

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) ННІТІ ім. акад. І.С.Тулун  
Кафедра мехатроніка та паливально-теплова

«До захисту в ЕК»

Директор інституту(декан факультету)

Сергій БЛАЖЕНКО  
(підпис) (ім'я та прізвище)

«17» 02 2023р.

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Юлія КРИВОПЛЯ-  
(підпис) (ім'я та прізвище) ВОЛОДИНА

«17» 02 2023р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

зі спеціальності 131 Прикладна механіка  
(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми Прикладна механіка

на тему: Дослідження процесу затворотворення  
мешок у лазеризаторах трубного типу

Виконав: здобувач \_\_\_\_\_ курсу, групи \_\_\_\_\_

Іларіон Максим Юрчиович  
(прізвище, ім'я, по батькові повністю) (підпис)

Керівник Васильківський Юстини Вікторівич  
(прізвище, ім'я та по батькові повністю) (підпис)

Консультанти \_\_\_\_\_  
(ім'я та прізвище) (підпис)

\_\_\_\_\_  
(ім'я та прізвище) (підпис)

\_\_\_\_\_  
(ім'я та прізвище) (підпис)

Рецензент Маша ЯКИШЧУК  
(ім'я та прізвище) (підпис)

Я як здобувач(ка) Національного університету харчових технологій розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавав(-ла) і не одержував(-ла) незарядженої допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Здобувач Іларіон Максим Юрчиович  
(підпис)

Київ - 2023 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) ІНІТІ ім. акад. І.С.Тулочо  
Кафедра електроніка та ланцюгова механіка  
Освітній ступінь магістр  
Спеціальність 131 Прикладна механіка  
(код і назва)  
Освітньо-професійна програма Прикладна механіка  
(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МПТ

Юлія Кривопляс-Володіна  
«07» 11 2022 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Паран Максим Юрійович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Освідчення процес затворотворення м'ясок у пастеризаторах мускульного типу

керівник роботи Вислюшівський Костянтин Вікторович к.т.н доц  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «07» 11 2022 року № 794-КВ

2. Строк подання здобувачем роботи 29.01.2023р.

3. Вихідні дані до роботи

1. Вид обладнання - пастеризатор мускульного типу.
2. Вид досліджень - аналітичні та експериментальні.
3. Процеси - формування та розформування масивів виробів

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

- Резюме Вступ, Розділ 1 Аналіз обладнання для серійного транспортування пакетів Розділ 2 Опис запропонованого пристрою та принцип функціонування
- Розділ 3 Наукові дослідження динаміки процесів розформування і формування

5. Перелік графічного матеріалу

Презентація на 13-ти аркушах


### 6. Консультанти розділів роботи

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

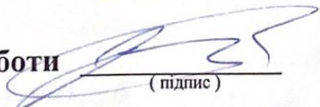
7. Дата видачі завдання 07.11.2022

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вступ	08.11.2022	
2.	Зерелом	10.11.2022	
3.	Розділ 1	15.11.2022	
4.	Розділ 2	20.11.2022	
5.	Розділ 3	17.12.2022	
6.	Висновок	28.12.2022	
7.	Список використаної літератури	23.01.2023	

Здобувач освіти   
(підпис)

Максим ТАРАХ  
(ім'я та прізвище)

Керівник роботи   
(підпис)

Юстини ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ  
(ім'я та прізвище)

«07» 11 2022 р.

# ЗМІСТ

	Стор.
Реферат . . . . .	4
Abstract . . . . .	6
Вступ. . . . .	8
Розділ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ПРО СТАН ПИТАННЯ І ВИЗНАЧЕННЯ ЗАВДАНЬ ПРОЄКТУ . . .	12
1.1. Стерилізаційні та пастеризаційні режими оброблення . . . . .	17
1.2. Пастеризація пива . . . . .	22
1.3. Визначення динаміки тиску в пляшках у процесі пастеризації . . . . .	26
1.4. Розрахунок переміщення і напруження у пляшці при підвищенні тиску . . . . .	32
1.5. Обладнання для пастеризації . . . . .	45
1.6. Задачі досліджень . . . . .	48
Розділ 2. ОПИС ЗАПРОПОНОВАНОГО ПРИСТРОЮ ТА ПРИНЦИП ФУНКЦІОНУВАННЯ ТУНЕЛЬ-НОГО ПАСТЕРИЗАТОРА ПЛЯШОК . . . . .	49
2.1. Опис запропонованого пристрою . . . . .	49
2.2. Принцип функціонування тунельного пастеризатора . . . . .	50
Розділ 3. НАУКОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ПРОЦЕСІВ РОЗФОРМУВАННЯ І ФОРМУВАННЯ МАСИВІВ ВИРОБІВ. . . . .	53
Висновки по роботі. . . . .	84
Список використаної літератури. . . . .	85

## Реферат

Забезпечення довготривалого терміну зберігання фасованого пива потребує теплової обробки тобто пастеризації або стерилізації, яка приводиться в пастеризаторах тунельного типу. Найпоширенішими є конструкції пастеризаторів зрошувального/душювального типу, в яких рух оброблюваної склотари проводять паралельно з тепловим обробленням та витримкою за певної температури та подальшим охолодженням.

Пастеризаційне оброблення, як правило, проходить склотарна продукція, розфасована у скляну тару, тому необхідно обмежувати температурні перепади через обмеження термічних напружень. Відомо, що температурний перепад у 20 °С еквівалентний 3-4 барам внутрішнього тиску в пляшках за величиною напружень. Останній фактор є визначальним при обмеженні продуктивності пастеризаційного обладнання.

У даному дипломному проєкті для підвищення продуктивності пастеризаційного пристрою виконано наукові дослідження та дослідна робота, у результаті якої модернізовано гідравлічну і теплову системи пастеризатора для збільшення рівня зрошування тепловим агентом (водою) зі збільшенням температурних перепадів по зонах обробки.

Окрім переваг існуючих на сьогодні конструкцій тунельних пастеризаторів вони мають і недолік, а саме: нерівномірність заповнення транспортної системи, яка пов'язана з роботою завантажувальних пристроїв. Вирішення цієї проблеми у проєкті проведено за рахунок реконструкції завантажувальної системи пастеризатора, що має на меті забезпечити повне завантаження транспортної систем виробами з шаховою розкладкою.

Дипломний проєкт включає у себе пояснювальну записку з обсягом 86 сторінок, 38 рисунків, 16 таблиць,

Конструктивне виконання всіх складових агрегатів пастеризатора дає можливість роботи з різними типорозмірами склотари. Це забезпечує збіль-

шення не тільки продуктивності, яка вимірюється в кількості пляшок за годину, а і зростання масової продуктивності в результаті зростання питомої поверхні теплопередавання при переході з пляшок більшої ємності на пляшки меншої місткості.

***Ключові слова:** пастеризація, пастеризатор тунельного типу, склотара, динаміка, тиск, формування масиву виробів*

## **Abstract**

Ensuring a long shelf life of packaged beer requires heat treatment, i.e. pasteurization or sterilization, which is carried out in tunnel-type pasteurizers. The most common are designs of pasteurizers of the irrigation/suffocation type, in which the movement of the treated glass container is carried out in parallel with heat treatment and exposure at a certain temperature and subsequent cooling.

As a rule, glass packaging products packed in glass packaging undergo pasteurization treatment, so it is necessary to limit temperature changes due to the limitation of thermal stresses. It is known that a temperature drop of 20 °C is equivalent to 3-4 bars of internal pressure in the bottles in terms of stress. The last factor is decisive in limiting the productivity of pasteurization equipment.

In this diploma project to increase the productivity of the pasteurization device, scientific studies and experimental work were performed, as a result of which the hydraulic and thermal systems of the pasteurizer were modernized to increase the level of irrigation with a heat agent (water) with an increase in temperature differences in the processing zones.

In addition to the advantages of existing tunnel pasteurizer designs, they also have a drawback, namely: the uneven filling of the transport system, which is associated with the operation of loading devices. The solution to this problem in the project was carried out due to the reconstruction of the loading system of the pasteurizer, which aims to ensure full loading of the transport system with products with a checkerboard layout.

The diploma project includes an explanatory note with a volume of 86 pages, 38 figures, 16 tables, as well as a graphic part,

The design of all the components of the pasteurizer makes it possible to work with different sizes of glass containers. This provides an increase not only in productivity, which is measured in the number of bottles per hour, but also in the growth of mass productivity as a result of an increase in the specific heat transfer

surface when switching from bottles of a larger capacity to bottles of a smaller capacity.

***Key words:** pasteurization, tunnel pasteurizer, glass container, dynamics, pressure, formation of array of products*

## ВСТУП

Пиво як слабоалкогольний пінистий напій, який отримують зброджуванням пророслих і непророслих різних зернових культур, відомий понад 9000 років. Виробництво пива – досить тривалий та складний біологічному і технічному сенсі. Спочатку зерно замочують, далі – пророщують і піддають термічній обробці з метою перетворення його у солод, який збагачений активними ферментами. Потім подрібнений солод в результаті ферментативних перетворень білків і крохмалю у спеціально підготованій воді перетворюється у пивне сусло, яке за допомогою ферментів дріжджів зброджується і отримується загальновідомий напій – пиво.

Пиво, вироблене на основі сучасних технологій, є композицією понад 400 органічних і неорганічних сполук, розчинений у слабкому водно-спиртовому розчині. Якісними показниками пива є своєрідний смак і аромат, пінистість, прозорість, гіркота, колір, стійкість піни. Останнім часом на пивзаводах України значно прискорено пошуки методів для суттєвого збільшення стійкості пива; і досвід показує, що підвищення цього показника вимагає уваги на всіх етапах виробництва, починаючи з вибору якісного ячменю.

Калорійність пива коливається від 29 до 53 Ккал на 100 грам напою. Значний розкид викликаний різною міцністю та відзнаками в технології його виробництва. Світле пиво менш калорійне, ніж темне і залежить від його хімічного складу та екстрактивності, тобто вмісту цукридів, азотистих і біологічно активних сполук, які присутні в ньому у розчиненій формі. Присутність у пиві речовин, що можуть виступати живильнісередовищем для мікроорганізмів робить його вразливим під час зберігання. Тому технологічні аспекти виробництва напою спрямовані на отримання мікробіологічно чистої продукції.

Обмеження біологічної стійкості пива і висуває певні вимоги до технологічних режимів його виробництва, і, особливо, до проведення завершальних

операцій фасування та закупорювання.

Важливим кроком у вирішенні питань отримання асептичного пива і подовження термінів зберігання вважається застосування пастеризаційних пристроїв тунельного типу для стерилізаційної/пастеризаційної обробки пива та інших напоїв.

Пастеризація пива відбувається під час його нагрівання до 60–70 °С, подальшого витримування певний час і з кінцевим охолодженням. Для остаточної летальності мікроорганізмів пиво достатньо нагріти до 60 °С і витримати 5–6 хв.

Також існує щадна пастеризація пива, як передбачає мінімальне нагрівання напою за часом і не вище необхідної температури: таким чином у ньому зберігається максимум корисних властивостей, без загрози здоров'ю у вигляді патогенних мікроорганізмів.

Види щадної пастеризації:

- флеш-пастеризація (потокова). Продукт нагрівається, проходячи по трубках через теплообмінник, потім витримується при певній температурі протягом необхідного часу. Після потік прямує в інших теплообмінник, де швидко охолоджується до температури для подальшого розливу в стерильну пляшку або банку;

- тунельна пастеризація. Дуже добре підходить для напоїв, розлитих у пляшки, коли під час нагрівання продукт вже знаходиться у тарі. По конвеєру виробі відправляються у машину, де їх зрошують гарячою водою, яка нагріває напої, стікаючи по пляшці.

Великою перевагою пастеризації фасованого пива є гарантоване забезпечення летального ефекту патогенної мікрофлори для можливості тривалого зберігання фасованого напою. При цьому нівелюються недоліки попередніх стадій виробництва.

Теплове оброблення пляшок з пивом і закорковане протікає зі збільшенням в них внутрішнього тиску через теплове розширення напою та виділення

CO<sub>2</sub>.

З метою розрахувати відповідний режим пастеризації в залежності від напою, фахівці використовують так звані одиниці пастеризації – Pasteurization Units (PU). Вони містять інформацію, до якої температури, при якому тиску і на який час необхідно нагріти той чи інший напій. Наприклад, для пива 1 PU дорівнює одній умовній хвилині перебування пива при температурі 60 °C.

Перевагами процесу пастеризації напоїв є:

- збереження напою;
- відсутність впливу на смакові якості і властивості продуктів;
- запобігання передчасного псування.

Для поліпшення якості продукту, що випускається, необхідно контролювати температурні процеси виробництва. Наприклад, разом з корисними вітамінами і речовинами у пиві присутні і шкідливі мікроорганізми. Використання пастеризації ефективно позбавить споживача від загроз здоров'ю.

Пастеризація пива може зумовити зміну органолептичних показників, колір стає темнішим. В пастеризованому пиві може з'явитись присмак свіжого хліба. Для зниження хлібного присмаку і запаху знижують температуру і подовжують час пастеризації.

З погляду інтересів пастеризації, рекуперації теплової енергії та обмеження витрат води робота пастеризатора повинна бути безперервною і з рівномірно заповненою транспортною системою. Це означає, що й після пастеризатора передбачено встановлення накопичувачів. Співвідношення продуктивностей технологічного обладнання до і після пастеризатора повинно бути таким, щоб накопичувальні пристрої до пастеризатора були заповнені, а після – якомога швидше вивантажені. Іншими словами, технічна продуктивність технологічного обладнання до і після пастеризатора повинна бути більшою від пропускної здатності останнього.

Оскільки тепла обробка регламентується показниками температури та часу, зупинки пастеризатора небажані й можуть призвести до перепастеризації

продукції. Для рекуперації теплової енергії завантаження транспортної системи пастеризатора повинно бути якомога рівномірнішим, що висуває певні вимоги до пристроїв для завантаження. Найчастіше вони виготовляються у вигляді дво- або трирядних конвеєрів, які зістиковуються нормально до транспортної системи пастеризатора.

Під час переміщення по транспортній системі пляшки надходять спочатку в декілька зон нагрівання, потім – у зону пастеризації, далі – в декілька зон охолодження.

У цьому проєкті поставлене завдання збільшення продуктивності тунельного пастеризатора до 30000 пл./год ємністю 0,5 л.

Модернізований пастеризатор має такі переваги перед своїм аналогом:

- інтенсифіковано теплообмін за рахунок оптимізації температур теплоносіїв;
- гарантується щільніше заповнення транспортної системи виробами з шахматним розкладанням;
- збільшення потоків теплоносіїв досягається за рахунок зростання продуктивності насосів і використання тиристорних частотних перетворювачів.

При виконанні поставлених завдань збільшиться пропускна здатність транспортної системи і самого пастеризатора, підвищиться ритмічність роботи лінії фасування пива.

## Розділ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ПРО СТАН ПИТАННЯ І ВИЗНАЧЕННЯ ЗАВДАНЬ ПРОЄКТУ

Пастеризація – це процес винищення патогенних мікроорганізмів у продуктах харчування нагріванням. Назвали цей процес на честь французького хіміка і мікробіолога Луї Пастера (Louis Pasteur). Пастер показав мікробіологічну сутність бродіння і багатьох захворювань тварин і людини, став одним з засновників мікробіології, автором наукових основ вакцинації.

Пастер довів, що нагріванням рідин до високих температур можна вони стають біологічно стійкими. Також від дослідив що кисла рідина стає майже стерильною при більш низьких температурах, ніж нейтральна чи лужна.

Також мікробіолог довів, що на бродіння негативно впливає кисень (т.з. ефект Пастера). Багато бактерій, що здійснюють бродіння (наприклад, маслянокислі бактерії), можуть розвиватися тільки в безкисневому середовищі. Ці факти дозволили йому розділити всі організми на аеробні (ростуть при наявності кисню) і анаеробні (без нього). Бродіння таким чином, було анаеробним процесом, життям без дихання.

У той же час, організми здатні як до бродіння, так і до дихання, за наявності кисню росли активніше, і до того ж споживали менше органічної речовини з середовища. Так було доведено, що анаеробне життя менш ефективно порівняно з аеробним. Зараз вважається, що з однієї кількості органічного субстрату організми аеробів здатні дістати в 20 разів більше енергії.

Послідовники досліджень цих проблем довели, що час необхідний для знищення мікроорганізмів, скорочується при збільшенні температури оброблення. Тобто, якщо, наприклад, на пиво впливати більш високими температурами, то мікроорганізми гинуть швидше.

За процесу пастеризації пива в потоці воно нагрівається в спеціальному пластинчастому теплообміннику до температури 72 °C і надалі підлягає витримці при цій температурі 50 с.

***Пластинчастий теплообмінник.*** В пластинчастому пастеризаторі

нагрів та охолодження напоїв відбувається при інтенсивному теплообміні між продуктом і нагрівачем.

В пастеризаторі (рис. 1.1) холодний напій, наприклад, пиво нагрівають в I секції 2 гарячим пивом. В II секції 3 напій нагрівають гарячою водою з регульованою температурою до температури, за якою відбувається пастеризація і витримують при цих температурах певний час в 4 секції.

Секція витримування може складати певну частину пластинчастого тепло-

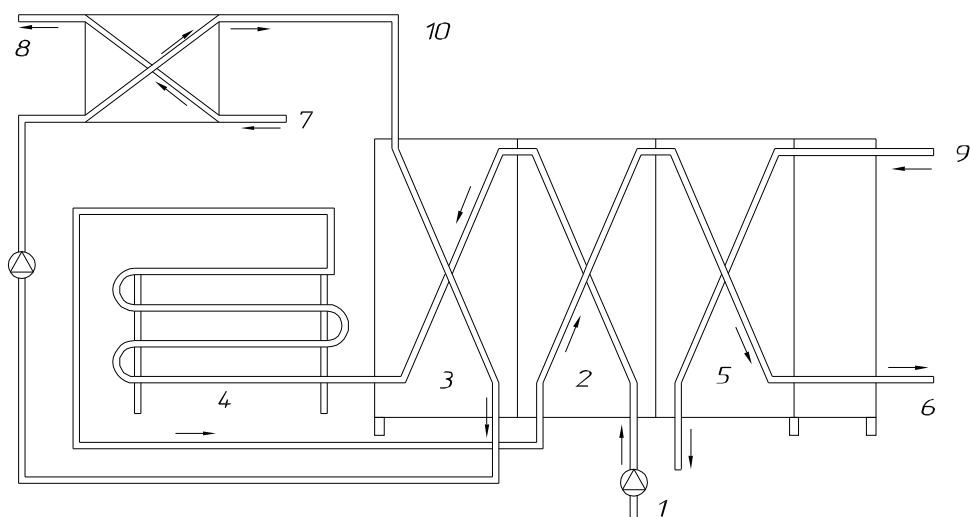


Рис. 1.1. Пластинчастий пастеризатор: 1 – вхід холодного напою; 2 – нагрівання вхідного напою/охолодження вихідного напою; 3 – секція нагрівання до температури пастеризації; 4 – секція витримування; 5 – секція охолодження до температури фасування; 6 – вихід пастеризованого пива; 7 – подавання пари; 8 – вихід конденсату; 9 – подавання сольового розчину; 10 – циркуляція гарячої води

обмінника, або представляти собою трубчасту ділянку пристрою. Після секції витримування напій охолоджують до температури (+2- +5 °С), за якої його направляють на фасування. В сучасних лініях фасування охолодження завжди виконують за допомогою холодного пива, яке надходить до пастеризатора. Через велику поверхню теплообміну пластин I секції 2 пиво з температурою 0 °С охолоджує пиво, що виходить з теплообмінника до 4 °С, і за такої температури напій відправляють на фасувальну ділянку лінії.

Весь процес пастеризації чи стерилізації триває біля 2 хв і негативного не

впливає на якість пива. Перехрещенням потоків пастеризації повертається до 96% витраченої теплової енергії. Ці переваги такого способу пастеризації сприяють його успішному розповсюдженню на виробництві різноманітних напоїв.

Для роботи пластинчастих пастеризаторів необхідні насоси, що створюють тиск до 10-12 бар, оскільки ні в одній точці пристрою тиск не можна знижувати нижче тиску насичування напоїв на CO<sub>2</sub>. Окрім того, тиск на нагрітому боці напоїв вищий, аніж на вході в пластинчастий пастеризатор.

**Часові і температурні режими термічного оброблення.** За вищих температур зменшується час, необхідний для винищення патогенних мікроорганізмів.

Враховуючи цю формулу була створена умовна величина, що виражає інтенсивність теплового оброблення пива, тобто для пастеризації, – *пастеризаційна одиниця (ПО)*.

Під пастеризаційною одиницею розуміють біологічний ефект від теплової обробки напою протягом 1 хв. за 60 °С і розраховується вона за формулою:

$$\text{ПО} = \text{час} \times 1,393^{(\text{Температура пастеризації} - 60 \text{ } ^\circ\text{C})}$$

Величина в дужках розглядається як показник степеня.

За температури в тунельному пастеризаторі складає 60 °С, то показник степеня складає 60 – 60 = 0, що в результаті дає одиницю. Якщо ж температура в пристрої збільшується до 61 °С, то маємо:

$$\text{ПО} = \text{час} \times 1,393^{(61 - 60)} = \text{час} \times 1,393^1 = \text{час} \times 1,393.$$

Якщо температура збільшується до 62 °С, то маємо:

$$\text{ПО} = \text{час} \times 1,393^{(62 - 60)} = \text{час} \times 1,393^2 = \text{час} \times 1,94 \text{ і так далі.}$$

Для пастеризації пива необхідно від 14 до 15 ПО. Чим менше пастеризаційних одиниць застосовується, тим краще зберігаються якісні властивості напою, але тим ближче до величини температур, нижче якої можуть виживати патогени.

У першу чергу потрібна кількість ПО залежить від рівня інфікування

напою. Чим більша кількість мікроорганізмів присутня у пиві, тим більше число ПО (до 22-27) потрібно для пастеризації.

Для усунення погіршення якостей напою, температурні режими пастеризаційного оброблення необхідно ретельно контролювати.

Пастеризація в потоці гарантує біологічну чистоту тільки самого напою. З літературних джерел відомо, що 50 відсотків патогенних мікроорганізмів попадають у пиво як вторинне інфікування, тобто на технологічних ділянках до пляшки, тому пастеризація у потоці не надає гарантій необмеженої біологічної стійкості пива.

Можна зробити висновок, що пастеризація в потоці вимагає найвищої чистоти пляшок та інших машин в лінії фасування пива. Не дивлячись на це, пастеризація в потоці – самий розповсюджений спосіб біологічного стабілізування пива, фасується у пляшки, кеги тощо.

***Вплив на якість пива пастеризації в потоці.*** У наш час розповсюджена теза, що збільшення температури пастеризації обов'язково погіршує смак я якісні показники пива. Але численні дослідження спростовують цю думку і показують, що часові режими пастеризації мають набагато більшу роль, ніж температурні.

Не можна припускати погіршення якості пива через термічне оброблення опираючись тільки на якийсь один параметр, наприклад, на кількість пастеризаційних одиниць. ПО – це міра біологічного ефекту пастеризації, а не мірою можливого погіршення смакових якостей напою.

Тому при розрахунках треба враховувати цілу множину факторів, таких як: перш за все кількість кисню у пиві, температура пастеризації, час пастеризації тощо.

***Гаряче фасування пива.*** Одна з можливостей уникнення вторинного інфікування напою – це фасування його у гарячому стані, але щоб не відбувалося виділення з пива CO<sub>2</sub>. Для цього потрібно проводити фасування напою витримуючи дуже високий надлишковий тиск – 8-10 бар. Маємо ще перевагу:

немає необхідності охолодження пляшок після миття. Але існують й недоліки цього способу, і вони дуже великі:

- втрата якостей пива через тривалий вплив тепла;
- втрати пляшок через високий тиск і зношування деталей фасувального автомату;
- великі витрат теплової енергії.

**Пастеризація в тунельному пастеризаторі.** Для забезпечення найвищої біологічної стійкості напою заповнені пляшки/банки пастеризують в тунельних пастеризаторах. Такий пристрій займає багато місця в цеху фасування тому пляшки проходять весь шлях через нього біля 1 год. Також, тунельний пастеризатор вимагає великих витрат енергії – від 14 до 24 МДж/гл, або 70-120 МДж/1000 пляшок.

