  $T_2 = 313 \text{ K}$ ) уявна (тобто розрахована по  $\Delta T$  на вході в камеру, а не по  $\Delta T$  на поверхні протилежних сторін мембрани) рушійна сила відрізняється на 12,3 %, однак питома продуктивність зростає лише на 8,5 % (рис. 3).

При наближенні вмісту сухих речовин до межі розчинності лактози теплова поляризація може призвести до початку процесу її кристалізації. Однак, лінійна залежність питомої продуктивності (рис. 3) вказує на відсутність цього негативного явища.

**Висновки.** Експериментально встановлено, що за допомогою КМД можна сконцентрувати ультрафільтрат молочної сироватки до вмісту сухих речовин 50—58 %, що дозволяє рекомендувати зазначений процес у технологіях виробництва лактози. Показано, що мембранно-дистиляційні установки, в яких використовуються мембрани марки МФФК-3, мають більшу продуктивність за умови горизонтального розміщення мембран.

**Подяки.** Представлена робота виконана за підтримки Державного фонду фундаментальних досліджень України, номер державної реєстрації №0108U011256.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Храмцов А.Г. Молочный сахар / А. Г. Храмцов. — М.: Пищ. пром-ть, 1972. — 192 с.
2. Обладнання підприємств переробної та харчової промисловості / [Мирончук В.Г., Гулий І.С., Пушанко М.М. та ін.]; під ред. В.Г. Мирончука. — [2-е вид.]. — Вінниця: Нова книга, 2007. — 648 с.
3. El-Bourawi M.S. A framework for better understanding membrane distillation separation process (Review) / M. S. El-Bourawi, Z.Ding, R.Ma, M. Khayet // J.Membr.Sci. — 2006. — V. 285. — P. 4—29.
4. Chlubek N. Concentration of dairy wastes by membrane distillation / N. Chlubek, M. Tomaszewska // Environ. Prot. Eng. — 1987. — № 1. — V. 13. — P. 17-23.
5. Christensen K. Using direct contact membrane distillation for whey protein concentration / K. Christensen, R. Andresen, I. Tandskov // Desalination. — 2006. — V. 200. — P. 523—525.
6. Kimura S. Transport phenomena in membrane distillation / S. Kimura, S.-I. Nakao, S.-I. Shimatani // J. of Membr. Sci. — 1987. — V. 33. — P. 285-298.
7. Мембраны. Фильтрующие элементы. Мембранные технологии ЗАО НТЦ Владипор: каталог. — Владимир, 2005. — 22 с.
8. Гунько С.М. Комплексна мембранна технологія концентрування яблучного соку: дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.17.18 «Мембрани і мембранні технології». / С.М. Гунько. — Ялта, 2001.
9. Змієвський Ю.Г. Визначення основних характеристик гідрофобної мікрофільтраційної мембрани марки МФФК-3 при мембранній дистиляції / Ю.Г. Змієвський, В.Г. Мирончук, Д.Д. Кучерук // Харчова промисловість. — 2010. — № 9. — С. 90—94.
10. Полянский К.К. Кристаллизация лактозы в производстве молочных продуктов: дис. ... доктора техн. наук: 05.18.04 / Полянский Константин Константинович. — Воронеж, 1981. — 331 с.
11. Енциклопедія мембран: в 2 т. / [упоряд. М.Т. Брик]. — К.: Вид. дім «Києво-Могилянська академія», 2005.— .—Т.1. — 2005. — 658 с.
12. Брык М.Т. Мембранная дистиляция / М.Т. Брык, Р.Р. Нигматулин // Успехи химии. — 1994. — Т. 63. — № 12. — С. 1114—1129.
13. Теплотехнический справочник: в 2 т. / [Под общ. ред. В.Н. Юрнева, П.Д. Лебедева]. — М., «Энергия», 1976.—.—Т.2. — 1976. — 896 с.
14. Бывальцев Ю.А. Теплопроводность водных растворов лактозы / Ю.А. Бывальцев, Б.Г. Перлыгин, К.К. Полянский // Изв. вузов. Пищ. технология. — 1974. — № 1. — С. 70—72.
15. Бывальцев Ю.А. Теплоемкость водных растворов лактозы / Ю.А. Бывальцев, Б.Г. Перлыгин, К.К. Полянский // Изв. вузов. Пищ. технология. — 1974. — № 4. — С. 159—161.

Одержана редколлегією 21.02.2011 р.

ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

УДК 621.789

**А.В. ДЕРЕНІВСЬКА**, здоб.

**Л.О. КРИВОПЛЯС-ВОЛОДИНА**, канд. техн. наук, доц.,

**В.М. ЛЮБІМОВ**, канд. техн. наук, доц.

*Національний університет харчових технологій*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ОПЕРАЦІЇ ПЕРЕМІЩЕННЯ СФОРМОВАНИХ КАРТОННИХ ПАЧОК З ПЛОСКОСКЛАДЕНИХ ЗАГОТОВОК КАРМАННИМИ НОСІЯМИ В РОТОРНИХ МАШИНАХ**

---

Наведено аналіз процесу перевантаження тари в карманних носіях різних типів транспортних систем пакувальних машин. Мета проведеного дослідження процесу переміщення картонної пачки карманними носіями в роторних машинах — визначення оптимального значення розподіленого навантаження від поворотних захватів, яке забезпечує надійну фіксацію пачки та цілісність вміщеного продукту.

**Ключові слова:** тара, картонна пачка, транспортна система, пакувальна машина, карманний носій, захват, напрямні.

Приведен анализ процесса перегрузки тары в карманных носителях разных типов транспортных систем упаковочных машин. Цель проведенного исследования процесса перемещения картонной пачки карманными носителями в роторных машинах — определение оптимального значения распределенной нагрузки от поворотных захватов, которая обеспечивает надежную фиксацию пачки и целостность вмененного продукта.

**Ключевые слова:** тара, картонная упаковка, пачка, транспортная система, упаковочная машина, карманный носитель, захват, направляющие.

An analysis process moving tare in the pocket of different types transport systems packing machines. A purpose of the conducted research of process cardboard pack moving in pocket of rotor machines is determination of optimal value of the up-diffused loading from turning captures, which provides the reliable fixing pack and integrity the contained product.

**Keywords:** tare, cardboard package, cardboard package, transport system, packing machine, pocket, capture, sending.

Аналіз стану ринку показує, що значна частка харчової продукції фасується в картонну упаковку форми паралелепіпеда. Один із найпоширеніших способів пакування продукції — це пакування в плоскоскладену картонну заготовку. Формування та закриття дна упаковки, фасування продукції, нанесення клею, закриття упаковки, а також датування здійснюється одночасно з транспортуванням картонної упаковки. Для цього використовують пакувальні машини зі спеціальними карманними носіями. Карманні носії крім переміщення забезпечують позиціонування тари при проведенні певних технологічних операцій в пакувальній машині.

© А.В. Деренівська, Л.О. Кривопляс-Володіна, В.М. Любимов 2011

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

Карманні носії можуть встановлюватися на гнучких тягових органах для транспортування картонної упаковки в машинах як лінійного типу так на роторах в машинах карусельного типу. За траєкторією руху карманні носії, в машинах карусельного типу вони бувають горизонтальні та вертикальні. За структурою переміщення картонної упаковки в носіях карманного типу пакувальні машини бувають дискретної (періодичної) та безперервної дії. Карманні носії для переміщення картонних пачок конструктивно можна поділити на два типи: кармани з нерухомими жорсткими стінками-бортами і кармани з поворотними захватами.

Кармани з нерухомими стінками прості за конструкцією, не мають рухомих ланок і відповідно не потребують приводів. Картонна пачка встановлюється в карман з певним зазором.

На рис. 1 наведена типова схема транспортної системи з вертикальним розміщенням пачок. Для забезпечення надійної поперечної фіксації пачок на нижній несучій площині (4) транспортна система оснащується бічними напрямними (3). Недоліком такої системи є те, що вільне положення пачки (1) в кармані з нерухомими стінками (2) потребує конструктивно складних напрямних для її утримання вертикально; неможливість звільнення від контакту зі стінками кармана та бічними напрямними при проведенні необхідних технологічних операцій; збільшення сумарного опору при контакті пачки з бічними напрямними, особливо на криволінійних ділянках транспортної системи. Для харчової продукції, яку можна фасувати в горизонтально розміщену пачку більш раціональною є транспортна система зображена на рис. 2. У такому випадку роль нижньої несучої площини виконує внутрішня стінка карману. Це дає змогу зменшити сумарний опір при контакті пачки. Крім того така конструкція звільняє клапани упаковки для проведення наступних технологічних операцій і підвищує продуктивність транспортної системи.

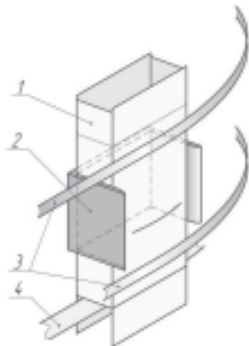


Рис. 1. Криволінійна ділянка транспортної системи з вертикальними карманними носіями, які мають нерухомі стінки:  
1. картонна пачка; 2. нерухомі стінки;  
3. криволінійні бічні напрямні; 4. нижня несуча площина

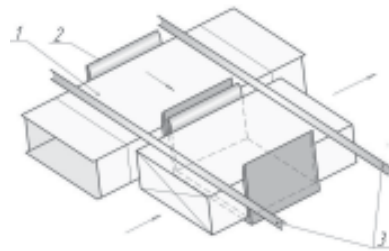


Рис. 2. Лінійна транспортна система з горизонтальними карманними носіями, які мають нерухомі стінки:  
1 — картонна пачка; 2 — нерухомі стінки; 3 — верхні напрямні

Використання другого типу карманних носіїв дозволяє виконати операцію формоутворення упаковки безпосередньо в кармані за допомогою поворотних захватів. Це спрощує технологічну схему пакувального процесу та підвищує продуктивність пакувальної машини. Характерне жорстке фіксування пачки по бічним граням. Найбільш поширена лінійна транспортна система з горизонтальним розміщенням карманів (рис. 3). Вона дозволяє забезпечити технологічний цикл безперервної дії і має найбільшу продуктивність. Для надійної фіксації пачки крім поворотних захватів (2) необхідні додаткові верхні (3) та нижні (4) напрямні. Недолік такої системи — зростання сумарного опору при контакті пачки з напрямними.

Транспортна система з вертикальним карманним носієм (на рис. 4), яка складається з поворотних захватів (2), задньої стінки (3) та нижнього дна (4), не використовує бічні напрямні. Це робить сумарний опір переміщенню пачки мінімальним порівняно з вище згадуваними транспортними системами.

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

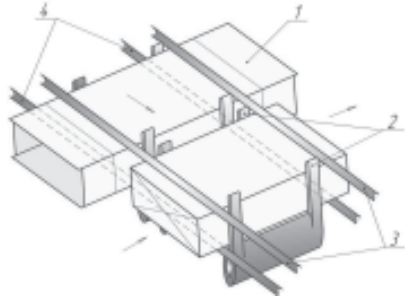


Рис. 3. Лінійна транспортна система з горизонтальними карманными носіями, які мають поворотні захвати:  
1 — картонна пачка; 2 — поворотні захвати;  
3 — верхні напрямні; 4 — нижні напрямні.

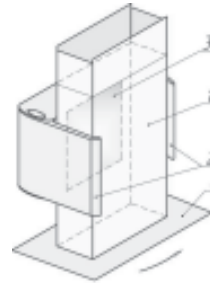


Рис. 4. Вертикальний карманный носій з поворотними захватами роторної транспортної системи:  
1 — картонна пачка; 2 — поворотні захвати; 3 — задня стінка; 4 — нижнє дно.

На рис. 5 показана схема силового навантаження при переміщенні картонної пачки з продукцією в вертикальному карманному носії з поворотними захватами роторної транспортної системи. Основна мета проведеного дослідження полягає в визначенні раціональних кінематичних та динамічних параметрів переміщення пачки.

Під час побудови математичної моделі, яка описує процес переміщення картонної пачки при розгоні прийняті такі припущення:

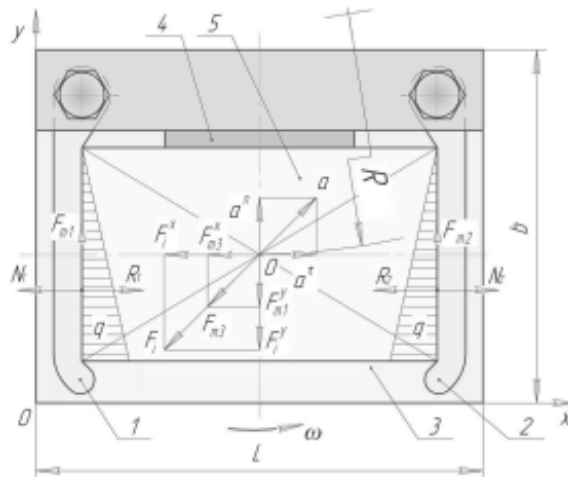


Рис. 5. Принципова схема карманного носія роторної машини для переміщення сформованих картонних пачок:  
1, 2 — поворотний захват; 3 — нижнє несуче дно; 4 — задня стінка; 5 — картонна пачка

картонна упаковка рівномірно заповнена продукцією;  
центр ваги упаковки співпадає з її геометричним центром;  
переміщення відбувається за умови максимальної швидкодії.

При переміщенні картонної пачки в карманному носії роторної транспортної машини на неї діють такі сил:

$R_1, R_2$  — сила реакції відповідного захвату на картонну пачку;  
 $N_1, N_2$  — сила реакції картонної пачки при дії на неї відповідним захватом.  
 $F_{T1}, F_{T2}$  — сила тертя зчеплення упаковки з відповідним захватом;

$F_{T3}$  — сили тертя зчеплення упаковки з нижнім несучим дном карману;

$F_i$  — сила інерції при переміщенні пачки з продукцією.

При переміщенні картонної пачки в карманному носії роторної транспортної машини на неї діє навантаження від таких сил:

$R_1, R_2$  — сила реакції відповідного захвату на картонну пачку;

$N_1, N_2$  — нормальна реакція картонної пачки на відповідний захват;

$F_{T1}, F_{T2}$  — сила тертя зчеплення упаковки з відповідним захватом;

$F_{T3}$  — сили тертя зчеплення упаковки з нижнім несучим дном карману;

$F_i$  — сила інерції при переміщенні пачки з продукцією.

Рівняння рівноваги картонної пачки заповненої продукцією при переміщенні в карманному носії роторної транспортної машини набуває вигляду:

$$F_{T1} + F_{T2} - F_{T3} - F_i^y = 0, \quad (1)$$

де  $F_{T3}^y$  — проекція сили тертя зчеплення упаковки з нижнім несучим дном карману на вісь OY;

$F_i^y$  — проекція сили інерції на вісь OY.

**Висновки.** Результати проведеного дослідження представлені графіками на рис. 6 та рис. 7. Дослідження процесу перевантаження картонної пачки з продукцією в роторній пакувальній машині дало можливість визначити мінімально потрібне розподілене навантаження від дії захватів на картонну пачку, яке забезпечує надійну фіксацію в карманному носії та цілісність вміщеного продукту.

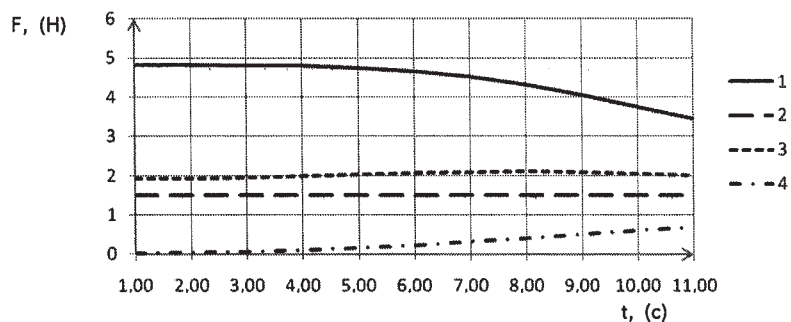


Рис. 6. Графік зміни динамічних навантажень при переміщенні картонної пачки: 1 — сила інерції при переміщенні пачки з продукцією; 2 — сила тертя зчеплення упаковки з захватом (1); 3 — сила тертя зчеплення упаковки з нижнім несучим дном (3); 4 — сила тертя зчеплення упаковки з захватом (2)

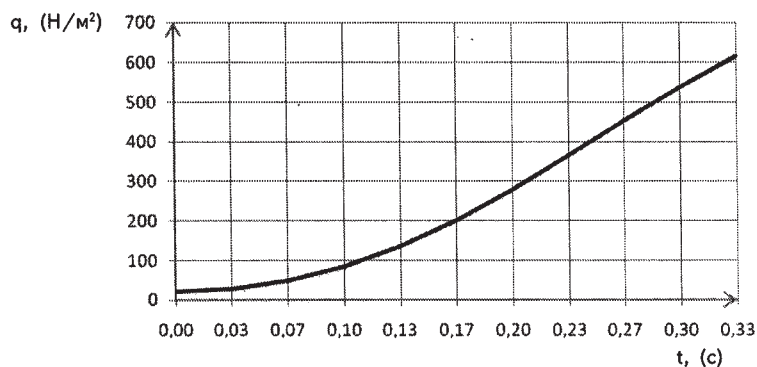


Рис. 7. Графік зміни розподіленого навантаження при переміщенні від дії захватів на картонну пачку

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

### **ЛІТЕРАТУРА**

1. *О.М. Гавва, А.П. Беспалько, А.І. Волчко* . Пакувальне обладнання в 3 кн. — Київ: ІАЦ «Упаковка».
2. *Упаковка из картона* /В.Л. Шредер, С.Ф. Пилипенко. — Киев: АИЦ «Упаковка», 2004. — 560 с.
3. *Чернов М.Е.* Упаковка сыпучих продуктов: Учебное пособие. — М.: ДеЛи, 2000. — 163 с.
4. *Спиваковский А.О., Дячков В.К.* Транспортирующие машины: Учебное пособие для машиностроительных вузов. — 3-е изд. перераб.— М.: Машиностроение, 1983. — 487 с.

*Одержано редколлегією 1.03.2011 р.*

УДК 633.002.68:620.9

О.О. ОСЬМАК, асист.,  
О.О. СЕРЬОГІН, д-р техн. наук  
Національний університет харчових технологій

## СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ГАЗИФІКАЦІЇ РОСЛИННОЇ БІОМАСИ

В статті розглянуто конструктивні елементи і технологічну схему застосування газогенераційного енергетичного комплексу для термоконверсії рослинної біомаси в товарні продукти.

**Ключові слова:** рослинна біомаса, газогенераційний енергетичний комплекс, газифікація.

В статье рассмотрены конструктивные элементы и технологическая схема применения газогенерационного энергетического комплекса для термоконверсии растительной биомассы в товарные продукты.

**Ключевые слова:** растительная биомасса, газогенерационный энергетический комплекс, газификация.

In the article the elements and technological scheme of hazoheneratsiyono energyscomplex for termokonversiyy plant biomass in commodity products.

