

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) ІНІТІ ім. акад. Ч.С. Турого
Кафедра мехатроніки та вакуальної техніки

«До захисту в ЕК»

Директор інституту(декан факультету)

(підпис)

(ім'я та прізвище)

«15» 02 2024р.

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис)

(ім'я та прізвище)

«15» 02 2024р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

зі спеціальності 131 Прикладна механіка
(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми Прикладна механіка

на тему: Дослідження технологічних операцій вакуальних процесів із застосуванням вакуумних технологій

Виконав: здобувач 2 курсу, групи ПМ-2-1М

Куреренко Юлія Олександрівна
(прізвище, ім'я, по батькові повністю)

(підпис)

Керівник Васильківський Костянтин
(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

Вікторів
(підпис)

Консультанти

(ім'я та прізвище)

(підпис)

(ім'я та прізвище)

(підпис)

(ім'я та прізвище)

(підпис)

Рецензент Юрій ВЕРЕСОЦЬКИЙ
(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) недозволеної допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Здобувач

(підпис)

Київ - 2024р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЦПТ
Людмила КРИВОПІС-ВОЛОДІНА
« 20 » 11 2023 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Кугеренко Юлія Александрівна
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження технологічних операцій пакувального процесу із застосуванням вакуумних технологій

керівник роботи Васильківський Костянтин Вікторович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від « 20 » 11 2023 року № 940-к

2. Строк подання здобувачем роботи 05.02.2024

3. Вихідні дані до роботи 1. Вид досліджень - аналітичні та експериментальні. 2. Вид обладнання - обладнання для здійснення процесів вакуумного пакування. 3. Вид продукції - вантажна продукція

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Вступ. 2. Вивчення стану питання, літературний огляд джерел інформації. 3. Теоретично-аналітичне моделювання процесів. 4. Експериментальні дослідження. 5. Висновки. 6. Список літератури.

5. Перелік графічного матеріалу
Презентація на 11 аркушах

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 20.11.2023

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Реферат	25.11.2023	
2.	Вступ	15.12.2023	
3.	Розділ 1	02.01.2024	
4.	Розділ 2	17.01.2024	
5.	Розділ 3	25.01.2024	
6.	Висновки	30.01.2024	
7.	Список використаної літератури	02.02.2024	

Здобувач освіти


(підпис)

Юлія КУЗЕРЕНКО
(ім'я та прізвище)

Керівник роботи


(підпис)

Костянтин ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ
(ім'я та прізвище)

« 20 » 11 2023 р.

АНОТАЦІЯ

на магістерську роботу Кучеренко Юлії Олександрівни, яка присвячується темі: «Дослідження технологічних операцій пакувальних процесів із застосуванням вакуумних технологій». Розглянуто причини розвитку і орієнтації на вакуумне пакування, що пов'язані з комплексом фізичних і технологічних ефектів, які повинні забезпечити подовження термінів зберігання, протягом яких якісні показники продуктів залишаються в межах норм. Показані деякі позитивні і негативні ефекти, що супроводжують вакуумне пакування. У зв'язку з цим виконаний цикл теоретичних і експериментальних досліджень, результати яких представлені в цій роботі.

На основі врахування плинних значень термодинамічних параметрів була одержана оцінка зміни швидкості витікання повітря і здійснено перехід до визначення часу перебігу процесу вакуумування упаковки.

Проведені експериментальні дослідження по визначенню часу вакуумування харчової продукції. За результатами експериментальних досліджень отримано математичну модель, за якої початкова температура незначно впливає на час вакуумування продукту.

Ключові слова: вакуумне пакування, упаковка, обладнання, зміни тиску, біологічні об'єкти, модифікована атмосфера, активна упаковка, моделювання, ефекти, перехідні процеси, кавітація, експериментальні дослідження, установка.

ABSTRACT

This master's thesis by Yulia Oleksandrivna Kucherenko is dedicated to the topic: "Research of technological operations of packaging processes using vacuum technologies " The reasons for the development and orientation towards vacuum packaging, associated with a complex of physical and technological effects aimed at extending the shelf life during which the quality indicators of the products remain within normal limits, are considered. Some positive and negative effects accompanying vacuum packaging are shown. Therefore, a cycle of theoretical and experimental studies was conducted, the results of which are presented in this work.

Based on considering the dynamic values of thermodynamic parameters, an assessment of the change in air outflow velocity was obtained, and a transition to determining the duration of the vacuum packaging process was made.

Experimental studies were conducted to determine the vacuuming time of food products. Based on the results of experimental research, a mathematical model was obtained, according to which the initial temperature has a slight effect on the vacuuming time of the product.