Через те, що теплообмін відбувається через скло, рівномірно нагріти пиво в пляшці не дуже легко: спочатку нагріваються зовнішні шари рідини, а середина залишається більш холодною, і знаходиться на відстані 1,5 см від середини дна пляшки (рис. 1.2).

При пастеризації/стерилізації в посуді виникає доволі високий тиск через

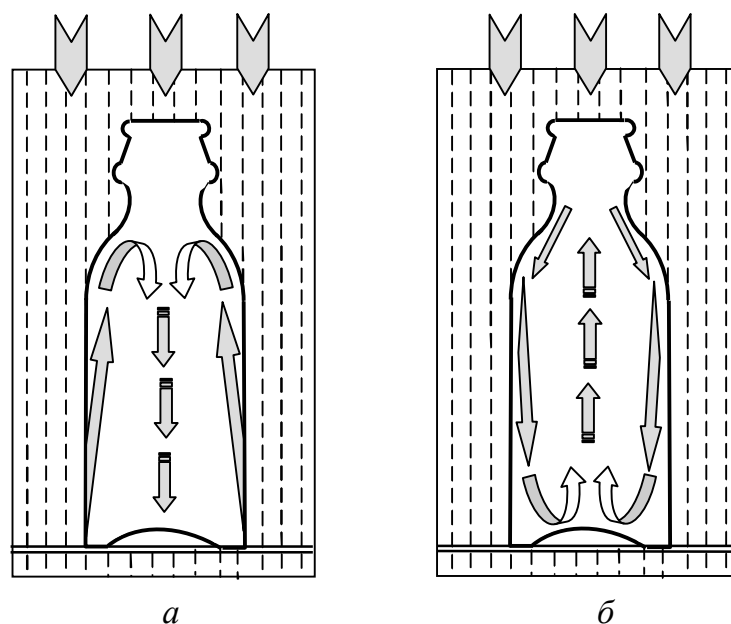


Рис. 1.2. Схематичне зображення конвекційного руху продукту в пляшці: а – під час нагрівання; б – під час охолодження

нагрівання та розширення пива. Напій піднімається у горло пляшки, яке заповнене на CO<sub>2</sub>, й тисне на нього. Газова подушка у горлі стискується, через що тиск у пляшці відповідно збільшується. При цьому важливо підкреслити, що рідини не стискаються, стискати можна тільки газу. Тобто, газова подушка у горлі пляшки бере на себе важливу захисну функцію.

Витікає висновок, що вільний простір у горлі пляшки при пастеризації не повинен займати менше 4 відсотків від загального об'єму пляшки, інакше через надлишковий тиск відбувається її руйнація.

Підвищення температури підвищує також і тиск насичення на CO<sub>2</sub>, тобто вуглекислий газ, що знаходиться у пиві, зрівноважує тиск у горлі пляшки.

В тунельному пастеризаторі пляшки чи банки разом з пивом нагріваються до температури пастеризації, а потім знову охолоджуються. Опис принципу роботи тунельного пастеризатора описані в розділі 3 даного проекту.

Під час пастеризації пива в пляшках у ньому вже не можуть розвиватися ніякі мікроорганізми, тому пастеризація є найбільш надійним способом забезпечення стійкості напою, особливо якщо він містить переброджені розчинені речовини.

Передумовою для успішної пастеризації є неодмінне дотримання необхідних пастеризаційних одиниць, навіть в найбільш холодній частині пляшки. При нагріванні повної пляшки напій, що нагрівається біля стінок пляшки, піднімається догори, а ще холодний всередині – спрямовується вниз. Отже, найбільш холодну частину напою треба шукати безпосередньо над центром дна пляшки. Змішування і вирівнювання температури настає повільно, причому теплопередавання гальмується ще й поганою теплопровідністю скла.

### **1.1. Стерилізаційні та пастеризаційні режими оброблення**

Вибір режимів теплового оброблення харчових напоїв здійснюється з урахуванням сукупності всіх впливових факторів, таких як ступінь інфікування продукції, вид тари та її об'єм, температурні показники, консистенція напою та

його теплофізичні характеристики тощо.

Для різних видів продуктів і напоїв на сьогоднішній день на практиці напрацьовані і використовуються формули стерилізації/пастеризації, що записано у вигляді наступної формули:

$$\frac{A-B-V}{T}P, \quad (1.1)$$

де А – час, протягом якого температура підвищується до стерилізаційної, хв; В – тривалість стерилізації, хв; С – час охолодження, хв; Т – температура стерилізації, С; Р – протитиск у автоклаві, МПа.

Наприклад, компот з черешень у літрових банках СКО-83-2 гарантовано стерилізують з розрахунку:

$$\frac{25-30-25}{100}0,1,$$

тобто, компот протягом 25 хв нагрівають до 100 С, витримують 30 хв при 100 С і протягом 25 хв охолоджують; протитиск в автоклаві при цьому складає 0,1 [30].

Обов'язково треба враховувати, що зниження заданого за формулою протитиску навіть на кілька секунд може призвести до зривання кришок зі скляних банок. Для гарантування відповідного протитиску в усіх трубопроводах пристрою, по яких подається вода, пара або стиснуте повітря до автоклава, обов'язково встановлюються клапани зворотної дії.

Кожну витрату часу А, В чи С призначають також і з урахуванням матеріалу та об'єму тари. Аналізуючи теплофізичну ситуацію, можна зробити висновки, що головний опір процесу теплопередаванню матиме місце з боку тепловіддачі для металевих посуду – від стінки до напою, а для скляної тари – значним впливом є опір теплопередаванню самої стінки.

Якщо час для нагрівання продукту для металевих тари можна зменшити варіюючи температурним напором (тобто за рахунок збільшення температури теплоносія), то використовуючи скляну тару цей процес суттєво обмежений через можливу терморуїнацію. Це стосується також і режимів процесів охо-

лодження. Перепад температури між цими показниками для тари і теплоносію на ділянках охолодження потрібно мати меншими не тільки через концентрацію термічних напружень, але й через те, що вони накладаються на напруження, пов'язані з підвищеним внутрішнім тиском.

У зв'язку з вищевикладеним завданням скорочення загального часу стерилізації/пастеризації та інтенсифікації теплового обміну є зменшення об'ємів посуду чи зміна гідродинамічного стану його вмісту. Це можливо досягти надаючи тарі механічного обертального руху, при якому відбувається краще теплопередавання, інтенсивніше перемішування її вмісту, вирівнювання температури по всьому об'єму тари. Найкращі результати досягаються під час стерилізації продукції підвищеної консистенції, наприклад різноманітних пюре. Але вирішення проблем стерилізації/пастеризації вимагає розв'язання питань, пов'язаних зі швидкістю обертання тари. Адже відомо, що спочатку зі збільшенням швидкості інтенсифікація процесів зростає, а подальше її нарощування приводить до певної межі, на якій потрібний ефект стабілізується, і, нарешті, знижується.

Стерилізаційні апарати діляться на такі, в яких посуд обертається навколо поздовжньої осі, і такі, де обертання відбувається з кришки на дно. Останні особливо ефективні при фасуванні продукту з великою консистенцією в посуд великого об'єму.

Практичні дослідження доводять що використання ротаційної стерилізації/пастеризації має переваги: різко скорочується тривалість оброблення, під час ротаційної стерилізації продукт прогрівається більш рівномірно у всьому об'ємі тари у результаті чого підвищується якість продукції.

Співвідношення тривалості процесів стерилізації в різних умовах, приведено у табл. 1.1 [31].

Ротаційна стерилізація дозволяє збільшити асортимент тари за рахунок збільшення об'єму банок. Велика термічна інерція деяких харчових продуктів обмежує випуск цих консервів у 1-2-літровими банками. Більші об'єми тари

збільшують строк стерилізації настільки, що на практиці використовувати такі режими неможливо. Через це погіршується якість продукції у тарі великих розмірів.

Таблиця 1.1. *Порівняльні дані процесів стерилізації*

Консерви	Тара	Режим стерилізації для нерухомих банок	ротаційні
Закуска з кабачків з морквою	83-2	$\frac{25-120-30}{120}$	$\frac{20-40-25}{120}$
Закуска з баклажанів	83-2	$\frac{25-75-30}{120}$	$\frac{20-30-25}{120}$
Закуска з перцю з морквою	83-2	$\frac{25-750-30}{120}$	$\frac{20-35-25}{120}$
Пюре з гарбузів з манною крупою	83-2	$\frac{25-110-30}{120}$	$\frac{20-40-25}{120}$
Соус із кабачків	14	$\frac{25-120-25}{120}$	$\frac{20-40-25}{120}$
Сік морквяний	14	$\frac{25-210-25}{120}$	$\frac{10-45-25}{120}$
Сік томатний	14	$\frac{25-60-25}{120}$	$\frac{10-5-25}{120}$
Томати протерті	14	$\frac{25-80-30}{100}$	$\frac{10-15-20}{100}$
Сік морквяний	83-3	$\frac{25-120-30}{120}$	$\frac{25-120-30}{120}$
Сік сливовий	14	$\frac{25-120-30}{120}$	$\frac{25-120-30}{120}$
Сік абрикосовий	14	$\frac{25-80-30}{100}$	$\frac{10-15-20}{100}$
Сік вишневий з м'якоттю і цукром	14	$\frac{25-60-30}{100}$	$\frac{10-5-20}{100}$

Прикладом може слугувати такий режим стерилізації морквяного соку в банках з об'ємом 3 л, тривалість якої перевищує 4 год. Такий тривалий вплив високої температури погіршує якість продукту, що є неприпустимим. Тому випуск цього продукту при "нерухомій" стерилізації неможливий. Для ротаційної ж стерилізації/пастеризації таких консистентно густих продуктів можливо роз-

рахувати прийнятний режим оброблення не тільки в три-, але і в 10-літрових банках. Але ротаційна стерилізація/пастеризація має й недоліки:

- 1) не дає помітного ефекту для дуже рідких продуктів, наприклад, яблучного або виноградного соків (в них протягом часу стерилізації діють природні конвективні інтенсивні контури перемішування);
- 2) дуже густі продукти, наприклад, паштети, які вимагають створення примусової конвекції, не перемішуються при обертанні тари і тому стимуляція не відбувається.

Обертання також може погіршити якість деяких видів продукції. Наприклад, під час стерилізації консервів "Зелений горошок" із зерен вимивається крохмаль, через що рідка фаза стає каламутною. На практиці необхідно експериментально встановлювати оптимальну частоту обертання консервної тари та формулу стерилізації для кожної партії консервів.

Зі значень часу, необхідного для пастеризації/стерилізації продукції, роблять висновок, що відносно продукції в банках метод високотемпературної короткочасної стерилізації не може бути застосований у загальноприйнятому вигляді. ВТКС дає результати під час стерилізації/пастеризації рідинної продукції не розфасованої у тару. Інтенсифікація теплообміну в продукті, а значить і швидкості його нагрівання при цьому досягаються створенням примусових гідродинамічних режимів з високими значеннями критерію Рейнольдса, збільшеної поверхні теплопередавання та відносно невеликої товщини шару продукту, тобто, за таких умов використовуються практично всі переваги інтенсифікації процесу. Пастеризація в потоці соків, напоїв, пива, молока, тощо є прикладами такого використання високотемпературної короткочасної стерилізації.

В результаті зменшення часу оброблення продукції у порівнянні зі стерилізацією продукції, фасованої у банки, має місце велике зменшення габаритів, маси пристроїв і, навіть, енергетичних втрат. Недоліки методу ВТКС та стерилізаційного обладнання: найголовніше – це забезпечення стерильного фасування продукції в стерильну тару; обмеження впливу температури на деякі види

продуктів. Останні умови можливо забезпечити використанням тільки спеціального обладнання, яке через високу вартість набагато зменшує економічні переваги високотемпературної короткочасної стерилізації.

## 1.2. Пастеризація пива

Пастеризацію пива проводять під час нагрівання до 55-70 С і витримання його певний час з наступним охолодженням. Для кожного виду мікроорганізмів (бактерій та дріжджів), що супроводжують готову продукцію, встановлюється певна температура, яка залежить кислотності пива, від часу витримання, вмісту алкоголю та антисептичної сили хмельових смол і є згубною. Одночасно для збереження якісних показників пива загальна тривалість пастеризації повинна бути мінімальною. Дані інактивації мікрофлори пива наведено у табл. 1.2.

Таблиця 1.2. Дані інактивації мікрофлори

Назва культури	Час пастеризації, хв	Температура пастеризації, С
Дріжджі:		
чистої культури	5	54
дикі	5	56
Спори дріжджів	15	64
Лактобацили	10	58
Сарцини	10	56

Запропонована і використовується на практиці формула визначення часу стерилізації/пастеризації залежно від температури:

$$\ln T_c = \alpha - \beta t, \quad (1.2)$$

де  $T$  – час витримання, потрібний для завершення процесу інактивації мікроорганізмів при температурі  $t$ ;  $\alpha$  і  $\beta$  – емпіричні сталі для даного напою. Значення  $\alpha$  і  $\beta$  знаходять експериментально у залежності від складу мікрофлори.

Для точного визначення пастеризаційного ефекту введено таке поняття, як одиниця пастеризації (ОП). За одиницю пастеризації прийнято ефект, який досягається за температури 60 С протягом 1 хв. В табл. 1.3 приведено значення

одиниць пастеризації їа різних температур [9].

Таблиця 1.3. *Визначення кількості одиниць пастеризації*

Температура, С	Швидкість летальності, ОП				
50	0,037	59	0,72	68	14,0
51	0,052	60	1,00	69	19,0
52	0,072	61	1,40	70	27,0
53	0,100	62	1,96	71	37,0
54	0,140	63	2,70	72	52,0
55	0,196	64	3,70	73	72,0
56	0,270	65	5,20	74	100,0
57	0,370	66	7,26	75	139,0
58	0,520	67	10,00		

Дослідження процесів стерилізації/пастеризації показали, що для повної летальності мікроорганізмів достатньо нагріти пиво і витримати його протягом 5-6 хв до температури 60 С, що в перерахунку дорівнює 5,6 ОП.

Процес пастеризації пива викликає зміни деяких органолептичних показників, наприклад, колір пива темнішає. Запах змінюється менш помітно, особливо для світлих сортів пива. Чим менший вміст білкових речовин і мальтози, тим незначніші зміни запаху. Пиво може набути несильного присмаку свіжого хліба, для зниження якого пастеризацію проводять за більш низької температури та підвищеного часу оброблення.

Для оброблення пива верхового і низового бродіння значення температури і часу різняться: так для низових штамів дріжджів температура інактивації складає 56, а для верхових – 60 С.

Значне підвищення температури пастеризації небажане, бо воно збільшує тиск у пляшках а також збільшує втрати посуду і самої продукції. Крім того, висока температура погано впливає на ізомеризацію гірких хмельових смол [9].

Пастеризація фасованого в пляшки пива відбувається у 3 етапи: перший – етап нагрівання від 2-5 С до температури пастеризації – 62 С, другий – етап витримування за цієї температури і третій – етап охолодження до температури 20-25 С. Також існують обмеження різниці температур між теплоносієм і

пляшками через термічне руйнування. Ці обмеження входять у протиріччя по інтенсифікації процесу, зменшення габаритів пастеризатора, його маси тощо.

На рисунках 1.3 та 1.4 побудовано термохронограми пастеризації пива, фасованого у пляшки, для пастеризатора НРБ і фірми GASguet. З них видно, що за підвищення температури і при зменшенні часу процесу можливо суттєво збільшити кількість ОП.

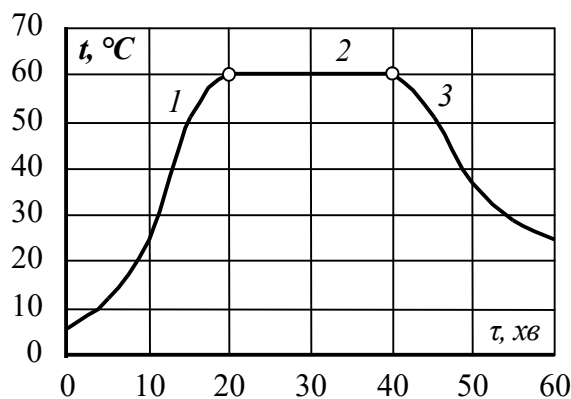


Рис. 1.3. Термохронограма пастеризатора виробництва фірми НРБ: зони нагрівання (1), витримки (2) та охолодження (3)

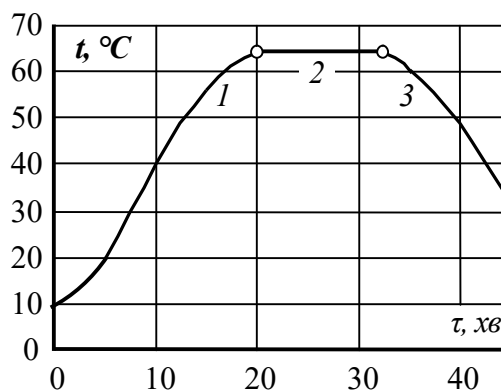


Рис. 1.4. Термохронограма пастеризатора виробництва фірми Gasquet: зони нагрівання (1), витримки (2) та охолодження (3)

Динаміка нагрівання продукту у пляшці залежить від таких показників, як гідродинамічні характеристики взаємодії теплоносія і пляшки, температурний напір, в'язкість продукту, його поверхневий натяг тощо і підлягає аналітичному моделюванню. Зважаючи на достатню складність останнього, виконано серію досліджень з метою одержання термохронограм [30], які проводились на спеціальному лабораторному стенді. До його складу входили термостат, пляшки з досліджуваним продуктом, спеціальний зонд на 5 термопар і потенціометр. Це давало можливість в умовах стабілізованої температури теплоносія здійснювати виміри температур з розгортанням процесу в часі. П'ять термопар розміщувались по висоті пляшки і давали можливість фіксувати нерівномірність теплових полів (рис. 1.5).

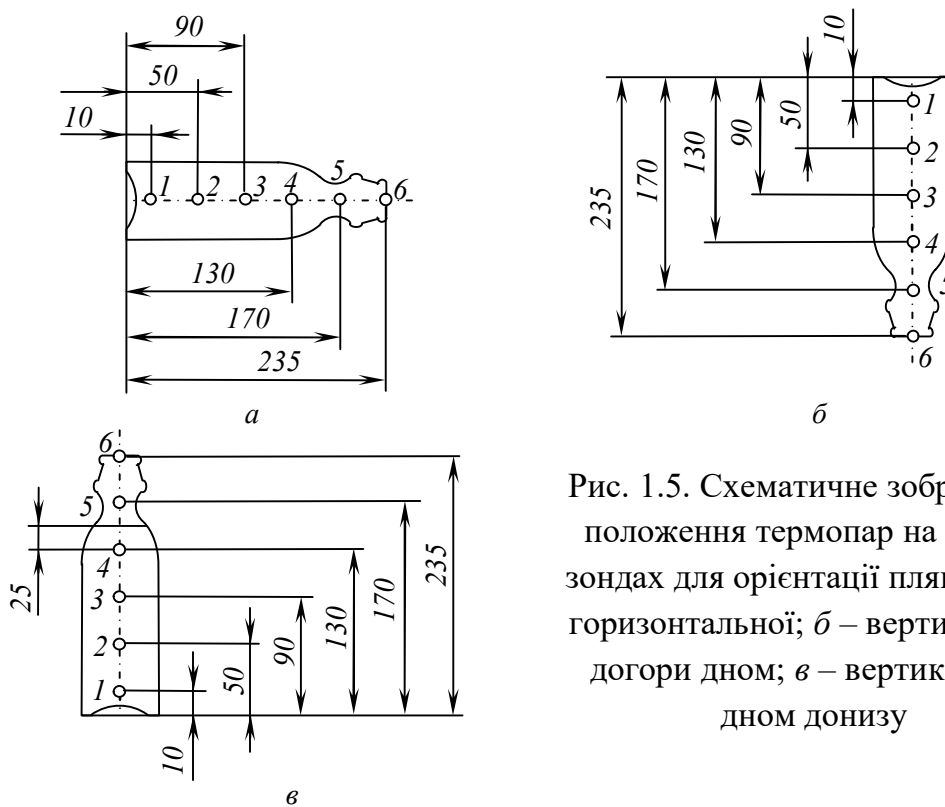


Рис. 1.5. Схематичне зображення положення термопар на термозондах для орієнтації пляшок: *a* – горизонтальної; *б* – вертикальної догори дном; *в* – вертикальної дном донизу

Як тепловий агент використовувалась вода і дослідження відповідали режимам занурювання пляшок у теплоносій і режимам душирування. Результати цих досліджень показані на рис. 1.6 для випадків вертикальної і горизонтальної орієнтації пляшок. У результаті дослідів зроблено наступні висновки:

- 1) вертикальна орієнтація пляшок для випадків нагрівання методом душирування і занурювання супроводжується значними температурними перепадами по висоті і поперечному перерізу. Пояснюється це відносно низьким рівнем гідродинамічного перемішування вмісту пляшки. Аналіз картини температурних полів вказує на можливість інтенсифікації процесу на фазі нагрівання за рахунок дестабілізації внутрішніх конвективних потоків;
- 2) визначальним фактором є опір вертикальної циркуляції вмісту пляшки, що підтверджується дослідями, в яких пляшка займала положення догори горлом, донизу горлом і горизонтальне положення;
- 3) одержані результати в режимах занурювання і душирування збігаються за динамікою нагрівання, тобто під час душирування існує якась нижня межа

щільності зрошування, перевищення якої практично не змінює динаміку теплопередавання.

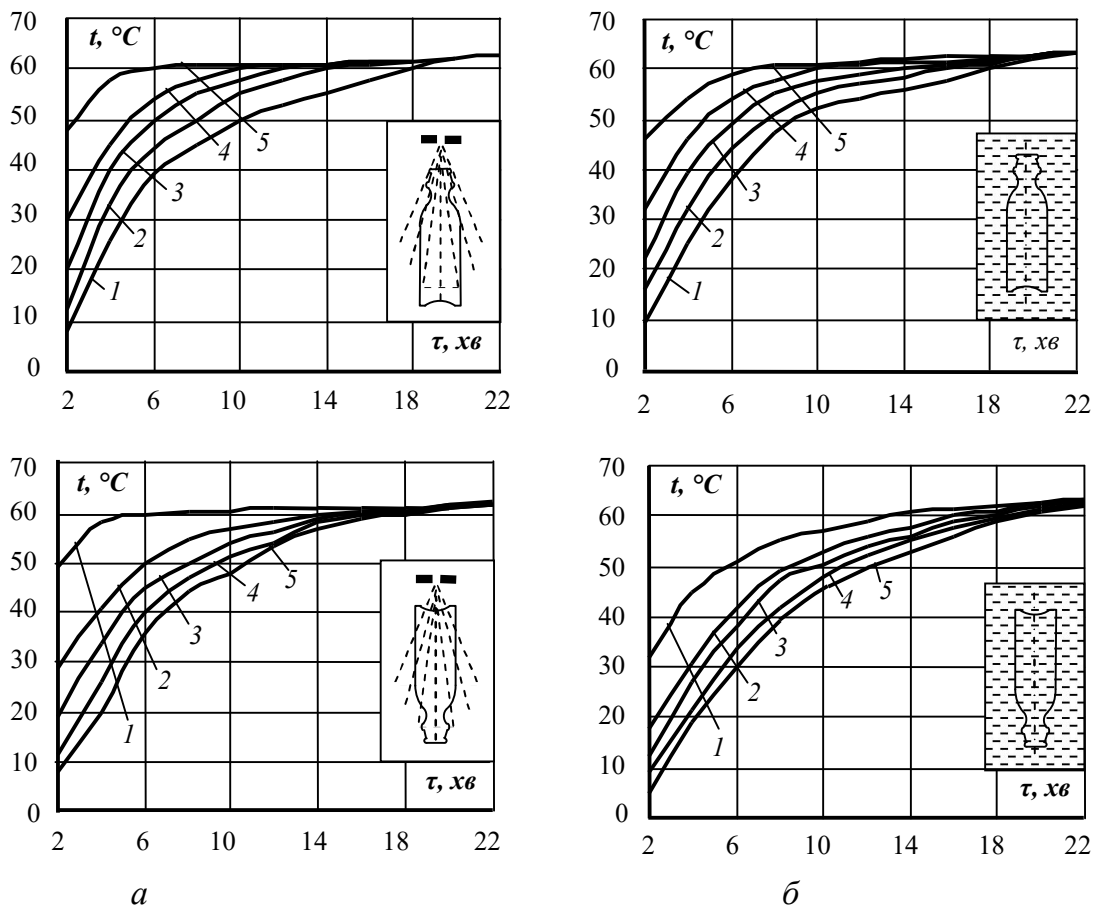


Рис. 1.6. Графіки зміни динаміки нагрівання вмісту пляшки ємністю 0,33 л за температури теплоносія  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$  і  $t_{\text{п}} = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  при: *a* – зрошуванні з різною орієнтацією тари; *б* – занурюванні; 1, 2, 3, 4 і 5 показники термопар (див. рис. 1.5)

### 1.3. Визначення динаміки тиску в пляшках у процесі пастеризації

Одним з важливих показників процесу пастеризації є внутрішній тиск. Відомо [30], що наповнення пляшок пивом відбувається за температури продукту  $2-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  і тиску  $0,15-0,25\text{ МПа}$ . Ці значення вибираються з метою більш повного збереження в розчиненому стані вуглекислого газу, який підтримує зрівноважений стан. Після заповнення внутрішній об'єм пляшки стикається з атмосферою (киснем), тиск в ній знижується до атмосферного, а потім відбувається закорковування. Далі під час нагрівання вмісту пляшки збільшується

об'єм пива і зростає тиск. Це визначається з виразу [32]:

$$P_2 = P_1 \frac{0,01aV_0}{0,01aV_0 - V_0(1-0,01a)0,000466(t_2-t_1)} \cdot \frac{273+t_2}{273+t_1}, \quad (1.3)$$

де  $P_1$  і  $P_2$  – початковий і кінцевий тиск у пляшці;  $V_0$  – внутрішній загальний об'єм пляшки;  $a$  – частка газової фази в загальному об'ємі пляшки.