**Key words:** plant biomass, hazoheneratsiyuu energy complex, gasification.

**Проблема.** У нових економічних умовах у зв'язку з різким збільшенням вартості традиційних палив (нафтопродукти) актуальним завданням стає освоєння та використання місцевих, відносно дешевих альтернативних палив. Найбільш потужним місцевим енергетичним ресурсом для більшості регіонів є, рослинна біомаса і відходи її переробки, залучення яких до паливного балансу країни дозволило б істотно знизити потреби в традиційних видах палива.

В процесі функціонування будь-якого підприємства утворюється велика кількість різноманітних відходів виробництва, що містять вуглець, і складаються з відпрацьованих паливно-мастильних матеріалів, резино-технічних виробів, упаковки (тари), пластмас, побутових відходів, технологічних відходів використаної сировини, продуктів аспірації тощо. У той же час, на більшості промислових підприємств не здійснюється планомірна робота по утилізації промислових відходів (ПВ), що призводить до розповсюдження в атмосфері, ґрунті і поверхневих підземних водах ряду шкідливих і високотоксичних речовин, що негативно впливає на соціальну сферу і екологічне середовище в регіоні [1, 3, 6].

Як безвідходну і автоенергетичну технологію утилізації ПВ доцільно застосувати газифікацію з виробленням генераторного газу, теплової та електроенергії шляхом комплексної термоконверсії всієї маси органічних відходів в товарні продукти.

**Мета.** Розроблення газогенераційного енергетичного комплексу для вирішення проблем газифікації рослинної біомаси.

У свій час для газифікації різного палива були розроблені і експлуатовалися різноманітні газогенераторні установки, які конструктивно адаптувалися для досягнення конкретних експлуатаційних завдань: отримання тепла, електроенергії, синтез-газу, рудних концентратів рідкісних металів і так далі.

Нами запропонований метод повітряної газифікації рослинної біомаси в нерухомому (стаціонарному) шарі. Застосування повітряної газифікації рослинної біомаси дозволяє

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

здешевити отримання генераторного газу, причому процес газоутворення проходить при атмосферному тиску.

Вибраний метод має ряд суттєвих переваг перед іншими способами газифікації твердого палива:

- можливість побудови газогенераторів великої одиничної потужності;
- універсальність методу, який дозволяє застосовувати всі види рослинної біомаси, а також перехід з повітряного дуття на кисневе і парокисневе дуття;
- невелика металоємність;
- мала кількість стадій для підготовки рослинної біомаси [2, 5].

Основні параметри вибраного процесу газифікації представлені в таблиці 1

**Таблиця 1. Основні параметри вибраного процесу газифікації**

Найменування параметру	Одинця виміру	Значення параметру
Тип процесу газифікації	—	зворотний
Вологість палива (не більше)	%	50
Витрати повітря на 1 кг палива	м <sup>3</sup> /кг	0,8 ÷ 2,0
Вихід сухого газу із 1 кг палива	м <sup>3</sup> /кг	в залежності від сировини 1,4 ÷ 4,2
Витрата палива	кг/год.	20,0 ÷ 150,0
Температура в зоні горіння	°С	1200
Температура газу на виході із газогенератора	°С	550
Температура газу після фільтру тонкої очистки генераторного газу	°С	45 ÷ 60
Тиск в елементах комплексу, не вище	кПа	25
Теплотворна здатність газу	ккал/м <sup>3</sup>	в залежності від сировини 1560 ÷ 1200
Потужність генератора (теплова)	кВт	в залежності від сировини 100,0 ÷ 400,0

За участі автора розроблений і виготовлений дослідний зразок газогенератора шарового типу зворотної дії, з запроєктованою тепловою потужністю від 100 до 200 кВт (рис. 1). Результати, отримані при газифікації в ньому різних видів низькосортного і високосортного палива, показали перспективність застосування технології газифікації для вирішення завдань зміни агрегатного стану рослинної біомаси [2].

Газогенератор складається з металевого трубчастого корпусу (3) з вбудованим паливним бункером (2), завантажувальним пристроєм (1), реакторною камерою (4) і зольником (8) для видалення золи і шлаку. Повітря, необхідне для газифікації палива, подається компресором безпосередньо в реакторну камеру, або всмоктується за рахунок депресії, створюваної двигуном внутрішнього згорання (у випадку застосування когенераційних технологій).

Бункер (2) призначений для завантаження палива і є циліндром, виготовленим з листової маловуглецевої сталі. Бункер встановлений усередині корпусу і закріплений болтами на термостійких прокладках на його фланці разом з кришкою. Паливо завантажується в паливний бункер дозовано. Одна доза рівна 0,375 м<sup>3</sup>. Цієї кількості, залежно від навантаження і виду палива, що використовується, вистачає на 246 години автономної роботи комплексу.

Завантажувальний пристрій являє собою люк (1), що закривається кришкою. По зовнішньому колу в кришці встановлений термостійкий матеріал, для ущільнення. З тією ж метою у кріпленні кришки люка введений амортизатор у вигляді листової ресори. У разі підвищення тиску усередині газогенератора (наприклад, при спалахах газу) унаслідок наявності запобіжного клапана (13) надлишок газу виходить назовні. На бічній поверхні корпусу в нижній його частині зроблено два люки (6), (7) з кришками, на різьбі. Нижній люк призначений для видалення золи із камери зольника (8), а верхній — для довантаження палива в зону відновлення. Люки мають ущільнюючі прокладки (термостійкий матеріал/сталь).



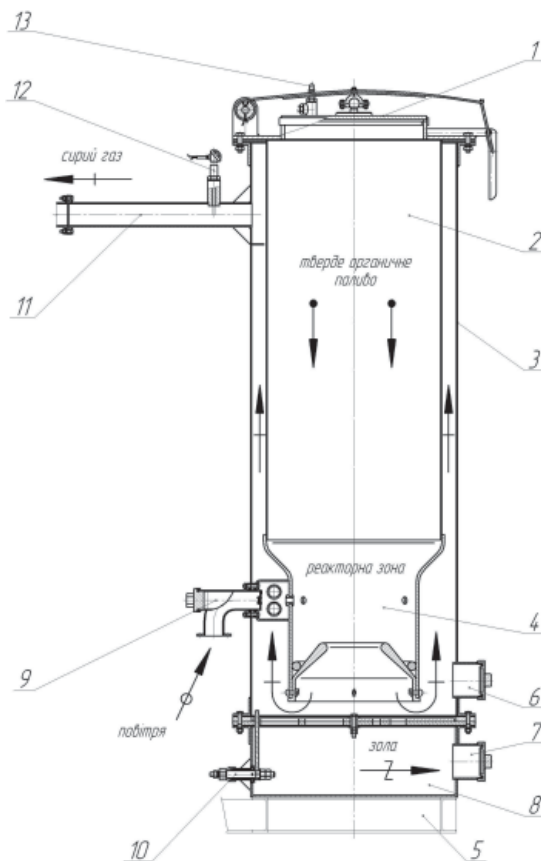


Рис. 1. Загальний вигляд газогенераційного енергетичного комплексу:  
 1 — кришка завантажувального бункера, 2 — бункер палива, 3 — корпус газогенератора, 4 — реактор, 5 — рама, 6 — розпалювальний люк, 7 — люк зольника, 8 — зольник, 9 — повітряний колектор, 10 — шурувальний механізм, 11 — патрубок генераторного газу, 12 — прилад для вимірювання температури, 13 — запобіжний клапан

Для відбору газу у верхній частині корпусу газогенератора приварений патрубок, до якого приєднаний газовідвідний трубопровід (11). При такому розташуванні патрубка газ, що відсмоктується із зони відновлення, проходить по кільцевій порожнині, утвореній стінками корпусу (3) і бункера (2), і обігріває бункер, стабілізуючи термохімічні процеси, що протікають в реакторній зоні (4) (крім того відбувається підсушка палива), а сам газ — охолоджується.

Реакторна камера призначена для забезпечення інтенсивного згорання палива. Корпус камери виготовлений з маловуглецевої листової сталі і приварений до нижньої частини бункера. У нижній частині корпусу закріплена, на чотирьох штирях горловина, відлита з хромистої сталі. Між корпусом і горловиною прокладений термостійкий ущільнювач.

У середній частині корпусу камери горіння розташовано по колу п'ять отворів — фурм для підведення повітря. Одна фурма безпосередньо сполучена з повітророзподільною коробкою (9), привареною до корпусу. Решта фурм сполучені з повітророзподільною коробкою трубами. До повітророзподільної коробки прикріплені чавунні повітрохідні патрубки, що сполучаються зовні за допомогою трубопроводів з повітродувкою. У патрубку встановлений зворотний клапан, що перешкоджає виходу газу з газогенератора, наприклад при зупинці двигуна в парі з яким він використовується.

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

Колосникові ґрати, розташовані в нижній частині корпусу газогенератора, підтримують шар розжареного палива під реакторною камерою. Зола через колосникові ґрати провалюється в камеру зольника. Прошуровування в цій зоні здійснюється важелем, сполученим з квадратним кінцем осі ґрат, що проходить назовні через сальникове ущільнення в стінці корпусу газогенератора.

Процес газифікації твердого палива складається з ряду теплохімічних реакцій, які відбуваються в різних зонах стовпа палива в шахті газогенератора (рис. 2), що утворюється бункером, реактором і колосниковими ґратами [2, 4].

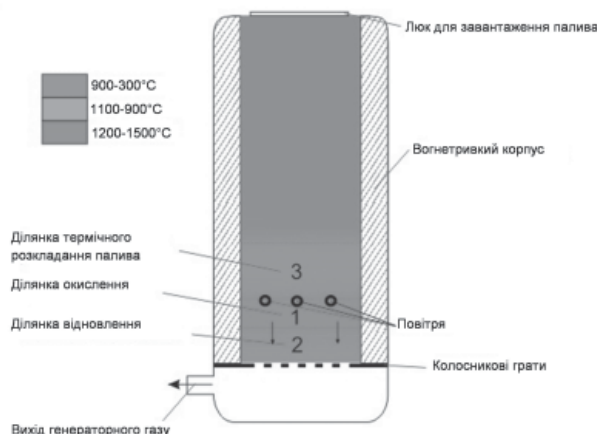


Рис. 2. Схема газогенератора зворотного процесу газифікації

Першою зоною по ходу просування палива під власною вагою в шахті генератора є зона підсушування палива, потім воно послідовно проходить зони піролізу, горіння (утворення  $\text{CO}_2$ ) і відновлення окислу вуглецю (CO) з вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ) (рис. 3) [2,4].

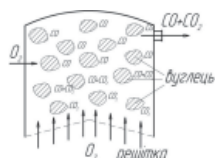


Рис. 3. Схема утворення генераторного газу

Повітря (точніше  $\text{O}_2$ ) яке вводиться через решітку в шар палива, контактуючи з вуглецем практично миттєво перетворюється в вуглецеву кислоту (реакція 1) [2, 4].



Піднімаючись догори через шар палива  $\text{CO}_2$ , контактуючи з розжареним вуглецем, (реакція 2) перетворюється в окис вуглецю (CO) [2,4].



Якщо біля решітки газу сильно нагріті, то можливо (реакція 3) утворення окису вуглецю з кисню і вуглецю [2, 4].



Щодо реакції 4 — горіння CO з вільним киснем і перетворення його в  $\text{CO}_2$ , то в газогенераторі вона не повинна мати місця [2, 4].



Реакція (4) можлива при поганій ізоляції, недостатній висоті і нерівномірній температурі шару палива. В цьому випадку кисень місцями може дійти до верхніх шарів палива, на своєму шляху не контактуючи з вуглецем високої температури, що може бути небезпечним і призвести до вибуху [2, 4].

Кінцева мета процесу газифікації — отримання як можна більшої кількості CO, і як можна меншої частки CO<sub>2</sub>.

В результаті отримуємо генераторний газ, що складається з: CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, і не великої кількості CH<sub>4</sub>.

Теплотворна здатність генераторного газу, залежно від вживаного виду палива, знаходиться в межах 1000ч1600 ккал/м<sup>3</sup> [2,4].

«Сирий» неочищений газ на виході з газогенератора має температуру ~ 450°C (контролюється вимірювальним і показуючим приладами: термодатчик ТХА-К.106-2-1-1-178-50 Т78 сталь ХН78Т ТУ4211-022-39375199-02, двуканальний измеритель 2ТРМО ТУ4211-016-46526536-05) і несе близько 200 ккал/м<sup>3</sup> фізичного тепла. При необхідності в тепловій енергії газ охолоджують, а тепло відповідно утилізують в теплообміннику. При подачі отриманого генераторного газу безпосередньо на паливник в топці котла, необхідності в охолодженні газу немає, його лише очищають від легких домішок палива (сировини газифікації) і частково від парів води.

Попередня груба очистка газу від легких домішок палива і золи відбувається в циклоні (10) (рис. 4). По мірі їх накопичення камера збору циклона очищається через люк в нижній частині корпусу.

При подачі генераторного газу в двигун внутрішнього згорання газ повинен мати температуру не більше 35 ÷ 40°C. В цьому випадку газ охолоджується в радіаторі (11) і з температурою ~ 120°C подається в фільтр тонкої очистки (12), де відбувається кінцеве охолодження, і очищення від дрібнодисперсного пилу. Пари води від контакту з поверхнею фільтруючого елементу конденсуються і осідають на останніх, забираючи з собою також «тонкий» пил. Остаточна очистка газу від механічних домішок відбувається в масляному (паливному) фільтрі двигуна.

Якщо газ на виході з газогенератора матиме температуру вищу за 40 °С, це призведе до зменшення об'ємного коефіцієнту наповнення циліндрів робочою сумішшю, відбудеться зниження потужності двигуна, тому, що кількість горючого газу в робочій суміші в одному і тому ж об'ємі при більш високій температурі буде менше.

Для компактного розміщення всіх вузлів комплексу монтаж здійснюють на спільній рамі.

Газогенераційний енергетичний комплекс (Блок А, рис. 4) є основною складовою частиною цілого спектру обладнання для утилізації дисперсних органічних відходів.

Схема одного із запропонованих технологічних варіантів застосування комплексу наведена на рис. 4.

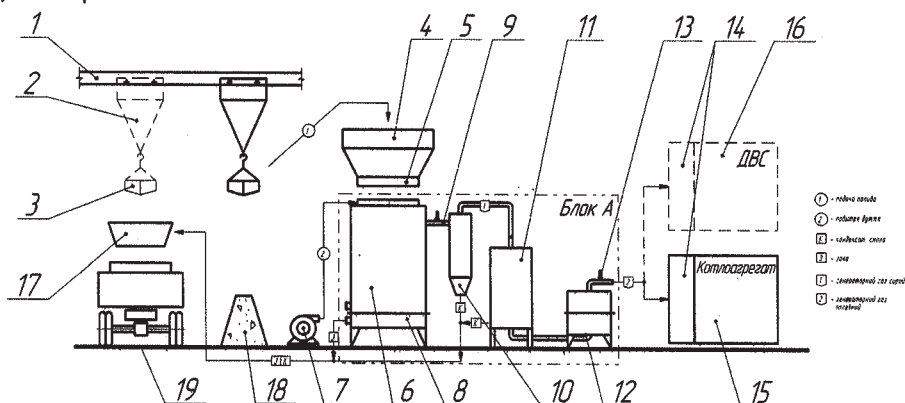


Рис. 4. Технологічна схема для утилізації відходів органічного походження з допомогою газогенераційного енергетичного комплексу:

- 1 — монорельс, 2 — таль електрична, 3 — грейфер, 4 — буферна ємність для відходів, 5 — шлюз-дозатор, 6 — газогенератор, 7 — повітродувна машина, 8 — зольник, 9 — газовий патрубок, 10 — циклон, 11 — радіатор (охолоджувач), 12 — фільтр тонкої очистки, 13 — прилад для вимірювання температури, 14 — додаткова очистка газу, 15 — котлоагрегат, 16 — ДВС, 17 — бункер золи, конденсату, 18 — паливо, 19 — рама.

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

Комплекс працює наступним чином: з приймального майданчика паливо (18) грейфером (3) за допомогою монорельса (1) і електричної талі (2) подають в буферну ємність для відходів (4), звідки направляється через шлюз-дозатор (5) у газогенератор (6) на газифікацію. Після чого, мінеральний залишок у вигляді золи через люк вивантаження золи (8) відвантажують у бункер золи (17), після чого його відправляють споживачам. Для здійснення процесу газифікації в газогенератор (6), подають повітря, що отримується від повітрорудної машини (7). Отриманий генераторний газ через патрубок газу (9) направляють у циклон (10) для очищення від звислих частинок, циклон періодично розвантажують через спеціальний пристрій в бункер (17). Далі газ потрапляє до радіатора (11), де охолоджується. Потім, генераторний газ направляють у фільтр тонкого очищення газу (12) для видалення тонко-дисперсних твердих частинок та додаткового охолодження до температури нижче  $45\pm 60^{\circ}\text{C}$  і конденсують пари смоли і води. Підготовлений таким чином генераторний газ подають, через пристрої додаткового очищення (14) до споживача. В ролі споживача виробником рекомендується використання агрегату опалювального модульного АОМ-02,5 в комбінації з пальником типу ДСГМ-30 (15), або двигун внутрішнього згорання типу ДГМА-75 (16) та інше.

**Висновки.** Таким чином, застосування газогенераційного енергетичного комплексу для безвідходної і альтернативної переробки рослинної біомаси є одночасно технічним, екологічним і соціальним завданнями.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Бекаев Л.С., Марченко О.В., Пинегин С.П. и др. Мироя энергетика и переход к стойкому развитию — Новосибирск: Наука, 2000. — 300 с.
2. Гамбург Д.Ю., Семенов В.П. Производство генераторного газа на базе твердого топлива // Химическая промышленность. — 1983.- №5.-с. 4-10.
3. Зорина Т.И. и др. Современные тенденции в развитии технологий газификации твердого топлива. // Химия твердого топлива. - 1986.- №3.-с.82-93.
4. Коллеров Л.К. Газомоторные установки,- Машгиз, 1951.—172с.
5. Шиллинг Г.Д., Бонн Би., Краус У. Газификация угля / Пер. и ред. С.Р. Исламова — М: Надра, 1986 — 175 с.
6. Yanome Senrou, abe Seiichi, Tanako Eitaro // Ishik anajuma Narita English. — 1991. — № 5. — с. 309—314.

Одержана редколлегією 03.02.2011 р.