Keywords: vacuum packaging, packaging, equipment, pressure changes, biological objects, modified atmosphere, active packaging, modeling, effects, transient processes, cavitation, experimental research, installation.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	2
ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. Огляд сучасних технологій та обладнання для вакуумного пакування харчових продуктів	7
1.1. Вакуумне пакування	7
1.2. Вакуумна упаковка	9
1.3. Вакуум-пакувальне обладнання	11
1.4. Технології різкої зміни тиску при вакуумному пакуванні	16
1.5. Особливості обробки склотари за допомогою вакууму	20
1.6. Загальні положення процесу вакуумування	23
1.7. Вплив вакууму на біологічні об'єкти	30
1.8. Система пакування в модифікованій атмосфері	32
1.9. "Активна упаковка"	34
РОЗДІЛ 2. Аналітичне моделювання процесів вакуумного пакування	37
2.1. Фізичні і технологічні ефекти вакуумного пакування	37
2.2. Визначення часу перехідних процесів вакуумування	40
2.3. Вакуумне пакування і кавітація	51
2.4. Моделювання процесів гідродинаміки газорідних середовищ в умовах дискретно-імпульсних технологій	60
РОЗДІЛ 3. Експериментальні дослідження по визначенню часу вакуумування	67
3.1. Опис експериментальної установки	70
3.2. Організація та проведення експериментальних досліджень	76
3.3. Отримання математичної моделі для визначення часу вакуумування	77
ВИСНОВКИ	83
ЛІТЕРАТУРА	86
ДОДАТКИ	88

ВСТУП

Успіхи практики вакуумного пакування продукції харчових виробництв привели до загального визнання цих технологій. Підвищення термінів зберігання продукції небезпідставно поєднують з обмеженням кількості кисню в залишковій атмосфері упаковок, однак це явно не єдина причина.

Технології вакуумного пакування отримали розвиток на промисловому рівні в середині минулого століття, коли були створені пакувальні матеріали з достатньо високими бар'єрними властивостями. Останнє означає, що пакувальний матеріал повинен стабілізувати на поверхні продукту складові середовища, в якому здійснювалося його вакуумування і герметизація. Якщо процес здійснюється в атмосферному середовищі, то такими складовими будуть азот, кисень, пари води і діоксид вуглецю.

Повну герметизацію пакованого продукту може забезпечити тільки жерстяна банка. Гнучкі полімерні матеріали не можуть забезпечити 100 % непроникність, наприклад, по кисню, який у багатьох випадках стимулює діяльність мікроорганізмів, призводить до окислення жирів, руйнування ферментних і вітамінних комплексів, фарбувальних речовин.

Орієнтація на вакуумне пакування пов'язана з комплексом фізичних і технологічних ефектів, що повинні забезпечити подовження термінів зберігання, протягом яких якісні показники продуктів залишаються в межах норм. Практика показує, що велике значення при цьому мають вибір геометрії упаковки, механічних характеристик пакувальних матеріалів, їх адгезійні показники та бар'єрні властивості, їх зв'язок з температурами при пакуванні і зберіганні, тощо.

Поряд з позитивними ефектами, що супроводжують вакуумне пакування, спостерігаються і недоліки, наприклад, у зв'язку з виділенням в порожнині упаковки рідкої фази у вигляді соку рослинного або тваринного походження. Та головним недоліком технологій вакуумного пакування в порівнянні з тепловим обробленням залишаються обмежені терміни зберігання.

Детальне вивчення фізичних ефектів, які супроводжують вакуумне пакування, дозволить пояснити і прогнозувати технологічні дії на продукцію. У зв'язку з цим виконаний цикл теоретичних і експериментальних досліджень, результати яких представлені в цій роботі.

Оцінка сучасних математичних моделей майже не можлива без використання обчислювальної техніки. Тому в роботі виконання розрахунків по визначенню фізичних параметрів здійснювалось за допомогою пакету прикладних програм MathCAD.

РОЗДІЛ 1. Огляд сучасних технологій та обладнання для вакуумного пакування харчових продуктів

1.1. Вакуумне пакування

На сьогоднішній день вакуумне пакування є одним з найперспективніших видів пакувальних технологій. Широке використання вакуумної упаковки останнім часом легко пояснити. Вона дозволяє за рівних умов збільшити в декілька разів терміни зберігання продуктів харчування, виключає втрату продукту при зберіганні, підвищує споживчі властивості товару і якість обслуговування споживачів.

Найширше розповсюдження в Україні вакуумне пакування отримало у виробництві м'ясної, ковбасної, рибної продукції, а також сира. Проте, це далеко не вичерпує сферу його використання. На заході, наприклад, вакуумне пакування широко використовується навіть для пакування четверть- і напівтуш при оптовій продажі м'яса.