Як видно з розрахунків (табл. 1.4), для досягнення кінцевого тиску  $P_2$  суттєве значення має об'єм газової фази  $a$ . Різні значення останньої можуть визначатись відхиленням від номінального об'єму самої пляшки, а також точністю дозування продукту.

Таблиця 1.4. *Результати визначення тиску  $P_2$ , МПа, у залежності від параметра  $a$  і температури  $t_2$ , С, при  $t_1=1$  С*

$t_2$ , С	$a$ , %									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	0,12	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
10	0,16	0,13	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
15	0,26	0,15	0,13	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11
20	0,63	0,18	0,15	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
25	∞	0,23	0,17	0,15	0,14	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12
30	–	0,31	0,19	0,16	0,15	0,14	0,13	0,13	0,13	0,13
35	–	0,45	0,22	0,18	0,16	0,15	0,14	0,14	0,13	0,13
40	–	0,86	0,27	0,20	0,17	0,16	0,15	0,14	0,14	0,14
45	–	6,38	0,33	0,22	0,19	0,17	0,16	0,15	0,15	0,14
50	–	∞	0,42	0,25	0,20	0,18	0,17	0,16	0,15	0,15
55	–	–	0,59	0,29	0,23	0,20	0,18	0,17	0,16	0,15
60	–	–	0,96	0,35	0,25	0,21	0,19	0,18	0,17	0,16
65	–	–	2,42	0,42	0,28	0,23	0,20	0,19	0,18	0,17
70	–	–∞	0,52	0,31	0,25	0,22	0,20	0,18	0,18	
75	–	–	–	0,69	0,36	0,27	0,23	0,21	0,19	0,18
80	–	–	–	1,01	0,42	0,30	0,25	0,22	0,20	0,19

Для визначення можливих показників  $P_2$  встановлено максимальні і мінімальні значення  $a$  для різних типів пляшок згідно з ГОСТ 10117-80 (табл. 1.5), а результати розрахунків представлено в табл. 1.6.

Аналіз даних табл. 1.4 та 6 показує, що за малих значень величини  $a$  в результаті теплового розширення рідини тиск теоретично може розвиватись до

нескінченно великого значення за умови, що знаменник виразу (3) перетворюється в нуль.

Таблиця 1.5. Дані до визначення можливих відхилень об'ємів газової фази

Тип пляшки	Місткість, см <sup>3</sup>	Об'єм газової фази, см <sup>3</sup>		Величина $a$ , %	
		номінальна	допустима	$a_{\max}$	$a_{\min}$
III	100	100±3	10±3	11,50	6,54
IV	250	270±10	20±10	10,70	3,85
	330	350±10	20±10	8,30	2,94
	500	535±10	35±10	8,30	4,76
I	500	520±10	20±10	5,66	1,96
	700	725±15	25±15	5,40	1,41
II	800	835±15	35±15	4,70	2,40

Таблиця 1.6. Результати визначення тиску  $P_2$  (МПа) як функції параметра  $a$  і температури  $t_2$ , С, за  $t_1=1$  С з урахуванням відхилень повного об'єму пляшки в межах ГОСТу

$t_2$ , С	$V_0$ , л	$P_2$ , МПа											
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
0,11	65	0,10	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15
	70	0,16	0,17	0,17	0,18								
0,27	6,54	0,10	0,11	0,12	0,12	0,13	0,14	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,20
	0,21	0,23	0,25	0,27									
	10,70	0,10	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	0,15	0,16
	0,16	0,17	0,18	0,18									
0,35	3,85	0,11	0,11	0,12	0,14	0,15	0,16	0,18	0,20	0,23	0,27	0,31	0,37
	0,46	0,60	0,84	1,39									
	8,30	0,10	0,11	0,11	0,12	0,12	0,13	0,14	0,14	0,15	0,16	0,16	0,17
	0,18	0,19	0,20	0,22									
0,535	2,94	0,11	0,12	0,13	0,15	0,17	0,19	0,23	0,27	0,34	0,45	0,65	1,12
	3,99	∞	–	–									
	8,30	0,10	0,11	0,11	0,12	0,12	0,13	0,14	0,14	0,15	0,16	0,16	0,17
	0,18	0,19	0,20	0,22									
0,52	4,76	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,18	0,19	0,21	0,24	0,26
	0,30	0,34	0,40	0,47									
	5,66	0,10	0,11	0,12	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,19	0,20	0,22
	0,24	0,26	0,29	0,33									
0,725	1,96	0,11	0,13	0,15	0,18	0,23	0,32	0,49	1,00	∞	–	–	–
	–	–	–	–									
	5,40	0,10	0,11	0,12	0,13	0,13	0,14	0,15	0,17	0,18	0,19	0,21	0,23
	0,25	0,28	0,31	0,35									
0,835	4,70	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24	0,27
	0,30	0,35	0,41	0,49									
	1,41	0,11	0,14	0,18	0,26	0,43	1,26	∞	–	–	–	–	–
	–	–	–	–									
–	2,40	0,11	0,12	0,14	0,16	0,19	0,24	0,30	0,41	0,63	1,30	∞	–
	–	–	–	–									

У зоні від'ємних значень  $P_2$  вираз втрачає фізичний зміст. Умова  $P_2 = \infty$ , зрозуміло, теж не може досягатися, тому що при певних значеннях тиску відбувається відкорковування пляшки або її руйнування.

При цьому абсолютна числова величина об'єму пляшки, як бачимо з табл. 1.4, значення не має, важливою є лише величина  $a$ . Для пляшок з номінальним об'ємом 0,5 та 0,33 л значення  $P_2$  для однакових  $t_2$  і  $a$  повністю збігаються. Це саме підтвердили розрахунки і для типорозмірів пляшок місткістю від 0,1 до 1,0 л і стосуються будь-яких об'ємів.

Отже, можна зробити висновок про доцільність прогностичної оцінки значень  $P_2$  за відхиленнями повного об'єму пляшки від номінального в межах ГОСТу (табл. 1.5).

В табл. 1.5 наведено дані можливих відхилень об'ємів, що дало змогу прорахувати максимальні  $a_{\max}$  і мінімальні  $a_{\min}$  значення. Найгірші співвідношення відповідають пляшкам типу I номінальною місткістю 0,5 і 0,7 л і типу II – 0,8 л. Саме для цих пляшок навіть за номінального заповнення прогнозується зрив пробки або руйнування самого посуду. За мінімальних значень  $a_{\min}$  слід чекати такого самого результату і для пляшки номінальною місткістю 0,33 л.

На рис. 1.7 та 1.8 показані графічні залежності тиску від температури при різних значеннях  $a$  для різних типів пляшок. Зважаючи на можливі відхилення дози рідини, яка подається в пляшку, можна стверджувати, що критичні умови для перезаповненого посуду матимуть місце у процесі пастеризації. Це стосується всіх типів пляшок. Теплове розширення рідини не є єдиною причиною в досягненні певних параметрів. Збільшення тиску відбувається також за рахунок переходу зв'язаного вуглекислоти в газоподібний стан. Величина виділеного газу зв'язана з підвищенням температури і тиском у газовому просторі пляшки над рідиною. З ростом температури безперервно збільшується тиск за рахунок додаткового виділення  $\text{CO}_2$  і при вмісті вуглекислого газу 3,6 г/л в пляшці місткістю 0,33 л за температури 60 °C внутрішній тиск складе 0,3 МПа. За тих самих умов для літрової пляшки тиск складе 0,4 МПа.

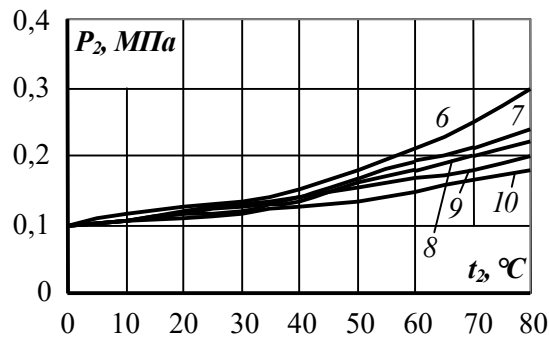
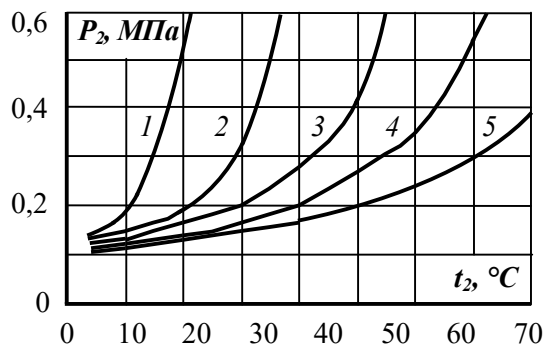


Рис. 1.7. Графіки залежностей тиску у пляш-  
ках від температури за заданого значення  
частки газової фази: 1 –  $a = 1$ ; 2 –  $a = 2$ ; 3 –  
 $a = 3$ ; 4 –  $a = 4$ ; 5 –  $a = 5$ ; 6 –  $a = 6$ ; 7 –  $a = 7$ ;  
8 –  $a = 8$ ; 9 –  $a = 9$ ; 10 –  $a = 10$  %

Враховуючи принцип суперпозиції можна констатувати: підвищення тиску в пляшці при нагріванні залежить від теплового розширення продукту і частки тиску за рахунок виділення  $\text{CO}_2$ . При цьому другий параметр за певних умов і не почне діяти. Це можливо тоді, коли збільшений тиск у пляшці за рахунок теплового об'ємного розширення пива буде більшим, ніж цей показник за зрівноваженим станом. За цих умов газ не буде виділятися.

Зі сказаного випливає, що розмір тиску у пляшці прогнозується з двома можливими максимумами, кожен з яких визначатиметься першим або другим фактором. На рис. 1.9 показано графік залежності тиску від величини  $a$ , де крива 1 відповідає частці тиску, що створюється за рахунок теплового розширення пива, а пряма 2 частці тиску за рахунок виділення газу. Положення останньої визначається як тиск зрівноваженої системи при вибраній температурі. Таким чином, існує якесь оптимальне значення  $a_0$ , якому відповідають рівні значення першої і другої складових.

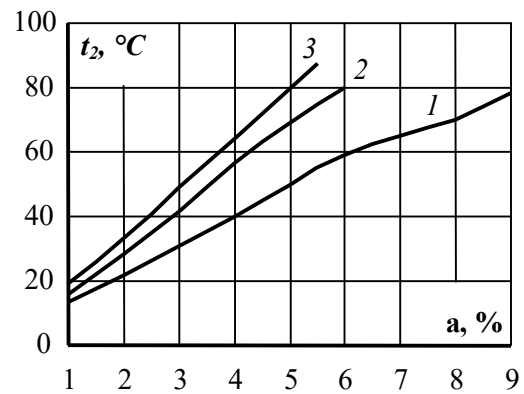


Рис. 1.8. Залежності температури від  
частки газової фази  $a$  при загальному  
тиску у пляшці: 1 –  $P_2 = 0,2$ ; 2 –  
 $P_2 = 0,3$ ; 3 –  $P_2 = 0,4$  МПа

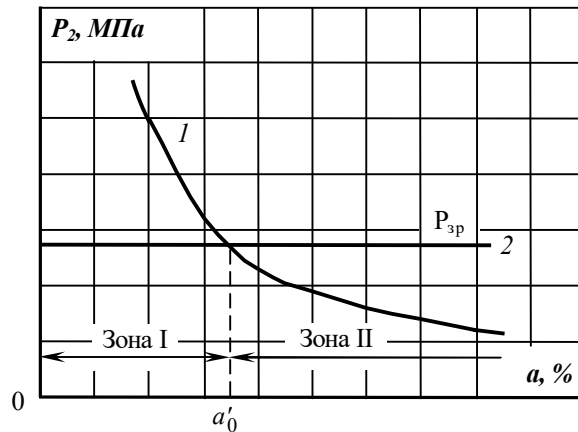


Рис. 1.9. Залежність тиску від частки газової фази  $a$  в об'ємі пляшки

Положення точки  $a_0$  на горизонтальній осі розбиває графік на дві зони:

I зоні відповідає значення тиску, що визначається лише тепловим розширенням продукту у пляшці. За малих значень  $a$  це величина може бути значною і аж за межею міцності. Якщо за якихось причин відбувається повне заповнення (або близьке до нього) пляшки, то з урахуванням того, що вода і її розчини є нестискуваними, можна прогнозувати зрив пробки або руйнування посуду;

II зоні відповідає сталі значення тиску в пляшці (тиск зрівноваженого стану  $P_{зр}$ ).

Якщо зважити на те, що об'ємне розширення продукту і виділення газу є наслідком нагрівання, то можна вважати, що по I зоні газоутворення не відбувається, а якщо  $a > a_0$ , то саме газоутворення визначатиме загальний тиск.

У зв'язку з вищевикладеним робимо висновок про надзвичайно велике значення ступеня заповнення пляшок напоями: заповнення вище критичного показника викликає втрати тари та продукції.

На жаль, це не єдиний показник руйнування посуду, оскільки за інших рівних умов суттєве значення має якість скляної тари та коркових матеріалів. Проте за будь-яких умов перезавнення пляшок продуктом значно погіршує ситуацію.

Виконані теоретичні дослідження динаміки зміни тиску в пляшках дозволяють зробити такі висновки:

1. Теплове розширення рідини в пляшках може бути визначальним у досягненні значень тиску і значно залежить від частки газової фази в загальному об'ємі пляшки;
2. За інших рівних умов збільшення частки газової фази забезпечує зменшення тиску в пляшці до критичних значень  $a$ , після чого загальний тиск визначатиметься умовами рівноваги між  $\text{CO}_2$  в розчині і в газовій надрідинній фазі;
3. Критичне значення тиску в пляшці може досягатися як за рахунок відхилення значень повного її об'єму в межах ГОСТ, так і за рахунок перезавповнення при дозуванні;
4. За рівнем заповнення пляшок, які надходять на пастеризацію, потрібен посилений контроль і перезавповнені пляшки з процесу пастеризації треба вилучати;
5. Розливний автомат, в якому фасується продукт у склотару, яка далі подається на пастеризацію, має додатково перевірятись на точність дозування. Бажано, щоб відхилення від номінальної дози були від'ємними у межах допуску.

#### **1.4. Розрахунок переміщення і напруження у пляшці при підвищенні тиску**

Скляна тара, використовувана у виробництві, має складну форму, тому створюємо розрахункову схему і проведемо аналіз рівняння деформації та рівняння рівноваги для осесиметричного тіла циліндричної форми. Ці рівняння у подальшому дадуть змогу оцінки впливів на окремі частини скляного посуду.

Внутрішній тиск у пляшці будемо вважати сталим.

Кожна точка математичної моделі одержує певне переміщення. Цілком очевидно, що у випадку осесиметричного тіла переміщення відбуваються в радіальній площині. Кожна точка переміщується по радіусу і по відповідній твірній.

Позначаємо величиною  $u$  радіальне переміщення довільно взятої точки, причому  $u$  – це функція радіусу  $r$  і воно не змінюється по довжині циліндра. За додатний напрям  $r$  приймаємо напрям від осі циліндра (рис. 1.10).

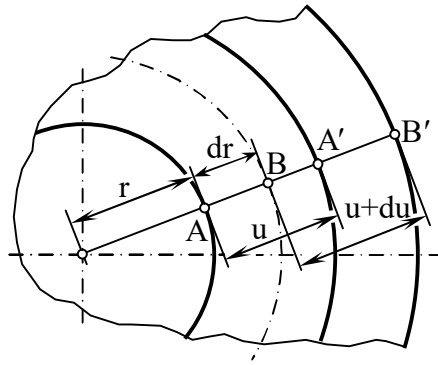


Рис. 1.10. Розрахункова схема для визначення напружень у циліндричній частині скляної тари:  $r$  – радіус;  $u$  – радіальне переміщення довільної точки

Припустимо, що осьові переміщення розподілені таким чином, що поперечні перерізи лишаються плоскими.

Позначаємо відносні деформації  $\varepsilon_r$  та  $\varepsilon_t$  у радіальному і коловому напрямках, тоді маємо:

$$\varepsilon_r \frac{du}{dr}. \quad (1.4)$$

Після навантаження отримаємо довжину кола  $2\pi(r + u)$ , тобто

$$\varepsilon_t \frac{2\pi(r+u) - 2\pi r}{2\pi r} \quad \text{або} \quad \varepsilon_t = \frac{u}{r}. \quad (1.5)$$

Підставляючи  $u = \varepsilon_t r$  у вираз (4), отримаємо рівняння:

$$\frac{d}{dr} (\varepsilon_t r) - \varepsilon_t = 0. \quad (1.6)$$

Виділяємо елемент циліндричної частини посуду і проектуємо діючі на нього сили на напрямок радіусу  $r$ , і у результаті отримуємо умову рівноваги (рис. 1.11):

$$(\sigma_r + d\sigma_r)(r + dr)d\varphi dz - \sigma_r r d\varphi dz - \sigma_t dz dz d\varphi = 0. \quad (1.7)$$

Звідки маємо –

$$\sigma_r + \frac{d\sigma_r}{dr} r - \sigma_t = 0 \quad (1.8)$$

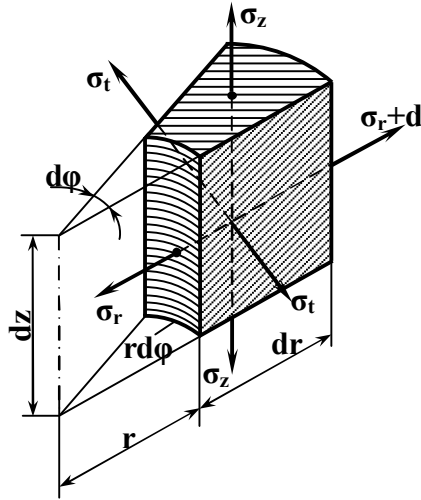


Рис. 1.11. Напруження в елементарному об'ємі стінки пляшки, де  $r$  – внутрішній радіус

$$\frac{d}{dr}(\sigma_r r) - \sigma_t = 0. \quad (1.9)$$

Згідно закону Гука напруження  $\sigma_r$ ,  $\sigma_t$  і  $\sigma_z$  пов'язані з подовженнями  $\varepsilon_r$  і  $\varepsilon_t$  наступними залежностями:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu(\sigma_t + \sigma_z)]; \quad \varepsilon_t = \frac{1}{E} [\sigma_t - \mu(\sigma_r + \sigma_z)]. \quad (1.10)$$

Напруження  $\sigma_z$  знаходимо враховуючи, що незалежно від форми горлової частини пляшки і форми її дна, результуючі сил внутрішнього тиску, що розтягують посуд, розраховуються як добуток тиску на площу внутрішнього перерізу. Позначивши внутрішній радіус через  $a$ , а зовнішній – через  $b$ , матимемо формулу площі внутрішнього перерізу:

$$F_{\text{вн}} = \frac{\pi a^2}{4}. \quad (1.11)$$

Тоді рівнодіюча  $R$  внутрішніх сил, що розтягують посуд,

$$R = p F_{\text{вн}} = p, \quad (1.12)$$

де  $p$  – величина внутрішнього тиску.

Значення  $\sigma_z$  знаходимо з рівняння:

$$\sigma_z = \frac{R}{F_n} = \frac{p \frac{\pi a^2}{4}}{\frac{\pi}{4}(b^2 - a^2)} = \frac{p a^2}{b^2 - a^2}. \quad (1.13)$$

Підставивши значення  $\varepsilon_r$  і  $\varepsilon_t$  у вираз (1.6), отримаємо рівність:

$$\frac{d}{dr}(\sigma_t r) - \sigma_r = 0. \quad (1.14)$$

Додаючи і віднімаючи почленно співвідношення (1.9) та (1.14), одержуємо:

$$\frac{d}{dr}[(\sigma_t + \sigma_r)r] - (\sigma_t + \sigma_r) = 0, \quad (1.15)$$

$$\frac{d}{dr}[(\sigma_t - \sigma_r)r] + (\sigma_t - \sigma_r) = 0. \quad (1.16)$$

Розв'язавши ці рівняння, маємо

$$\sigma_t + \sigma_r = 2A; \quad \sigma_t - \sigma_r = \frac{2B}{r^2}, \quad (1.17)$$

де  $A$  та  $B$  – довільні сталі величини.

Надалі розраховуємо:

$$\sigma_r = A - \frac{B}{r^2}; \quad (1.18)$$

$$\sigma_t = A + \frac{B}{r^2}. \quad (1.19)$$

Величину переміщення  $u$  знайдемо з рівняння (1.5), попередньо визначивши  $\varepsilon_t$  з рівняння закону Гука (10):

$$u = \frac{1}{E} [A(1-\mu)r + B(1+\mu)\frac{1}{r} - \mu\sigma_z r]. \quad (1.20)$$

Значення сталих  $A$  та  $B$  знайдемо за таких граничних умов:

при  $r = a$   $\sigma_r = -p_a$ ; при  $r = b$   $\sigma_r = -p_b$ , тобто

$$A - \frac{B}{a^2} = -p_a; \quad A - \frac{B}{b^2} = -p_b, \quad (1.21)$$

де  $p_b$  – зовнішній тиск.

Звідки маємо:

$$A = \frac{p_a a^2 - p_b b^2}{b^2 - a^2}; \quad B = \frac{a^2 b^2}{b^2 - a^2} (p_a - p_b). \quad (1.22)$$

У результаті певних підстановок отримаємо:

$$\sigma_r = \frac{p_a a^2 - p_b b^2}{b^2 - a^2} - \frac{a^2 b^2}{r^2} \cdot \frac{p_a - p_b}{b^2 - a^2}, \quad (1.23)$$

$$\sigma_t = \frac{p_a a^2 - p_b b^2}{b^2 - a^2} + \frac{a^2 b^2}{r^2} \cdot \frac{p_a - p_b}{b^2 - a^2}, \quad (1.24)$$

$$u = \frac{1-\mu}{E} \cdot \frac{p_a a^2 - p_b b^2}{b^2 - a^2} r + \frac{1+\mu}{E} \cdot \frac{a^2 b^2}{r} \cdot \frac{p_a - p_b}{b^2 - a^2} - \mu\sigma_z z. \quad (1.25)$$

Знаючи величину зовнішнього тиску, обчислимо  $\sigma_z$ :

$$\sigma_z = \frac{p_a a^2 - p_b b^2}{b^2 - a^2} \quad (1.26)$$

і, нарешті:

$$u = \frac{1-\mu}{E} \cdot \frac{p_a a^2 - p_b b^2}{b^2 - a^2} r + \frac{1+\mu}{E} \cdot \frac{a^2 b^2}{r} \cdot \frac{p_a - p_b}{b^2 - a^2}. \quad (1.27)$$

Отримані розраховані формули (1.23)-(1.27) повністю відповідають вимогам перебування скляного посуду в стерилізаторі, в якому оброблення проводиться за підвищеного зовнішнього тиску. У випадку пастеризаційного оброблення тари зовнішній тиск відсутній; тоді  $p_a = p$  і  $p_b = 0$ .

$$\sigma_r = \frac{p a^2}{b^2 - a^2} \left( 1 - \frac{b^2}{r^2} \right); \quad (1.28)$$

$$\sigma_t = \frac{p a^2}{b^2 - a^2} \left( 1 + \frac{b^2}{r^2} \right); \quad (1.29)$$

$$u = \frac{1-\mu}{E} \cdot \frac{p a^2}{b^2 - a^2} r + \frac{1-\mu}{E} \cdot \frac{a^2 b^2}{r} \cdot \frac{p_a}{b^2 - a^2}.$$

Рівності (1.28) та (1.29) зображають епюри розподілення радіальних і колових напружень. З них видно, що за інших рівних умов величини  $\sigma_r$  та  $\sigma_t$ , залежать від розміру поточного значення радіуса  $r$ .