УДК 519.863

**О.Ю. ШЕВЧЕНКО**, д-р техн. наук**І.М. МИКОЛІВ**,**А.М. РОМАНЮК**,**А.О. ШЕВЧЕНКО***Національний університет харчових технологій*

## ЕНЕРГЕТИЧНІ РЕСУРСИ МАТЕРІАЛЬНИХ ПОТОКІВ В ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Проаналізовано можливість організованого використання енергії утворюваного в процесі бродіння  $\text{CO}_2$  для інтенсифікації масообмінних процесів та запропоновано відповідне конструктивне оформлення

**Ключові слова:** газова фаза, пружна система, осмотичний тиск, масообмін, енергетичний потенціал, інтенсифікація

Проанализирована возможность организованного использования энергии  $\text{CO}_2$ , который образуется в процессе брожения для интенсификации массообменных процессов и предложено соответствующее конструктивное оформление

**Ключевые слова:** газовая фаза, осмотическое давление, массообмен, энергетический потенциал, интенсификация

Possibility of organised use of energy  $\text{CO}_2$  which is formed in the course of corresponding constructive registration fermentation for an intensification mass transfer processes is analysed and is offered

**Keywords:** a gas phase, osmotic pressure, mass transfer, an energy potential, an intensification

Рідинне середовище з диспергованою в ньому газовою фазою можна розглядати як пружну систему, яка під дією зростаючого тиску деформується. Стосовно такої системи цілком можливо знайти механічні аналогії на зразок систем з розподіленими масами. Проте важливою відмінністю газорідного середовища, що наближається до стану колапсу газової фази буде потужний гідравлічний удар. Додаткове і поглиблене вивчення подібних явищ дозволить зробити оцінку можливостей практичного застосування подібних інтенсивних технологій. Прикладне значення можливостей у зв'язку з організованим використанням енергії утворюваного в процесі бродіння  $\text{CO}_2$  для інтенсифікації масообмінних процесів може бути перенесене, наприклад, на заводи первинного виноробства. Перероблюване сушло в цих умовах містить в собі залишки рослинних структур ягід винограду і частково гребенів за вмісту цукрів до 18 % і більше. При цьому використовуються як негерметичні так і герметичні бродильні апарати. За вказаної концентрації цукрів початковий осмотичний тиск в середовищах додаткового зростає за рахунок утворення спирту і діоксиду вуглецю, що в кінцевому результаті спричиняє зброджування за наявності залишкового цукру. За таких умов поглиблену десатурацію і забезпечення мінімізованої концентрації  $\text{CO}_2$  з обмеженням її висотної нерівномірності слід розцінювати, як перспективний напрямок підвищення рівня зброджування первинних виноматеріалів. Для підтвердження такого висновку наведемо наступні міркування.

Відомо, що життєдіяльність сапрофітної або спеціальної мікрофлори сут-тєво залежить від співвідношень осмотичних тисків культуральних середовищ і цитоплазми клітин. Якщо осмотичний тиск середовищ переважає останній, то це приводить до втрати цитоплазмою певної частини вологи і бактеріостатич-них ефектів [1, 2, 3]. Саме тому в процесах зброджування цукровмістких речовин процеси бродіння припиняються за вмісту алкоголю в середовищах на

© О.Ю. Шевченко, І.М. Миколів, А.М. Романюк, А.О. Шевченко, 2011

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

рівні 9—10 % масових і лише за використання осмофільних дріжджів можливо досягти концентрацій алкоголю до 12 і максимально до 14 %. Осмотичний тиск розчинів речовин розраховується з використанням характеристичного рівняння

$$P_{oc} V = RT, \quad (1)$$

де  $V$  — об'єм даного розчину, в якому розчинено 1 г/моль речовини, л;  $R$  — газова стала,  $R = 8,3144 \cdot 10^3$  Дж/(кмоль·К);  $T$  — абсолютна температура, К.

Звідси осмотичний тиск

$$P_{oc} = \frac{RT}{V}. \quad (2)$$

Припустимо, що для порівняння необхідно розрахувати осмотичний тиск 10 відсоткових розчинів цукрози і глюкози за температури 20 °С. Визначимо параметр  $V$  — кількість літрів 10 відсоткового розчину цукрози, в якому розчинено 1 г/моль вказаних речовин. 1 г/моль цукрози  $C_{12}H_{22}O_{11}$  дорівнює 342 грамам, а глюкози — 180 г. З деякою похибкою приймемо, що 10 відсотковий розчин цукрози — це такий розчин, в 1 л якого міститься 100 г цукру. Тоді маємо для цукрози

$$1 \text{ л} — 100 \text{ г};$$

$$V — 342 \text{ г};$$

$$V = \frac{342 \cdot 1}{100} = 3,42 \text{ л}.$$

Аналогічно для глюкози (і фруктози) будемо мати

$$V = \frac{180 \cdot 1}{100} = 1,8 \text{ л}.$$

Тоді осмотичний тиск розчину цукрози становитиме

$$P_{oc} = \frac{8,314 \cdot 10^3 \cdot 293 \cdot 10^{-6}}{3,42} = 0,712 \text{ МПа}$$

і відповідно для глюкози

$$P_{oc} = \frac{8,314 \cdot 10^3 \cdot 293 \cdot 10^{-6}}{1,8} = 1,353 \text{ МПа}.$$

Дані, що характеризують складові реакції спиртового бродіння і осмотичних тисків наведені в табл. 1.

**Таблиця 1. Складові і результати спиртового бродіння з початковою концентрацією цукру 10 %**

Складові реакції	$C_6H_{12}O_{16}$	$2C_2H_5OH$	$2CO_2$
Концентрації речовин, кг/м <sup>3</sup>	100	51,11	48,88
Молекулярні маси, кг/кмоль	180	46	44
Температура розчину, К	293	293	293
Осмотичний тиск, МПа	1,354	2,707	2,707

У зв'язку з наведеними у табл. 1 даними повторимо запис реакції бро-діння



Відмітимо, що кожна із складових правої частини останньої умови створює осмотичний тиск, який вдвічі перевищує осмотичний тиск вихідної речовини, записаної у лівій частині. Наведені співвідношення підтверджують сформульоване у роботі [3] правило: співвідношення осмотичних тисків розчинів речовин, що взаємодіють у хімічних (біохімічних) реакціях співпадають із співвідношеннями зрівнювальних коефіцієнтів у відповідних реакціях.

ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

Порівняльні оцінки розчинів цукрози і етанолу наведені відповідно у таблицях 2 та 3.

**Таблиця 2. Осмотичні тиски розчинів цукрози при T = 293 K**

Концентрація цукрози, %	10	20	30	40	50	60	70	80
Осмотичний тиск, МПа	0,712	1,425	2,136	2,848	3,56	4,272	4,984	5,696

**Таблиця 3. Осмотичні тиски розчинів етанолу при T = 293 K**

Вміст спирту, %	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10
Осмотичний тиск, МПа	0,5296	1,05	1,59	2,118	2,47	3,18	3,707	4,237	4,77	5,296
Вміст спирту, %	12	14	16	18	20	22	30	40	50	60
Осмотичний тиск, МПа	6,354	7,414	8,473	9,932	10,591	11,65	15,888	21,184	26,48	31,776

Осмотичний тиск 70-відсоткової концентрації цукрози гарантовано приводить до бактеріостатичних ефектів. При цьому  $P_{oc} \approx 5$  МПа і таким же значенням осмотичних тисків відповідають розчини етанолу з концентраціями  $\sim 9-10$  %. Саме таким концентраціям відповідають завершальні стадії бродіння у спиртовому виробництві та у технологіях первинного виноробства.

Вказані значення осмотичних тисків суттєво доповнюються тисками, створюваними розчинним діоксидом вуглецю. Виконаємо розрахунки по їх оцінці. Оскільки молекулярна маса  $CO_2$  складає 88 одиниць, то його 1-відсотковому розчину відповідає об'єм

$$V = \frac{88 \cdot 1}{10} = 8,8 \text{ л,}$$

двовідсотковому розчину — об'єм

$$V = \frac{88 \cdot 1}{20} = 4,4 \text{ л, тощо.}$$

Результати розрахунків по визначенню осмотичних тисків розчинів  $CO_2$  наведено в табл. 4.

Наведені значення осмотичних тисків розчинів етанолу і діоксиду вуглецю приводять до висновку про те, що саме обмежена розчинність  $CO_2$  дозволяє здійснювати процеси бродіння в рамках існуючих класичних співвідношень, оскільки за інших рівних умов вирішальне значення мав би принцип суперпозиції. В результаті слід прийти до висновку про доцільність вибору геометричних параметрів бродильних апаратів для зменшення в них величин гідростатичних тисків, що пояснює невдалі результати у використанні ЦКТ висотою до 40 м.

**Таблиця 4. Результати розрахунків по визначенню осмотичних тисків розчинів  $CO_2$  при T = 293 K**

Концентрація $CO_2$ , %	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10
Осмотичний тиск, МПа	0,277	0,554	0,831	1,107	1,384	1,66	1,938	2,215	2,49	2,768
Концентрація $CO_2$ , %	12	14	16	18	20	22	24	26	30	40
Осмотичний тиск, МПа	3,323	3,88	4,43	4,98	5,536	6,09	6,64	7,21	8,31	11,07

Проте, повернувшись до оцінки ефективності використання енергетичних потенціалів газонасичених середовищ, відмітимо ще одну технічну можливість, пов'язану з вертикальною гомогенізацією середовищ. Адже навіть за висоти шару рідинної фази 20 м масові концентрації  $CO_2$  по висоті помітно відрізняються. При цьому чисто технічний результат, пов'язаний з розчинністю і концентрацією  $CO_2$  по висоті може бути не єдиним чинником, що впливає на масовіддачу від клітини до середовища. Точна картина такого масообміну є невідомою, однак в умовах існування зустрічних матеріальних і енергетичних потоків стосовно клітини гіпотетично приймемо, що він відбувається на молекулярному рівні. Це означає, що підвищення концентрації  $CO_2$  в середовищі приведе до зменшення концентраційного градієнта і сповільнення дифузійного перенесення в системі «клітина —



## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

середовище». Проте може мати місце й інший результат, пов'язаний з відновленням градієнта за рахунок підвищення концентрації  $\text{CO}_2$  в цитоплазмі клітини, хоча на прикладі інших об'єктів біологічного світу цілком надійно фіксуються обмеження концентрації діоксиду вуглецю в плазмі, крові тощо.

Вважаючи, що доцільність організації вертикального перемішування середовищ обґрунтована, виконаємо опис відповідного технічного рішення (рис. 1).

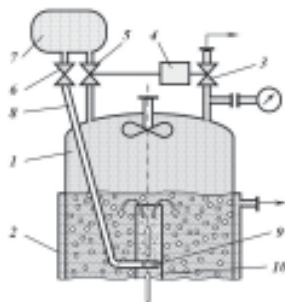


Рис. 1. Схема модифікованого бродильного апарата з системою вертикальної циркуляції:

- 1 — корпус; 2 — сорочка охолодження; 3 — клапан газової магістралі; 4 — контролер; 5 — клапан на магістралі ресивера; 6 — клапан магістралі подавання  $\text{CO}_2$  на газорозподільний пристрій; 7 — ресивер; 8 — трубопровід подавання  $\text{CO}_2$ ; 9 — газорозподільний пристрій; 10 — циркуляційна труба

Для здійснення вертикальної циркуляції апарат устатковується циркуляційною трубою 10 з газорозподільним пристроєм 9. Енергетичне забезпечення початку циркуляції здійснюється за рахунок стиснутого  $\text{CO}_2$ , що знаходиться в ресивері 7. Для цього в момент відкривання клапана 3 і закривання клапана 5 відкривається дросельний клапан 6 з обмеженою пропускною здатністю. Після потраплення діоксиду вуглецю в газорозподільний пристрій 9 починається рух газорідної суміші в циркуляційній трубі, який підсилюється за рахунок додаткового утворення в ній диспергованої газової фази нижніх перенасичених на  $\text{CO}_2$  шарів.

Подавання газу з ресивера продовжується на протязі часу десатурації середовища. Одночасно з відкриттям клапана 5 перекриваються клапани 3 та 6, проте циркуляція продовжується за рахунок енергетичного потенціалу глибинних шарів.

Наслідком організованої таким чином циркуляції буде обмеження концентраційного градієнта  $\Delta c_{\text{CO}_2} / \Delta x$ , вертикальне перемішування і відповідна підвищена вертикальна гомогенізація середовища.

Разом з тим зберігаються переваги, пов'язані з організацією збереження енергетичного потенціалу. Адже кількість діоксиду вуглецю, що на першій фазі процесу зберігається, практично залишається сталою на протязі процесу бродіння. У зв'язку з цим значення має співвідношення об'ємів ресивера і газової фази бродильного апарата. В газгольдер (або в атмосферу) буде видалятися тільки та частина газу, що знаходиться в газовому просторі апарата. Після завершення десатурації і герметизації системи газ з ресивера перерозподіляється в системі, а потенціал тиску відновлюється в подальшому процесі бродіння.

**Висновок.** Рівень трансформації матеріальних потоків суттєво залежить від прийнятих технологій переробки під дією фізичних, хімічних, мікробіологічних впливів або їх комбінацій. Більшість мікробіологічних перетворень здійснюється на основі хімічної енергії матеріальних потоків з вагомою часткою втрат, пов'язаних з синтезом діоксиду вуглецю, біомаси мікроорганізмів та інших органічних сполук, які виводяться з циклу подальших перетворень і не входять до складу готової продукції та втрат у формі низькопотенціальної теплової енергії.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Піддубний В.А. Наукові основи і апаратне оформлення перехідних процесів харчових і мікробіологічних виробництв. Автореф. дисерт. на здобуття ступеня д.т.н. — К.: 2008. — 47 с.
2. Соколенко А.І., Васильківський К.В., Шевченко О.Ю. та ін. Фізико-хімічні методи обробки сировини та продуктів харчування. К.: — АртЕк. — 2000. — 306 с.
3. Шевченко О.Ю. Наукові основи і апаратне оформлення процесів довгострокового зберігання харчових продуктів. Автореф. дисерт. на здобуття ступеня д.т.н. — К.: 2006. — 49 с.

Одержана редколегією 15.03.2011 р.



УДК 663.283

С.В. ЛЕНЗІОН, асп.

Національний університет харчових технологій

## СИНТЕЗ ЗМІШУВАЧА РІДИННИХ ТА ГАЗОРІДИННИХ ПОТОКІВ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ У ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВАХ І АНАЛІЗ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОТОКУ

---

Запропоновано форму та метод виготовлення змішувача рідин у потоці. Проведено чисельний розрахунок пружно-пластичного деформування заготовки-труби для отримання форми поверхні елемента змішувача та чисельний розрахунок потоку рідини у запропонованому змішувачі з використанням методів обчислювальної гідродинаміки.

**Ключові слова:** змішування, гомогенізація, пульсація тиску, поперечне перемішування, метод скінченних елементів, обчислювальна гідродинаміка.

Предложены форма и метод изготовления смесителя жидкостей в потоке. Проведен численный расчет упруго-пластического деформирования заготовки-трубы для получения формы поверхности элемента смесителя и численный расчет потока жидкости в предложенном смесителе с использованием методов вычислительной гидродинамики.

**Ключевые слова:** смешивание, гомогенизация, пульсация давления, поперечное перемешивание, метод конечных элементов, вычислительная гидродинамика.

The shape and the fabrication method of fluid flow mixer are proposed. Numerical simulation of a raw pipe elasto-plastic deforming was performed in order to obtain the surface shape of element of the mixer as well as numerical simulation of the flow in proposed mixer with the use of Computational Fluid Dynamics.

**Key words:** mixing, homogenisation, pressure pulsations, transverse mixing, Finite Element Method, Computational Fluid Dynamics.

Важливим заходом інтенсифікації масообміну в газорідинних системах визнано зміну тисків, що супроводжується деформаціями диспергованої газової фази, оновленням міжфазної поверхні, явищами коалесценції і повторного диспергування, тощо. Разом з тим газорідинні середовища мають помітні дисипативні властивості, що вимагає особливих підходів в організації втручань в їх гідродинаміку.

Рідинні середовища з високими рівнями гомогенізації або рідинні середовища з додаванням твердої фази доцільно одержувати в поєднанні їх перетворень, наприклад, з операціями транспортування. Досягнення такого результату можливе за використання масообмінних ділянок трубопроводів зі змінними розмірами поперечних перерізів. Одним з варіантів таких рішень є випадок пос-лідовного чергування переходів від кругових до еліптичних перерізів [1].

Завданням даного дослідження є вирішення задачі синтезу такої масообмінної ділянки на основі моделювання пружно-пластичного деформування трубної конструкції з використанням

© С.В. Лензюон, 2011

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

методу скінченних елементів (МСЕ) та наступним визначенням гідродинамічних параметрів рідинних потоків в ній на основі використання методів обчислювальної гідродинаміки (ОГД).

З огляду на останнє, в рамках дослідження було розроблено комплексний підхід (алгоритм) чисельного моделювання даної задачі. Цей підхід стосується послідовності розрахунків, яка дозволяє замінити трудомісткий та витратний процес експериментального пошуку оптимальних параметрів елемента змішувача для досягнення максимального ефекту перемішування. Розроблений підхід складається з:

а) моделювання деформування заготовки-труби при навантаженні пуансоном за допомогою МСЕ з урахуванням фактичних фізичних властивостей матеріалу труби та з отриманням у результаті моделювання форми поверхні, що окреслює потік рідини;

б) моделювання потоку рідини методами ОГД з метою отримання гідродинамічних параметрів потоку, які є факторами, що визначають ступінь перемішування та гомогенізації;

в) аналіз отриманих гідродинамічних характеристик, і, за необхідності, корегування параметрів елемента змішувача та/або вхідних гідродинамічних параметрів потоку з повторним моделюванням з метою досягнення максимального ефекту перемішування.

Після знаходження оптимальних параметрів змішувача в результаті серії розрахунків завершальним етапом має стати виготовлення змішувача потоків в натурі для використання, наприклад, при змішуванні потоків виноматеріалів в процесах асамблювання, купажування та приготування тиражних сумішей для заводів вторинного бродіння.

Конструкція змішувача має бути виконана у формі труби зі змінним поперечним перерізом. Таку конструкцію пропонується отримати шляхом деформування труби з вибраним кроком із створенням залишкової деформації, яка однак не повинна приводити до зміни довжини внутрішнього периметра. В результаті деформування трубчаста конструкція перетворюється в масопровід з еліптичними перерізами з різними співвідношеннями довжин напівосей та площами. Найбільша площа відповідає круглому перерізу, а найменша — перерізу з мінімальним співвідношенням довжин напівосей  $b/a$ .

Базовим елементом для створення змішувача обрано трубу із нержавіючої сталі 12Х18Н10Т, з внутрішнім діаметром 49 мм та товщиною стінки 4,25мм.

Для досягнення необхідної конфігурації змішувача було розроблено пуансон спеціальної форми. Конфігурацію пуансона та схему навантаження труби пуансоном відображено на рис. 1.