В Україні є цікавий досвід використання вакуумної упаковки навіть для такої нестандартної продукції, як квашено-мариновані овочеві салати. Це дозволило досягти зберігання цієї продукції до 25 діб без застосування консервантів.

Останнім часом особливої актуальності набуває подовження термінів зберігання готових м'ясних продуктів. В процесі зберігання багатьох харчових продуктів відбуваються хімічні і мікробіологічні зміни, важливу роль в яких відіграє кисень, світло і температура в сукупності.

Особливо чутливі до окиснення білки м'яса, риби і птиці, які в м'ясі з міоглобіну пурпурно-червоного переходять в оксиформу яскраво-червоного кольору, а потім в метміоглобін – коричневого кольору. При переході більше 50 % оксиміоглобіну в метміоглобін м'ясо стає непридатним до вживання. Для усунення негативного впливу кисню на продукти використовують різні прийоми: видалення кисню, застосування захисних газів, заморожування продуктів.

Найбільш доступним є спосіб вакуумного пакування.

При зберіганні продукції протягом відносно тривалого періоду часу максимальне видалення повітря з упаковки є важливим моментом, так як кисень сприяє росту бактерій і відповідно погіршенню якості і зміні кольору продукції. Важливим є те, що продукція у вакуумній упаковці повинна зберігатися в холодильнику, так як це сповільнює ріст бактерій.

Зберігання м'яса у вакуумі, а значить при низькому парціальному тиску кисню, або припиняє, або уповільнює небажані процеси. Крім того, зберігання у вакуумі супроводжується складним комплексом біохімічних і фізико-хімічних процесів, в результаті яких м'ясо в упаковці дозріває і набуває ніжнішу консистенцію і соковитість, стає доступнішим травним ферментам.

У вакуумі, практично, не відбувається утворення метміоглобіну, тому колір м'яса в упаковці пурпурно-червоний. Після видалення м'яса з упаковки і витримці його на повітрі протягом 20...25 хвилин колір змінюється до яскраво-червоного, що пов'язано з утворенням оксиміоглобіну.

Сам процес вакуумного пакування достатньо простий і полягає в тому, що продукт поміщають в споживчу тару (пакети, піддони і інші об'ємні форми), виконану з бар'єрних, тобто погано проникних для газів, матеріалів і розташовують в камері вакуум-пакувальної машини. Потім здійснюють відкачування повітря з камери. При цьому видаляється 95-99 % повітря, після чого в автоматичному режимі відбувається зварювання швів пакету або об'ємних пакувальних форм.

В деяких випадках перед зварюванням швів в камеру подають вуглекислий газ, кисень, азот або їх суміші, що дозволяє або збільшити терміни зберігання продуктів, або поліпшити їх зовнішній вигляд.

Вирішальними чинниками, що визначають якість вакуумного пакування, є, в першу чергу, властивості використовуваних матеріалів і обладнання.

1.2. Вакуумна упаковка

Якість пакетів для вакуумного пакування – дуже важливий чинник, якщо необхідно максимально зберегти якість продукту. Пакети для вакуумного пакування повинні мати високу механічну міцність, високі бар'єрні і оптичні якості, добре зварюватися, навіть якщо на них потрапила волога або жир.

Основними чинниками, що впливають на якість продукції при зберіганні, є:

- Світлопроникність – деякі типи випромінювання каталізують небажані реакції в продуктах, особливо в світлочутливих речовинах;
- Газопроникність, особливо кисню, дозволяє мікробам аеробів дихати, обумовлює окислення і, як наслідок, втрату аромату, окислення вітамінів і утворення двоокису вуглецю;
- Вологопроникність – створює умови, які можуть сприяти розвитку мікробів, погіршує експлуатаційні характеристики упаковки;
- Теплопроникність – прискорює всі реакції;
- Механічні дії – динамічні (поштовхи і вібрація) і статичні (стискання).

Для вакуумного пакування продуктів харчування використовується плівка, що має низькі показники проникності кисню, вуглекислого газу, азоту і водяної пари. При виборі плівки важливо враховувати і зіставляти бар'єрні властивості плівки з продукцією, що пакується. Для вакуумної упаковки використовують багат шарові структури, що містять від 3 до 6-ти шарів з різних матеріалів. В основному це поєднання поліетилену (ПЕ), поліаміду (ПА) і поліпропілену (ПП). Поліетилен забезпечує безпечний контакт з харчовими продуктами і якість зварювального шва, поліамід – бар'єрні властивості і міцність, а поліпропілен – необхідну жорсткість при виготовленні об'ємних пакувальних форм. В табл. 1.1. наведені технічні характеристики деяких матеріалів, що використовуються для вакуумної упаковки.

Технічна характеристика пакувальних матеріалів, що використовуються
при вакуумному пакуванні Таблиця 1.1.