Прийmemo  $r = a$ , тоді йому відповідає:

$$\sigma_r = \frac{p a^2}{b^2 - a^2} \left( 1 - \frac{b^2}{a^2} \right) = \frac{p a^2}{b^2 - a^2} - \frac{p a^2 b^2}{(b^2 - a^2) a^2} = -p;$$

$$\sigma_t = \frac{p a^2}{b^2 - a^2} \left( 1 + \frac{b^2}{a^2} \right) = \frac{p a^2}{b^2 - a^2} + \frac{p a^2 b^2}{(b^2 - a^2) a^2} = \frac{p(a^2 + b^2)}{b^2 - a^2}.$$

Прирівнявши  $r = b$  маємо:

$$\sigma_r = \frac{p a^2}{b^2 - a^2} \left( 1 - \frac{b^2}{r^2} \right); \quad (1.30)$$

$$\sigma_t = \frac{p a^2}{b^2 - a^2} \left( 1 + \frac{b^2}{r^2} \right); \quad (1.31)$$

$$u = \frac{1-\mu}{E} \cdot \frac{p a^2}{b^2 - a^2} r + \frac{1-\mu}{E} \cdot \frac{a^2 b^2}{r} \cdot \frac{p_a}{b^2 - a^2}. \quad (1.32)$$

Рівняння (1.30) і (1.31) відображають епюри розподілу радіальних і колових напружень. З них видно, що  $\sigma_r$  і  $\sigma_t$  за інших рівних умов залежать від величини

поточного значення радіуса  $r$ .

Нехай  $r = a$  і йому відповідають

$$\sigma_r = \frac{pa^2}{b^2 - a^2} \left( 1 - \frac{b^2}{a^2} \right) = \frac{pa^2}{b^2 - a^2} - \frac{pa^2 b^2}{(b^2 - a^2)a^2} = -p; \quad (1.33)$$

$$\sigma_t = \frac{pa^2}{b^2 - a^2} \left( 1 + \frac{b^2}{a^2} \right) = \frac{pa^2}{b^2 - a^2} + \frac{pa^2 b^2}{(b^2 - a^2)a^2} = \frac{p(a^2 + b^2)}{b^2 - a^2}. \quad (1.34)$$

Тобто, напруження  $\sigma_r$  і  $\sigma_t$  вздовж радіусу змінюються за гіперболічним законом, при цьому треба нагадати, що вектори напружень  $\sigma_r$ ,  $\sigma_t$  і  $\sigma_z$  взаємно перпендикулярні, що зображено на рис. 4.16.

Наведені результати визначення величин напружень у циліндричній частині скляної пляшки повністю відповідають класичній теорії розрахунку товстостінної ємності. Проте, вказівок про визначення поняття "товстостінна" або "тонкостінна" оболонка в літературних джерелах немає, тому треба зіставляти відповідно до розглянутого в цьому дослідженні випадку різні моделі. Окрім того, на нашу думку, основні теоретичні посилки, що дали змогу отримати розрахункові формули, можливо значно спростити.

В основу досліджуваного аналітичного апарату покладено певну мікромодель і використано основні припущення опору матеріалів. Спробуємо, використовуючи цю ж основу розглянути макромодель.

Припускаємо дослідити ємність (оболонку) з циліндричною формою, для якої відомими є внутрішній радіус  $r_1$ , зовнішній радіус  $r_2$ , висота ємності  $H$  і внутрішній тиск  $p$  (рис. 1.12). Будемо вважати відсутнім зовнішній тиск.

Застосуємо метод перерізів для розсікання ємності на два напівциліндри діаметральною площиною  $F$  та розглянемо їх у стані рівноваги.

На внутрішню поверхню напівциліндру впливає внутрішній тиск  $p$  з результуючою  $R$ , яка лежить на осі симетрії в площині  $OXY$ , а числове значення її можна знайти з рівняння:

$$R = 2pr_1H. \quad (1.35)$$

Для розрахунку результуючої сил внутрішнього тиску на стінку ємності будь-якої іншої форми сформулюємо наступне правило: результуюча сил внут-

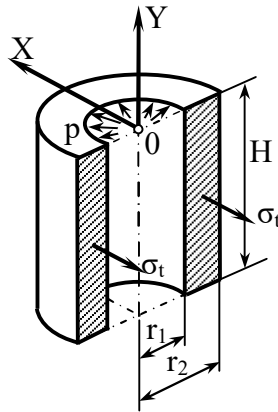


Рис. 1.12. Схема до макромоделі посудини циліндричної форми:  $r_1$  – внутрішній радіус;  $r_2$  – зовнішній радіус;  $H$  – висота;  $p$  – внутрішній тиск

рішнього тиску на довільно вибрану частину ємкості визначається добутком тиску на площу перерізу площини, яким утворена частина ємкості. В даному випадку величина цієї площі дорівнює значенню  $2r_1H$ .

Посилаючись на умову рівноваги відсіченої частини у площі перерізу до граней напівциліндру необхідно прикласти певні внутрішні сили, а саме колові напруження  $\sigma_t$ . Тоді маємо:

$$R=2(r_2-r_1)H\sigma_t; \quad (1.36)$$

або 
$$2pr_1H=2(r_2-r_1)H\sigma_t, \quad (1.37)$$

звідки виводимо

$$\sigma_t = \frac{pr_1}{h}. \quad (1.38)$$

Порівняємо розрахунки формул (1.31) і (1.38). Початковими умовами маємо:

$$p = 1 \text{ МПа}; r_1 = 0,031 \text{ м}; r_2 = 0,036 \text{ м}.$$

Тоді з формули (1.31) запишемо

$$\sigma_{t_a} = \frac{1 \cdot 10^6 \cdot 0,031^2}{0,036^2 - 0,031^2} \left( 1 - \frac{0,036^2}{0,031^2} \right) = 6,27 \text{ МПа}; \quad (1.39)$$

$$\sigma_{t_b} = \frac{1 \cdot 10^6 \cdot 0,031^2}{0,036^2 - 0,031^2} \left( 1 + \frac{0,036^2}{0,031^2} \right) = 5,85 \text{ МПа}. \quad (1.40)$$

Середнє напруження дорівнюватиме:

$$\sigma_{t_c} = \frac{\sigma_{t_a} + \sigma_{t_b}}{2} = \frac{6,27 + 5,85}{2} = 6,06 \text{ МПа.} \quad (1.41)$$

З формули (1.38) маємо:

$$\sigma_t = \frac{1 \cdot 0,031}{0,036 - 0,031} = 6,2 \text{ МПа.} \quad (1.42)$$

Різниця двох значень складає:

$$\Delta\sigma_t = \frac{\sigma_t + \sigma_{t_c}}{\sigma_t} 100 = \frac{6,2 - 6,06}{6,06} 100 = 2,3 \%. \quad (1.43)$$

Якщо провести розрахунки за максимальними напруженнями  $\sigma_t$ , то різниця становитиме:

$$\Delta\sigma_t = \left| \frac{\sigma_t - \sigma_{t_c}}{\sigma_t} \right| \cdot 100 = \left| \frac{6,2 - 6,27}{6,27} \right| \cdot 100 = 1,1 \%. \quad (1.44)$$

Отримані значення різниць не потребують коментарів і підтверджують доцільність та справедливість розробленої нової аналітичної моделі розрахунків. Адже запропонована модель не обмежує розрахунків лише ємностей циліндричної форми, а практично дає можливість розраховувати оболонки будь-якої форми.

Так як в новій моделі можливо отримати середнє значення колових напружень, то вона більш відповідає моделі розрахунків тонкостінної оболонки, завданням якої є визначення колових і меридіональних напружень.

Нормальні напруження  $\sigma_t$  і  $\sigma_z$  діють у площинах, де відсутні дотичні напруження і, очевидно, вони виступають як головні. Що ж до третього головного напруження, яке має нормальний напрям до поверхні ємності, то на внутрішній поверхні воно дорівнює  $p$ , а на зовнішній – нулю. Оскільки в тонкостінній ємності  $\sigma_1 = \sigma_t$  і  $\sigma_2 = \sigma_z$  значно більші за  $p$ , останнім нехтують, і вважають, що  $\sigma_3 = 0$ .

Останнє дає право вважати, що матеріал оболонки є в плоскому напруженому стані. Тому розраховуючи міцність, через напружений стан матеріалу, треба застосовувати відповідну гіпотезу міцності, наприклад, за IV теорією міцності умова міцності має вигляд:

$$\sigma_{\text{екв. IV}} = \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_z^2 - \sigma_t \sigma_z} \leq [\sigma]. \quad (1.45)$$

Використаємо складену макромодель для розрахунку напружень на перехідній поверхні. Завданням дослідження тут маємо визначення меридіональних (осьових) і колових напружень у довільно вибраному перерізі I-I.

Позначимо внутрішній радіус в даному перерізі  $r_1$ , зовнішній –  $r_2$ , внутрішній радіус пляшки в її циліндричній частині –  $r_a$  (рис. 1.13).

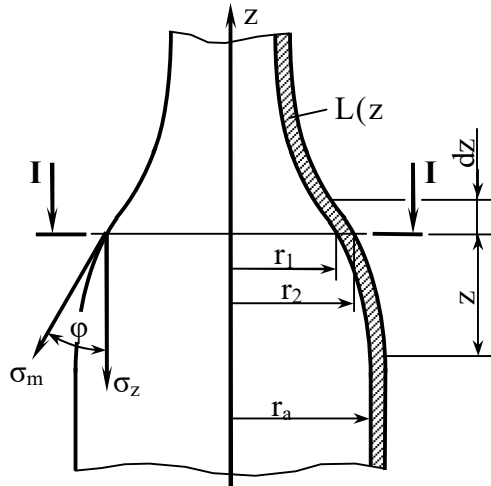


Рис. 1.13. Ілюстрація до випадку визначення напружень в перехідній частині пляшки:  $r_1$  – внутрішній діаметр перехідної поверхні;  $r_2$  – зовнішній діаметр;  $r_a$  – внутрішній діаметр циліндричної частини

Використовуючи метод перерізів можна ствердно сказати, що осьова рівнодіюча сила внутрішнього тиску  $R_{oc}$  в тій частині пляшки, що вище площини I-I, визначається рівнянням:

$$R_{oc} = \pi r_1^2 p. \quad (1.46)$$

Осьові та меридіональні напруження дорівнюють:

$$\sigma_z = \frac{R_{oc}}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} = \frac{\pi r_1^2 p}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} = \frac{p r_1^2}{r_2^2 - r_1^2}, \quad (1.47)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_z}{\cos \varphi} = \frac{p r_1^2}{(r_2^2 - r_1^2) \cos \varphi}, \quad (1.48)$$

Чим більше відстань  $z$  від циліндричної частини пляшки, тим більше зменшуються осьові напруження  $\sigma_z$ , за умови, якщо товщина стінки пляшки залишається незмінною.

Позначивши через  $\Phi$  співвідношення  $\frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2}$  і припустивши

$$r_2 = r_1 + \delta, \quad \text{де } \delta = \text{const},$$

запишемо

$$\Phi = \frac{r_1^2}{(r_1 + \delta)^2 - r_1^2} = \frac{r_1^2}{r_1^2 + 2r_1\delta + \delta^2 - r_1^2} = \frac{r_1^2}{2r_1\delta + \delta^2}. \quad (1.49)$$

Задаємося діапазоном зміни  $r_1$  і вибираємо  $\delta = 0,005$  м, тоді отримаємо значення  $\Phi = \Phi(r_1)$ :

$r_1, \text{ м}$	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
$\Phi$	0,8	1,78	2,77	3,76	4,76

У відповідності з виразом (1.49) одержуємо залежність, яка наближена до лінійної (рис. 1.14).

Від значення радіуса  $r_1$  аналогічну залежність також мають і величини  $\sigma_z$  та  $\sigma_m$ .

Зробимо висновок, що за цими показниками горлова частина пляшки має великий запас міцності, якщо товщина  $\delta$  буде однаковою.

Наступним етапом дослідження визначимо коліві напруження на довільно вибраній ділянці пляшки з товщиною  $dz$ . З цією величиною зв'язані значення внутрішніх радіусів, які відповідають перерізам на висоті  $z$  і  $z+dz$ . Позначаємо ці радіуси через величини  $r_{1z}$  і  $r'_{1z}$  (див. рис. 1.15). Тоді площа перерізу, яка має

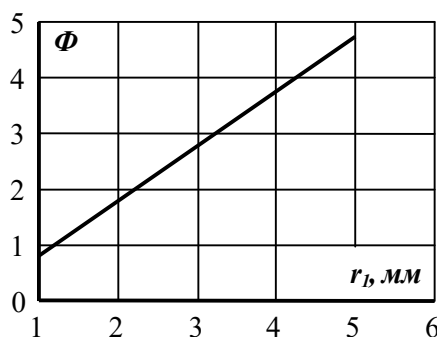


Рис. 1.14. Залежність осьових і меридіональних напружень від внутрішнього радіуса

форму трапеції, дорівнює:

$$F_{\text{трап}} = \frac{1}{2} (2r_{1z} + 2r'_{1z}) dz = (r_{1z} + r'_{1z}) dz. \quad (1.50)$$

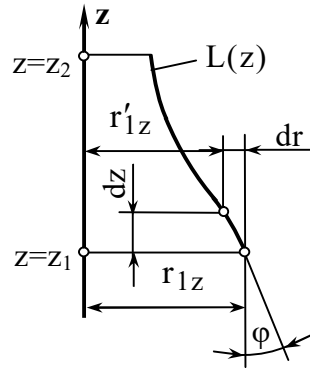


Рис. 1.15. Розрахункова схема визначення колових напружень

Маючи відому форму бічної поверхні і коли крива твірної  $L = L(z)$  лежить у межах від  $z = z_1$  до  $z = z_2$ , маємо вираз:

$$F_{\text{трап}} = 2 \int_{z_1}^{z_2} L(z) dz. \quad (1.51)$$

Також можемо визначити рівнодіючу сил внутрішнього тиску  $R$ , яка діє на половині внутрішньої поверхні пляшки, яка лежить у межах  $z_1$  і  $z_2$ :

$$R = pF_{\text{трап}} = 2p \int_{z_1}^{z_2} L(z) dz, \quad (1.52)$$

і для елементарної ділянки –

$$dR = p(r_{1z} + r'_{1z}) dz. \quad (1.53)$$

За відомого значення  $\varphi$ , маємо:

$$dr = dz \operatorname{tg} \varphi \quad (1.54)$$

$$i \quad r_{1z} = r'_{1z} + dr = r_{1z} + \operatorname{tg} \varphi dz. \quad (1.55)$$

Тоді маємо можливість розрахувати площу, що працює на розрив:

$$F_{\text{розр}} = 2 \frac{dz}{\cos \varphi} \delta. \quad (1.56)$$

Колові напруження на ділянці  $dz$  знайдемо зі співвідношення:

$$\sigma_t = \frac{dR}{dF_{\text{розр}}} = \frac{p(r_{1z} + r'_{1z}) dz}{2 \frac{dz}{\cos \varphi} \delta} = \frac{p(r_{1z} + r'_{1z}) \cos \varphi}{2\delta}. \quad (1.57)$$

З останнього рівняння видно, що зі зменшенням радіуса горловини і колові

напруження зменшуються також. Це доводить висновок: виходячи з умови рівномірності доцільно ставити питання про організацію технології випуску пляшок зі змінною товщиною горлової частини.

Наступним є висновок про те, що для пастеризації продуктів у скляній тарі треба вибирати тип пляшок з меншим діаметром. Це суттєво зменшить виробничі втрати тари і продуктів за інших рівних умов.

Отримані розрахункові співвідношення (1.47), (1.48) та (1.57) дають можливість виконувати розрахунки і будувати епюри напружень по висоті пляшки або інших видів харчової тари відомих форм та розмірів. Загальний вигляд епюр колових, осьових і меридіональних напружень наведено на рис. 1.16.



Рис. 1.16. Ілюстрація до побудови епюр колових, осьових і меридіональних напружень

Метою даного дослідження було визначення параметрів напруженого стану, у т.ч. величин деформацій, оскільки вони пов'язані зі зміною загального об'єму посуду.

Застосовуючи теорію розрахунку товстостінних оболонок, отримано рівняння (1.32), яке визначає зміну зовнішнього та внутрішнього радіусів, які перебувають під впливом внутрішнього тиску. Дана теорія для циліндричної частини пляшки дає вираз:

$$u = \frac{pR^2}{\epsilon h} \left(1 - \frac{\mu}{2}\right), \quad (1.58)$$

де  $R$  – усереднений радіус пляшки;  $h$  – товщина стінки пляшки.

Якщо вважати перехідну поверхню горловини посуду наближеною до конічної (рис. 1.17), можна записати вираз:

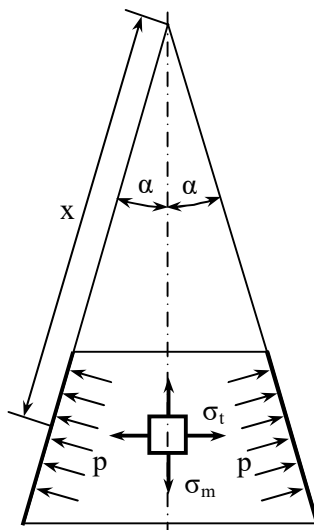


Рис. 1.17. Ілюстрація до визначення деформацій в перехідній частині горловини пляшки

$$u = \frac{3px^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}{4h\varepsilon}. \quad (1.59)$$

Визначимо переміщення  $u$  через величину зміни внутрішнього радіусу циліндричної частини пляшки, використовуючи наступні вихідні дані:  $p = 0,5$  МПа;  $E = 0,55 \cdot 10^{11}$  Па;  $\mu = 0,25$ ;  $R = 0,035$  м;  $h = 0,005$  м.

$$u = \frac{0,5 \cdot 10^6 \cdot 0,032^2}{0,55 \cdot 10^{11} \cdot 0,005} \left( 1 - \frac{0,25}{2} \right) = 1,63 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

Маючи до деформації внутрішній радіус  $r_1 = 0,032$  м, після деформації матимемо:

$$r'_1 = r_1 + u = 0,032 + 1,63 \cdot 10^{-6} = 0,03200163 \text{ м.}$$

Відповідно площа внутрішнього поперечного перерізу посуду складе:

до деформації –  $f_{\text{вн}} = \pi r_1^2 = 3,14 \cdot 0,032^2 = 3,215 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ ;

після деформації –  $f'_{\text{вн}} = \pi (r'_1)^2 = 3,14 \cdot 0,03200163^2 = 3,21569 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ .

Прийнявши висоту циліндричної частини  $0,156$  м, обчислимо об'єм:

до деформації –  $V_{\text{вн}} = 3,215 \cdot 10^{-3} \cdot 0,156 = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ ;

після деформації –  $V'_{\text{вн}} = 3,21569 \cdot 10^{-3} \cdot 0,156 = 0,5016510^{-3} \text{ м}^3$ ,

Тоді об'єм зміниться на величину:

$$\Delta V_{\text{вн}} = V'_{\text{вн}} - V_{\text{вн}} = 0,50165 \cdot 10^{-3} - 0,5 \cdot 10^{-3} = 0,00165 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 = 1,6 \text{ см}^3.$$

Виконаємо подібні розрахунки, використовуючи залежність (1.32).

$$u = \frac{1 - 2 \cdot 0,25 \cdot 0,55 \cdot 10^6 \cdot 0,032^2}{0,55 \cdot 10^{11} \cdot 0,036^2 - 0,32^2} \cdot 0,032 + \frac{1 + 0,25}{0,55 \cdot 10^{11}} \times \\ \times \frac{0,032^2 \cdot 0,036^2}{0,32} \frac{0,55 \cdot 10^6}{0,036^2 - 0,032^2} = 1,411 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Отримані величини зміни внутрішнього радіуса пляшки доводять, що для практичних розрахунків можна використовувати обидві теорії. Але, незважаючи на відносно малу деформацію матеріалу посуду в радіальному напрямку, маємо зміну об'єму, яку треба враховувати, тому що вона має однаковий порядок з об'ємом газової фази. І саме величина цього показника, є визначальною в процесі пастеризації/стерилізації харчової продукції.

### 1.5. Обладнання для пастеризації

Найбільш широке поширення в теперішній час одержали пластинчасті пастеризатори і пастеризаційно-охолоджувальні установки, у яких поверхні, які передають тепло, виконані у вигляді рифлених пластин для збільшення поверхні теплообміну та інтенсифікації процесу. Кожна пластина має чотири отвори: два для входу і виходу теплоносія. Продукт рухається по одній стороні пластини, а теплоносій – по іншій. Робоча частина пластини окантована гумовими прокладками, що при зборі пластин у пакети дозволяють утворити герметично ізольовані плоскі простори, по яких рухається продукт або теплоносій [33].

Недоліком даної конструкції є те, що для санітарно-гігієнічної обробки пластин їх необхідно цілком розбирати і збирати з точною установкою прокладок, а це довгий і трудомісткий процес.

Далі проведемо огляд пастеризаторів виробництва деяких фірм для порівняння їх переваг і недоліків.

1. Тунельний пастеризатор типу РТ-1 застосовується для безперервної пастеризації різних напоїв (пива, соків), що герметично закупорені в скляному

посуді. Максимальні розміри посуду: діаметр 85 мм і висота 350 мм.

Масив посуду з харчовим продуктом надходить в тунель на вхідному транспортері. Транспортер подає масив посуду на похилу плиту, далі – на рухомий стіл. Разом з ним масив повільно переміщується зі сталою швидкістю до вихідної ділянки пастеризатора, з якої він рухається поперечним вихідним транспортером.

Пастеризатор має шість камер: I' – камера, що підігрівається гарячим повітрям; I, II – камери, які підігріваються гарячою технічною водою; III, IV – камери витримки; V, VI – камери, що охолоджуються технічною і холодною водою відповідно.

#### Технічна характеристика пастеризатора РТ-1:

Продуктивність, уп./год.	3000-6500
Максимальна температура, °С	60
Витрата електроенергії, кВт	9,9
Витрата пари, т/год.	0,55
Вага, кг	16000
Габаритні розміри, мм	
довжина	11050
ширина	4135
висота	2000

2. Група пастеризаторів РР. Ці пастеризатори безперервної дії використовують для термообробки продуктів, фасованих у скляні та жерстяні банки.

Процес пастеризації проходить в занурювальній або зрошувальній системі. Охолодження в пастеризаторах виконують за допомогою насосів в протитоці.

В залежності від необхідної часу процесу пастеризації продуктивність цієї групи пристроїв змінюється в широких межах. Їх конструкція проста і легко встановлюються в технологічних лініях фасування продукції різних виробництв.

### Технічні характеристики пастеризаторів PF:

пастеризатори з занурювальною системою: PF 01, PF 02, PF 03;

пастеризатори зі зрошувальною системою: PF 04, PF 05, PF 06, PF 07;

Максимальна температура, °C	95
Витрата пари, кг/год.	600-1300
Вага, кг	5850-11750
Габаритні розміри, мм	13920×2700×1500
Загальна потужність електродвигунів, кВт	6,6-9,6

3. Двоюрисний пастеризатор ДПС. Тунельний зрошувальний пастеризатор безперервної дії. Використовують для пастеризації напоїв до температури 70 °C для всіх видів тари і упаковки. Зручна збірна/розбірна конструкція пастеризатора дозволяє його збирати за індивідуальними потребами виробника.