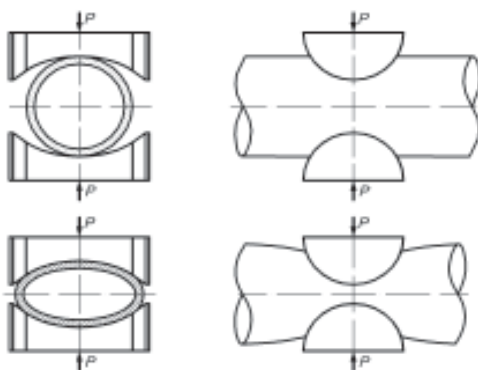


Рис. 1. Схема навантаження труби пуансоном

Чисельний розрахунок відбувався за умов моделювання вдавлювання абсолютно жорсткої поверхні пуансона в трубу в режимі жорсткого навантаження з використанням контактної алгоритму та з отриманням в результаті напружено-деформованого стану матеріалу труби.

Крок між пуансонами обрано рівним двом зовнішнім діаметрам труби (115 мм). В чисельному розрахунку моделювалось три зони деформації труби пуансонами.

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

Для отримання характеристик пружності та пластичності матеріалу (модуля пружності та істинної діаграми деформування) з метою закладення останніх у розрахунок МСЕ, було проведено експеримент на одновісний розтяг зразків, виготовлених із труби згідно вимог міжнародного стандарту ISO [2].

В результаті чисельного розрахунку було отримано форму потоку рідини, що обмежена внутрішньою стінкою деформованої труби і поля деформацій та напружень у вузлових точках моделі труби. На рис.2 відображено поле пластичної деформації, нанесене на деформовану модель труби.

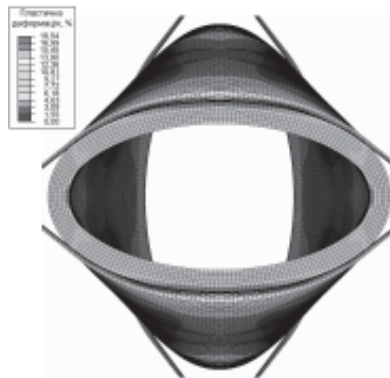


Рис. 2. Зображення результату розрахунку деформування труби

Влаштування змішувача на основі переходів від круглих перерізів до еліпсоподібних і знову до круглих означає зміну співвідношень довжин їх напівосей  $b/a$ , що визначає змінні значення площ поперечних перерізів. Звідси витікає, по-перше, що в умовах дії закону нерозривності потоку останній матиме змінні характеристики тисків і швидкостей; по-друге, звуження і розширення потоку із взаємоповернутими на кут  $90^\circ$  мінімальними еліптичними перерізами стимулює поперечне перемішування.

Схема положення перерізів з максимальними і мінімальними площами відображено на рис. 3.

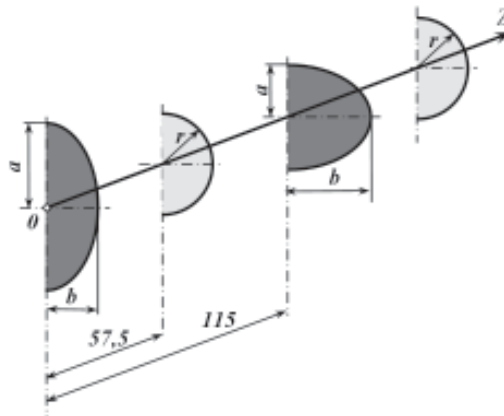


Рис. 3. Схема розташування перерізів з мінімальними і максимальними площами

Максимальна величина площі відповідає круглому поперечному перерізу і складає  $S_{кр} = 1885,7 \text{ мм}^2$ . Мінімальне значення площі еліптичних перерізів —  $0,76 S_{кр}$ .

Таким чином, трансформації потоку у формі швидкостей як у поздовжніх так і у поперечних напрямках означають виникнення масових сил (сил інерції), наслідком яких є

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

інтенсифікація масообмінних процесів. Подібні режими є особливо сприятливими для інтенсифікації масообміну в газорідних системах.

Використовуючи отриману форму області потоку рідини, в рамках наступного етапу даного дослідження проведено чисельний розрахунок гідродинамічних параметрів потоку нестискуваної рідини. Початкова форма області потоку та елементна сітка задачі відображені на рис. 4.

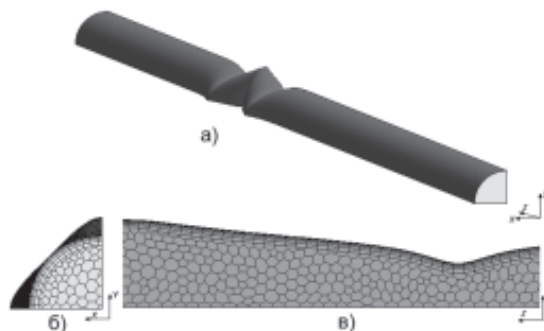


Рис. 4. Модель області потоку (а) та сітка розбивки на елементи (б, в) змішувача для розрахунку ОГД

З огляду на те, що потік вісесиметричний, модель області потоку обмежена однією четвертиною всієї області, з додаванням властивостей симетрії по двом площинам вздовж осі труби.

Вхідні параметри потоку обрано наступними: характерний розмір труби (внутрішній діаметр)  $d = 0,049$  м, або радіус  $R = 0,0245$  м, об'ємні витрати —  $10$  м<sup>3</sup>/год =  $0,002(7)$  м<sup>3</sup>/с. В якості рідини обрано вино. Фізичні характеристики вина наступні [3]: густина  $\rho = 980,7$  кг/м<sup>3</sup>, динамічна в'язкість  $\mu = 0,0018$  Па·с.

Число Рейнольдса для даного випадку  $Re = 39307$ , тому потік вважаємо турбулентним. Основні параметри потоку для розрахунку наведено у таблиці.

### Основні параметри потоку для розрахунків ОГД

Назва параметру	Позначення	Розмірність	Значення
Внутрішній діаметр труби	$d$	м	0,049
Площа поперечного перерізу	$A$	м <sup>2</sup>	0,001886
Об'ємні витрати потоку	$Q$	м <sup>3</sup> /с	0,002(7)
Середня швидкість потоку	$v_m$	м/с	1,473
Густина вина	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	980,7
В'язкість вина	$\mu$	Па·с	0,0018
Число Рейнольдса	$Re$	—	39307

На виході моделі потоку задавався тиск  $P = 1500$  Па, а на вході моделі — осьова швидкість потоку  $v(R)$  з профілем вздовж радіуса потоку, обчисленим за формулою[4]:

$$v(r) = v_m \left( 1 + 1,33\sqrt{f} - 2,04\sqrt{f} \cdot \log(R / (R - r)) \right), \quad (1)$$

де  $v_m$  — середнє значення швидкості;  $f$  — коефіцієнт тертя;  $R$  — радіус внутрішнього перерізу потоку;  $r$  — змінний радіус,  $r = [0 \div R]$ .

Коефіцієнт тертя  $f$  для випадку турбулентного потоку вираховувався чисельним методом (методом Ньютона) із рівняння Коулбрука-Уайта [4]:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left( \frac{2.51}{\text{Re}\sqrt{f}} + 0,269 \frac{k}{d} \right), \quad (2)$$

де  $\text{Re}$  — число Рейнольдса;  $k$  — абсолютна шорсткість поверхні трубопроводу (в даному дослідженні приймаємо  $k = 0$ );  $d$  — гідравлічний діаметр, що для потоку у трубі дорівнює її геометричному діаметру.

Для даного випадку,  $f = 0,0221$ .

Розрахунок за допомогою методу ОГД проведено у трьохвимірній постановці, в режимі стаціонарного потоку, з використанням рівнянь RANS,  $k-\varepsilon$  моделі турбулентності та вбудованої в останню пристіночної суб-моделі.

На рис. 5 відображено поле осьової швидкості на площинах симетрії та на поперечних перерізах, отримане у результаті розрахунку. У мінімальних еліптичних перерізах має місце градієнт осьової швидкості по перерізу, в той час як у круглих перерізах розподілення швидкості близьке до розподілення, яке має місце при потоці у циліндричній трубі. Також слід відмітити присутність зон завихрення незначних розмірів із зворотнім потоком, що розташовані одразу за мінімальними перерізами.

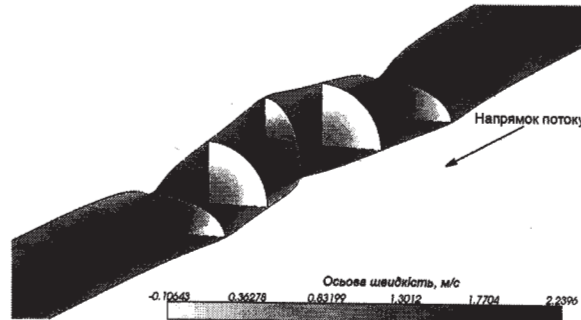


Рис. 5. Поле осьової швидкості на площинах симетрії та поперечних перерізах, отримане в результаті розрахунку

Для того, щоб оцінити ступінь поперечного перемішування, проаналізуємо отримані результати для компонент векторів швидкості. У ортогональній декартовій системі координат вектор швидкості можна представити сумою векторів:

$$\vec{v} = \vec{v}_x + \vec{v}_y + \vec{v}_z,$$

де  $\vec{v}_x$  — компонента вектора швидкості у напрямку осі  $x$  (поперечному горизонтальному),  $\vec{v}_y$  — у напрямку осі  $y$  (вертикальному),  $\vec{v}_z$  — у напрямку осі  $z$  (поздовжньому).

Перейдемо від абсолютних значень компонент вектора швидкості для кожної точки перерізу до деякої узагальненої характеристики перерізу. Чим більша величина цієї усередненої характеристики, тим, в цілому, швидший рух рідини в даному перерізі у даному напрямку, і навпаки. Графік зміни усереднених по перерізам абсолютних значень компонент швидкості  $\vec{v}_x$  та  $\vec{v}_y$  відображено на рис. 6.

Однак, найбільш повною характеристикою поперечного перемішування буде усереднене по перерізу абсолютне значення такої компоненти вектора швидкості, яка діє у площині перерізу і являє собою векторну суму поперечної горизонтальної та вертикальної компонент:  $\vec{v}_{xy} = \vec{v}_x + \vec{v}_y$  (рис. 6). Поперечне перемішування найбільш активне у перерізах, які розташовані на відстані 9мм по обидва боки від мінімальних еліптичних перерізів.

В результаті розрахунку також отримано графік зміни усереднених по перерізу статичних тисків, який відображено на рис. 7.

Оскільки на частинку, що рухається з потоком рідини, діє лише статичний тиск, саме його аналіз становить інтерес з точки зору гомогенізації середовищ. Як бачимо із результату розрахунку, за умов заданої геометрії потоку та швидкості, отримуємо пульсацію статичного тиску з амплітудою близько 750Па та частотою пульсацій — 13,68 Гц.

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

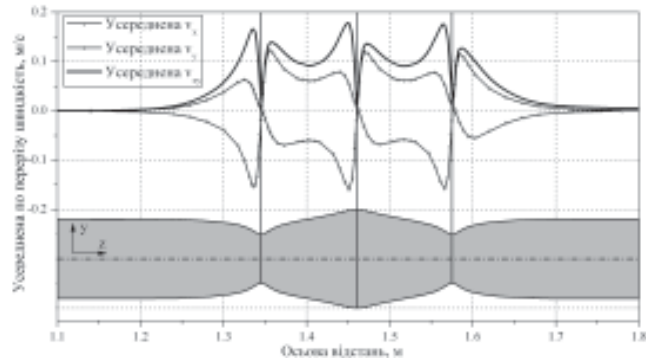


Рис. 6. Графік залежності усереднених по перерізу абсолютних значень компонент вектора швидкості

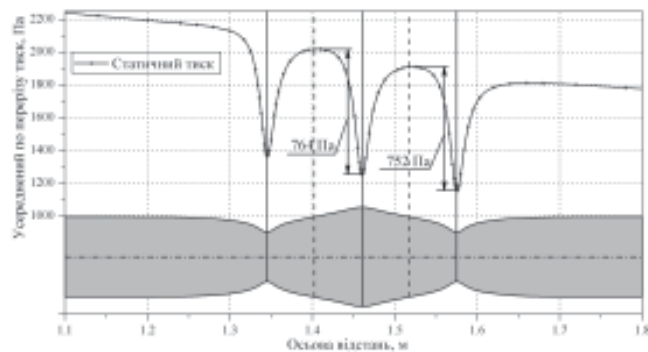


Рис. 7. Графік залежності усереднених по перерізу тисків на ділянці еліптичних перерізів

**Висновки.** Виконані дослідження дозволяють відмітити наступне.

1. Запропоновано форму та метод виготовлення змішувача рідин у потоці. Проведено моделювання пружно-пластичного деформування труби при навантаженні пуансоном обраної форми і отримано форму поверхні, що окреслює потік рідини в елементі змішувача.

2. Результати досліджень, які стосуються синтезу масообмінної ділянки змішувача потоків, підтверджують прикладну ефективність застосування чисельних методів до розв'язання задач апаратного забезпечення харчових виробництв.

3. На основі теорії ОГД і обраного алгоритму проведено розрахунок потоку рідини у запропонованому змішувачі, в результаті якого отримано якісні та кількісні характеристики гідродинамічних параметрів потоку у елементі змішувача, які визначають ступінь гомогенізації.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Соколенко А.І., Піддубний В.А., Якимчук М.В., Лензіон С.В., Шевченко О.Ю. Інтенсифікація масообмінних процесів в системах транспортних потоків харчових виробництв. Научно-практический журнал „Хранение и переработка зерна”, №9(123), вересень 2009р., С. — 42—43.

2. ISO 6892-1:2009. *Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature.*

3. Мерджаниан А.А. Физико-химия игристых вин “ М.: Пищевая промышленность, 1979. “ 272с.

4. Kothandaraman С.Р., Rudramoorthy R. *Fluid Mechanics and Machinery (Second Edition), New Age International Publishers, 2007.*

Одержана редколлегією 24.03.2011 р.

УДК: 664.1+678

М.О. ПОЛУМБРИК, канд. техн. наук  
Національний університет харчових технологій

## НАНОТЕХНОЛОГІЇ В ХАРЧОВИХ ПРОДУКТАХ

---

В статті проаналізовані основні галузі застосування нанотехнологій в харчових продуктах, зокрема в технології пакувальних матеріалів, наноліпосомах та наносенсорів. Показано, що присутність наноматеріалів суттєво поліпшує властивості упаковки, полегшує контроль якості готових виробів, сприяє збереженню активних компонентів продуктів всередині харчової матриці.

**Ключові слова:** нанотехнології, пакувальні матеріальні, ліпосоми, наносенсори, наноконсоли

В статье проанализированы основные области использования нанотехнологий в пищевых продуктах, в частности в технологии упаковочных материалов, нанолипосомах и наносенсорах. Показано, что их присутствие значительно улучшает свойства упаковочных материалов и контроль качества готовых изделий, способствует сохранению активных компонентов продуктов в пищевой матрице.

**Ключевые слова:** нанотехнологии, упаковочные материалы, липосоми, наносенсоры, наноконсоли

The main applications of food nanotechnologies including packaging materials, nanosensors and nanoliposomes were analyzed. It has been shown that nanomaterials essentially improved barrier properties of packaging materials and help control and maintain food quality and also preserve active compounds in food matrix.

**Keywords:** nanotechnologies, packaging materials, liposomes, nanosensors, nanocantilever

Нанотехнології — широкий термін, який використовують для опису сукупності процесів, матеріалів, а також застосувань, які охоплюють хімію, фізику, біологію і інженерію. Всі вони включають маніпулювання об'єктами з розмірами в межах нанометричної шкали. Наноматеріали характеризуються наявністю одного чи декількох внутрішніх розмірів в межах нанощкали (1...100 нм), або які є наноструктурованими. Матеріали, в яких всі три внутрішні розміри знаходяться в межах нанощкали, класифікуються як наночастинки [1]. Наноматеріали можуть існувати у різних формах, зокрема у вигляді нанотрубок, які мають два внутрішні розміри в межах нанощкали, і наночастинки, які мають лише один розмір в межах від 1 до 100 нм. Слід зазначити, що більшість наноматеріалів, які використовують в харчових продуктах, займають проміжне положення між нано- і мікроструктурами. Так, діаметр ДНК складає 12 нм, ліпосом 30...10000 нм, амілопектину 44...200 нм, кубосомів 500 нм, наносенсорів < 1000 нм [1,2].

Нанотехнології потенційно можуть впливати на багато аспектів технологій харчових продуктів. Безпека і якість продуктів харчування; засоби доставки біологічно активних компонентів; нові матеріали для детектування патогенів і захист навколишнього середовища є основними напрямками застосування наноматеріалів у харчових продуктах [1—3].

Нанотехнології у пакувальних матеріалах

Наноконсолі застосовують для посилення бар'єрних властивостей пакувальних матеріалів. Полімерні плівки металізують за допомогою алюмінію в якості бар'єрів для газу і світла вже протягом десятиліть. Крім того, наночастинки таких оксидів як  $TiO_2$ ,  $SiO_2$ ,  $ZnO$ ,



## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

$Al_2O_3$  включають до складу полімерних плівок з метою гальмування їхнього фотолітичного розкладу. Деякі наночастинки, наприклад наносрібло, завдяки біоцидним і біостатичним властивостям наносять на поверхню плівок.

Найбільший інтерес представляє застосування нанотехнологій в пакувальних матеріалах, здатних розкладатись біологічним шляхом. Біонанокомпозити — гібридні наноструктуровані матеріали з поліпшеними механічними, термічними і бар'єрними властивостями. Застосування таких наноматеріалів не тільки сприяє збереженню харчових продуктів і подовженню терміну їх придатності, але й захищає навколишнє середовище шляхом заміни полімерних пластикових матеріалів. Три типи сполук використовують для отримання біонанокомпозитів, а саме: 1) природний полімер (крохмаль, целюлоза, полімолочна кислота, желатин, колаген, хітозан); 2) неорганічні глини (монтморилоніт, клоїзит); 3) пластифікатор (гліцерол, рослинні олії, триетилцитрат). Із розвитком нанотехнологій ефективних упаковок з'являються їх нові функціональні властивості, такі як антимікробіологічна активність пакувальних матеріалів, здатних розкладатись біологічним шляхом [1, 3].

Наноматеріали використовують в активному пакуванні, яке передбачає поглинання або сприяння утворенню певних хімічних сполук. Так в якості кисневих пасток застосовують наночастинки металів, насамперед заліза і їх оксидів, полімерні смоли, здатні до швидкого окиснення, а також низькомолекулярні органічні сполуки, такі як аскорбінова кислота [1].

Нанотехнології є важливими у так званому «розумному пакуванні», метою якого є контроль якості упакованих продуктів. Воно базується на здатності індикаторних наносполук реагувати з хімічними речовинами, які утворюються внаслідок окиснення чи мікробіологічного псування харчових продуктів. Наприклад, під час зберігання упакованого м'яса птиці внаслідок мікробіологічного псування накопичується гідрогенсульфід  $H_2S$ , який реагує з тонким шаром наносрібла. Останній має світло-коричневий колір, але при поступовому утворенню  $Ag_2S$ , колір шару наносрібла поступово змінюється до прозорого. Для контролю за вмістом кисню всередині упаковки застосовують світлочутливі наночастинки [1].