Назва основного складу пакувального матеріалу	Товщина, мм	Маса 1 м ² матеріалу, г/м ²	Бар'єрні властивості		Максимальна глибина витягування, мм
			O ₂ *	Пари води**	
ПЕ+ОПА	65-90	63-87	38-45	10-19	
ПЕ+ПА	85-200	73-200	2-33	5-17	50-150
ПЕ+ПА+ОПП	90-110	86-106	50	5	
ПЕ+ПА+ПП	110-300	105-300	10-33	1,5-5,5	50-200
ПЕ+ПА+ПЕ	120-280	115-290	10-33	3-6	60-160

* см³/м² · 24 год (23 °С, 50% відн. волог. 0,1 МПа)

** г/м² · 24 год (38 °С, 90% відн. волог.)

Найбільш високими бар'єрними властивостями по відношенню до кисню відзначається матеріал EVON (етилєнвініловий спирт). Через високу собівартість його використовують дуже рідко. Найпопулярніший тип бар'єрних плівок, призначених для зберігання харчових продуктів, плівки, до складу яких входить LDPE (полієтилен низької густини) і ПА. Цей тип упаковки є самим оптимальним з точки зору співвідношення ціна-якість.

На сьогоднішній день в Україні для вакуумного пакування використовується як термоусаджувальна, так і звичайна плівка. Причому остання дешевша від першої в 2-3 рази і умовно ділиться на два типи. Перший тип – плівка товщиною близько 60-70 мкм, для пакування м'яса, сиру, риби, тобто продуктів, які не мають гострих кутів. Ця плівка має хороші бар'єрні властивості, але не стійка до проколів. Другий тип – плівка товщиною від 70 до 120 мкм, що має бар'єрні властивості і стійка до проколів.

При використанні звичайної плівки можна пакувати продукцію як у вакуумі, так і в контрольованому газовому середовищі. Пакування у вакуумі дозволяє збільшити терміни зберігання продукції в середньому в 2-3 рази порівняно зі зберіганням цієї продукції в звичних умовах. При зберіганні в контрольованому газовому середовищі терміни зберігання продукції збільшуються в 4-5 разів, але важливіше те, що в цьому випадку значно розширюється асортимент пакованої продукції, яку можна зберегти, і яка взагалі не зберігається у вакуумі або зберігається недостатньо довго і втрачає товарний вигляд. До цієї продукції можна віднести сире м'ясо, м'ясний фарш, свіжу рибу, сосиски, сардельки, м'ясні і рибні напівфабрикати, салати, кулінарні вироби, птицю, гриби, чищену картоплю, пироги, тістечка, хліб.

Відмінність термоусаджувальних матеріалів від звичайних полягає в тому, що в структурі перших використовується поліетилен спеціальних марок з термоусаджувальними властивостями, який під впливом температури після герметизації продукту усаджується і забезпечує щільне обтискання.

1.3. Вакуум-пакувальне обладнання

Якість пакованої продукції залежить не тільки від технології процесу пакування, пакувальних матеріалів, а в значній мірі і від обладнання, що здійснює процес пакування. На українському ринку вакуум-пакувальне обладнання представляють як вітчизняні так і зарубіжні виробники.

На сьогоднішній день існують кілька пакувальних систем, що дозволяють пакувати у вакуумі і контрольованому газовому середовищі.

Самим розповсюдженим видом пакувальних систем є камерні вакуумні машини, які бувають двох типів: машини для пакування в плоскі пакети з термоусаджувальної і звичайної плівки і машини для пакування у вакуумі в об'ємні піддончики з покриттям плівкою зверху. Обидва типи камерних вакуумних машин можуть використовуватися для пакування в пакети з термоусаджувальної і звичайної плівки у вакуумі і в контрольованому газовому середовищі.

Автоматична пакувальна система працює подібно пакувальній системі для сипких продуктів, але може бути як вертикального, так і горизонтального розташування.

Вакуум-пакувальні машини можна розділити на кілька груп:

- Побутові машини або машини, що використовуються для пакування невеликих об'ємів продукції;
- Машини для крупних цехів і виробництв.

По ступеню автоматизації вакуумні машини діляться на дві групи:

- Напіваавтоматичні машини;
- Автоматичні лінії.

В напіваавтоматичних машинах робітник сам дозує продукт, сам його укладає в об'ємний пакет або форму, сам вкладає пакет у вакуумну камеру. Останнім часом на ринку вакуумного обладнання з'явилися машини, які упаковують продукт в заздалегідь сформовані піддони. Такі машини мають схожий принцип роботи зі звичайними камерними машинами, але на відміну від машин з системою зварювальних рейок – зварювання об'ємної форми здійснюється по всьому периметру піддону. Продукт, запакований на такій машині, обов'язково зберігається в середовищі контрольованого газу, оскільки в середовищі вакууму неможливо зберегти форму упаковки.