Перевагами даного обладнання є:

- 1) деталі конструкції виготовлені з нержавіючої сталі;
- 2) має три зони підігріву, дві зони пастеризації та три зони охолодження;
- 3) система автоматичної регуляції температури;
- 4) система рекуперації теплової енергії між попереднім підігріванням і охолодженням;
- 5) має термоізоляцію.
- 6) пастеризатор можна використовувати в якості охолоджувача або підігрівача.

4. Пастеризаційний монітор-термограф PU 1000 фірми STIL Instruments – для моніторингу ефективності процесу пастеризації, а також налаштування і відстеження термічного впливу.

Устаткування записує показання за допомогою двох датчиків температури; при підключенні до програмного забезпечення видає графіки пастеризації; зручний при ручному перенесенні та встановлення продуктів виробництва при вимірюванні. Може застосовуватись для контролю температури як в пастериза-

ційних установках, так і у виробничих приміщеннях, охолоджувальних камерах.

### **1.6. Задачі досліджень**

Для умови максимального завантаження транспортної системи пастеризатора виконати дослідження динаміки формування дворядного масиву пляшок.

Дослідити процеси затороутворення при перебудові пастеризованих пляшок з напоєм з транспортної системи пастеризатора на відвідний конвеєр.

Передбачити у конструкції пастеризатора – сучасну схему душіювання виробів, внести корективу у систему завантаження з метою збільшення продуктивності обладнання, забезпечити у конструкції пристрою заходу по унеможливленню утворення заторів.

## Розділ 2. ОПИС ЗАПРОПОНОВАНОГО ПРИСТРОЮ ТА ПРИНЦИП ФУНКЦІОНУВАННЯ ТУНЕЛЬНОГО ПАСТЕРИЗАТОРА ПЛЯШОК

### 2.1. Опис запропонованого пристрою

Згідно із поставленими завданнями проекту виконано наступні задачі:

- модернізовано теплотехнічну, гідравлічну та завантажувальну системи пастеризатора для підвищення пропускної здатності і з метою усунення недоліків даного типу обладнання.

У попередньому розділі було з'ясовано, що у матеріалі скляних виробів при зрошуванні та теплопередаванні виникає термічний опір, який в технічних джерелах описують коефіцієнтами тепловіддачі  $\alpha_1$  та  $\alpha_2$ , коефіцієнтом теплопровідності скла  $\lambda$  та товщиною стінки скляного виробу.

Порівнюючи ці опори можна зробити наступні висновки: по-перше, визначальне значення для розрахунків має величина  $\alpha_2$ , і, по-друге – впливати на цей показник практично не можливо. Тому стає зрозумілим, що необхідно якомога повніше використовувати резерви, якщо варіювати величиною коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_1$ . Також можливим рішенням проблеми вбачається зменшення товщини стінки склотари, тоді коли це можливо.

Вплинути на коефіцієнт  $\alpha_1$  на практиці можливо збільшуючи рівень зрошування/душювання, тому у роботі пропонується ще одна пропозиція: збільшення продуктивності насосів системи зрошування/душювання завдяки використанню частотних перетворювачів в системі живлення асинхронних електродвигунів для можливості плавно збільшувати частоту і амплітуду напруги. Таке зростання повинно враховувати синхронізацію з системою енергетичного забезпечення нагрівачів, встановлених у зонах нагрівання.

Зростання рівня зрошування має привести до інтенсифікації теплообміну у тому числі і за рахунок збільшення температурного напору, що дозволить скоротити час нагрівання і охолодження виробів. Також це пришвидшить транспортування виробів через пастеризатор.

Для поліпшення конструкції пастеризатора пропонується встановити механічний варіатор, який забезпечить можливість безступінчатого варіювання швидкістю руху транспортної системи.

Реконструкція вузла завантаження забезпечить рівномірне розташування пляшок на транспортній системі, що матиме наслідком також підвищення продуктивності та більш ритмічну роботу лінії.

## **2.2. Принцип функціонування тунельного пастеризатора**

Схема принципова роботи тунельного пастеризатора наведена на рис. 2.1.

Пастеризатор складається з наступних вузлів: рами розбірної, завантажувальної системи, транспортної системи, розвантажувальної системи, гідротеплотехнічної системи та системи керування технологічним процесом.

Завантажувальна система складається з дворядного пластинчастого конвеєра 1, який має бічні напрямні 2, приводу 3, перевантажувального механізму 4 та перехідного містку 5.

Основна транспортна система включає два ланцюгових конвеєри 6 з настилом 7 і привод 8.

Розвантажувальна система складається з перехідного містка 9, трирядного пластинчастого конвеєру 10, який теж має бічні напрямні 11.

Гідротеплотехнічна система зрошувального типу у своєму складі має ванни 12 в семи зонах, насоси 13, всмоктуючу і напорну частини магістралей, запірну арматуру, водороздільні колектори 14 з форсунками 15 та теплообмінні агрегати T01, T02, T03 та T04.

Система керування технологічним процесом складається з двох частин. Перша – це керування гідротепловими режимами (витратами пари і теплоносія), а друга частина відповідає за забезпечення оптимального завантаження транспортних систем пастеризатора і беззаторного його розвантаження.

Керування тепловими процесами можливе завдяки приводним засувкам на ділянці подавання пари по сигналу датчиків температури у напірній магістралі теплоносія. Дозування теплоносія у кожній з семи зон пастеризатора

забезпечують засувки. За необхідні режими душіювання/зрошування відповідають насоси.

Керувати завантажувальною системою можливо використовуючи датчики присутності сформованого дворядного масиву посуду і датчики присутності вільної зони на основній транспортній системі пристрою. Датчик в системі керування забезпечує умови формування наступного масиву посуду. Контроль за беззаторним розформуванням масиву посуду на ділянці розвантаження транспортера також здійснює датчик.

Конструкція пастеризатора дозволяє працювати у двох різних режимах: у режимі завантаження пляшок та в усталеному режим. Така можливість закладена для дотримання різниці між температурами теплоносія та оброблюваними виробами.

Робота пастеризатора відбувається наступним чином. Вироби, що підлягають пастеризації, конвеєрним транспортером подаються на дворядний пластинчастий транспортер 1, на якому формується дворядний масив виробів з шаховим розташуванням. По закінченні формування масиву спрацьовує датчик і подає команду на зупинку транспортера 1 й одночасне включення перевантажувального механізму 4. За один цикл механізм 4 виконує робочий та холостий хід і займає вихідну позицію. Датчик подає команду на зупинку електродвигуна перевантажувача 4 і на пуск електроприводу пластинчастого транспортера 1. Під час робочого ходу перевантажувального механізму масив виробів передається на основну транспортну систему пастеризатора через перехідний місток 5. Під час наступного циклу роботи формується черговий дворядний масив виробів. Датчик фіксує наявність вільної зони, спрацьовує і відбувається наступне перевантаження пляшок. По основній транспортній системі пляшки послідовно проходять усі 7 зон теплового оброблення, далі через перехідний місток 9 поступають на трьохрядний пластинчастий конвеєр 10, з якого відводяться цеховим конвеєром на наступні технологічні етапи.

Задані температурні режими пастеризації пляшок забезпечує регулюван-

ня температури теплоносія та дозованого подавання гарячої пари в теплообмінні апарати обладнання.

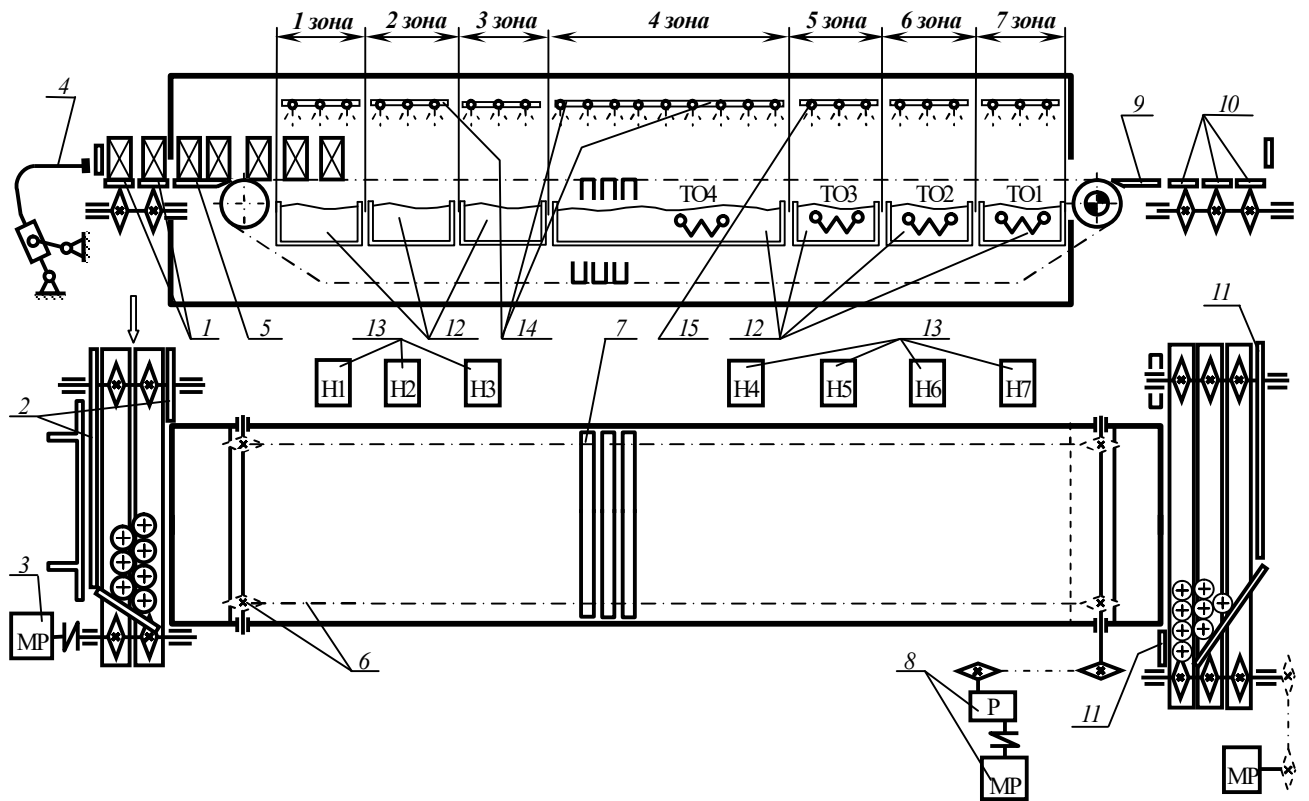


Рис. 2.1. Схема функціонування пастеризатора тунельного типу

### Розділ 3. НАУКОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ПРОЦЕСІВ РОЗФОРМУВАННЯ І ФОРМУВАННЯ МАСИВІВ ВИРОБІВ

#### 3.1. Дослідження динаміки формування дворядного масиву пляшок

З літературних джерел відомо, що при значній кількості пляшок на приймальній площині найефективнішим є розкладка з кутом  $60^\circ$ . Тому в даному проєкті у конструкції пастеризатора заплановано пристрій для формування детермінованого масиву виробів з вказаним кутом і подальші дослідження присвячено розрахунку формуючого пристрою.

Формуючий пристрій складається з конвеєра 1, яким вироби подаються, здвоєного конвеєра 2 для формування двох рядів пляшок, упора 3 з пружиною 4, штовхача 5, обмежувальної планки 6, нерухомої приймальної площини 7, обмежувальної контурної планки 8 та елементу системи керування (рис. 3.1).

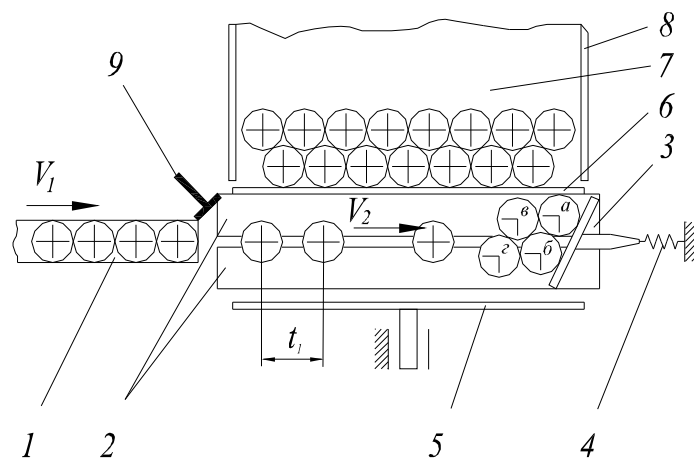


Рис. 3.1. Схема формуючого пристрою пастеризатора

Конвеєр 1 підводить вироби безперервним потоком і далі подає їх на здвоєний конвеєр 2. Швидкість елементів здвоєного конвеєра 2, на якому рухаються пляшки, вища за швидкість елементів конвеєра 1, що їх подає, тому в процесі транспортування вироби на ньому розміщуються з деяким кроком  $t_1$ . Перша пляшка торкається упора 3, і після взаємодії з ним займає положення "а", друга пляшка, контактуючи з першою, займає положення "б", третя, взаємодіючи з другою – положення "в" і так далі.

Після формування двох рядів виробів з певною розкладкою, перетворювач системи керування 9 зупиняє конвеєри 1 та 2 з одночасною командою спрацювання штовхача 5 й прибирання обмежувальної планки 6. Розмір ходу штовхача планово перебільшує ширину двох отриманих рядів. Перетворювач 9 після завершення зворотного ходу штовхача 5, подає сигнал і цикл формування наступного масиву повторюється.

Процесу формування двох рядів виробів буде забезпеченим, якщо час позиціонування кожної пляшки з початку взаємодії з упором або з попередньою пляшкою не повинна перевищувати інтервал надходження пляшок на конвеєр 2, тобто

$$t_{\text{поз}} \leq t_0,$$

де  $t_0 = d/V_1$ , де  $d$  – діаметри пляшки;  $V_1$  – швидкість елемента, на якому знаходиться пляшка.

### 3.2. Причини виникнення затороутворення виробів

Утворення заторів з виробів, яке стосується транспортних потоків, відбувається під час контактування виробів з елементами стояка. При затороутворенні складається рівність рушійної сили та сили опору, які діють на масив виробів. Можливий і протилежний варіант – переважання сили опору над рушійною. В деяких випадках збільшення рушійної сили приводить до виконання умови

$$P_{\text{руш}} > P_{\text{оп}}, \quad (3.1)$$

де  $P_{\text{руш}}$  та  $P_{\text{оп}}$  – сила рушійна та сила опору відповідно, при яких затор зникає або можливо вважати його тимчасовим. Наприклад до тимчасового затору можна віднести випадок, коли масив виробів на перехідному містку, що з'єднує два транспортери обмежена, і сила тертя, яка виступає як сила опору, також буде обмеженою.

Проте мають місце випадки утворення постійних заторів, коли збільшен-

ням сили рушійної подолати його не вдається. На рис. 3.2 наведено розрахункову схему цього випадку. Для початку розглянемо випадок, коли опорна площина виробу I нерухома, а сам він затиснутий між бічною напрямною та виробом II і тому єдиним можливим переміщенням для нього є рух вздовж осі  $OX$ .

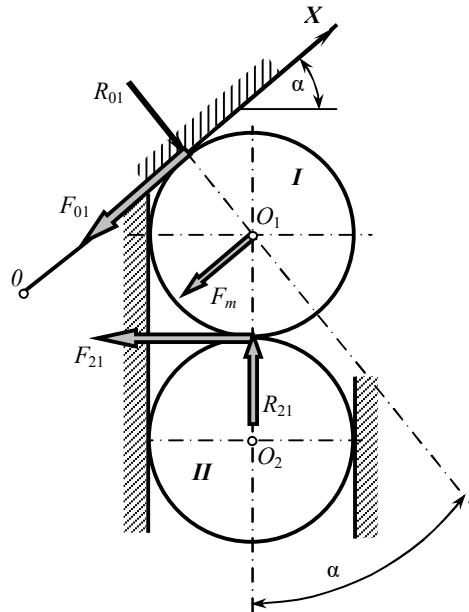


Рис. 3.2. Схема для розрахунку виникнення постійного затору

Рушійна сила дорівнює:

$$P_{\text{руш}} = R_{21} \sin \alpha, \quad (3.2)$$

і сила опору складає:

$$P_{\text{он}} = F_{01} + F_m + F_{21} \cos \alpha, \quad (3.3)$$

де  $F_{01}$  – сила тертя пляшки по бічній напрямній;  $F_m$  – сила тертя пляшки по опорній площині;  $F_{21}$  – сила тертя між пляшками.

З точки зору руйнування затору відносно положення пляшок і векторів сил є найгіршим з існуючих варіантів. У цьому випадку виникненню затору відповідає нерівність:

$$R_{21} \sin \alpha \geq F_{01} + F_m + F_{21} \cos \alpha. \quad (3.4)$$

Якщо

$$F_{01} = R_{01} f; \quad F_m = f_0 mg; \quad F_{21} = f_c R_{21}. \quad (3.5)$$

де  $f$ ,  $f_0$  та  $f_c$  – коефіцієнти тертя в парах «пляшки – бічна напрямна», «пляшки –

опорна площа»;  $m$  – маса виробу;  $g$  – прискорення вільного падіння.

Після відповідних розрахунків одержуємо:

$$R_{21} \geq \frac{f_0 mg}{(1 - ff_c) \sin \alpha - (f + f_c) \cos \alpha}. \quad (3.6)$$

Вираз (3.6) існує за умови  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ , тобто, що, коли знаменник цього виразу дорівнює нулю, то виникне постійний затор, і  $R_{21} \rightarrow \infty$ .

Прирівняємо знаменник до нуля і одержимо критичне значення кута:

$$\alpha_{кр} = \arctg \frac{f_c + f}{1 - ff_c}. \quad (3.7)$$

Як бачимо, він залежить від співвідношення коефіцієнтів тертя  $f$  та  $f_c$ .

Розглянемо випадок переміщення пляшки рухомою площиною. Такий випадок можна вважати одним з найгірших, тому що результуюча сил тертя з площиною  $F_m$  має напрям протилежний напрямку переміщення. Доведемо це. Нехай вантаж знаходиться на рухомій опорній площині, вектор швидкості  $V_{o.n.}$  якої має певні величину та напрям (рис. 3.3). Тоді за відомої абсолютної швидкості вантажу  $\bar{V}_A$  положення та величини вектора відносної швидкості знайдемо з рівняння:

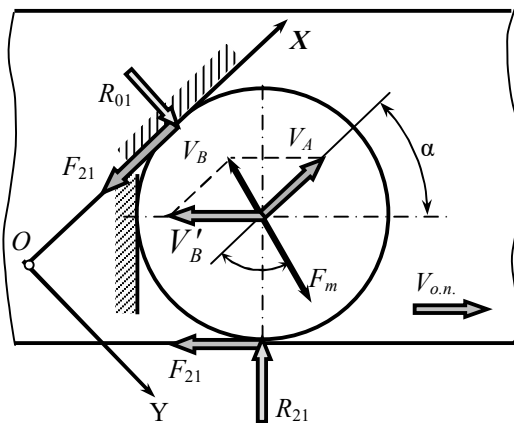


Рис. 3.3. Розрахункова схема до випадку з рухомою опорною площиною та утворенням затору

$$\bar{V}_B = \bar{V}_B + \bar{V}_A. \quad (3.8)$$

Результуюча сил тертя пляшки по опорній площині у даному випадку буде направлена у бік, протилежний розташуванню вектора відносної швидкості

ті  $\bar{V}_B$ . Тоді проекція  $F'_m$  на вісь  $OX$  визначимо з виразу:

$$F'_m = F_m \cos \beta, \quad (3.9)$$

де  $\beta$  – кут між векторами швидкості  $\bar{V}_A$  та  $\bar{V}_B$ .

Зі зменшенням кута  $\beta$  (при зменшенні величини  $V_A$ )  $F'_m$  також зменшиться до 0, коли лінія дії векторів  $\bar{V}_B$  і  $\bar{F}_m$  перпендикулярна до напрямної. За подальшого зменшення  $\beta$  складова  $F'_m$  із сили опору перетвориться на рушійну силу. Тому умову (3.4) прийме вигляд:

$$R_{21} \sin \alpha \geq F_{01} + F_{21} \cos \alpha - f_0 mg \cos(180^\circ - \beta). \quad (3.10)$$

Проте початку переміщення пляшки відповідає умова  $V_A = 0$ , тобто

$$R_{21} \sin \alpha \geq F_{01} + F_{21} \cos \alpha + f_0 mg \cos \alpha. \quad (3.11)$$

Значення сили  $R_{01}$  знаходимо з умови рівноваги вантажів, записавши:

$$\begin{aligned} \sum Y &= R_{01} - F_{21} \sin \alpha - R_{21} \cos \alpha + f_0 mg \cos(90^\circ - \alpha) = \\ &= R_{01} - F_{21} \sin \alpha - R_{21} \cos \alpha + f_0 mf \sin \alpha = 0. \\ R_{01} &= R_{21} (f_0 \sin \alpha + \cos \alpha) - f_0 mg \sin \alpha. \end{aligned}$$

$$R_{21} \sin \alpha \geq f R_{21} (f_0 \sin \alpha + \cos \alpha) - f f_0 mg \sin \alpha + f_c R_{21} \cos \alpha - f_0 mg \cos \alpha; \quad (3.12)$$

$$R_{21} \geq \frac{f_0 mg (\cos \alpha - f \sin \alpha)}{(1 - f f_c) \sin \alpha - (f + f_c) \cos \alpha}. \quad (3.13)$$

Порівняємо отримані результати з виразом (3.6). У другому випадку бачимо зменшення сили  $R_{21}$ , за інших однакових умов. Але присутність опорної рухомої площини не має впливати на критичне значення кута  $\alpha_{кр}$ . У результаті опорна рухома площина зменшує загальний опір переміщенню пляшок вздовж напрямної, і лише коли швидкість  $V_{оп}$  має напрям протилежний переміщенню, загальний опір збігатиметься з опором у випадку нерухомої опорної площини.

Числові значення  $\alpha_{кр}$  залишаються однаковими при рухомій та нерухомій опорних площинах.

В табл. 3.1 наведено результати розрахунків, і вони вказують на великий діапазон змін  $\alpha_{кр}$ , який знаходиться у межах змін коефіцієнтів  $f$  та  $f_c$ . Вказані результати приводять до висновку: виконання опорної площини рухомою,

незалежно від швидкості та напрямку її переміщення, не впливає на величину кута  $\alpha_{кр}$ , і тому даний спосіб впливу не може розв'язати задачу руйнування затору.

Аналіз отриманих математичних формалізацій також дозволяє назвати головні чинники, що викликають затори: до них треба віднести сили  $F_{01}$ ,  $F_m$  та  $F_{21}$ . У той же час складова  $F_{21}$  може не виникати, хоча й буде можливість короточасного переміщення пляшки 2 (при відслідковуванні руху пляшки 1). За рахунок приведення в рух опорної площини силу тертя  $F_m$  можна перетворити на рушійну силу. Також силу тертя пляшки з бічною напрямною  $F_{01}$  можна перетворити на рушійну силу завдяки, наприклад, зворотно-поступальному руху напрямної хоча б на деякий час.

### *Моделювання процесу затороутворення для випадку рухомої бічної напрямної*

Припустимо, що конструкція бічної напрямної має можливість рухатися у зворотно-поступального напрямі паралельно осі  $OX$ . Розглянемо два випадки: пляшки розташовані на рухомій та на нерухомій опорній площині.

Випадок нерухомої опорної площини. Розрахункова схема даного випадку наведена на рис. 3.4. Як бачимо на схемі задано напрям переміщення бічної напрямної зі швидкістю  $V_n$ . Оскільки пляшка I відносно напрямної перемі-

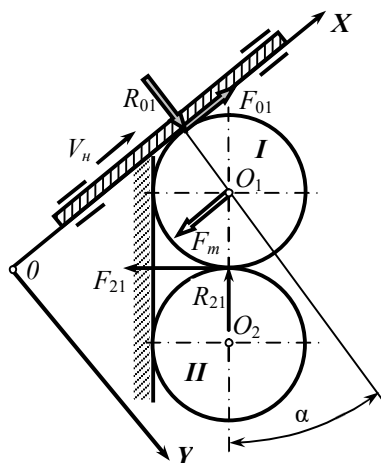


Рис. 3.4. Розрахункова схема до випадку з рухомою напрямною та нерухомою опорною площиною

щується у зворотному напрямі, то сила тертя  $F_{01}$  збігається з напрямом швидкості  $V_n$ . Припущення найгірші умови: будемо вважати, що пляшка І має плоскопаралельний рух вповодж осі  $OX$ . Рушійні сили мають складові  $R_{21}$  та  $F_{01}$ , а сили опору –  $F_{21}$  та  $F_m$ .