### Наноліпосоми

В якості носія біологічно активних речовин одними з найбільш перспективних є ліпосоми. Коли молекули амфіфільних (мають як гідрофільну, так і гідрофобну природу) сполук, наприклад фосфоліпіди потрапляють у водне середовище, вони в певних умовах можуть утворювати везикули фосфоліпідних бішарів — наноліпосоми (ліпосоми, рис. 1). Під час утворення цих композицій гідрофільні сполуки можуть проникати всередину ліпосом [4]. Ліпофільні сполуки, такі як деякі вітаміни і харчові добавки, можуть включатись у бішари при їх розчиненні разом з ліпідами.

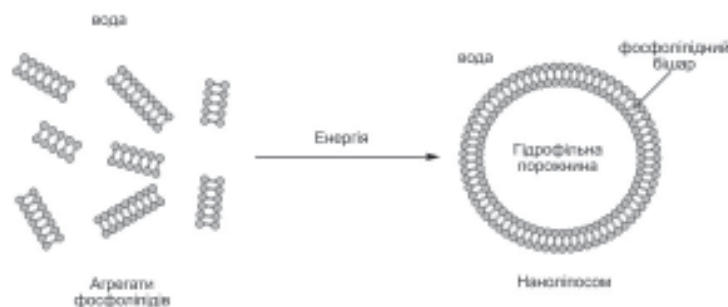


Рис. 1. Спрощений механізм утворення ліпосом

Зважаючи на позитивний досвід застосування ліпосом у медичній і фармацевтичній галузях (доставка ліків, терапія онкозахворювань, генна терапія тощо) [5], спеціалісти в галузі харчових технологій почали використовувати ліпосоми для контрольованого введення функціональних компонентів, таких як пептиди, ензими, вітаміни і ароматизатори у різні харчові продукти.

Одним з перших використань ліпосомів у харчових продуктах була технологія сиру [4]. Інкапсуляція ензимів, джерелом яких є мікроорганізми *Lactococcus lactis*, за допомогою молочних жирів дозволила значно поглибити смакові якості сиру за рахунок збільшення



## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

концентрації речовин, які формують смакові якості — диацетилу та ацетоїну у 8 разів при обробці сиру за температури 30—33 °С. Проте, при підвищенні температури до 35 °С мікрокапсули руйнуються, наслідком чого є суттєве зниження кількості сполук, які формують смакові якості сиру [4]. Альтернативним методом інкапсуляції ензимів є використання ліпідних везикул у формі ліпосом чи наноліпосом [4].

Відомо, що додавання протеаз, які містяться всередині багат шарових везикул, до сирної маси інгібує швидкий протеоліз β-казеїну, сприяючи зростанню твердості сиру після завершення ферментації і підтримуючи його структуру шляхом попередження дії ензимів. Подібні результати були отримані при дослідженні активності протеаз, інкапсульованих в ліпосомах під час процесів заморожування-розморожування [4]. Ензими у ліпосомах звичайно орієнтуються між ліпідними бішарами, і, таким чином, дифундують більш швидко, ніж ті, що знаходяться у гідрофільному просторі. Більшість ліпідних везикул з'єднуються з мембранами жирів молока, деякі залишаються у сироватці, в той час як окремі негативно заряджені везикули зв'язуються з казеїном. Ліпосоми, які розміщені близько до глобул жирів молока, з часом взаємодіють з мембраною, дестабілізуючи її, а ті ліпосоми, що знаходяться в сироватці агрегуються з утворенням великих везикул [4].

Ліпосоми також застосовують для інкапсуляції ліпаз. Вони сприяють зниженню твердості сиру Чедер, підвищуючи його когезивність і еластичність. Оптимізація основних параметрів ліпосом, таких як їх тип, склад мембран, концентрація інкапсульованого ензиму, дозволяє виготовляти сир з відмінними текстурою і смаковими характеристиками при скороченні тривалості виробництва наполовину і зменшенні кількості використаних ензимів у 100 разів [4].

Крім здатності істотно знижувати тривалість виготовлення сирів, ліпосоми використовують для збагачення продуктів вітамінами і, таким чином, підвищення їх харчової цінності. Зокрема, інкапсуляція в ліпосомах гальмує розклад вітамінів. Так, у сирі, виготовленому з включенням вітамінів у ліпосоми, кількість корисного вітаміну D на 30 %-ків є більшою, ніж при збагаченні виробів за стандартною процедурою [4].

Іншою важливою галуззю застосування ліпосомів є захист консервантів. Прикладом є їх використання в технології таких сирів як Гауда, Емменталь та Едем [4,7]. Ці сири мають підвищену тенденцію до росту патогенних і гнильних мікроорганізмів, включаючи споруутворюючі бактерії. Таке псування пригнічується шляхом додавання ензиму лісозим, який має білкову природу. Недоліком його при використанні у молочних виробках вважається приєднання до казеїну, що знижує ефективність лісозиму. Інкапсуляція його у наноліпосоми дозволяє цього уникнути [7].

Таким чином, використання наноліпосом в харчових технологіях — зручний і безпечний спосіб забезпечення стабільності чутливих біологічно активних компонентів і харчових добавок.

### Наносенсори

Крім пакування та біодоставки нанотехнології також застосовують для контролю якості харчових продуктів. Сполуки, які утворюються під час псування харчових продуктів, можна визначити за допомогою наносенсорів. Наприклад, при контакті з харчовими патогенами вони викликають специфічну флуоресценцію [1, 2]. Основним завданням наносенсорів є зниження часу, необхідного для детектування патогенів, з декількох днів до кількох годин чи, навіть хвилин. Такі наносенсори включають, наприклад, до складу пакувальних матеріалів, де вони слугують в якості «електронного носу», який здатен детектувати хімічні сполуки, які утворюються внаслідок псування харчових продуктів. Цей аналітичний метод використовують, зокрема, для розрізнення різних сортів вина [8]. Інші типи наносенсорів базуються на мікрогідродинамічних пристроях і використовуються для ефективного визначення патогенів в реальному часі і з високою точністю [2].

Іншим класом біологічних сенсорів вважають наноконсолі. Їх детекторний принцип полягає у здатності визначати фізичний чи електромеханічний сигнал біологічно-зв'язуючих взаємодій, зокрема між антигеном і антитілами, ензимом та субстратом чи кофактором і рецептором або лігандом. Наноконсолі містять тонкий шар кремнієвого матеріалу, який має здатність розпізнавати білки і детектувати патогенні бактерії і віруси. Визначення патогенів базується на їх здатності вібрувати на різних частотах, залежно від біомаси патогенних організмів [2].

Наноконсолі можна модифікувати шляхом приєднання антитіл до кремнієвої поверхні, наслідком чого є зміна резонансної частоти вібрування залежно від приєднаної маси. Гфелер та

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

співр. детектували мікроорганізми *Escherichia coli*, які є індикатором фекального забруднення води і харчових продуктів, за допомогою консольного сенсора, покритого шаром полісахариду агарози (рис. 2) [9]. Відносний вміст води шару агарози і вологого середовища знаходяться в рівновазі (рис. 2 а). Із збільшенням концентрації мікроорганізмів на поверхні поживного шару агарози, остання для відновлення рівноваги поглинає пари води із вологого середовища, що приводить зміни маси, і, таким чином, характеристичної частоти вібрації консолі (рис. 2 б).

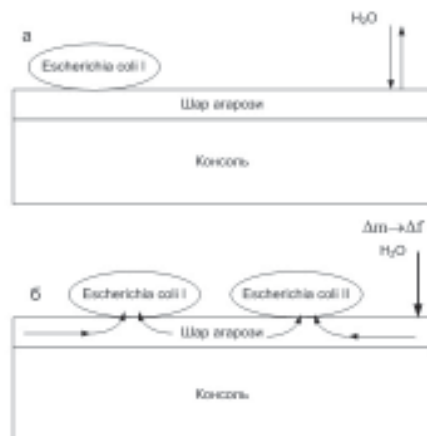


Рис. 2. Схематичне уявлення про функціонування наноконсольного сенсора. Передруковано з [12]

Таким чином, використання нанотехнологій у пакувальних матеріалах привело до революції у цьому секторі. З'явилися нові типи пакування, такі як активне та «розумне» пакування. На долю пакувальних матеріалів приходить більше половини від загальної частки нанотехнологій в харчових продуктах. В найближчому майбутньому слід очікувати інтенсивного застосування наноліпосомів та інших засобів біодоставки і збереження активних компонентів не лише в технології молочних продуктів, а й інших галузях промисловості.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Chaudhry Q., Castle P., Watkins R. Nanotechnology in food. 2010. RSC Publishing. — 300 p.
2. Sozer N., Kokini J.L. Nanotechnology and its applications in the food sector // *Trends Biotechnol.* 2009. v. 27, p. 82—89.
3. М.О. Полумбрик. Вуглеводи в харчових продуктах і здоров'я людини. К.: Академперіодика. 2011. — 487 с.
4. Mozafari M.R., Johnson C., Hatziantoniou S. et al. Nanoliposomes and their applications in food nanotechnology // *J. Liposom. Res.* 2008. v. 18, p. 309-327.
5. Gregoriadis G., Bacon A., Caparros-Wanderley W. et al. Plasmid DNA vaccines: entrapment into liposomes by dehydration-rehydration // *Meth. Enzymol.* 2003. v. 367, p. 70-80.
6. Thompson A.K. Liposomes: from concepts to applications // *Food N.Z.* 2003. v. 13, p. s23-S32.
7. Benech R.O., Kheadr E.E., Laridi R. et al. Inhibition of *Listeria innocua* in cheddar cheese by addition of nisin Z in liposomes or by in situ production in mixed culture // *Appl. Environ. Microbiol.* 2002. v. 68, p. 3683-3690.
8. Garcia M., Aleixandre M., Gutierrez J. et al. Electronic nose for wine discrimination // *Sensors Actuat. B.* 2006. v. 113, p. 911—916.
9. Gfeller K.Y., Nugaeva N., Hegner M. Micromechanical oscillators as rapid biosensor for the detection of active growth of *Escherichia coli* // *Biosens. Bioelectron.* 2005. v. 21, p. 528—533.

Одержана редколегією 25.03.2011 р.

УДК 681.513.5

**Б.М. ГОНЧАРЕНКО**, д-р техн. наук,  
**О.П. ЛОБОК**, канд. фіз.-мат. наук  
Національний університет харчових технологій

## АНАЛІТИЧНЕ КОНСТРУЮВАННЯ ДИСКРЕТНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АПЕРІОДИЧНИМ ОБ'ЄКТОМ З ЗАПІЗНЮВАННЯМ

---

Розглянута задача синтезу в рамках лінійної теорії дискретного регулятора для керування аперіодичним неперервним технологічним об'єктом з запізнюванням в каналі керування. Показане формування рекурентного співвідношення у вигляді різницевого рівняння, яке дозволяє обчислити значення керувального діяння у будь-якому такті квантування.

**Ключові слова:** дискретний регулятор, z-перетворення, зворотний зв'язок, синтез керування, передатна функція, канал керування, збурення, рекурентне співвідношення, різницеве рівняння.

Рассмотрена задача синтеза в рамках линейной теории дискретного регулятора для управления аperiodическим непрерывным технологическим объектом с запаздыванием в канале управления. Показано формирование рекуррентного соотношения в виде разностного уравнения, которое позволяет вычислить значение управляющего действия в каком-либо такте квантования.

**Ключевые слова:** дискретный регулятор, z-преобразование, обратная связь, синтез управления, передаточная функция, канал управления, возмущение, рекуррентное соотношение, разностное уравнение.

The task of synthesis within the framework of linear theory of discrete regulator is considered for a management a aperiodicheskiy object continuous technological object with a delay in the channel of management. Forming of recurrent correlation is shown as raznostnoe | equalization which allows to calculate the value of managing action in some time of quantum.

**Keywords:** discrete regulator, z-transformation, feedback, synthesis of management, transmission function, management channel, indignation, recurrent correlation, raznostnoe equalization.

Більшість технологічних об'єктів керування в харчовій промисловості є аперіодичними і статичними. Для них відомі розв'язки задач синтезу керування за умови відсутності запізнювання у каналі керування або за умови апроксимації динамічних властивостей аперіодичного об'єкта з запізнюванням аперіодичною ланкою другого порядку [1], при якій реальне транспортне запізнювання в каналі керування заміщується на перехідне, а синтез керування залишається в межах лінійної теорії.

Тут покажемо, як за допомогою z-перетворення як основи аналізу дискретних систем здійснити в рамках лінійної теорії синтез (аналітичне конструювання) дискретного регулятора для керування аперіодичним об'єктом з запізнюванням в каналі керування.

Нехай технологічний об'єкт керування ТОК має динамічні властивості, які відображаються за каналом збурення аперіодичною ланкою першого порядку

ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

$$W_{of}(p) = \frac{Y(p)}{F(p)} = \frac{k_f}{T_0 p + 1}, \quad (1)$$

де  $Y(p)$ ,  $F(p)$  — зображення за Лапласом керованої змінної та збурювального діяння, відповідно;  $k_f$ ,  $T_0$  — коефіцієнт підсилення та стала часу каналу збурення об'єкта, а за каналом керування — аперіодичною ланкою першого порядку з запізнюванням:

$$W_{ок} = \frac{Y(p)}{U(p)} = \frac{k_0 \cdot \exp(-p\tau)}{T_0 p + 1}, \quad (2)$$

де  $U(p)$  — зображення за Лапласом керувального діяння;  $k_0$ ,  $T_0$ ,  $\tau$  — коефіцієнт підсилення, стала часу та запізнювання каналу керування ТОК.

Структурна схема такого ТОК представлена на рис. 1 в неперервному варіанті.

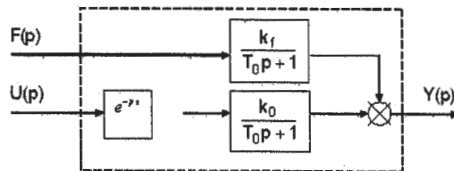


Рис. 1. Структурна схема ТОК

У  $z$ -формі передатна функція (1) має вигляд [2]:

$$W_{of}(z) = \frac{y(z)}{f(z)} = k_f \frac{1 - a_p}{1 - a_p z^{-1}} z^{-1}, \quad (3)$$

де  $y(z)$ ,  $f(z)$  —  $z$ -зображення вихідної (керованої) змінної  $y(t)$  та збурювального діяння  $f(t)$ .

$$a_p = \exp(-T / T_0),$$

$T$  — період квантування.

Передатна функція (2) відповідно набуває [2] наступного  $z$ -вигляду:

$$W_{ок}(z) = \frac{y(z)}{u(z)} = k_0 \frac{1 - a_p}{1 - a_p z^{-1}} z^{-(k+1)}, \quad (4)$$

де  $u(z)$  —  $z$ -зображення керувального діяння,  $k = \tau / T$ .

З огляду на вирази  $z$ -передатних функцій каналів ТОК його структурна схема в дискретному вигляді представлена на рис. 2.

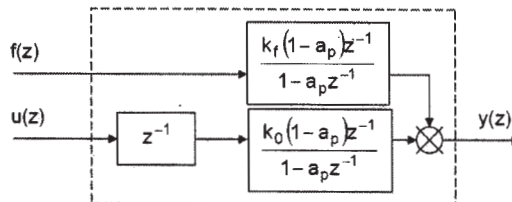


Рис. 2. Дискретна структурна схема ТОК

Доповнимо структурну схему ТОК передатною функцією дискретного регулятора в ланцюгу зворотного зв'язку, щоб одержати структурну схему системи автоматичного керування (регулювання) САК.

На рис. 3 зображена структурна схема неперервної САК з неперервним (аналоговим) регулятором  $D(p)$ , який ще належить аналітично сконструювати.

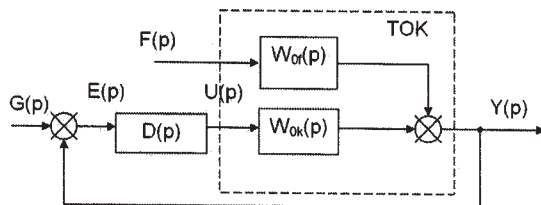


Рис. 3. Структурна схема неперервної САК ТОК

На рис. 3 крім  $D(p)$  позначені:  $W_{0i}(p)$  — канал збурення ТОК;  $W_{0k}(p)$  — канал керування ТОК;  $G(p)$ ,  $E(p)$ ,  $F(p)$  — зображення за Лапласом задавального діяння, неузгодження та збурення, відповідно.

Для визначення передатної функції (аналітичного конструювання) неперервного регулятора з передатною функцією  $D(p)$  за рис. 3 запишемо передатну функцію замкненої САК з оглядом на бажану аперіодичність перехідного процесу керування як

$$\Phi(p) = \frac{Y(p)}{G(p)} = \frac{\exp(-p\tau)}{1 + T_3 p} \quad (5)$$

де  $T_3$  — стала часу замкненої системи;  $G(p)$  — зображення за Лапласом задавального діяння.

Із рис. 3 очевидно, що при  $F(p) = 0$  (за принципом суперпозиції) рівнянням САК відносно зображень буде вираз:

$$Y(p) = W_{0k}(p) D(p) [G(p)] - Y(p). \quad (6)$$

З цього рівняння передатна функція  $D(p)$  аналітично сконструйованого неперервного регулятора визначається як:

$$D(p) = \frac{Y(p) / G(p)}{W_{0k}(p) \cdot [1 - Y(p) / G(p)]}. \quad (7)$$

Оскільки за виразом (5)  $\Phi(p) = Y(p)/G(p)$ , то:

$$D(p) = \frac{\Phi(p)}{W_{0k}(p) \cdot [1 - \Phi(p)]}. \quad (8)$$

Підставивши у вираз (8)  $D(p)$  вираз  $W_{0k}(p)$  (2) та вираз  $\Phi(p)$  (5), отримаємо передатну функцію неперервного регулятора  $D(p)$ , сконструйованого аналітично, у вигляді:

$$D(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = \frac{1 + T_0 p}{k_0 [1 - \exp(-p\tau) + T_3 p]}. \quad (9)$$

Очевидно, що його фізична реалізація на базі аналогових засобів автоматизації з огляду на наявність у знаменнику ланки запізнювання надто утруднена і майже неможлива, тому і не здійснюється. Це, до речі, пояснює і обмежений перелік стандартних законів регулювання.

Якщо скористатися дискретними (цифровими) засобами, наприклад, персональним комп'ютером або КОМ для реалізації  $D(z)$ , то одержимо дискретну САК ТОК (рис.4).

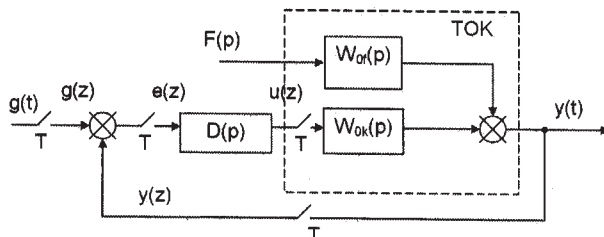


Рис. 4. Структурна схема дискретної САК ТОК

## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

На рисунку 4 зображена відповідна структурна схема дискретної САК з аналітично сконструйованим дискретним регулятором  $D(z)$ . На схемі зображені і імпульсні елементи з періодом квантування  $T$  і  $Z$ -зображення відповідних сигналів і діянь.