Вакуумні машини характеризуються наступними параметрами:

- Розмір пакувальної камери;
- Довжина зварювальних рейок і їх кількість;
- Продуктивність вакуумного насоса (від 3,2 до 250 м³/годину);
- Кількість пакувальних камер;
- Тривалість циклу пакування (в значній мірі визначає продуктивність обладнання).

При виборі вакуум-пакувального обладнання потрібно враховувати те, який продукт і в яких кількостях пакуватиметься (рис. 1.1.).

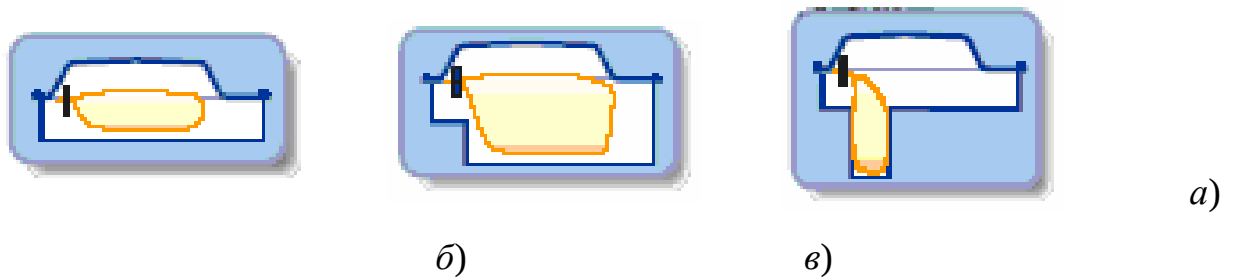


Рис. 1.1. Схеми вакуумних камер різної форми:

- а) для продукції витягнутої форми;
- б) об'ємна і висока камера;
- в) для рідкої продукції.

Моделі камерних машин поділяються на настільні, напільні і двокамерні.

Настільні вакуум-пакувальні машини (рис. 1.2.а) розраховані на періодичну роботу і невелику продуктивність. Всі моделі мають прозору кришку, що дозволяє спостерігати за процесом пакування. Запаювання здійснюється пневматичним способом, процес регулюється за допомогою електронного блоку. Додатково машини можуть бути оснащені похилою вставкою для пакування рідких продуктів, а також пристроєм для створення модифікованої атмосфери.

Для упаковки продуктів в модифікованій атмосфері, що містить високий відсоток кисню, використовують спеціалізовані оксигенові машини. Вуглепластикові насоси, працюючі на кисневостабільних рідинах, повністю виключають можливість спалаху і вибуху.

Очищення камери і зварної планки здійснюється дуже легко і швидко, завдяки округлій формі кутів камери і відсутності сполучних електричних дротів планки. Матеріал камери – нержавіюча сталь.

Напільні вакуум-пакувальні апарати (рис. 1.2.б) призначені в першу чергу для середніх виробництв, малогабаритні, універсальні, економічні, надійні в роботі, не вимагають висококваліфікованого обслуговуючого персоналу. Як додаткова опція всі апарати мають можливість пакування в середовищі

інертних газів. Основний вид упаковки – первинна упаковка продуктів харчування.

Двокамерні напільні вакуум-пакувальні машини (рис. 1.2.в), призначені для роботи з дуже великими об'ємами продукції (м'ясокомбінати, рибозаводи).

Тривалість циклу пакування від 10 до 30 с. Максимально досяжний вакуум 98 %. Глибину вакууму слід підбирати експериментально при відпрацюванні технології.

Можливе одночасне пакування кількох пакетів, в залежності від довжини шини для запаювання. Найпростіші машини забезпечують пакування від 1 до 8 пакетів, в залежності від їх розмірів.

Автоматичні лінії мають дуже складну структуру. Автомат, як правило, складається з модуля, який дозує продукт, модуля, який укладає продукт в заздалегідь підготовлені об'ємні форми або пакети (або сам виробляє ці форми), і модуля, який безпосередньо вакуумує і пакує продукт (рис. 1.3.). Також до цієї схеми можна додати машини, які наносять етикетку на упаковку.

*a)**б)**в)*

Рис. 1.2. Моделі камерних машин.



Рис. 1.3. Автоматична лінія вакуумного пакування.