Пляшка І почне переміщення за умови:

$$R_{21} \sin \alpha + F_{01} \geq F_m + F_{21} \cos \alpha . \quad (3.15)$$

Щоб розрахувати сили тертя  $F_{01} = fR_{01}$  треба знайти нормальну складову реакції бічної напрямної  $R_{01}$  з умови рівноваги:

$$\sum Y = R_{01} - R_{21} \cos \alpha - f_c R_{21} \sin \alpha = 0 ; \quad (3.16)$$

$$R_{01} = R_{21} (\cos \alpha + f_c \sin \alpha) ; \quad (3.17)$$

$$F_{01} = f R_{21} (\cos \alpha + f_c \sin \alpha) .$$

Виводимо:

$$R_{21} \sin \alpha + f R_{21} (\cos \alpha + f \sin \alpha) \geq f_o mg + f_c R_{21} \cos \alpha ;$$

$$R_{21} \geq \frac{f_o mg}{\sin \alpha + f \cos \alpha + f f_c \sin \alpha - f_c \cos \alpha} = \frac{f_o mg}{(1 + f f_c) \sin \alpha + (f - f_c) \cos \alpha} . \quad (3.18)$$

Суцільному затору відповідає умова:

$$(1 + f f_c) \sin \alpha + (f - f_c) \cos \alpha = 0 . \quad (3.19)$$

Рівність (3.19) можлива лише за умови, якщо  $f_c > f$ . Тоді друга складова стане від'ємною:

$$\alpha_{кр} = \arctg \frac{f_c - f}{1 + f f_c} . \quad (3.20)$$

Значення критичних кутів за різних співвідношень  $f$  та  $f_c$  наведено у табл. 3.2 та на рис. 3.5.

Таким чином, умова не утворення заторів буде мати вид:

$$\alpha_{min} > \alpha_{кр} . \quad (3.21)$$

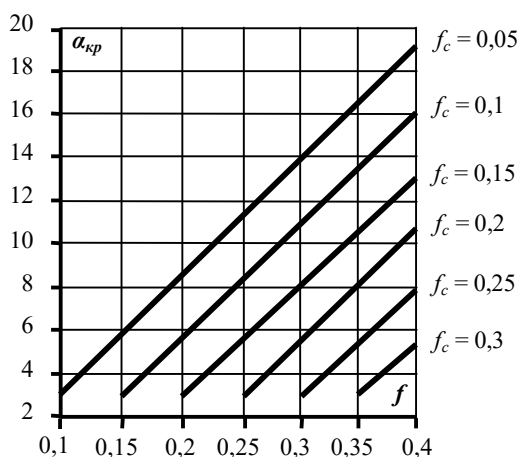


Рис. 3.5. Графіки залежності кута  $\alpha_{кр}$  від величин  $f$  та  $f_c$

Таблиця 3.2. *Значення критичних кутів встановлення напрямної  $\alpha_{кр}$* 

$f_c \backslash f$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
0,05	2,85	5,67	8,45	11,18	13,84	16,44	18,95
0,10	-	2,82	5,60	8,33	10,99	13,59	16,10
0,15	-	-	2,78	5,51	8,17	10,76	13,27
0,20	-	-	-	2,73	5,39	7,98	10,50
0,25	-	-	-	-	2,66	5,26	7,77
0,30	-	-	-	-	-	2,59	5,10
0,35	-	-	-	-	-	-	2,51
0,40	-	-	-	-	-	-	-

Проектування транспортуючого обладнання зазвичай супроводжується пошуком параметрів системи, які б могли забезпечити відсутність будь-яких заторів пляшок і таким незалежним параметром впливу є коефіцієнт тертя  $f$ .

Розв'язок рівняння (3.19) відносно коефіцієнту  $f$  дозволяє записати:

$$f \geq \frac{f_c \cos \alpha - \sin \alpha}{f_c \sin \alpha + \cos \alpha}. \quad (3.22)$$

Коефіцієнтом тертя  $f$  у парі «пляшка – пляшка», не можливо варіювати, а кут  $\alpha$  розташування напрямної визначається конструктивно, то отримання поставленої задачі можна здійснити певним вибором матеріалу, з якого виготовляють напрямну для одержання необхідного  $f$ . Критичне значення коефіцієнта  $f_{кр}$  знайдемо з рівняння:

$$f_{кр} = \frac{f_c \cos \alpha - \sin \alpha}{f_c \sin \alpha + \cos \alpha}. \quad (3.23)$$

В табл. 3.3 та на рис. 3.6 наведено дані для визначення  $f_{кр}$ .

Таблиця 3.3. *Значення критичних коефіцієнтів тертя  $f_{кр}$* 

$\alpha$ , град. $\backslash f_c$	6	8	10	12	14	16	18	20
0,15	0,044	0,009	-	-	-	-	-	-
0,20	0,093	0,058	0,023	-	-	-	-	-
0,25	0,141	0,106	0,071	0,036	0,001	-	-	-
0,30	0,189	0,153	0,118	0,082	0,047	0,012	-	-
0,35	0,236	0,199	0,164	0,128	0,093	0,058	0,023	-
0,40	0,283	0,246	0,209	0,173	0,137	0,102	0,067	0,032

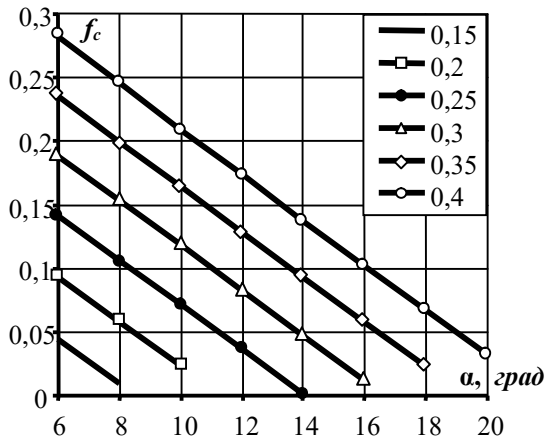


Рис. 3.6. Графічні залежності для визначення критичного значення коефіцієнта  $f_{кр}$

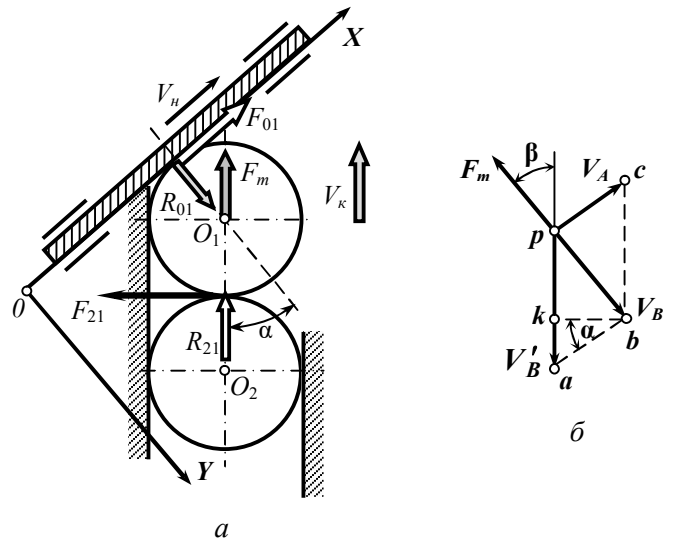


Рис. 3.7. Розрахункова схема до випадку рухомої опорної площини (а) та план швидкостей (б)

Випадок рухомої опорної площини. Опорна площина з можливістю руху змінює положення результуючої сил тертя (рис. 3.7). У загальному випадку положення вектора  $\bar{F}_m$  визначаємо з плану швидкості, оскільки він має напрям протилежний вектору відносної швидкості  $\bar{V}_B$ :

$$\bar{V}_B = \bar{V}'_B + \bar{V}_A \quad (3.24)$$

і кут  $\beta$  можливо розрахувати із співвідношення величин  $V'_B$  та  $V_A$ .

З плану швидкостей маємо:

$$ak = V_A \sin \alpha; \quad kb = V_A \cos \alpha; \quad pk = V'_B - V_A \sin \alpha.$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{kb}{pk} = \frac{V_A \cos \alpha}{V'_B - V_A \sin \alpha}. \quad (3.25)$$

Тоді витікає висновок про те, що збільшення складової  $V_A$  тягне за собою й збільшення кута  $\beta$  та більший поворот  $\bar{F}_m$ . Розкладемо силу тертя  $F_m$  на напрямки вибраної системи координат і з цією метою звернемося до схеми на рис. 3.8. З неї видно:

$$\angle mpn = 90 - (\beta + 90 - \alpha) = \alpha - \beta. \quad (3.26)$$

Тоді

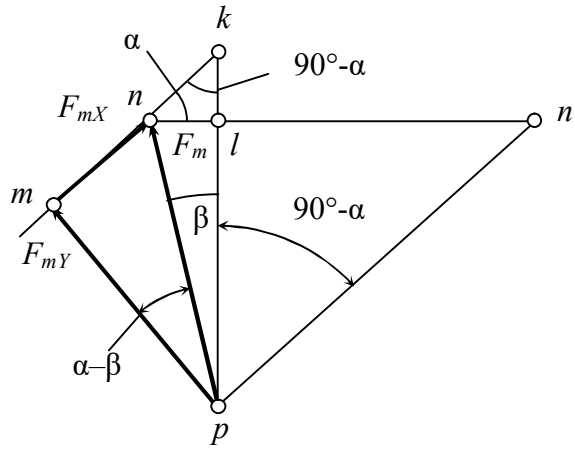


Рис. 3.8. Розрахункова схема для визначення проєкцій  $F_m$  на осі вибраної системи координат

$$F_{m_x} = F_m \sin(\alpha - \beta); \quad F_{m_y} = -F_m \cos(\alpha - \beta). \quad (3.27)$$

Проекція  $F_m$  на вісь  $OX$  безпосередньо є силою рушійною, а проекція на вісь  $OY$ , впливаючи на величину  $R_{01}$ , також збільшує значення рушійної сили.

Оскільки кут  $\beta$  входить у вирази по визначенню проекції результуючої сили тертя  $F_m$ , то відповідно виразу (3.25) можна розрахувати взаємовплив між силовими, кінематичними та геометричними параметрами.

$$F_{m_x} = F_m \sin\left(\alpha - \arctg \frac{V_A \cos \alpha}{V'_B - V_A \sin \alpha}\right); \quad (3.28)$$

$$F_{m_y} = -F_m \cos\left(\alpha - \arctg \frac{V_A \cos \alpha}{V'_B - V_A \sin \alpha}\right). \quad (3.29)$$

Рівняння не утворення затору пляшок набуває вигляду:

$$R_{21} \sin \alpha + F_{01} + F_{m_x} \geq F_{21} \cos \alpha. \quad (3.30)$$

Визначимо нормальну складову реакції  $R_{01}$  бічної напрямної:

$$\sum Y = R_{01} - R_{21} \cos \alpha - f_c R_{21} \sin \alpha - F_{m_y} = 0; \quad (3.31)$$

$$R_{01} = R_{21} (\cos \alpha + f_c \sin \alpha) + F_{m_y}. \quad (3.32)$$

$$R_{21} \sin \alpha + f R_{21} (\cos \alpha + f_c \sin \alpha) + F_{m_x} \geq F_{21} \cos \alpha; \quad (3.33)$$

Звідси маємо:

$$R_{21} \geq \frac{F_{mX}}{(f_c - f)\cos\alpha - (1 + ff_c)\sin\alpha} = \frac{F_m \sin\left(\alpha - \arctg \frac{V_A \cos\alpha}{V'_B - V_A \sin\alpha}\right)}{(f_c - f)\cos\alpha - (1 + ff_c)\sin\alpha}. \quad (3.34)$$

На початок руху пляшки  $V_A = 0$ , тобто

$$R_{21} \geq \frac{F_m \sin\alpha}{(f_c - f)\cos\alpha - (1 + ff_c)\sin\alpha}. \quad (3.35)$$

Умові виникнення постійного затору і в цьому випадку відповідає вираз аналогічний (3.20), хоча наявність рухомої опорної площини зменшує рушійну силу  $R_{21}$ .

Маючи результати розрахунків, наведені в табл. 3.2 та 3.3 підкреслимо, що правильним підбиранням геометричних параметрів і забезпеченням певних значень коефіцієнтів тертя  $f$ , можна гарантовано забезпечувати відсутність або неутворення заторів пляшок.

### *Аналіз процесу затороутворення при розформуванні недетермінованих масивів з пляшок*

Розформування масивів пляшок здійснюють на спеціальних пристроях, на яких багаторядний недетермінований потік виробів необхідно перетворити на однорядний.

Конструктивно пристрій виконують як багатопотоковий конвеєр, а саме

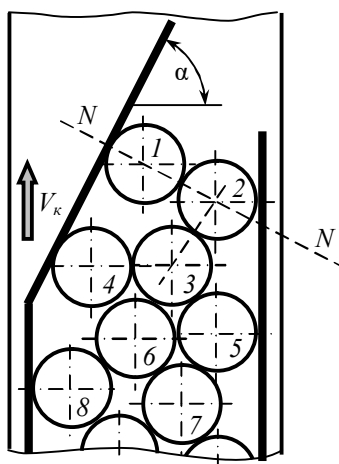


Рис. 3.9. Схема для пояснення затороутворення пляшок

перебудова потоку здійснюється під час взаємодії пляшок з бічною напрямною і опорною площиною.

При нерухомій бічній напрямній вирішення проблем шукали виходячи з певної геометрії пристрою та в максимальному обмеженні кута  $\alpha$ :

$$\alpha \geq [\alpha].$$

Проте пошук у цьому напрямку не отримав успіху, що, власне, можливо бу-

ло передбачити. Розкриємо причини цього більш докладніше.

Зробимо припущення, що на площині пристрою для розформування виробів знаходиться певний масив пляшок з номерами 1-8 (рис. 3.9). Виникнення затору найвірогідніше відбудеться при взаємодії виробів 1 і 2 з бічними напрямними. Положення лінії, що проходить через центри виробів N-N збігається з положенням реакції  $R_{21}$ , яка з силою тертя  $F_m$  виступають як рушійні сили. Якщо ж лінія N-N лежить у межах кута тертя у парі, утвореній виробом 1 з бічною напрямною, то затор, звісно, відбудеться. І яке б значення не мав кут  $\alpha$ , взаємне положення виробів 1 і 2 та їх лінії центрів можливе в якомусь іншому місці. Тобто затороутворення пляшок залишається можливим, яке б велике значення

не мав кут  $\alpha$ .

Встановимо взаємозв'язок між силовими і геометричними параметрами, іншими словами визначимо умови, за яких утворення затору відбудеться.

Припустимо, що швидкість руху пляшок  $V_A$  вздовж напрямної планки дорівнює 0 (рис. 3.10). Тоді вектор результуючої сил тертя  $F_m$  за напрямом збігається з вектором швидкості  $V_k$ .

Зі схеми видно, що рушійними силами у даному випадку є  $R_{21}\cos\gamma$  та  $F_m\sin\alpha$ , а силами опору –  $F_{21}\sin\gamma =$

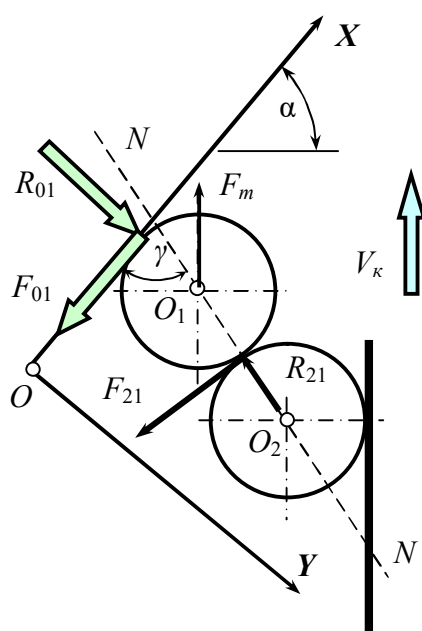


Рис. 3.10. Схема для визначення умов утворення заторів пляшок

$f_c R_{21}\sin\gamma$  та  $F_{01}$ .

Знайдемо реакцію бічної напрямної  $R_{01}$  з умови рівноваги пляшки 1: це сума сил в проекції на вісь  $OY$ :

$$\sum Y = R_{01} - F_m \cos\alpha - R_{21} \sin\gamma - F_{21} \cos\gamma = 0, \quad (3.36)$$

звідки маємо:

$$R_{01} = F_m \cos\alpha + R_{21} \sin\gamma + f_c R_{21} \cos\gamma. \quad (3.37)$$

Умова відсутності затору прийме вигляд:

$$R_{21} \cos \gamma + F_m \sin \alpha \geq f_c R_{21} \sin \gamma + f(F_m \cos \alpha + R_{21} \sin \gamma + f_c R_{21} \cos \gamma);$$

$$R_{21} \cos \gamma - f_c R_{21} \sin \gamma - f R_{21} \sin \gamma - f f_c R_{21} \cos \gamma \geq F_m \sin \alpha + f F_m \cos \alpha;$$

Звідки реакція бічної напрямної  $R_{01}$  дорівнює:

$$R_{21} \geq \frac{F_m \sin \alpha + f F_m \cos \alpha}{\cos \gamma - f_c \sin \gamma - f \sin \gamma - f f_c \cos \gamma} \geq \frac{F_m \sin \alpha + f F_m \cos \alpha}{(1 - f f_c) \cos \gamma - (f_c + f) \sin \gamma}. \quad (3.38)$$

З рівняння (3.38) виводимо:

$$\gamma_{кр} = \arctg \frac{1 - f f_c}{f_c + f}. \quad (3.39)$$

Шукана умова не утворення затору прийме вид:

$$\gamma < \gamma_{кр}. \quad (3.40)$$

Як бачимо з рівняння (3.39) чим більші значення коефіцієнтів тертя  $f_c$  та  $f$ , тим менше значення  $\gamma_{кр}$ . Результати розрахунків по кута  $\gamma_{кр}$  наведено у табл. 3.4 і графічно на рис. 3.11.

Таблиця 3.4. *Значення кута  $\gamma_{кр}$*

$f \backslash f_c$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
0,10	1,37	1,32	1,27	1,23	1,18	1,13	1,09
0,15	1,32	1,27	1,22	1,18	1,13	1,09	1,04
0,20	1,27	1,22	1,18	1,13	1,08	1,04	0,99
0,25	1,23	1,18	1,13	1,08	1,03	0,99	0,95
0,30	1,18	1,13	1,08	1,03	0,99	0,94	0,90
0,35	1,13	1,09	1,04	0,99	0,94	0,90	0,85
0,40	1,09	1,04	0,99	0,95	0,90	0,85	0,81

Оскільки на опорній площині розформувального пристрою проходять недетерміновані процеси, то це надає можливість такого позиціонування пляшок, при якому рівняння (3.40) не буде виконуватися, що призводить до неминучості утворення заторів пляшок.

Розглянемо випадок руху виробів з рухомою бічною напрямною. Тут сила тертя  $F_{01}$  перетвориться на рушійну, а умова відсутності утворення заторів пляшок матиме вигляд:

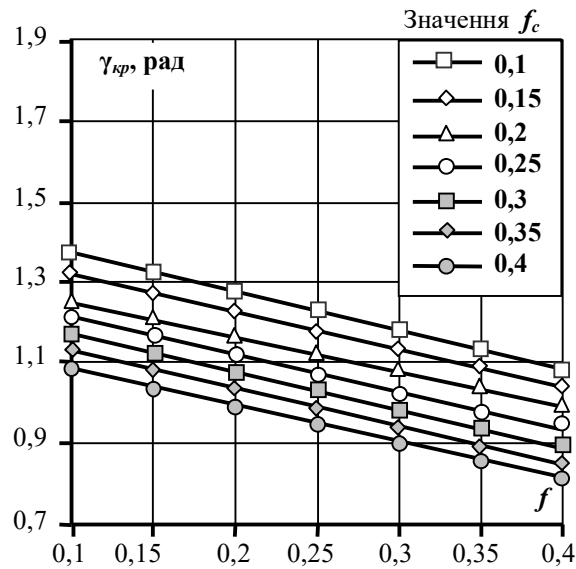


Рис. 3.11. Графіки залежності критичних кутів  $\gamma_{кр}$  від коефіцієнтів тертя  $f$  та  $f_c$

$$R_{21} \cos \gamma + F_m \sin \alpha + f(F \cos \alpha + R_{21} \sin \gamma + f_c R_{21} \cos \gamma) \geq f_c R_{21} \sin \gamma; \quad (3.41)$$

$$R_{21}(\cos \gamma + f \sin \gamma + ff_c \cos \gamma - f_c \sin \gamma) \geq -F_m \sin \alpha - fF_m \cos \alpha;$$

$$R_{21} \geq \frac{F_m (\sin \alpha + f \cos \alpha)}{f_c \sin \gamma - f \sin \gamma - \cos \gamma - ff_c \cos \gamma} = \frac{F_m (\sin \alpha + f \cos \alpha)}{(f_c - f) \sin \gamma - (1 + ff_c) \cos \gamma}.$$

Звідки після певних перетворень матимемо:

$$\operatorname{tg} \gamma_{кр} \geq \frac{1 + ff_c}{f_c - f}; \quad (3.42)$$

$$\gamma_{кр} \geq \operatorname{arctg} \frac{1 + ff_c}{f_c - f}. \quad (3.43)$$

Додатним значенням  $\gamma_{кр}$  відповідає позитивна різниця  $f_c - f$ , тому обов'язковою буде умова  $f_c > f$ .

Результати розрахунків по визначенню  $\gamma_{кр}$  представлено у табл. 3.5 і на рис. 3.12.

Таблиця 3.5. Критичні значення величин  $\gamma_{кр}$

$f \backslash f_c$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
0,10	-	-	-	-	-	-	-
0,15	1,52	-	-	-	-	-	-
0,20	1,47	1,52	-	-	-	-	-

0,25	1,43	1,47	1,52	-	-	-	-
0,30	1,38	1,43	1,48	1,52	-	-	-
0,35	1,33	1,38	1,43	1,48	1,53	-	-
0,40	1,29	1,34	1,39	1,44	1,48	1,53	-

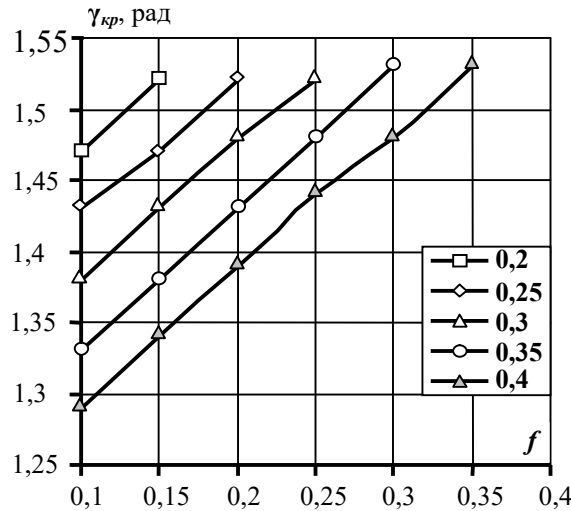


Рис. 3.12. Залежності критичних кутів  $\gamma_{кр}$  від коефіцієнтів тертя  $f$  та  $f_c$

Порівнюючи дані таблиць 3.4 і 3.5 можна зробити висновок, що застосування рухомої бічної напрямної набагато зменшує вірогідність виникнення заторів пляшок, причому в якості сили, протидіючої переміщенню виробів залишається тільки складова  $fR_{21}\sin\gamma$ .

Але є можливість зменшити і цю силу опору аж до 0, тобто утворення заторів тоді стане неможливим. Досягти такого результату можна використовуючи системи з двома рухомими бічними напрямними, які пов'язані асинхронним зворотно-поступальним рухом (рис. 3.13).