Користуючись структурною схемою дискретної САК (рис. 4) при  $F(p) = 0$  за принципом суперпозиції, напишемо рівняння САК відносно  $Z$ -зображень:

$$y(z) = W_{ок}(z) D(z) [g(z) - y(z)], \quad (10)$$

де  $W_{ок}(z) = \frac{z-1}{z} \cdot \left[ \frac{W_{ок}(p)}{p} \right]$  — дискретна передатна функція ТОК за каналом керування.

З виразу (10) випливає, що дискретна передатна функція аналітично сконструйованого дискретного регулятора ТОК буде:

$$D(z) = \frac{y(z) / g(z)}{W_{ок}(z) \cdot [1 - y(z) / g(z)]}. \quad (11)$$

Очевидно, що вираз  $y(z)/g(z)$  є передатною функцією замкненої системи керування, яку можна визначити, застосувавши до виразу її передатної функції (5)  $Z$ -перетворення. Тоді:

$$\Phi(z) = \frac{y(z)}{g(z)} = \frac{1 - a_3}{1 - a_3 z^{-1}} z^{-(k+1)}, \quad (12)$$

де  $a_3 = \exp(-T / T_3)$ .

Підстановка відповідних виразів  $W_{ок}(z)$  (4) та  $\Phi(z)$  (12) у вираз  $D(z)$  (11) дає рівняння аналітично сконструйованого дискретного регулятора ТОК:

$$D(z) = \frac{(1 - a_3) \cdot (1 - a_p z^{-1})}{k_0(1 - a_p) \cdot [1 - a_3 z^{-1} - (1 - a_3) \cdot z^{-(k+1)}]}, \quad (13)$$

що повністю відповідає передатній функції ДРД (Даліна) типу III [2], із реалізацією якої в дискретній формі не виникає жодних труднощів.

В [2] для такого регулятора було наведене рекурентне співвідношення у вигляді різницевого рівняння, яке дозволяє обчислити в  $n$ -ному такті (на  $nT$ -кроці) значення керувального діяння:

$$u(nT) = a_0 e[nT] - a_1 e[(n-1)T] - b_1 u[(n-1)T] + b_2 u[(n-k-1)T]. \quad (14)$$

З останнього виразу очевидно, що для обчислення керувального діяння на  $n$ -ному кроці потрібно:

1. Обчислити неузгодження  $e(nT)$  на кроці  $n$  і знайти його значення, яке було на кроці  $(n-1)$ , тобто  $e[(n-1)T]$ , а також мати значення керувальних діянь  $u[(n-1)T]$  та  $u[(n-k-1)T]$ , які були обчислені на кроках  $(n-1)$  та  $(n-k-1)$ ;

2. Перемножити значення змінних  $e(nT)$ ,  $e[(n-1)T]$ ,  $u[(n-1)T]$  та  $u[(n-k-1)T]$  на відповідні коефіцієнти  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $b_1$  та  $b_2$ .

3. Додати (скласти) одержані результати.

Очевидно, що обчислення керувального діяння найдоцільніше здійснити у вигляді комп'ютерної програми, що реалізує відповідне рекурентне співвідношення.

**Висновок.** Аналітичне конструювання дискретного регулятора для керування аперіодичним з запізнюванням об'єктом з застосуванням  $z$ -перетворення відбувається в рамках лінійної теорії. Синтезований регулятор дозволяє керувати неперервним об'єктом за законом дискретного регулятора Даліна типу III [2], з реалізацією якого у вигляді комп'ютерної програми розв'язання різницевого рівняння не виникає жодних труднощів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Гончаренко Б.М., Лобок О.П. Синтез оптимальних регуляторів для динамічного об'єкта другого порядку. — К.: НУХТ, Харчова промисловість, №7, 2008. — 89 — 91с.

2. Гончаренко Б.М., Ладанюк А.П., Лобок О.П. Цифрові системи керування: Навч. посіб. — Вінниця: Нова книга, 2007. — 158с.

Одержана редколегією 30.03.11р.

УДК 663.533

**Г.В. ВЕРГЕЛЕС**, директор УкрНДІспиртбіопроду  
*Український науково-дослідний інститут спирту і біотехнології продовольчих продуктів*  
**П.Л. ШИЯН**, д-р техн. наук,  
**Т.О. МУДРАК**, канд. техн. наук,  
**А.М. ФІЩЕНКО**, канд. техн. наук,  
**Р.Г. КИРИЛЕНКО**, канд. техн. наук  
*Національний університет харчових технологій*

## ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ І рН НА ГІДРОЛІЗ БІОПОЛІМЕРІВ ЗЕРНОВИХ ЗАМІСІВ ПРИ ВИКОРИСТАННІ КИСЛОТОСТІЙКИХ ФЕРМЕНТНИХ ПРЕПАРАТІВ СЕЛЕКТИВНОЇ ДІЇ

Наведено результати досліджень по вмісту розчинених вуглеводів і нерозчиненого крохмалю в розріджених замісах, отриманих з використанням кислотостійких ферментних препаратів (ФП) залежно від рН і температури термоферментативної обробки (ТФО). З точки зору ефективності біоконверсії складових зернової сировини і забезпечення мікробіологічної чистоти напівпродуктів оптимальне значення рН становить 3,8—3,4, тривалість оброблення — 180 хв.

**Ключові слова:** заміс, ферментний препарат, сусло, концентрація.

Приведены результаты исследований по содержанию растворимых углеводов и нерастворенного крахмала в разжиженных замесах, полученных с использованием кислотостойких ФП в зависимости от рН и температуры ТФО. С точки зрения эффективности биоконверсии составных зернового сырья и обеспечения микробиологической чистоты полупродуктов оптимальное значение рН составляет 3,8—3,4, продолжительность обработки — 180 мин.

**Ключевые слова:** замес, ферментный препарат, сусло, концентрация.

The results of researches on the content of soluble carbohydrates and insoluble starch in diluted batches derived with the use of acid-resistant enzyme preparations according to pH and the temperature of thermal ferment processing (TFP) are given. From the point of efficiency of bioconversion of grain raw materials and provision of microbiological cleanness of semi-products the optimum value of pH is 3,8—3,4, the duration of processing is 180 min.

**Keywords:** batch, enzyme preparation, mash, concentration.

В технології спирту із крохмалевмісної сировини пріоритетним напрямком є дослідження і розробка інноваційних енерго- та ресурсозберігаючих технологій, які дозволяють знизити температуру ТФО замісів та забезпечують більш глибокий гідроліз біополімерів зерна за рахунок використання комплексних ФП селективної дії [1].

Зниження температури розварювання замісів не дозволяє повністю інактивувати спороутворюючу мікрофлору, яка на послідуєчих стадіях технологічного процесу може бути джерелом підвищеної кислотності спиртової бражки і, відповідно, післяспиртової барди, фільтрат якої використовується для

© Г.В. Вергелес, П.Л. Шиян, Т.О. Мудрак, А.М. Фіщенко, Р.Г. Кириленко 2011 р.



## ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

приготування замісів. В результаті зниження рН замісів інактивуються ферменти, знижується бродильна активність дріжджів, зменшується питомий вихід спирту, погіршується його якість.

Метою досліджень було визначення оптимальних умов гідролізу біополімерів вуглевод-вмісної сировини при понижених значеннях температури та рН.

Досліджувались комплекси кислотостійких ФП, які зберігають високу ферментативну активність при рН 3,4...5,0 та температурі 49...63 °С — Amylex HT ( $\alpha$ -амілаза), Diazyme SG (глюкоамілаза), Alphasase AFP (протеаза), Laminex (ксиланаза) — фірма «Даніско».

Як сировину використовували кукурудзу та жито. Дослідження проводили у трикратній повторності.

При впровадженні ТФО зернових замісів та кислотостійких ФП визначальною умовою є ступінь подрібнення зерна. Заміси з кукурудзи готували із ступенем подрібнення 95 % проходу крізь сито з отворами діаметром 0,6 мм при гідромодулі 1 ÷ 3. Концентрація сухих речовин сусла — 20 %. Заміси з жита готували із ступенем подрібнення 85 % проходу крізь сито з отворами діаметром 1,0 мм при гідромодулі 1 ÷ 3,5. Концентрація сухих речовин сусла — 18 %.

Оптимум дії кислотостійкої  $\alpha$ -амілази за даними виробника ФП залежить від виду сировини і знаходиться в межах 49...51 °С для жита та 60...63 °С для кукурудзи. Враховуючи те, що клейстеризація крохмалю жита відбувається при температурі 55...60 °С, а кукурудзи — 65...68 °С [2], дослідження ефективності процесу розріджування проводились при вищезгаданих температурах протягом 90 та 180 хвилин при рН 3,4...5,0. Значення рН корегували внесенням розчину сірчаної кислоти. ФП задавались у наступній кількості:  $\alpha$ -амілаза — 0,15; 0,4; 0,8 та 1,0 л/т крохмалю, що в перерахунку на одиниці активності становить 0,075; 0,2; 0,4; 0,5 од. АЗ/г крохмалю; глюкоамілаза — 1,45 л/т крохмалю або 5,0 од. ГЛЗ/г крохмалю відповідно; протеази — 0,1 л/т або 0,035 од. ПЗ/г сировини; ксиланази — 0,2 л/т сировини або 4,0 од. КЗ/г сировини. Вміст загальних та розчинених вуглеводів визначали фотоелектро-колориметричним методом з антроновим реактивом.

Відмічено, що в процесі приготування замісів при понижених значеннях рН (3,4—4,5) з різким підвищенням температури розріджування до 68 °С для кукурудзи і 60 °С — для жита спостерігалось значне підвищення в'язкості замісу. Це явище імовірно обумовлено коагуляцією білків із наступною адсорбцією на них ферментів, що і призводить до зниження гідролітичної активності  $\alpha$ -амілази [3]. Тому при приготуванні замісу при зазначеній температурі підвищення її проводили поступово.

Дослідження впливу рН замісу на ступінь гідролізу крохмалю кислотостійкою  $\alpha$ -амілазою (Amylex HT) дали можливість визначити оптимальне значення рН (таблиці 1, 2). Для кукурудзи та жита оптимальне рН знаходиться в межах 3,8...4,0.

Із збільшенням терміну ТФО замісу з 90 хв. до 180 хв. збільшується вміст розчинених вуглеводів в середньому на 25,5 % та 35,8 % для кукурудзи та жита відповідно (табл. 1, 2). Це пов'язано з температурною деструкцією оболонки крохмальних зерен та більш вільному доступу ферменту до крохмалю [3].

**Таблиця 1. Вплив рН замісу на ступінь розріджування крохмалю кукурудзи**

№ дослідів	Умови дослідів: Концентрація $\alpha$ -амілази 0,2 од. АЗ/г крохмалю, температура розріджування 68 °С		Тривалість розріджування, хв.			
	рН замісу	90		180		
		розчинені вуглеводи, г/100 см <sup>3</sup>	нерозчинений крохмаль, г/100 см <sup>3</sup>	розчинені вуглеводи, г/100 см <sup>3</sup>	нерозчинений крохмаль, г/100 см <sup>3</sup>	
1	3,4	3,50	9,49	4,85	7,68	
2	3,6	3,74	9,48	4,94	7,68	
3	3,8	3,94	8,92	5,08	3,26	
4	4,0	3,95	8,92	5,10	3,43	
5	4,5	3,94	8,90	5,09	3,46	
6	5,0	3,94	8,92	5,83	2,89	



Таблиця 2. Вплив рН замісу на ступінь розріджування крохмалю жита

№ дослідів	Умови дослідів: Концентрація $\alpha$ -амілази 0,2 од. АЗ/г крохмалю, температура розріджування 60 °С		Тривалість розріджування, хв.			
	рН субстрату	90		180		
		розчинені вуглеводи, г/100 см <sup>3</sup>	нерозчинений крохмаль, г/100 см <sup>3</sup>	розчинені вуглеводи, г/100 см <sup>3</sup>	нерозчинений крохмаль, г/100 см <sup>3</sup>	
1	3,4	3,15	8,91	4,91	3,73	
2	3,6	3,19	8,78	5,05	3,27	
3	3,8	3,51	8,32	5,47	2,72	
4	4,0	3,41	8,41	5,42	2,96	
5	4,5	3,49	8,32	5,42	3,05	
6	5,0	3,30	8,55	5,19	3,26	

В таблицях 3, 4 наведений вплив температури ТФО замісу та кількості кислотостійкої  $\alpha$ -амілази на ступінь розріджування крохмалю.

Із збільшенням витрати  $\alpha$ -амілази з 0,075 од. АЗ/г до 0,4 од. АЗ/г крохмалю зростає концентрація розчинених вуглеводів. Подальше підвищення концентрації б-амілази не дає помітного ефекту.

Таблиця 3. Вплив температури термоферментативної обробки замісу на ступінь розріджування крохмалю кукурудзи

№ дослідів	Умови дослідів: рН замісу 4,0		Тривалість розріджування, хв.			
	Температура розріджування крохмалю, °С	Кількість $\alpha$ -амілази, од. АЗ/г крохмалю	90		180	
			розчинені вуглеводи, г/100 см <sup>3</sup>	нерозчинений крохмаль, г/100 см <sup>3</sup>	розчинені вуглеводи, г/100 см <sup>3</sup>	нерозчинений крохмаль, г/100 см <sup>3</sup>
1	60	0,075	0,68	15,40	1,61	14,39
2		0,2	2,48	11,04	3,33	9,65
3		0,4	3,50	6,01	4,20	5,18
4		0,5	3,61	6,30	4,38	4,98
5	68	0,075	1,42	14,65	5,08	3,51
6		0,2	3,96	8,87	5,12	3,37
7		0,4	4,69	6,36	5,13	3,29
8		0,5	4,72	6,25	5,21	3,15

З підвищенням температури розріджування замісу кислотостійкою  $\alpha$ -амілазою з 60 °С до 68 °С для кукурудзи та з 50 °С до 60 °С для жита збільшується концентрація розчинених вуглеводів в розрідженому замісі в середньому в 1,7 та 1,9 рази для кукурудзи та жита відповідно (табл. 3, 4).

Аналогічні дослідження нами були проведені по гідролізу біополімерів сировини з використанням ФП Amylex HT (б-амілаза), Diazyme SG (глюкоамілаза), а також додаткові ФП Laminex (ксиланаза) та Alphalase AFP (протеаза). Розріджування житнього замісу проводили 90 хв. при температурі 60 °С, оцукрювання — 30 хв. при температурі 55 °С. Додаткові ФП додавали на стадії оцукрювання суслу.

ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

Таблиця 4. Вплив температури ТФО замісу на ступінь розріджування крохмалю жита

№ дослідів	Умови дослідів: рН замісу 3,8		Тривалість розріджування, хв.			
			90		180	
	Температура розріджування крохмалю, °С	Кількість $\alpha$ -амілази, од. АЗ/г крохмалю	розчинені вуглеводи г/100 см <sup>3</sup>	нерозчинений крохмаль, г/100 см <sup>3</sup>	розчинені вуглеводи, г/100 см <sup>3</sup>	нерозчинений крохмаль, г/100 см <sup>3</sup>
1	50	0,075	0,59	13,94	1,08	14,53
2		0,2	1,52	12,80	2,04	11,97
3		0,4	2,45	10,35	3,35	7,91
4		0,5	2,23	10,15	3,48	7,85
5	55 — 60	0,075	0,98	13,24	4,20	5,45
6		0,2	3,28	8,51	5,29	2,80
7		0,4	4,32	5,21	5,30	2,79
8		0,5	4,41	5,12	5,45	2,64

На основі проведених досліджень (табл. 5) встановлено, що додавання в розріджене сусло протеолітичного ферменту Alphasase AFP сприяло зниженню вмісту нерозчиненого крохмалю на 25 % по відношенню до контролю, а використання комплексу Alphasase AFP + Laminex — на 65 % .

Таблиця 5. Вплив ферментних комплексів на показники сусла із жита

№ дослідів	Умови дослідів: Концентрація $\beta$ -амілази 0,2 од. АЗ/г крохмалю, глюкоамілази 5,0 од. ГЛЗ/г крохмалю		Концентрація вуглеводів, г/ 100 см <sup>3</sup>			концентрація амінного азоту, мг/100 см <sup>3</sup>	в'язкість, Па·с
	Концентрація протеази, од. ПЗ/г сировини	Концентрація ксиланази од. КЗ/г сировини	розчинені	загальні	нерозчинений крохмаль		
1	контроль		11,20	11,80	0,54	7,00	3,20
2	0,035	—	11,35	11,80	0,40	10,80	2,83
3	—	4,0	11,27	11,85	0,52	7,42	2,75
4	0,035	4,0	11,60	11,81	0,19	11,20	2,55

При використанні додаткових ФП протеази та ксиланази в'язкість сусла знижувалась майже на 20 % в порівнянні з контрольним (табл. 5).

Використання протеолітичних ферментів і ксиланази сприяє також підвищенню в оцукреному суслі концентрації амінного азоту, в середньому, на 37,0 % в порівнянні з контрольним зразком. Підвищення концентрації амінного азоту в суслі сприяє біосинтезу дріжджової біомаси в бражці та підвищенню питомого виходу спирту у зв'язку з тим, що в процесі біосинтезу дріжджів використовують не тільки вуглеводи сировини, а й аміний азот.

Проведені також дослідження по визначенню впливу тривалості ТФО замісів із кукурудзи при температурі 68 °С та різних значеннях рН на кислотоутворюючу мікрофлору.

Визначення рівня мікробної контамінації розвареної маси проводили шляхом висіву проб на чашки Петрі з м'ясопептонним агаром. Чашки інкубували в термостаті при температурі 37 °С протягом 3 діб.

На основі проведених досліджень (табл. 6) встановлено, що із зниженням рН субстрату від 5,0 до 3,4 вже через 30 хв. розріджування спостерігається зниження його контамінації.

Таблиця 6. Вплив рН на кислотоутворюючу мікрофлору

№ п.п.	Умови дослідю: рН розрідженого сусла	Кількість колоній			
		Тривалість обробки, хв.			
		30	60	90	180
1	6,2 (контроль)	25	15	10	5
2	5,0	15	8	4	2
3	4,5	8	4	2	1
4	4,0	3	1	0	0
5	3,8	1	0	0	0
6	3,6	0	0	0	0
7	3,4	0	0	0	0

Особливо різке зниження колоній бактерій у замісах відбувалося при рН 3,8—3,4. З підвищенням тривалості обробки до 90 хв. вже при рН 4,0 наявність колоній не спостерігалась. При цьому ФП зберігали високу активність, яка характеризувалася високим вмістом зброджуваних вуглеводів та декстринів у суслі.