1.4. Технології різкої зміни тиску при вакуумному пакуванні

Значна кількість різновидів продуктів харчування і напоїв виробляється на основі біотехнологій, і на завершальних етапах виникає необхідність припинення життєдіяльності мікроорганізмів, що їх супроводжують. Під час фасування продукції, створення упаковки необхідно обмежити або зовсім припинити їх контактування з зовнішнім середовищем, створюючи відповідні бар'єри. Існують два шляхи одержання продукції в асептичному стані. Перший з них реалізується, якщо асептично оброблений продукт в асептичних умовах фасується в асептичну тару. Ця тріада умов виконується, коли асептичний стан продукції досягається не за рахунок використання хімічних консервантів. Одержання екологічно чистої продукції вимагає відмови від останніх. Другий шлях одержання продукції довгострокового зберігання досягається тепловими або іншими фізичними впливами на фасовану і герметично закупорену упаковку [1].

Обидва методи знаходяться у постійному розвитку, і вже протягом двох століть найбільш поширеною залишається теплова обробка. За типом упаковки для тривалого зберігання продукції безумовним лідером є жерстяна банка, однак в останні десятиріччя динамічно зростають об'єми полімерних видів упаковки.

Незважаючи на переважне розповсюдження технологій теплової обробки і високий рівень їх технічного забезпечення, вони не позбавлені окремих недоліків, які лімітують якість продукції, питомі енергетичні витрати, геометрію і абсолютні розміри упаковки тощо.

Більшість економічно розвинених країн пройшли через визначення можливостей радіаційної стерилізації. Такі дослідження були припинені у США в 60-ті роки, у Радянському Союзі – в 80-ті. Прийняттю таких рішень сприяла активна розробка вакуумних технологій пакування та технологій контрольованої атмосфери. Завдяки цим технологіям у життя нового покоління увійшли різні види полімерної упаковки для м'ясних і рибних продуктів, сирів,

заморожених фруктів, овочів тощо. До числа переваг вакуумних технологій відносяться: обмеження кількості O_2 , вологи (H_2O), азоту на поверхні продуктів в упаковці. За наявності кисню в упаковці мікрофлора активізується у своїй діяльності. Окрім того кисень бере участь у хімічних та фотохімічних процесах, завдяки яким відбувається окислення жирів, олій, руйнування вітамінів, втрата кольору природних барвників. Аналіз даних і відомих положень щодо вакуумного пакування показує важливість бар'єрних властивостей пакувальних матеріалів і необхідність індивідуального підходу до режимів пакування, стосовно виду продукту і передбачуваного терміну його зберігання.

Вакуумна обробка супроводжується енергетичною дією. При цьому йдеться не про таку енергію, що витрачається безпосередньо на створення вакууму, а про ту, що потрібна для переходу біологічної системи у новий термодинамічний стан. І саме на цьому шляху слід шукати пояснення ефекту дії вакуумування.

Важливо, що швидкість зміни термодинамічних параметрів за вакуумування може порівнюватись з можливостями дуже обмеженої кількості методів фізичної обробки, наприклад надвисокочастотної (НВЧ), імпульсної обробки тощо.

Вивчення процесів переходу енергії здійснюється в межах певної системи, і зони, що відокремлюють цю систему від зовнішнього середовища, можуть бути уявним або реальним бар'єром, що обмежує обмін масою або енергією. За термодинамічну систему може бути обрана упаковка, гомогенна маса середовища або живий організм.

За характером обміну з зовнішнім середовищем розрізняють такі системи: ізольовані (адіабатичні), що не обмінюються ні енергією, ні масою; закриті (ізотермічні), в яких має місце обмін енергією, але не масою. Відкриті системи характеризуються обміном енергії і маси.

Фізичні і хімічні системи, як правило, відносяться до закритих або ізольованих. Біологічні ж системи, в яких постійно здійснюється обмін як енергією, так і речовинами, відносяться до відкритих.

Закони термодинаміки притаманні будь-якій специфічній системі і стосуються повного теплового балансу нескінченного числа молекул. У таких системах має місце широкий розподіл рівнів енергії, але середня їх величина визначається звичайними фізичними поняттями.

Спроби розібратися у фізичній суті явищ тих чи інших методів обробки біологічних середовищ потребують інформації про перебіг їх з одного рівноважного стану до іншого. Проте методи класичної термодинаміки дають інформацію про кількісне порівняння двох рівноважних систем і дуже обмежену інформацію про шляхи їх переходу. Наприклад, термодинаміка не визначає часу і механізму такого переходу.

Оцінка енергетичних балансів біологічних систем здавна знаходиться у полі зору наукових досліджень. Це пов'язано, по-перше, з забезпеченням функціонування таких систем, їх оптимізацією, підвищенням ефективності тощо; по-друге, пошуки можливостей в досягненні летальних ефектів мікроорганізмів сприяли створенню відносно нових технологій, що забезпечують суттєве подовження термінів зберігання продукції харчових виробництв. Пошуки можливостей впливу на характеристики біологічних середовищ і мікроорганізми привели до використання адіабатного кипіння, дискретно-імпульсних методів введення енергії і дестабілізації станів рівноваги, або поступового накопичення енергії і виведення її короткотерміновими імпульсами.