І це дуже доцільно, тому що затор пляшок може утворюватись при контактуванні 1 пляшки з прямою бічною напрямною. За умови лише косої рухомої напрямної цей затор може залишитися незруйнованим.

Докладніше проаналізуємо випадок, який зображений на рис. 3.13.

Якщо на попередньому етапі утворився затор і вироби займають позиції, які зображені на рис. 3.13, а бічні напрямні виконують рух у напрямках, вказаних стрілками  $V_n$  та  $V'_n$ , то від початку такого руху контактування між вироро-

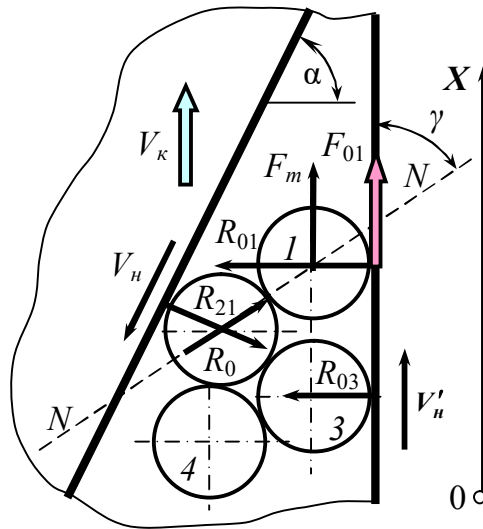


Рис. 3.13. Розрахункова схема уникнення затороутворення завдяки застосуванню двох рухомих бічних напрямних

бами 1 та 2 зникає. Тобто дія реакції сил  $R_{21}$  і  $R_{01}$  та сили тертя  $F_{21}$ , і  $F_{01}$  зникає. А у якості рушійної сили залишається лише сила  $F_m$ , тому рівняння руху пляшки 1 запишеться у вигляді:

$$m\ddot{x} = f_0 mg. \quad (3.44)$$

Прийнявши позначення  $\ddot{x} = d\dot{x}/dt$ , отримаємо рівняння з розділеними змінними:

$$d\dot{x} = f_0 g dt. \quad (3.45)$$

Проінтегрувавши його прийдемо до виду:

$$\dot{x} = f_0 g t + C_1. \quad (3.46)$$

При наступних початкових умовах:

$$t_{(n)} = 0; \quad x_{(n)} = 0; \quad \dot{x}_{(n)} = 0, \quad (3.47)$$

розрахуємо, що стала інтегрування  $C = 0$  і тоді:

$$\dot{x} = f_0 g t. \quad (3.48)$$

За аналогією запишемо:

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt}; \quad dx = f_0 g t dt; \quad (3.49)$$

$$x = f_0 g \frac{t^2}{2} + C_2. \quad (3.50)$$

Тоді з урахуванням початкових умов отримаємо величини:

$$C_2=0 \quad \text{і} \quad x=f_0g\frac{t^2}{2}. \quad (3.51)$$

Розгін пляшки має завершитися при умові  $\dot{x}_{(к)}=V_k$ . Це дає можливість розрахувати час завершення етапу розгону виробу:

$$t_{(к)}=\frac{V_k}{f_0g}. \quad (3.52)$$

А величина переміщення пляшки знайдемо з виразу:

$$x_{(к)}=f_0g\frac{t_{(к)}^2}{2}. \quad (3.53)$$

Якщо за мету розформування масиву виробів є одержання однорядного потоку, то зрозуміло, що швидкість руху опорної площини (особливо тієї частини, що збігається з ділянкою відведення пляшок) має відповідати заданій пропускній здатності всієї транспортної системи. Якщо швидкість кожної до-ріжки конвеєра визначити з рівняння

$$V_k=\frac{Qa}{3600k_3}, \quad (3.54)$$

де  $Q$  – пропускна здатність системи, шт./год;  $a$  – крок розташування виробів, м;  $k_3$  – коефіцієнт запасу пропускної здатності системи, то знайдемо переміщення

$$x_{(к)}=f_0g\frac{V_k^2}{f_0^2g^2}=\frac{V_k^2}{f_0g}=\frac{\left(\frac{Qa}{3600k_3}\right)^2}{f_0g}. \quad (3.55)$$

Через те, що пляшки 2, 3, 4 тощо продовжують контактувати з бічними напрямними та між собою, то їх швидкість у напрямі осі  $OX$  буде обов'язково меншою за швидкість 1 пляшки, тому можна зробити прогноз про неможливість повторного контактування 1 і 2 пляшок та повторне утворення затору за їх участю.

Зрозуміло, що успішне руйнування заторів пляшок певним чином пов'язане зі співвідношенням швидкостей конвеєра  $V_k$  і напрямної  $V_n$  та частотою зворотно-поступального руху напрямних. Дослідження таких систем показали,

що за неправильно вибрані вищевказані співвідношення не завжди руйнують затори пляшок за один цикл. Це, звичайно, зменшує пропускну здатність всієї транспортної системи.

Визначення величин  $x_{(k)}$  не є самоціллю дослідження і питання про можливість утворення затору пляшок аналогічного за розташуванням виробів попередньому, зовсім не риторичне. За безперервної зміни умов цілком можливо, що при досягненні якогось значення  $x_{(k)}$  виріб 1 буде зупинено в результаті взаємодії з попередніми зупиненими в системі виробами. Це означає, що повторне контактування пляшки 2 з пляшкою 1 можливе. Але кут  $\gamma$  у цьому випадку буде меншим завдяки зменшенню відстані між напрямними, і у повторних етапах звільнення зони проходження гарантує переміщення напрямних нове руйнування затору пляшок.

Звісно, затор може виникати не лише при взаємодії двох пляшок між собою або бічними напрямними та опорною площиною. Кількість пляшок у заторі може складати 3, 4, 5 і більше, проте «міцність» затороутворення зі збільшенням кількості пляшок зменшуватиметься. Також треба підкреслити, що певна роль належить всьому масиву виробів, оскільки вони впливають на величину реакції  $R_{21}$ , адже раніше отримані залежності визначали роль сили  $R_{21}$  у їх ролі на руйнування затору.

Ще одне характерне розташування пляшок, за якого виникає затор, приведено на рис. 3.14, а. Фізичні умови для руйнування затору пляшок в самий перший момент часу збігаються з попереднім випадком, але умови переміщення пляшки вздовж косої бічної напрямної – інші.

Розглянемо особливості цього випадку. На плані швидкостей на рис. 3.14, б було зроблено додаток, що дозволяє знайти положення результуючого вектора сил тертя при умові поступального переміщення пляшки. У попередньому підрозділі було викладено:

$$\beta = \arctg \frac{V_A \cos \alpha}{V_B' - V_A \sin \alpha};$$

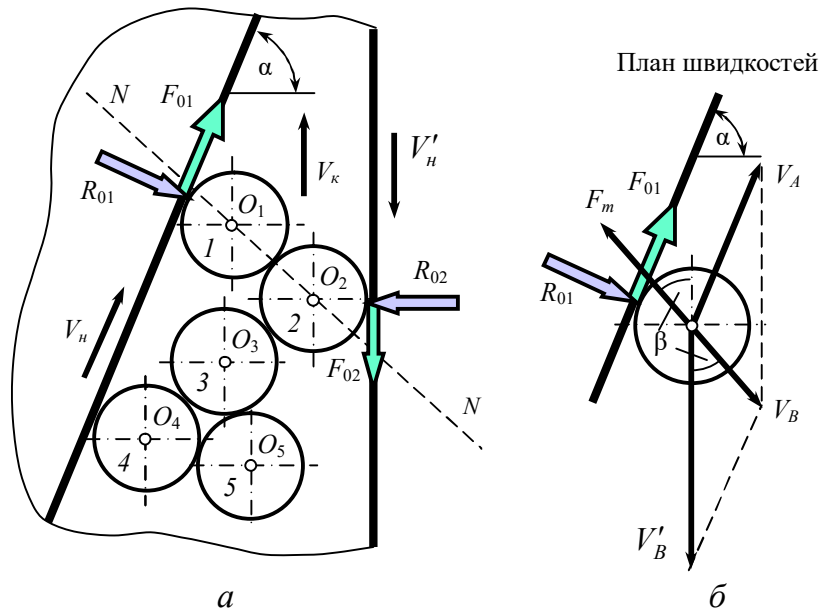


Рис. 3.14. Ілюстраційна схема до випадку виникнення затору пляшок у випадку з рухомими бічними напрямними

$$F_{m_x} = F_m \sin(\alpha - \beta); \quad F_{m_y} = F_m \cos(\alpha - \beta).$$

Для даного випадку маємо:

$$R_{01} = F_{m_y} = F_m \cos(\alpha - \beta); \quad (3.56)$$

$$F_{01} = fR_{01} = fF_m \cos(\alpha - \beta) = ff_0 mg \cos(\alpha - \beta). \quad (3.57)$$

Якщо виконується умова  $V_n > V_\kappa$ , то сила тертя  $F_{01}$  виступає як рушійна, тоді рівняння руху пляшки прийме вигляд:

$$m\ddot{x} = F_m \sin(\alpha - \beta) + fF_m \cos(\alpha - \beta). \quad (3.58)$$

Після підстановки відповідних величин, отримаємо:

$$m\ddot{x} = f_0 mg \sin(\alpha - \beta) + ff_0 mg \cos(\alpha - \beta);$$

$$\ddot{x} = f_0 g \sin\left(\alpha - \frac{\dot{x} \cos \alpha}{V_\kappa - \dot{x} \sin \alpha}\right) + ff_0 g \cos\left(\alpha - \frac{\dot{x} \cos \alpha}{V_\kappa - \dot{x} \sin \alpha}\right), \quad (3.59)$$

де  $\dot{x} = V_A$  і  $V'_B = V_\kappa$ .

Отримане рівняння руху нелінійне і його розв'язання здійснимо при наступних початкових умовах руху і часу:

$$t_{(п)} = 0; \quad x_{(п)} = 0; \quad \dot{x}_{(п)} = 0. \quad (3.60)$$

Зрозуміло, що тут матиме місце перехідний процес, за час протікання

якого швидкість  $\dot{x}$  зміниться від 0 до якоїсь певної величини. Цій величині відповідає умова рівності між силою рушійною та силою опору. Хоча у рівнянні руху пляшки маємо тільки рушійні сили, проте можна вказати на те, що рушійна сила  $F_m \sin(\alpha - \beta)$  може перетворитися на силу опору за деяких співвідношень швидкостей  $\dot{x}$  та  $V_k$ . Після цього перетворення зміниться співвідношення, коли  $\beta > \alpha$ , і за якого перша складова правої частини рівняння руху стане від'ємною, а друга – залишиться додатною. Але є ще одна причина, яка змінить рух пляшки вздовж косої бічної напрямної на неусталений. Тут мова йдеться про зміну напрямку переміщення зворотно-поступальному руху. Тоді за цієї умови рівняння руху отримає вигляд:

$$m\ddot{x} = F_m \sin(\alpha - \beta) - fF_m \cos(\alpha - \beta)$$

або

$$\ddot{x} = f_0 g \sin\left(\alpha - \frac{\dot{x} \cos \alpha}{V_k - \dot{x} \sin \alpha}\right) - f f_0 g \cos\left(\alpha - \frac{\dot{x} \cos \alpha}{V_k - \dot{x} \sin \alpha}\right). \quad (3.62)$$

Початкові умови II етапу руху залежать від кінцевих умов I:

$$t_{(II)}^{\Pi} = 0; \quad x_{(II)}^{\Pi} = x_{(K)}^I; \quad \dot{x}_{(II)}^{\Pi} = \dot{x}_{(K)}^I. \quad (3.63)$$

Вибравши значення наступних величин, проведемо розрахунки:

$$m = 0,5 \text{ кг}; \quad \alpha = 85; 80; 75; 70; 65^\circ; \quad f = 0,2; \quad f = 0,25; \quad V_k = 0,15 \text{ м/с}.$$

Також вважатимемо, що час протікання I етапу збігається з часом протікання II етапу руху і буде становити 1 с. Призначимо переміщення напрямної – 0,15 м і тоді одержимо середню швидкість руху  $V_H = 0,15 \text{ м/с}$ .

Порівнюючи розраховану швидкість  $V_H = 0,15 \text{ м/с}$  з очікуваною величиною  $\dot{x}$ , бачимо, що сила тертя  $F_{01}$  обов'язково буде рушійною силою, тому що  $\dot{x} < V_H$ . На II етапі руху пляшки отримаємо силу тертя  $F_{01}$  у якості сили опору.

Можна очікувати, що на I етапі затор з пляшок 1 та 2 буде зруйновано і 1-ша пляшка буде відведена із зони створення затору і за час протікання I етапу руху можуть виникнути передумови другого затору з виробів 2 та 3. При цьому їх взаємне розташування співпадатиме з розташуванням пляшок 1 і 2 з рис. 3.13.

Проте саме II етапу відповідає напрям  $V'_H$ , який разом з напрямом  $V_H$  (рис. 3.13) не дасть утворитися новому затору пляшок або приведе до його обов'язкового руйнування.

На рис. 3.15 приведено графічні залежності по визначенню кінематичних параметрів, які відповідають I і II етапам руху.

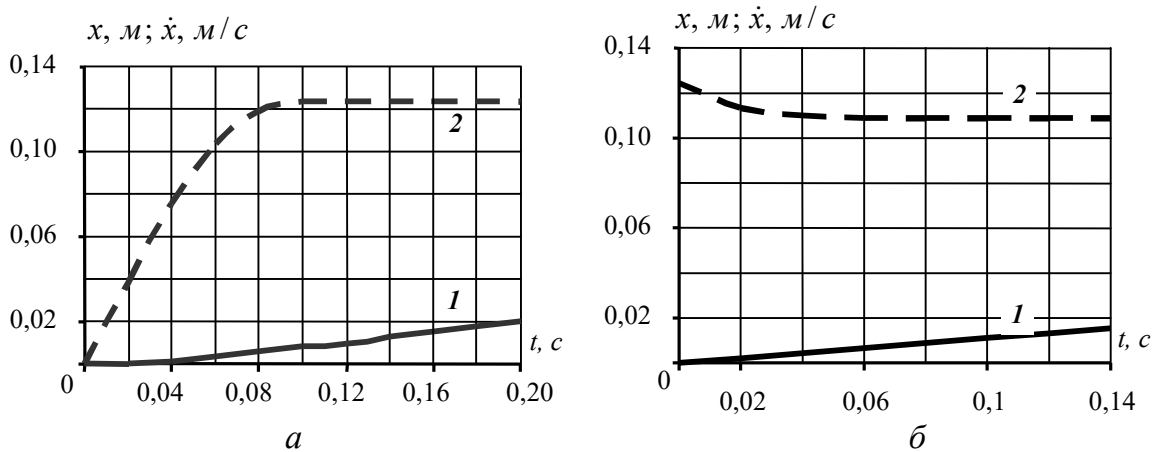


Рис. 3.15. Графічні залежності зміни переміщень (1) і швидкостей (2) пляшки вздовж напрямної на I (а) та II (б) етапах руху

Вибір співвідношень між кінематичними та геометричними параметрами розформовуючого пристрою та кінематичними параметрами косої бічної напрямної, як показують рівняння (3.59) і (3.62) та результати розрахунків, має забезпечувати умови існування даних рівнянь. Наприклад, коли не буде виконуватись умова  $V_H > \dot{x}$ , то сила тертя  $F_{01}$  з рушійної перетвориться у силу опору, тому протягом робочого ходу бажано досягти її виконання. Оскільки за досягнення умови  $\dot{x}_{\max} = \text{const}$  вирішальне значення мають параметри  $V_k$ ,  $f_0$  і кут  $\alpha$ , то очевидно, що кожне з їх можливих сполучень буде відповідати якомусь певному результату, причому ці результати будуть різними для режиму робочого та холостого ходу.

Вплив перетворення  $F_{01}$  з рушійної на силу опору і навпаки можна порівняти з розв'язком рівнянь (3.59) і (3.62) за однакових початкових умов.

На додаток до вже проведених розв'язань виконаємо числові розрахунки рівняння (3.62) підставивши вибрані значення величин і з урахуванням почат-

кових умов (3.60). Результати розрахунків у вигляді графічних залежностей наведено на рис. 3.16.

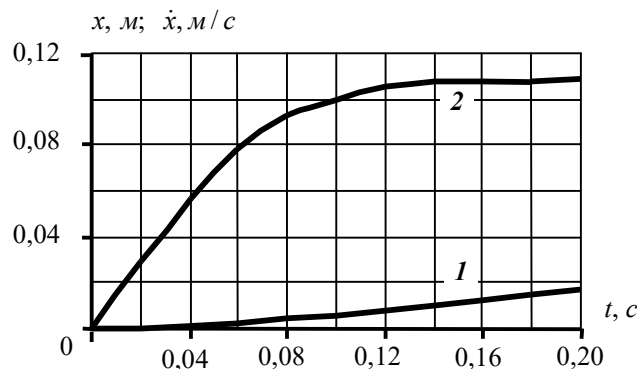


Рис. 3.16. Графічні залежності зміни переміщення (1) та швидкості (2) пляшки під час холостого ходу бічної напрямної

Отримані дані дають можливість призначити величин швидкості  $V_H$  бічних напрямних.

Так як ми розглядаємо випадок поступального руху пляшок вздовж бічної напрямної, то маємо можливість застосовуючи рівняння (3.59) та (3.62) розрахувати максимальну швидкість  $x_{max}$ , і очевидно, що їй буде відповідати прискорення  $\ddot{x}=0$ . Тоді використавши рівняння (3.59) запишемо:

$$f_0 g \sin\left(\alpha - \frac{\dot{x} \cos \alpha}{V_k - \dot{x} \sin \alpha}\right) + f f_0 g \cos\left(\alpha - \frac{\dot{x} \cos \alpha}{V_k - \dot{x} \sin \alpha}\right) = 0; \quad (3.64)$$

$$\operatorname{tg}\left(\alpha - \frac{\dot{x} \cos \alpha}{V_k - \dot{x} \sin \alpha}\right) = -f; \quad (3.65)$$

$$\alpha - \frac{\dot{x} \cos \alpha}{V_k - \dot{x} \sin \alpha} = \operatorname{arctg}(-f) = -\operatorname{arctg} f;$$

$$\alpha V_k - \alpha \dot{x} \sin \alpha - \dot{x} \cos \alpha = \dot{x} \sin \alpha \cdot \operatorname{arctg} f - V_k \operatorname{arctg} f;$$

$$\alpha V_k + V_k \operatorname{arctg} f = \dot{x} (\sin \alpha \cdot \operatorname{arctg} f + \alpha \sin \alpha + \cos \alpha).$$

З останнього рівняння виведемо швидкість усталеного руху:

$$\dot{x} = \frac{\alpha V_k + V_k \operatorname{arctg} f}{\sin \alpha \cdot \operatorname{arctg} f + \alpha \sin \alpha + \cos \alpha}. \quad (3.66)$$

Зі знайденого рівняння розрахуємо величини  $\dot{x} = \text{const}$  для випадків  $\alpha =$

80; 75; 70; 65; 60° або відповідно 1,396; 1,308; 1,22; 1,134; 1,047 рад;  $V_k = 0,05$ ; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25;  $f = 0,2$  і зведемо їх у табл. 3.6.

Таблиця 3.6. *Швидкість усталеного руху пляшки вздовж косої бічної напрямної за умови рушійної сили  $F_{01}$*

$\alpha$ , рад	1,047	1,134	1,22	1,308	1,396
$V_k$ , м/с					
0,05	0,039	0,041	0,042	0,044	0,046
0,10	0,079	0,082	0,085	0,088	0,091
0,15	0,180	0,123	0,127	0,132	0,137
0,20	0,158	0,163	0,169	0,176	0,183
0,25	0,197	0,204	0,212	0,220	0,228

На основі виразу (3.62) отримаємо:

$$f_0 g \sin\left(\alpha - \frac{\dot{x} \cos \alpha}{V_k - \dot{x} \sin \alpha}\right) = f f_0 g \cos\left(\alpha - \frac{\dot{x} \cos \alpha}{V_k - \dot{x} \sin \alpha}\right); \quad (3.67)$$

$$\alpha - \frac{\dot{x} \cos \alpha}{V_k - \dot{x} \sin \alpha} = \arctg f, \quad (3.68)$$

звідки введемо рівняння швидкості:

$$\dot{x} = \frac{\alpha V_k - V_k \arctg f}{\alpha \sin \alpha + \cos \alpha - \sin \alpha \cdot \arctg f}. \quad (3.69)$$

Використовуючи значення величин, що виведено в попередньому випадку, зробимо розрахунки швидкості  $\dot{x}$ . Результати розрахунків зведено у табл. 3.7.

Таблиця 3.7. *Результати визначення швидкості усталеного руху пляшок вздовж косої бічної напрямної при умові  $F_{01}$ , як сили опору*

$\alpha$ , рад	1,047	1,134	1,22	1,308	1,396
$V_k$ , м/с					
0,05	0,034	0,037	0,039	0,042	0,044
0,10	0,069	0,074	0,078	0,083	0,088
0,15	0,103	0,110	0,118	0,125	0,133
0,20	0,137	0,147	0,157	0,167	0,177
0,25	0,172	0,184	0,196	0,208	0,221

На рисунку 3.17 для порівняння двох останніх випадків приведено залежності  $\dot{x}_{\max} = \dot{x}_{\max}(V_k, \alpha)$ . З цього порівняння видно, що зміна напрямку  $F_{01}$  має вплив і величина цього впливу залежить від кута  $\alpha$  за інших рівних умов. Є підстави прогнозувати зміни величини  $\dot{x}_{\max}$  у зв'язку зі зміною коефіцієнта тертя  $f$ .

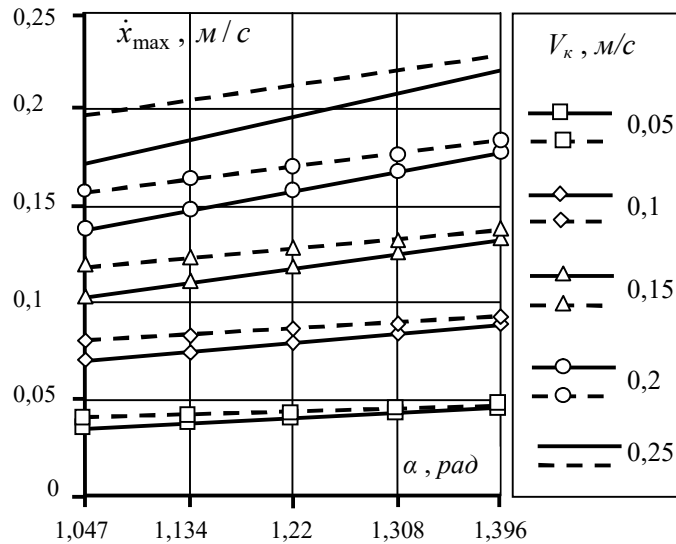


Рис. 3.17. Графічні залежності  $\dot{x}_{\max} = \dot{x}_{\max}(V_k, \alpha)$  для випадків, коли сила  $F_{01}$ : - - - - рушійна; ———— сила опору

В таблиці 3.8 та на рисунку 3.18 приведено результати розрахунків для оцінювання впливу коефіцієнту  $f$ , за значень призначених величин:  $V_k = 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25$  м/с;  $f = 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3$ ;  $\alpha = 1,22$  рад.

Таблиця 3.8. *Значення величин  $\dot{x}_{\max}$  у випадку робочого ходу напрямної*

$f \backslash V_k, \text{м/с}$	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
0,05	0,0417	0,0420	0,0423	0,0426	0,0428
0,1	0,0837	0,0840	0,0846	0,0852	0,0857
0,15	0,1250	0,1260	0,1266	0,1278	0,1286
0,2	0,1667	0,1680	0,1692	0,1040	0,2080
0,25	0,2084	0,2100	0,2116	0,2130	0,2143

У випадку зворотного ходу (або нерухомої бічної напрямної) отримаємо дані, що наведено в табл. 3.9.