**Висновки.** Кислотостійка б-амілаза (Amylex НТ) дозволяє переробляти зернові заміси зі зниженню кислотності при одночасному зниженні температури розріджування для жита — до 60 °С, для кукурудзи — до 68 °С. При цьому ступінь дисперсності помелу повинна бути для жита не менше 85 % проходу крізь сито з отворами діаметром 1,0 мм, а для кукурудзи — не менше 95 % проходу крізь сито з отворами діаметром 0,6 мм.

Для більш повного гідролізу біополімерів сировини, зменшення в'язкості сусла та підвищення концентрації в ньому амінного азоту доцільно використовувати протеазу (Alphalase АРР) у кількості 0,035 од. ПЗ/г сировини та ксиланазу (Laminex) в кількості 4,0 од. КЗ/г сировини.

Збільшення терміну ТФО сировини до 180 хв. покращує деструкцію крохмальних зерен і позитивно впливає на мікробіологічну чистоту виробництва.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Шиян П.Л., Сосницький В.В., Олійничук С.Т. Інноваційні технології спиртової промисловості. Теорія і практика: Монографія. — К.: Видавничий дім «Асканія», 2009. — 424 с.
2. Громов С.И., Пыхова С.В., Голубева А.Д. Исследование режимов приготовления концентрированного сусли при механико-ферментативной обработке с использованием различных ферментных препаратов. Тезисы «Микробные биокатализаторы для перерабатывающих отраслей АПК» / Под ред. В.А. Полякова, А.В. Рымаревой, Москва, ВНИИПБТ, 2006, с. 141 — 148.
3. Жеребцов Н.А. Амилотические ферменты в пищевой промышленности. — М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1984. — 160 с.

Одержана редколлегією 22.03.11 р.

**О.М. М'ЯКШИЛО**, канд. техн. наук,

**О.В. ХАРКЯНЕН**, здоб.

*Національний університет харчових технологій*

## **ПЛАНУВАННЯ СОБІВАРТОСТІ ПРОДУКЦІЇ ХАРЧОВОГО ПІДПРИЄМСТВА НА ОСНОВІ АНАЛІТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ OLAP-КУБІВ**

---

Досліджено способи використання даних, накопичених в базі даних харчового підприємства. Описано розробку рішення для планування собівартості продукції на основі аналітичних моделей OLAP-кубів.

**Ключові слова:** OLAP-рішення, сховище даних, OLAP-куб, видобуток даних, собівартість продукції, планування.

Исследовано способы использования данных, накопленных в базе данных пищевого предприятия. Описано разработку решения для планирования себестоимости продукции на основе аналитических моделей OLAP-кубов.

**Ключевые слова:** OLAP-решение, хранилище данных, OLAP-куб, извлечение данных, себестоимость продукции, планирование.

Researched ways to use data accumulated in a database of food enterprise. Described the development of solution for the planning of production cost value, based on analytical models of OLAP-cubes.

**Keywords:** OLAP-solution, data warehouse, OLAP-cube, extraction of data, production cost value, planning.

Підприємства харчової промисловості України для виживання в ринкових умовах потребують постійного удосконалення бізнес-процесів з метою зниження собівартості продукції, розробки нових видів продукції для задоволення потреб споживача, пошуку нових ринків збуту.

Собівартість продукції є одним з найважливіших факторів, який впливає на прибутковість діяльності підприємства.

Ретельний аналіз факторів, які впливають на собівартість продукції за кожною зі статей калькуляції, потребує особливої уваги зі сторони осіб, що приймають управлінські рішення (ОПР), оскільки помилкові рішення можуть призвести до великих фінансових втрат.

Українські підприємства харчової промисловості, в процесі своєї діяльності, накопили великі обсяги статистичної інформації, яка містить дані про асортимент продукції, що виготовляється, її собівартість та ціни, обсяги виробництва та збуту за різні періоди часу (місяць, квартал, рік), постачальників сировини, потужність підприємства тощо. Спеціалісти (ОПР), що здійснюють аналіз та приймають управлінські рішення, часто не мають достатніх знань з інформаційних технологій для знаходження та видобутку такої інформації, оскільки вона неструктурована, неузгоджена, знаходиться у різних джерелах, її складно отримати вчасно у необхідних для аналізу розрізах.

Сучасні інформаційні технології дозволяють надати ОПР зручні та гнучкі інструментальні засоби за допомогою яких накопичені дані будуть систематизовані і вчасно представлені у необхідних для прийняття управлінських рішень інформаційних зрізах.

Необхідність використання OLAP-рішень (On-Line Analytical Processing) обґрунтована обмеженим набором аналітичних функцій в облікових системах. Реляційні бази даних, які, як

правило, використовуються в таких системах потребують значного часу для виконання запитів на перетворення накопичених підприємством даних в аналітичну інформацію, оскільки вихідні дані розташовані в багатьох таблицях і для їх агрегації необхідно виконання складних операцій об'єднання, що потребує досить значних обчислювальних ресурсів та призводить до перевантаження облікової системи підприємства.

В статті розглянуто OLAP-рішення для планування діяльності багатоменклатурного харчового підприємства, яке надає можливість отримання, об'єднання та коригування даних з OLTP-бази даних підприємства та зовнішніх джерел (наприклад, статистичних звітів), тощо, з метою формування багатовимірного масиву інформації для її подальшого представлення у необхідному для аналізу вигляді.

Розроблене OLAP-рішення передбачає наявність джерел даних, OLAP-сервера та OLAP-клієнта.

Джерела даних — це сховище даних, розроблене з врахуванням специфіки діяльності харчового підприємства, що вміщує дані з облікових OLTP-систем підприємства, таблиць Excel, окремих документів різних типів тощо.

OLAP-сервер — використовується для накопичення, збереження та підготовки даних для формування необхідних інформаційних зрізів.

OLAP-клієнт — програма, яка надає користувачу інтерфейс для роботи з агрегованими даними.

Розглянемо використання OLAP-рішення для реалізації задач, розрахунку, планування та аналізу собівартості багатоменклатурного харчового підприємства.

Як відмічалось раніше, собівартість продукції — це один з основних факторів, який безпосередньо впливає на прибутковість виготовлення продукції. Чим нижче собівартість продукції (за умови збереження якості) тим більше прибуток від реалізації виготовленої продукції. Оскільки зниження собівартості продукції є основним фактором підвищення прибутковості, то слід приділяти особливу увагу виявленню факторів, що найбільше впливають на динаміку коливань собівартості.

Собівартість продукції являє собою вираз у грошовій формі витрат всіх видів ресурсів, які використовуються у процесі виготовлення продукції та виконанні робіт: основних фондів, природної та промислової сировини, матеріалів, палива та електроенергії, праці.

У практиці планування, обліку і аналізу собівартості використовують два види групувань витрат на виробництво і реалізацію продукції — за економічними елементами і статтями витрат [4].

За по-елементною класифікацією визначають загальну суму витрат на виробництво всієї продукції.

Разом з тим, для виявлення резервів зниження собівартості конкретних видів продукції необхідно знати собівартість одиниці продукції. Для цього при плануванні і обчисленні собівартості продукції всі витрати групують за статтями калькуляції.

Для планування, обліку і аналізу собівартості продукції в харчовій промисловості використовують такі основні показники: кошторис витрат на виробництво і реалізацію продукції; собівартість товарної та реалізованої продукції; собівартість одиниці продукції; витрати на 1 грн. товарної продукції; зниження собівартості порівнянної продукції.

Розроблене для багатоменклатурного харчового підприємства OLAP-рішення реалізує такі етапи:

1. Проектування та розробку схеми сховища даних з урахуванням всіх параметрів даних, необхідних для аналізу собівартості продукції.
2. Вибірку, очищення, агрегування даних з облікових OLTP-систем підприємства та інших джерел і завантаження агрегованих даних до сховища даних.
3. Проектування та побудову OLAP-кубів, наповнених інформацією, необхідною для аналізу факторів, які впливають на собівартість продукції.
4. Представлення результатів аналізу користувачеві у вигляді діаграм та графіків.
5. Створення прогнозів на основі акумульованих даних.

Розробка OLAP-рішення для розрахунку та аналізу собівартості продукції багатоменклатурного підприємства потребувала дослідження та вивчення всіх основних факторів, що впливають на собівартість продукції. З метою виявлення та аналізу таких факторів складено економіко-математичну модель, яка максимізує прибуток від виробництва продукції

## ЕКОНОМІКА

багатомономенклатурним харчовим підприємством. Обмеження функції цілі даної моделі враховують всі основні параметри, необхідні для планування оптимального асортименту продукції і отримання найбільшого прибутку від її виробництва [2].

### 1. Функція цілі

$$F(x) = \sum_{j=1}^n p_j x_j \Rightarrow \max, \quad (1)$$

де  $P_j$  — прибуток від виробництва  $j$ -виду продукції, грн.;  $X_j$  — обсяг випуску продукції  $j$ -виду  
Для одномономенклатурного підприємства харчової промисловості  $n=1$

### 2. Обмеження.

а) за виробничим обладнанням:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq A_i \quad (i = 1, n) \quad (2)$$

де  $a_{ij}$  — зв'язуючий коефіцієнт по обладнанню

б) за видами продукції у вартісному виразі (за товарною продукцією):

$$\sum_{j=1}^n g_j x_j \geq G \quad (3)$$

де  $g_j$  — оптова ціна  $j$ -го виду продукції;  $G$  — товарна продукція в оптових цінах.

в) за собівартістю

$$\sum_{j=1}^n c_j x_j \leq C \quad (4)$$

де  $c_j$  — собівартість  $j$ -го виду продукції;  $C$  — собівартість.

г) за випуском продукції в натуральному виразі

$$\sum_{j=1}^n t_j x_j \geq 0 \quad (5)$$

де  $t_j$  — обсяг виготовлення  $j$ -го виду продукції

д) за сировиною

$$\sum_{j=1}^n b_{ij} x_j \leq B_i \quad (6)$$

$b_{ij}$  — норма витрат сировини, що дорого коштує

е) за попитом на окремі види виробів

$$\alpha_j \leq x_j \leq \beta_j \quad (7)$$

Розроблену економіко-математичну модель використано як основу при проектуванні структури сховища даних та структур OLAP-кубів.

На рис. 1 представлена модель сховища даних, в якій враховано всі необхідні для аналізу собівартості продукції дані. Проектування розмірної (Dimensional) моделі сховища даних було здійснено у CA ERwin Data Modeler. Сховище даних має денормалізовану структуру, використовує стандарт збереження даних — схему зірка, орієнтоване на високу продуктивність при виконанні аналітичних запитів [6].

В процесі розробки сховища даних було виділено статистичні дані, які періодично змінюються і потребують збереження у сховищі, проведено денормалізацію даних з метою спрощення і відповідно прискорення виконання вибірки даних у запитах.

Сховище даних містить наступні таблиці вимірів (для збереження даних, які не змінюються або змінюються рідко): «Продукція», «Період», «Постачальник», «Стаття калькуляції», «Елемент витрат» та таблиці фактів (для збереження фактичних або агрегованих даних): «Витрата по статті», «Витрата по елементу», «Показник».

Реалізовано сховище даних в MS SQL Server 2008.

Для аналізу даних розроблено OLAP-куби, які враховують необхідні зміни вимірів, рівні деталізації, орієнтацію даних та їх графічне представлення відповідно до потреб



Рис. 1. Модель сховища даних

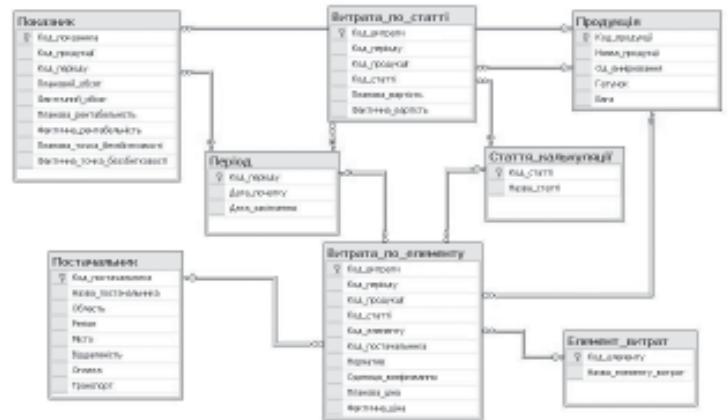


Рис. 2. Схема сховища даних в MS SQL Server 2008

підприємства при аналізі собівартості продукції. OLAP куби надають достатньо даних для розрахунку різноманітних показників, які характеризують собівартість продукції та використані для створення, на основі агрегованих даних, прогнозів щодо собівартості продукції.

Спроектвані і наповнені інформацією зі сховища даних підприємства OLAP-куби надали можливість підвищення ефективності планування собівартості продукції за рахунок:

- визначення впливу окремих статей калькуляції на загальну собівартість продукції з метою оптимізації витрат по статтях калькуляції;
- визначення впливу окремих елементів витрат в межах статей калькуляції;
- визначення оптимального асортименту продукції;
- визначення доцільності впровадження нових видів продукції;
- визначення розбіжностей між плановими та фактичними показниками, які характеризують собівартості продукції;
- виявлення факторів, які найбільше впливають на собівартість продукції в розрізі статей калькуляції та окремих елементів в межах статей калькуляції.

На рис. 3 наведено схему одного з розроблених OLAP-кубів, яка реалізована в MS Analysis Services 2008. OLAP-куб вміщує дані про витрати на виготовлення продукції по статтях калькуляції та елементах витрат в межах цих статей для виявлення і аналізу факторів в розрізі статей калькуляції, які найбільше впливають на собівартість окремих видів продукції за обрані ОПР періоди.

## ЕКОНОМІКА

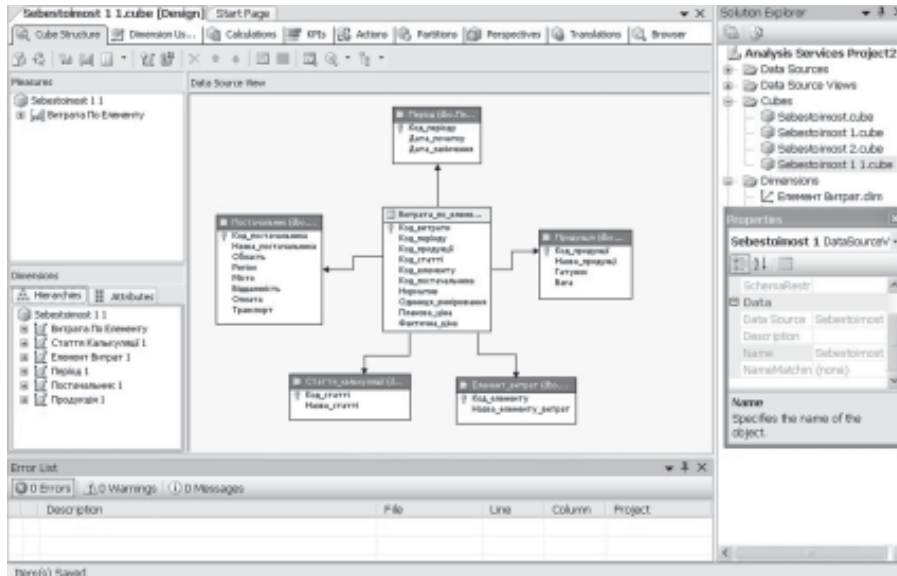


Рис. 3. Схема OLAP-куба в MS Analysis Services 2008

Для забезпечення зручності використання побудованих OLAP-куб передано до OLAP-клієнта. В якості клієнта найчастіше використовують електронні таблиці Microsoft Excel для відображення даних у вигляді зведених таблиць, діаграм та графіків, які зручно аналізувати не спеціалістам з інформаційних технологій.

На наступних діаграмах наведено приклад для підприємства з виробництва безалкогольних напоїв. Діаграми побудовані на основі даних переданих з OLAP-куба до зведеної Pivot-таблиці Microsoft Excel 2007 і відображують інформаційні зрізи для аналізу змін в структурі собівартості по статті калькуляції «Сировина та матеріали» на виготовлення безалкогольного напою з вишнею та прогнозування собівартості безалкогольного напою з вишнею на майбутні періоди.

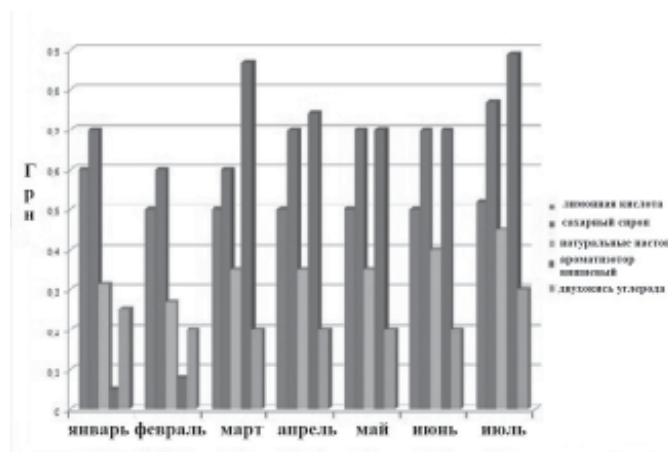


Рис. 4. Витрати по статті калькуляції «Сировина та матеріали» на виготовлення продукції



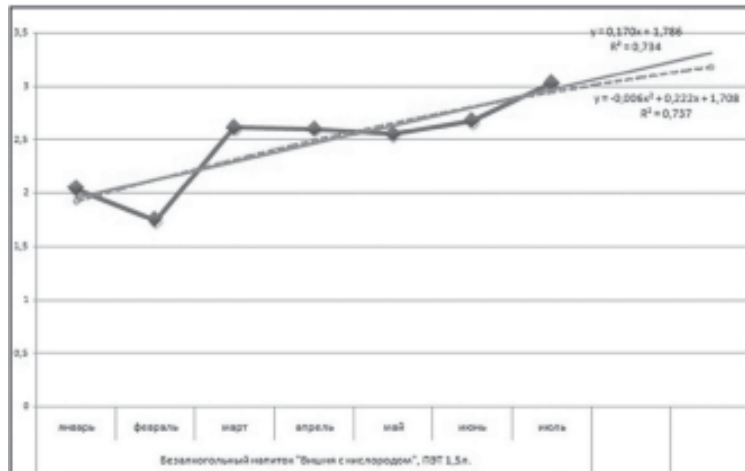


Рис. 5. Прогнозування собівартості продукції

**Висновки.** Розроблене для підприємства з великою номенклатурою продукції OLAP рішення надає можливість багатовимірного експрес-аналізу даних, отриманих з різних джерел інформації, розширює способи використання даних, накопичених в базі даних харчового підприємства з метою планування та зниження собівартості продукції та отримання найбільшого прибутку, забезпечує перехід від статичних до динамічних звітів, тобто можливість визначення вигляду звіту в процесі аналізу даних.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Бергер А. Microsoft SQL Server 2005 Analysis Services. OLAP и многомерный анализ данных — БХВ-Петербург, 2007. — 928 с.
2. Глізенко С.В., Соколов М.О., Теліженко О.М. Економічне прогнозування: Навчальний посібник. — 3-тє вид., доп. — Суми: ВТД «Університетська книга», 2004. — 207 с.
3. Елманова Н., Федоров А. Введение в OLAP-технологии Microsoft. — М: Диалог-МИФИ, 2002. — 272
4. Ефремова А.А. Себестоимость: от управленческого учета затрат до бухгалтерского учета расходов — М.: Вершина, 2006. — 208 с.: ил., табл.
5. Ларсон Б. Разработка бизнес-аналитики в Microsoft SQL Server 2005. — Питер, 2008. — 688 с.
6. Маклаков С.В. Case-средства разработки информационных систем. — 2 изд., испр. и дополн. — М: ДИАЛОГ-МИФИ, 2001. — 304 с.
7. Уокенбах Джон. Microsoft Office Excel 2007. Библия пользователя.: Пер. с англ. — М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2008. — 816 с.: ил. — Парал. тит. англ.
8. <http://olap.ru>

Одержана редколлегією 29.11.10 р.