Рівень енергетичного накопичення при цьому залежить від підведення енергії з зовнішніх джерел, за підвищеного тиску відбувається перегрівання середовища.

Якщо після такого перегрівання різко знизити тиск в системі, то досягається адіабатне кипіння, активізація гідродинамічного стану в локальних зонах або навіть в повному об'ємі середовища. При цьому відбувається утворення парової фази, поверхонь розділення фаз, досягаються високі показники швидкості руху міжфазних поверхонь.

Аналогічні явища і гідродинамічні стани досягаються за рахунок вакуумування систем, коли зниженням тиску середовище переводиться до адіабатного кипіння, на яке витрачається його внутрішня енергія, і має місце швидке охолодження. Останнє вимагає безперервного збільшення рівня вакуумування.

Якщо тиск газорідинної системи за вакуумування змінювати, то можна організувати осциляцію початку і завершення кипіння у значному об'ємі біологічної системи. Такий режим забезпечує пульсацію пухирців парової фази, інтенсифікацію масообмінних процесів, кавітаційне зіхлопування пухирців, що супроводжується утворенням ударних хвиль високої і ультразвукової частот тощо.

Оцінка стану теорії, яка стосується дискретно-імпульсних методів інтенсифікації процесів тепло- та масообміну приводить до висновку про достатньо високий рівень її розвитку і різні форми реалізації таких технологій.

В той же час слід відмітити відсутність яких-небудь наукових і технічних спроб використання енергетичного потенціалу, що утворюється у результаті накопичення в біологічних середовищах діоксиду вуглецю.

У замкненому рідинному середовищі за бродіння має місце накопичення CO_2 , що здійснюється у режимі саморегулювання. Відомо, що діоксид вуглецю належить до добре розчинних газів і ця розчинність відповідає закону Генрі (пропорційна парціальному тиску) та залежить від температури рідинного середовища. Утворюється діоксид вуглецю в результаті життєдіяльності мікроорганізмів. Транспортування CO_2 у рідинне середовище здійснюється через цитоплазматичну мембрану (плазмолемму) та клітинну стінку і відбувається на молекулярному рівні. Зростання вмісту розчиненого діоксиду вуглецю досягає рівня насиченості за заданого тиску, що приводить до утворення мікропухирців, їх піднімання до поверхні розділу, руйнування на ній, підвищення загального тиску і поступового зміщення стану рівноваги в сторону збільшення.

Саме зростання тиску в системі підвищує рівень її потенціальної енергії в двох складових, а саме у газовій фазі (надрідинному просторі) і у розчиненому газі.

Проведені дослідження показали, що в залежності від глибини введення в метастабільний стан двофазної системи час активного зниження енергетичного рівня складає від 1 до кількох секунд, що відповідає для вибраних умов потужності процесу дегазації від 4 до 1–2 кВт на 1 л середовища.

Між тим відомо, що для інтенсифікації процесів масообміну в двофазних системах введена потужність складає до 5 кВт на 1 м³ середовища. Наведене співставлення вказує на те, що технологія різкого зниження тиску має енергетичний імпульс, який перевищує аналогічний показник традиційних систем у 200–800 разів.

Технологія введення рідинних середовищ, до яких належить значна кількість соків, напоїв, пива тощо у метастабільний стан супроводжується енергетичними імпульсами такого високого рівня, який є практично недосяжним для інших видів енергетичної обробки. Такі технології супроводжуються летальними ефектами по мікрофлорі (що в якійсь мірі має прояви у вакуумному пакуванні) і тому, наприклад, фасування газонасичених напоїв є галуззю, в якій вони можуть суттєво обмежити використання консервантів і відповідні екологічні ефекти.

1.5. Особливості обробки склотари за допомогою вакууму

Слід підкреслити важливість вибору параметрів вакуумування скляних пляшок у виробництві газованих напоїв. Завдяки цій операції досягається інактивація мікрофлори у залишках води на стінках пляшок і одночасно виконується їх охолодження. Для покращення операції фасування газованих напоїв, обмеження їх спінювання та зменшення температурних напружень температури пляшок і напоїв повинні бути якомога ближчими. Зазвичай температура пляшок після пляшкомиїних машин складає 15–20° С, а напої

фасуються за температур 2-6° С. Кількість теплоти Q , яку необхідно відвести від пляшки масою 0,5 кг складає

$$Q = m_n c_n (t_2 - t_1) = 0,5 \cdot 0,67(20 - 5) \approx 5 \text{ кДж}, \quad 1.5.1$$

де m_n та c_n – відповідно маса пляшки та теплоємність скла; t_2 і t_1 – початкова і кінцева температури пляшки.