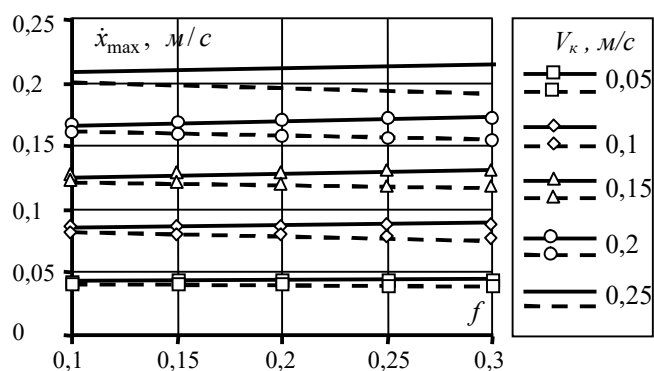


Рис. 3.18. Графічні залежності швидкості руху пляшок  $\dot{x}_{max}$  від величини коефіцієнту  $f$  за умови, що сила  $F_{01}$ : - - - – рушійна; — – сила опору

Таблиця 3.9. *Значення величин  $\dot{x}_{max}$  у випадку нерухокої напрямної*

$V_k, \text{ м/с}$ \ $f$	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
0,05	0,0401	0,0397	0,0392	0,0387	0,0382
0,1	0,0803	0,0794	0,0784	0,0774	0,0764
0,15	0,1204	0,1190	0,1170	0,1160	0,1150
0,2	0,1605	0,1587	0,1568	0,1548	0,1528
0,25	0,200	0,1980	0,1960	0,1940	0,1909

З отриманих результатів як ми і прогнозували, відбулося збільшення коефіцієнтів тертя  $f$  за випадку  $F_{01}$ , як рушійної сили, і також збільшення швидкості  $\dot{x}_{max}$ , хоча це збільшення незначне і за переходу від  $f = 0,1$  до  $f = 0,3$  складає приблизно 2,7 відсотка.

Коли ж сила  $F_{01}$  виступає в якості сили опору, збільшення коефіцієнта тертя від  $f = 0,1$  до  $0,3$ , навпаки, зменшує максимальну швидкість переміщення вантажів, і ця величина приблизно складає 4,7 відсотка.

Порівнюючи значення максимальної швидкості під час робочого і холостого ходів бічної напрямної, можливо побачити, що вона збільшується від 4 до 12 відсотків за інших рівних умов.

Звичайно, на розраховані співвідношення величин певним чином має вплив такий показник, як кут встановлення бічної напрямної  $\alpha$ , але головною перевагою використання рухомої бічної напрямної є саме руйнування заторів

ПЛЯШОК.

***Аналіз кінематики переміщення виробів циліндричної форми  
вздовж косої бічної напрямної***

В попередньому підрозділі дослідження затороутворення пляшок виконувалося з припущенням, що від моменту руйнування затору переміщення пляшок відбувалося у вигляді поступального руху. Проте результуюча сил

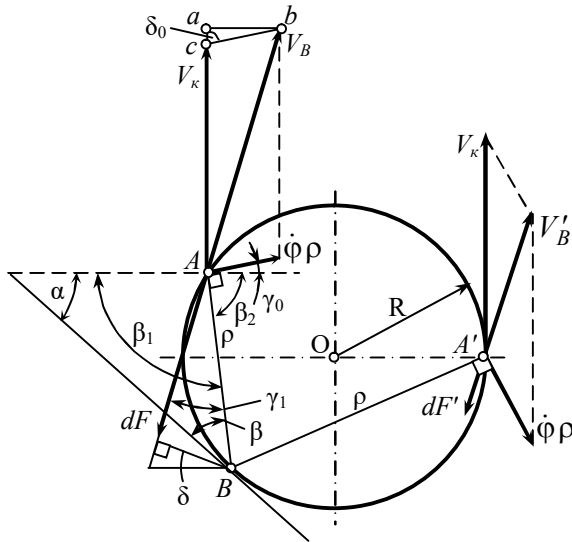


Рис. 3.19. Розрахункова схема для визначення параметрів руху виробів

тертя виробу з рухомою опорною площиною відносно лінії контакту з напрямною створює такий момент, коли цей рух перетвориться на складний. Розглянемо особливості цієї взаємодії.

На рис. 3.19 маємо схему для розрахунку рушійного моменту сили тертя пляшки з опорною площиною.

В точках А та А' лінії контакту пляшок з опорною площиною виберемо елементарні ділянки з довжиною  $dl$ . Числове значення сили тертя  $F$  на вибраних ділянках знайдено з виразу:

$$dF = f q dl, \tag{3.70}$$

де питомий тиск  $q = \frac{mg}{2\pi R}$  і  $R$  – радіус кола контактної лінії.

Тоді маємо:

$$dF = \frac{f_0 mg}{2\pi R} dl. \tag{3.71}$$

Елементарний момент від сили тертя  $dF$  дорівнює:

$$dM = dF \cdot h_{dF}, \tag{3.72}$$

де  $h_{dF}$  – відстань від точки В контакту пляшки з бічною напрямною до лінії дії вектора елементарної сили тертя.

Підставляємо знайдене значення  $dF$  в рівняння (3.72), тоді маємо:

$$dM = \frac{f_0 mg}{2\pi R} h_{dF} \cdot dl. \quad (3.73)$$

У виразі (3.73) змінною маємо величину  $h_{dF}$ , яка залежить, у свою чергу, від таких параметрів як  $\beta$ ,  $R$ ,  $V_k$  та  $\dot{\phi}R$ , де  $\dot{\phi}$  – кутова швидкість при обертальному русі пляшки.

З рис. 3.19 видно, що елементарна складова сили тертя  $dF$  створює момент, який протидіє обертанню, а складова  $dF'$ , прикладена в точці А створює рушійний момент. З цієї точки зору визначальним фактором є положення лінії дії вектора  $dF$  чи  $dF'$ , яка у свою чергу збігається з положенням результуючого вектора відносної швидкості  $V_B$  елементарної ділянки.

Для даного випадку маємо:

$$\bar{V}_B = \bar{V}_k + \dot{\phi}\bar{R} \quad (3.74)$$

і оскільки положення вектора  $\bar{V}_k$  є фіксованим, можемо знайти кут  $\delta$ .

З рисунка 3.19 видно

$$\begin{aligned} \gamma_0 &= 90^\circ - \beta; \quad \beta_2 = 180^\circ - \beta_1 = 180^\circ - (180^\circ - (\alpha - \beta)) = \alpha + \beta; \\ \gamma_0 &= 90^\circ - (\alpha - \beta); \quad \delta_0 = 90^\circ - \gamma_0 = \alpha + \beta. \end{aligned} \quad (3.75)$$

З цих співвідношень виводимо:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{ab}{Aa} = \frac{ab}{V_k + ac}; \quad (3.76)$$

$$ab = \dot{\phi}R \sin \delta_0 = \dot{\phi}R \sin(\alpha + \beta);$$

$$ac = \dot{\phi}R \cos(\alpha + \beta); \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{\dot{\phi}R \sin(\alpha + \beta)}{V_k + \dot{\phi}R \cos(\alpha + \beta)}. \quad (3.77)$$

Плече елементарної сили  $dF$  знайдемо з рівняння:

$$h_{dF} = \rho \sin \gamma_1.$$

Так як

$$\gamma_1 = 180^\circ - \gamma - \gamma_0 - \beta_2 = 180^\circ - (90^\circ - \delta) - \beta_2 = 90^\circ + \delta - \beta_2 = 90^\circ + \delta - (\alpha + \beta)$$

То маємо:

$$h_{dF} = \rho \sin \left( 90^\circ + \arctg \frac{\dot{\varphi} R \sin(\alpha + \beta)}{V_k + \dot{\varphi} R \cos(\alpha + \beta)} - (\alpha + \beta) \right). \quad (3.78)$$

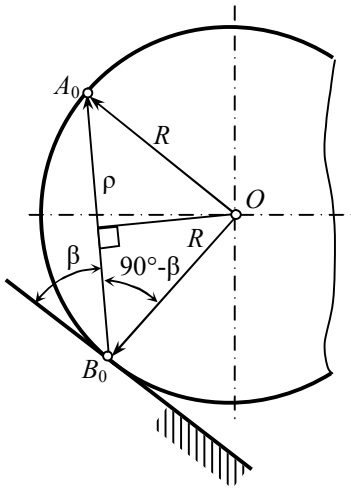


Рис. 3.20. Схема для визначення радіуса-вектора  $\rho$

титу, що

Для визначення довжини радіуса-вектора  $\rho$  як функції кута  $\beta$  побудуємо схему, яка приведено на рисунку 3.20.

В границях зміни кута  $OB_0A_0$  від  $0^\circ$  до  $90^\circ$  маємо:

$$\rho = 2R \cos(90^\circ - \beta) = 2R \sin \beta, \quad (3.79)$$

а за умови  $180^\circ \geq \beta > 90^\circ$  отримаємо:

$$\rho = 2R \cos(\beta - 90^\circ). \quad (3.80)$$

Для елементарного кута  $d\beta$  можна допус-

$$dl = \rho d\beta \quad (3.81)$$

і тоді в межах знаходження кута  $\beta$  від  $0^\circ$  до  $90^\circ$  момент рушійних сил знаходимо з рівняння:

$$\begin{aligned} M &= \int_0^{\pi/2} \frac{f mg}{2\pi R} \rho \sin \left( 90^\circ + \arctg \frac{\dot{\varphi} R \sin(\alpha + \beta)}{V_k + \dot{\varphi} R \cos(\alpha + \beta)} - (\alpha + \beta) \right) \cdot dl = \\ &= \frac{f mg}{2\pi R} \int_0^{\pi/2} (2R \sin \beta)^2 \sin \left( 90^\circ + \arctg \frac{\dot{\varphi} R \sin(\alpha + \beta)}{V_k + \dot{\varphi} R \cos(\alpha + \beta)} - (\alpha + \beta) \right) \cdot d\beta = \\ &= \frac{2f mg R}{\pi} \int_0^{\pi/2} \sin^2 \beta \cdot \sin \left( \arctg \frac{\dot{\varphi} R \sin(\alpha + \beta)}{V_k + \dot{\varphi} R \cos(\alpha + \beta)} - (\alpha + \beta) \right) \cdot d\beta. \end{aligned} \quad (3.82)$$

Для меж кута  $90^\circ < \beta < 180^\circ$ , маємо:

$$M' = \frac{2f mg R}{\pi} \int_0^{\pi/2} \cos^2(\beta - 90^\circ) \sin \left( \arctg \frac{\dot{\varphi} R \sin(\alpha + \beta)}{V_k + \dot{\varphi} R \cos(\alpha + \beta)} - (\alpha + \beta) \right) d\beta. \quad (3.83)$$

Знаходимо момент опору переміщенню кочення, позначивши величину нормальної реакції з боку косої бічної напрямної через  $N$ :

$$M_{оп} = kN, \quad (3.84)$$

де  $k$  – коефіцієнт тертя кочення.

Рівняння руху пляшки запишеться у вигляді:

$$I\ddot{\varphi} = \frac{2f_o mgR}{\pi} \left[ \int_0^{\pi/2} \sin^2 \beta \cdot \sin \left( \arctg \frac{\dot{\varphi} R \sin(\alpha + \beta)}{V_k + \dot{\varphi} R \cos(\alpha + \beta)} - (\alpha + \beta) \right) d\beta + \int_0^{\pi/2} \cos^2(\beta - 90^\circ) \sin \left( \arctg \frac{\dot{\varphi} R \sin(\alpha + \beta)}{V_k + \dot{\varphi} R \cos(\alpha + \beta)} - (\alpha + \beta) \right) d\beta \right] - kN, \quad (3.85)$$

де  $I$  – момент інерції пляшки.

Розв'язок рівняння (3.85) виконаємо, призначивши такі початкові умови:

$$t_{(п)} = 0; \quad \varphi_{(п)} = 0; \quad \dot{\varphi}_{п} = 0, \quad (3.86)$$

проте це завдання супроводжується певними складностями, тому що у рівняння з розрахунку рушійного моменту входить кутова швидкість  $\dot{\varphi}$ . Тобто визначення інтегралів можливо лише за відомої швидкості  $\dot{\varphi}$ .

Останню розраховану математичну модель неможливо застосовувати в інженерній практиці, тому враховуючи інтереси вирішення прикладних задач проведено експериментальні дослідження для визначення впливу деяких параметрів на кінематику переміщення пляшок та інших вантажів вздовж косої бічної напрямної.

Піч час дослідів вимірювалась середня швидкість переміщення пляшки місткістю 0,5 л, скляної банки місткістю 3,0 л та штофу місткістю 0,8 л. Такий набір різних типів скляної тари вибрано не випадково, оскільки на меті було визначення вплив різних законів руху (поступальний чи складний) на швидкість переміщення їх вздовж косої напрямної.

Поперечний переріз штофу – прямокутник, тому вздовж бічної напрямної він мав поступальний рух, а відносно опорної площини – його рух був складним. При переміщенні відносно бічної напрямної пляшки і банки мало місце ковзання та кочення.

Метою даного дослідження було не одержання математичної моделі процесу переміщення виробів, а лише порівняння вказаних випадків руху.

Дослідження здійснювалися при значеннях кута  $\alpha = 45^\circ; 60^\circ$  і швидкості опорної площини – 0,082 м/с у двох серіях. В першій серії коса бічна напрямна була нерухомою, а в другій серії дослідів – напрямній задавався зворотно-по-

ступальний рух з амплітудою 0,1 м і частотою 0,5 Гц.

Результати дослідів зведено у таблиці 3.10. Проаналізувавши отримані дані, можна зробити висновок, що для випадків роботи з виробами циліндричної форми немає чистого ковзання або кочення вздовж бічної напрямної, а є суміщення цих двох рухів.

Але більш важливим є висновок, що швидкості переміщення пляшок у формі паралелепіпеда та циліндричної форми вздовж бічної напрямної практично співпадають. З цього висновку витікає, що розраховані раніше методики з припущенням щодо поступального (по відношенню до бічної напрямної) руху вантажів циліндричної форми правомірні з точки зору кінцевого результату, хоча явища, які виникають під час взаємодії вантажів з опорною площиною та напрямною, є різними.

Отриманий висновок, що швидкості руху центра мас циліндричних виробів та виробів іншої форми співпадають, дозволяє сформулювати таку думку: організація процесів переміщення вантажів з поступальним рухом енергетично більш вигідна, тому що при цьому є відсутньою кінетична енергія обертання.

Таблиця 3.10. *Результати досліджень по визначенню середньої швидкості переміщення пляшок вздовж бічної напрямної*

Об'єкт дослідження та його параметри			За нерухою напрямною					За рухою напрямною				
			номер досліду					номер досліду				
			1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
К у т $\alpha = 60^\circ$	Банка місткістю 3 л	Час переміщення, с	9,72	9,58	9,6	9,75	9,55	8,95	9,0	9,05	8,9	9,1
		Середня швидкість, м/с	0,0519					0,0556				
	Пляшка місткістю 0,5 л	Час переміщення, с	10,3	10,1	10,05	10	10,2	9,7	9,75	9,65	9,6	9,65
		Середня швидкість, м/с	0,0512					0,0556				
	Штоф місткістю 0,8 л	Час переміщення, с	9,75	9,85	9,7	9,75	9,8	9,0	9,1	8,9	8,95	9,0
		Середня швидкість, м/с	0,0494					0,0517				
К у т $\alpha = 45^\circ$	Банка місткістю 3 л	Час переміщення, с	13,7	13,4	13,7	13,5	13,6	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7
		Середня швидкість, м/с	0,0368					0,0393				

Пляшка місткістю 0,5 л	Час пере- міщення, с	14,4	14,1	14,2	14,1	14,2	13,4	13,5	13,4	13,5	13,6
	Середня швид- кість, м/с	0,0353					0,037				
Штоф місткістю 0,8 л	Час пере- міщення, с	13,6	13,2	13,9	13,4	13,5	12,7	12,8	12,8	12,6	12,9
	Середня швид- кість, м/с	0,037					0,0393				

## ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У процесі виконання кваліфікаційної роботи згідно поставлених завдань виконано:

- модернізацію пастеризатора тунельного типу для теплової обробки пиво-безалкогольної продукції, фасованої в пляшки місткістю 0,5 л з метою збільшення продуктивності;
- модернізацію теплової та гідравлічної систем пастеризатора за рахунок збільшення об'єму зрошування тепловим агентом (водою) та зі збільшенням температурного градієнту в зонах оброблення.

В основу проєкту покладено наукові дослідження однієї з головних частин тунельного пастеризатора – завантажувального вузла.

В науково-дослідній частині проєкту досліджено динаміку процесів розформування і формування масивів пляшок. Складено математичні моделі для різних випадків руху виробів опорною площиною.

Дане обладнання відрізняється від існуючих аналогів більш високою продуктивністю, надійністю в роботі, простотою конструкції та обслуговування, можливістю переналагодження під різні типи пляшок.

Основним соціальним ефектом проведеної роботи буде задоволення потреб пиво-безалкогольної промисловості України у пастеризаторах такого класу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Автоматизація технологічних процесів (виготовлення і пакування виробів) [Текст] : навч. посіб. / Б. О. Пальчевський. Львів: Світ, 2007. 392 с.
2. Вода, напитки, продукты питания [Текст] / А. И. Соколенко, А. И. Украинец, В. Л. Яровой, В. А. Поддубный ; под ред. А. И. Соколенко. К.: П.П.Люксар, 2006. 368 с.
3. Деталі машин [Текст] : зб. завдань та прикладів розрахунків / В. О. Малащенко, В. Т. Павлице. Львів: Новий Світ-2000, 2009. 136 с.
4. Дослідження технологічних систем (моделювання, проектування, оптимізація) [Текст] : Навч. посіб. / Б. О. Пальчевський. Львів: Світ, 2001.
5. Енергетичні трансформації і енергозбереження в харчових технологіях [Текст] : монографія / А. І. Соколенко, А.А. Мазаракі, В. А. Піддубний та ін. ; НУХТ. К.: Фенікс, 2012. 484 с.
6. Енергоматеріальні потоки харчових і мікробіологічних виробництв [Текст] : монографія / А.І. Соколенко, В.А. Піддубний, К.В. Васильківський та ін.; за ред. д-ра техн. наук, проф. Соколенка А. І. К.: Кондор-Видавництво, 2016. 326 с.
7. Енергоматеріальні трансформації в харчових технологіях на основі замкнених контурів [Текст] : монографія / А.І. Соколенко, В.А. Піддубний, А.О. Чагайда; під ред. д-ра техн. наук, проф. Соколенка А.І. К.: Кондор-Видавництво, 2015. 300 с.
8. Етикетка [Текст] : навч. посіб. / С. М. Ярема, О. М. Гавва ; МОН України. К. : Ун-т Україна; НУХТ, 2007. 635 с.
9. Інтенсифікація масообмінних процесів в харчових і мікробіологічних технологіях / А. І. Соколенко, О. Ю. Шевченко, В. А. Піддубний. К.: ПП"Люксар", 2008. 443 с.

10. Інтенсифікація тепло- масообмінних процесів в харчових технологіях [Текст]: монографія/ А.І.Соколенко, А.А.Мазаракі, О.Ю.Шевченко, В.А.Піддубний; під. ред. А.І.Соколенка ; К.: Фенікс, 2011. 536 с.
11. Моделювання процесів пакування [Текст]: підручник / А. І. Соколенко, В. Л. Яровий, В. А. Піддубний, К. В. Васильківський ; за ред. А. І. Соколенка ; НУХТ. Вінниця : Нова книга, 2004. 272 с.
12. Основи конструювання та розрахунок деталей машин [Текст]: Підруч. / В. Т. Павлице. 2-е вид., перероб. Львів: Афіша, 2003. 560 с.
13. Основи наукових досліджень у прикладних задачах [Текст]: навч. посіб. / Л. О. Кривопляс-Володіна, О. М. Гавва, В. Л. Яровий, С. В. Токарчук ; наук. ред. О. М. Гавва, літ. ред. Л. О. Кривопляс; Нац. ун-т харч. технол. К.: Сталь, 2016. 272 с.
14. Пакувальне обладнання [Текст]: в 3 кн. Кн. 1 : Обладнання для пакування продукції у споживчу тару / О. М. Гавва, А. П. Беспалько, А. І. Волчко. К.: ІАЦ Упаковка, 2008. 436 с.
15. Пакувальне обладнання [Текст]: в 3 кн. Кн. 2. : Обладнання для групового пакування: / О. М. Гавва, А. П. Беспалько, А. І. Волчко. К.: ІАЦ Упаковка, 2007. 136 с.
16. Пакувальне обладнання [Текст]: в 3-х кн. Кн.3 : Обладнання для обробки транспортних пакетів / О. М. Гавва, А. П. Беспалько, А. І. Волчко. К.: ІАЦ Упаковка, 2006. 96 с.
17. Пакувальне обладнання [Текст]: Підруч. / О. М. Гавва, А. П. Беспалько, А. І. Волчко, О. О. Кохан. Київ: ІАЦ "Упаковка", 2010. 744 с.
18. Пакувальні матеріали та їх фізико-хімічні властивості [Текст]: підручник / А. І. Соколенко, В. С. Костюк, К. В. Васильківський та ін. ; Нац. ун-т харч. технол. К.: Кондор, 2015. 396 с.
19. Продукты питания [Текст] / А. И. Соколенко, А. Е. Шевченко, В. А. Поддубный и др.; под ред. А.И.Соколенко; НУХТ. К.: Люксар, 2010. 392 с.

20. Проектування пакувального обладнання мехатронних модулів [Текст] : монографія / М. В. Якимчук, О. М. Гавва, А. П. Беспалько та ін.; за ред. О. М. Гавви; Нац. ун-т харч. технол. Київ: Видавництво "Сталь", 2017. 515 с.
21. Сертифікація, гігієнічне забезпечення та метрологічна атестація пакувального обладнання [Текст] : навч. посіб. / О. М. Гавва, А. П. Беспалько, С. В. Токарчук; МОН України, Нац. ун-т харч. технол. К.: НУХТ, 2014. 268 с.
22. Справочник специалиста пищевых производств [Текст]. Кн. 1: Механика / А. И. Соколенко, А. И. Украинец, В. Л. Яровой, К. В. Васильковский. К.: АртЭк, 2001. 304 с.
23. Справочник специалиста пищевых производств [Текст]. Кн. 2: Теплофизические процессы. Энергосбережение / А. И. Соколенко, А. И. Украинец, В. Л. Яровой, К. В. Васильковский; под ред. А. И. Соколенко. К.: АртЭк, 2003. 432 с.
24. Теорія тертя у взаємодії твердих тіл [Текст] : монографія / А. І. Соколенко, С. В. Іванов, В. А. Піддубний та ін. ; НУХТ. К.: Фенікс, 2012.
25. Тертя в машинах і системах транспортування вантажів [Текст]: монографія / А. І. Соколенко, О. П. Мацко, В. А. Піддубний та ін.; за ред. А. І. Соколенко. К.: ЛЮКСАР, 2007. 246 с.
26. Транспортно-технологічні системи пивзаводів [Текст] / А. І. Соколенко, А. І. Українець, В. А. Піддубний; За ред. А.І. Соколенка. К.: АртЕк, 2002. 304 с.
27. Фізико-хімічні методи обробки сировини і стабілізація харчових продуктів: монографія / А. І. Соколенко, О. Ю. Шевченко, В. А. Піддубний та ін. К.: Люксар, 2009. 454 с.
28. Фізико-хімічні методи обробки сировини і харчових продуктів [Текст]: підруч. для студ. ВНЗ / А.І. Соколенко, В.А. Піддубний,

- В.М. Гіджеліцький та ін.; Нац. ун-т харч. технол. К.: Кондор-Видавництво, 2015. 324 с.
29. Функціонально-модульне проектування пакувальних машин [Текст] : монографія / О. М. Гавва, Л. О. Кривопляс-Володіна, С. В. Токарчук та ін.; за ред. О. М. Гавви ; Нац. ун-т харч. технол. К.: Сталь, 2015. 547 с.
30. Моделювання процесів пакування: підруч. / А. І. Соколенко, В. Л. Яровий, В. А. Піддубний, К. В. Васильківський. Вінниця: Нова книга, 2004. 272 с.
31. Фізико-хімічні методи обробки сировини і стабілізація харчових продуктів / А. І. Соколенко, О. Ю. Шевченко, В. А. Піддубний, К. В. Васильківський Київ: Люксар, 2009. 454 с.
32. Домарецький В. А. Технологія солоду і пива. К.: ІНК ОС. 2004. 500 с.
33. Єрмоменко Д. О., Чернишов С. О., Лебедев І. М. Обладнання для технології харчових виробництв. Темат. зб. наук. праць. Вип. 20. Донецьк: ДонДУЕТ. С. 76-80.