Г.М. Білошицька, асп.,

П.К. Канінський, д-р екон. наук

Національний аграрний університет, м. Житомир

## ЯКІСТЬ СИРОВИНИ ТА ЇЇ РОЛЬ У ПІДВИЩЕННІ КОНКУРЕНТОСПРОМОЖНОСТІ ПРОДУКЦІЇ

---

Досліджено проблеми формування якості сировини, та її роль у підвищенні конкурентоспроможності продукції України.

**Ключові слова:** якість, сировина, конкурентоспроможність, продукція.

Исследовано проблемы формирования качества сырья, а так же значение повышения конкурентоспособности продукции Украины.

**Ключевые слова:** качество, сырье, конкурентоспособность, продукция.

The problems of creation of quality raw materials, as well as the importance of increasing to the competitiveness production in Ukraine.

**Key words:** quality, raw materials, competitiveness, production.

На всіх етапах розвитку суспільства проблема підвищення якості продукції завжди було в центрі уваги товаровиробників. Єдиний підхід до вирішення даної проблеми — на роботі люди почували себе комфортно і зручно, відчували турботу про себе — лише тоді можна сподіватися на цілковиту віддачу. Потрібно дбати і про умови праці і про калорійність продуктів харчування [1].

Тому глибокого вивчення потребує розробка теоретичних засад і практичних пропозицій щодо оптимізації виробничої структур із урахуванням підвищення конкурентоспроможності економічних, соціальних та природно-екологічних факторів.

Рушійними силами ринкової економіки є конкуренція між суб'єктами господарювання. Конкуренція — суперництво між товаровиробниками за найсприятливіші, економічно найвигідніші умови виробництва та реалізації овочепереробної продукції.

Найбільш складним у теорії та практиці менеджменту є визначення сутності та механізмів конкурентоспроможності. Це можливо на основі визначення характеру конкурентної переваги або ключових факторів успіху (КФУ).

Ключові фактори успіху (або конкурентні переваги) — це характерний для певної галузі перелік чинників, що приносять їй переваги перед іншими галузями (наприклад, у боротьбі за інвестиції за рахунок більшої прибутковості або швидкості обороту капіталу), а також одним підприємствам галузі над іншими. Також ключові фактори успіху мають стабільні класифікаційні ознаки і, як правило, базуються на належному науково-технічному рівні виробництв; маркетингу та менеджменту; належному фінансово-економічному забезпеченні діяльності підприємства; високому рівні кваліфікації персоналу тощо [4].

У боротьбі за споживача ці фактори не є постійними, вони змінюються залежно від особливостей галузей; сегментів ринку, що обслуговуються, а також часу та етапу «життєвого циклу» галузі та підприємства.

Для кожної галузі є свої специфічні вимоги до комбінації наведених ключових факторів успіху, але для зразкового розвитку овочепереробних підприємств кожне із них може стати

інструментом перемоги в конкурентній боротьбі [3]. Однак відомо, що конкурентоспроможність, базується на одному ключовому факторі успіху, ненадійна. Це повинен пам'ятати кожен менеджер.

Ключові фактори успіху формують конкурентоспроможність об'єкта досліджень: товару, виробництва, підприємства, галузі, держави тощо.

У стратегічному управлінні найчастіше конкурентоспроможність розглядається у двох аспектах:

1) конкурентоспроможність товару (продукції), тобто ступінь його відповідності на певний момент вимогам цільових груп споживачів або обраного ринку за найважливішими характеристиками: технічними, економічними, екологічними тощо.

2) конкурентоспроможність підприємства — це рівень його компетенції щодо інших підприємств-конкурентів у нагромадженні та використанні виробничого потенціалу певної спрямованості, а також його окремих складових: технології, ресурсів, менеджменту (особливо — стратегічного та поточного планування), навичок і знань персоналу тощо, що знаходить вираження в таких результируючих показниках, як якість продукції, прибутковість, продуктивність тощо.

Наслідком конкурентоспроможності підприємства є продукція, яку воно виготовляє. У процесі добору з метою купівлі певного товару покупець «виграє», тобто купує, той товар, в якого відношення корисного ефекту до витрат на купівлю та використання є найбільшим, порівняно з іншими аналогічними товарами. Це співвідношення і є умовою конкурентоспроможності продукції.

Для визначення конкурентоспроможності товару здійснюються такі кроки:

вибір цільового ринку;

вибір товару-аналога (бази для порівняння);

визначення набору параметрів товару для порівняння та моделей, за допомогою яких здійснюватимуться розрахунки;

порівняння товарів, визначення кількісних значень обраних параметрів;

розрахунок інтегрального показника конкретного товару.

Більшість моделей, що використовуються для аналізу «портфеля підприємства», базується на визначенні конкурентоспроможності продукції.

Наприклад, у разі використання моделі «життєвого циклу» товару враховується, що кожний з його етапів має специфічні характеристики конкурентоспроможності. Так, на перших етапах — «зародження» та «вихід на ринок» — ними можуть бути швидкість проектних робіт і час виходу на ринок. Далі (етапи «зростання», «зрілості») на перший план виходять показники рентабельності виробництва, продуктивності праці тощо.

Кожний продукт або послуга цінні настільки, наскільки вони можуть задовольняти потреби споживача, тому в усіх показниках, що характеризують той чи інший продукт або послугу, будуть використовуватися об'єктивні та суб'єктивні, кількісні та якісні параметри й показники, які більшою чи меншою мірою відбивають рівень задоволення потреб. Чим вищий цей рівень, тим більш конкурентоспроможний продукт випускає підприємство.

Потрібно розрізняти параметри та показники конкурентоспроможності, як кількісні характеристики властивостей товару, які враховують галузеві особливості його оцінки. Розрізняють окремі групи параметрів конкурентоспроможності: технічні, економічні, нормативні (різних типів).

Технічні параметри є характеристикою технічних і фізичних властивостей товару, що їх визначають особливості галузі та способи його використання, а також функції, які виконує товар у процесі його використання.

Економічні параметри визначають рівень витрат на виробництво та ціни споживання через витрати на купівлю, обслуговування, споживання, утилізацію товару.

Нормативні параметри визначають відповідність товару встановленим нормам, стандартам і вимогам, установленим законодавством та іншими нормативними документами.

Показники конкурентоспроможності — це сукупність системних критеріїв кількісного оцінювання рівня конкурентоспроможності товару, які базуються на параметрах.

Перелік цих показників залежить від об'єкта досліджень, а також від обраної методики визначення останньої. Послідовність робіт з визначення купівельних властивостей сировини з урахуванням наведених щойно її параметрів подано на рис. 1.



Рис. 1. Оцінювання конкурентоспроможності товару

Для порівняння використовуються такі показники [2]:

робоча характеристика (нормативний параметр) — можливості (інтервали) вимірювання коливань;

собівартість одиниці (економічний параметр);

функціональність (технічний параметр) — кількість операцій, які можна виконати;

надійність роботи (технічний параметр) — частота відказів;

своєчасність ремонтування/постачання (нормативний параметр).

Порівняння можна проводити в табличній формі, показники обирають залежно від типу продукту. Щоб прийняти рішення про те, конкурувати чи ні з тією чи іншою продукцією, можна скористатися підходом, який запропонував К.Омаї у праці «Стратегічне мислення» (рис. 2) [4].



Рис. 2. Модель конкурентних рішень К. Омаї

Свої ідеї щодо формування та використання ключових факторів успіху К.Омаї сформулював як побажання:

конкурувати мудро, використовуючи свої унікальні властивості, яких не торкаються конкуренти; стара, успішна стратегія, дає змогу зберегти досягнуті рубежі; базована на ній нова, творча стратегія забезпечить у майбутньому певний рівень свободи діяльності;

уникати жорсткої конкуренції, що може призвести до взаємного знищення в разі орієнтації на аналогічні, другорядні переваги.

Конкурентні переваги організації поділяються на два типи:

переваги високого рангу, пов'язані з наявністю в підприємств високої репутації, кваліфікованого персоналу, патентів, розвинутого маркетингу, заснованого на використанні сучасних технологій, сучасного менеджменту, довготривалих зв'язків з покупцями, тоді це довше триває в часі і дає змогу досягати вищої прибутковості організації.

переваги низького рангу, що базуються на використанні дешевої робочої сили, доступності джерел сировини, не такі стійкі, оскільки можуть бути скопійовані конкурентами.

Конкурентні переваги не є постійними, вони завойовуються та утримуються тільки завдяки постійному вдосконаленню сфер діяльності. Основними напрямками захисту конкурентних переваг можуть бути монополія на ринку, патенти, ноу-хау, доступ до джерел сировини або до комунікацій. При визначенні конкурентних переваг організація має орієнтуватися на запити споживачів і пересвідчитися в тому, що ці переваги є цінними для них.

Утримання конкурентних переваг суттєво пов'язане із курсами використовуваних валют.

Занижений курс валюти сприяє збільшенню експорту і зменшенню імпорту, що веде до зростання сукупного попиту. При такому курсі валют внутрішні ціни країни стають нижчі світових і, значить, підвищується конкурентоспроможність товарів на світовому ринку, збільшується обсяг їх продажу, але поруч з тим стає дорожчим імпорту товарів, посилюється рівень інфляції, збільшується зовнішня заборгованість в іноземній валюті.

Відносно впливу валютного курсу на сукупну пропозицію, тобто того обсягу виробництва, який може бути виготовлений, то тут ситуація складається протилежна. Пониження курсу валюти викликає зростання цін на імпорту сировину, матеріали, обладнання. Це веде до зростання витрат виробництва, яке може призвести до скорочення його обсягів. Негативний вплив зниження курсу валюти на сукупну пропозицію може бути нейтралізований зростанням експорту.

**Висновки.** Овочепереробна галузь України має забезпечувати найбільший прибуток з гектара площі, дати можливість створити велику кількість робочих місць і відроджувати українське село. Цей сектор залишається одним із найбільш інвестиційно-привабливих секторів економіки та має на належному рівні конкурувати з провідними європейськими країнами — виробниками сільгосппродукції.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. *Безверхний С.* Решение проблем качества — на уровень национальной идеи // Стандарты и качество. — 2002. — № 10. — С. 19 — 21.
2. *Браун М., Георги Д.* Управление качеством: затраты и выгоды // Проблемы теории и практики управления. — 2000. — № 1. — С.34 — 36.
3. *Завадський Й.С., Мринська Т.С.* Методологічні підходи до аналізу ефективності виробництва у овочевому підкомплексі України // Економіка АПК. — 1996. — №9. — С.31 — 35.
4. *Шериньова З.Є.* Стратегічне управління: Підручник. — 2-ге вид., перероб. і доп. — К.: КНЕУ. — 2004. — 699 с.

*Одержана редколегією 12.12.10 р.*

---

## ДО ВІДОМА АВТОРІВ

### *Шановні колеги!*

Редакційна колегія журналу «Харчова промисловість» запрошує Вас до публікації наукових робіт.

Засновник та видавець журналу: Національний університет харчових технологій.

Журнал зареєстрований Президією ВАК України (Постанова № 1-05/6 від 16.12.2009 р.) як наукове видання з технічних наук.

У журналі висвітлюються результати науково-дослідних робіт з технології харчових продуктів, хімічних, біохімічних, мікробіологічних процесів, апаратів, обладнання, автоматизації харчових ви-робництв та економіки харчової промисловості.

Обсяг статей — до 10 машинописних аркушів (до 10000 друкованих знаків).

## ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

Статті мають бути підготовлені з урахуванням Постанови Президії ВАК України № 7-05/6 «Про підвищення вимог до фахових видань, внесених до переліків ВАК України». Друкуються наукові статті, які мають такі необхідні елементи: постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання певної проблеми і на які спирається автор; виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття; формулювання цілей статті (постановка завдання); виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки з цього дослідження і перспективи подальших розвідок у цьому напрямі.

До публікації приймаються не опубліковані раніше статті, що містять результати фундаментальних теоретичних розробок та найзначніших прикладних досліджень викладачів, наукових співробітників, докторантів, аспірантів і студентів. Всі статті підлягають обов'язковому рецензуванню провідними спеціалістами у відповідній галузі харчових технологій, яких призначає науковий редактор журналу.

Рукопис статті надсилається у двох примірниках, українською мовою, включаючи таблиці, рисунки, список літератури.

Статті подаються у вигляді **вчитаних** роздруків на папері формату А4 (поля з усіх сторін по 2 см, шрифт Arial або Time New Roman, кегль 14, інтервал 1,5) та електронної версії (редактор Microsoft Word) на електронному носії. На електронному носії не повинно бути інших версій та інших статей, у тексті статті — порожніх рядків. Між словами допускається лише один пробіл. Усі сторінки тексту мають бути пронумеровані.

На першій сторінці наводяться: у лівому верхньому куті – шифр УДК (напівжирним шрифтом), нижче ініціали і прізвища авторів (напівжирним шрифтом), наукові ступені авторів, назва установи, де працює автор; далі – назва статті великими напівжирними літерами, під назвою – анотація українською мовою з ключовими словами (5 – 6 слів / ключових словосполучень) набрана світлим курсивом; фраза **“Ключові слова”** – напівжирним шрифтом.

У кінці першої сторінки, під короткою рисою, ставиться знак авторського права, ініціали, прізвища авторів, рік.

У кінці тексту статті окремим абзацом наводяться висновки (слово **«Висновки»** – напівжирним курсивом).

Після тексту статті в алфавітному або порядку згадування в тексті наводиться список літературних джерел (кожне джерело з абзацу). Бібліографічні описи оформляються згідно з ГОСТ 7.1-84 «Библиографическое описание документа. Общие требования и правила составления» та вимогами ВАК України. У тексті цитоване джерело позначається у квадратних дужках цифрою, під якою воно стоїть у списку літератури. Бібліографічний опис подається мовою видання. Не допускається посилання на неопубліковані матеріали. У переліку джерел мають переважати посилання на роботи останніх років.

---

Прізвища іноземних авторів у тексті статті треба наводити в українській транскрипції.

Після списку літератури наводяться: анотація та ключові слова російською мовою; ініціали і прізвища авторів, назва статті великими напівжирними літерами, анотація та ключові слова (Summary) англійською мовою (розмір анотації від 1/2 до 2/3 сторінки); фрази “Ключевые слова” та “Key words” – напівжирним шрифтом.

Усі анотації мають містити коротку інформацію щодо об’єкту та методик досліджень з наведенням основних результатів роботи та рекомендаціями щодо сфери їх застосування.

Після тексту анотацій та ключових слів наводиться фраза «Одержана редколегією (дата)» (набраним світлим курсивом). За дату одержання статті вважають дату надходження її до редакції.

Роздрукований варіант статті підписують усі автори.

У разі одержання статті, оформленої з порушенням запропонованих “ВИМОГ”, редакція статтю не реєструє. За необхідності доопрацювання статті відповідно до зауважень рецензента авторам направляється екземпляр рукопису, який разом із рецензією, відповіддю рецензентові, двома екземплярами виправленої статті та електронним носієм з виправленим текстом слід повернути до редакції.

*Таблиці* (у Word або Excel) можна давати як у тексті, так і в окремих файлах (на окремих сторінках). Кожна таблиця повинна мати тематичний заголовок, набраний напівжирним шрифтом, і порядковий номер (без знака №), якщо таблиць кілька. Якщо таблиця одна, то дається тільки заголовок (без слова «Таблиця»). Слово «Таблиця» і номер — курсивним шрифтом, заголовок — напівжирним. Таблиці мають бути відкритими — без бокових, нижньої і горизонтальних лінійок у полі таблиці. Розграфлюється лише шапка таблиці світлими лініями.

*Ілюстрації* мають бути виконані ретельно, на білому папері й розміщені в тексті та в окремих файлах (формати BMP, TIF, JPG; роздільна здатність не менше 300 dpi); допускається подавати рисунки розмірами 10×17 см, виконані акуратно чорною тушшю або чорною кульковою ручкою на білому папері, придатні для подальшого сканування. На звороті рисунка зазначити його номер, авторів і назву статті.

Фотографії друкуються лише у разі крайньої потреби, вони мають бути чіткими, контрастними, виконаними на білому фотопапері, розмірами 6×9 см.

Підписи до рисунків набираються на окремій сторінці або безпосередньо під рисунками прямим шрифтом.

Повторення одних і тих самих даних у тексті, таблицях і на рисунках не допускаються.

*Формули* вставляються прямо в текст за допомогою редактора формул. Нумерація формул — арабськими цифрами у круглих дужках біля правого поля сторінки.

Використовувані в статті фізичні, хімічні, технічні та математичні терміни, одиниці фізичних величин та умовні позначення мають бути загальноприйнятими. Скорочення позначень одиниць фізичних величин мають відповідати Міжнародній системі одиниць (SI).

До статей додаються: виписка з протоколу засідання кафедри (підрозділу) з рекомендацією роботи до друку; відомості про авторів (прізвище, повне ім’я та по батькові, науковий ступінь, місце роботи, номери контактних телефонів, адреса), експертний висновок (для статей сторонніх організацій).

Головний редактор журналу доктор технічних наук, професор

*Анатолій Іванович Соколенко*

Відповідальний секретар журналу кандидат технічних наук, доцент

*Сергій Володимирович Токарчук*

Контактні телефони: міський – (044) 287-92-45, внутрішній – 92-45

E-mail: [tmipt\\_xp@ukr.net](mailto:tmipt_xp@ukr.net)

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

# **ХАРЧОВА ПРОМИСЛОВІСТЬ**

**№ 11**

**Видання подається в авторській редакції**

Комп'ютерна верстка *Є.В. Колесниченко*

Підп. до друку 10.12.2010 р. Формат 70×100/16. Обл.-вид. арк. 14,2.  
Ум. друк. арк. 10,96. Наклад 300 прим. Вид. № 30-2/11. Зам. № 19/2-11

---

НУХТ. 01601 Київ-33, вул. Володимирська, 68  
Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу  
масової інформації №7252, серія КВ, видане 29 квітня 2003 р.