Для охолодження за рахунок вакуумування і “холодного” кипіння необхідно випарувати води масою m_e

$$m_e = \frac{Q}{r} = \frac{5}{2257} = 0,00232 \text{ кг}, \quad 1.5.2$$

де r – теплота випаровування води.

Знайдене значення маси m_e дуже близьке до тієї кількості води, яка залишається після миття в пляшці, і це означає правомірність вибору параметрів вакуумування, за яких досягатиметься задане охолодження.

Зазвичай в самому процесі вакуумного охолодження пляшок термічні напруження будуть мати місце, однак вони будуть суттєво нижчими від суми термічних напружень, які виникають при фасуванні холодних напоїв в неохоложені пляшки і напружень від внутрішнього тиску.

Експериментальні дослідження показали, що при забезпеченні певних режимів вакуумування досягається летальний ефект мікрофлори на рівні 100%. При цьому слід нагадати про дію на мікроорганізми стресових факторів. Так, наприклад, для пивних дріжджів до числа стресових факторів відносять осмотичний, етанольний, окислювальний, температурний тощо. При вакуумуванні, окрім “холодного” кипіння одночасно має місце саме стрімке зниження температури. Проведені досліді показали можливість охолодження водного середовища в діапазоні від 40 до 10° С зі швидкістю 0,2-0,5 градусів за секунду, що відповідає потужності відведеного потоку 0,8-2 кВт на 1 кг середовища.

Досягнення певної температури кипіння за рахунок вакуумування потребує певних енергетичних витрат на стискання утворюваної пари, яке

відбувається у вакуум насосі. Враховуючи швидкоплинність процесу такого стискання, у першому наближенні вважатимемо його адіабатним. Кінцевий тиск стиснутої пари дорівнює тиску навколишнього середовища. Як відомо, зміна внутрішньої енергії Δu і робота адіабатного процесу l рівні за величиною і протилежні за знаком

$$\Delta u = -l. \quad (1.5.3)$$

Для оцінки енергетичних витрат вакуумування виконаємо розрахунки, які стосуватимуться 1 кг водяної пари. Робота її стискання за фіксованих значень тисків p_1 і p_2 та абсолютних температур T_1 і T_2 визначаються за формулою

$$l = \frac{R}{k-1}(T_2 - T_1), \quad (1.5.4)$$

де R – газова стала, яка для водяної пари дорівнює 461 Дж/(кг·К); k – показник адіабати.

При цьому

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (1.5.5)$$

При вакуумному охолодженні (кипінні) стабільним залишається тільки тиск P_2 , а параметри T_1 і T_2 є змінними.

При стабілізованому значенні температури $T_1 = 343$ К одержуємо

$$l = \frac{461}{0,4}(473,34 - 343) = 150,17 \text{ кДж}, \quad (1.5.6)$$

а при $T_1 = 303$ К маємо

$$l = \frac{461}{0,4}(748,2 - 303) = 513 \text{ кДж}. \quad (1.5.7)$$

З наведених залежностей видно, що енерговитрати на створення і підтримання вакууму будуть змінними і зростатимуть по мірі охолодження оброблюваного середовища.

Таким чином:

1. Глибоке вакуумування скляної тари перед фасуванням забезпечує асептичну обробку і охолодження об'єктів обробки.
2. Математична модель вакуумування повинна враховувати змінні значення параметрів процесу.
3. Відмову від вакуумування пляшок на багатьох виробництвах слід вважати помилковою.

1.6. Загальні положення процесу вакуумування

Ступінь вакууму

В техніці вакуумом називають стан газу, коли його тиск нижчий за атмосферний. Розрізняють чотири основні ступеня вакууму: низький, середній, високий і надвисокий. Для кількісної оцінки вводиться критерій Кнудсена:

$$Kn = \frac{L}{d_{ef}}, \quad (1.6.1)$$

де L – середня довжина вільного пробігу – довжина, яку молекула газу проходить від зіткнення до зіткнення з іншими молекулами газу; d_{ef} – ефективний розмір вакуумної камери.

Ефективний розмір вакуумної камери $d_{ef} = 4V / F$, де F – площа поверхонь стінок, що контактують з розрідженим газом; V – об'єм камери.

Для молекул газу всередині сферичної посудини діаметром D ефективний розмір камери $d_{ef} = \frac{2}{3}D$, для труби нескінченної довжини з діаметром D одержимо $d_{ef} = D$, а для двох нескінченних паралельних поверхонь, розташованих на відстані D одна від одної – $d_{ef} = 2D$.

Область тиску, коли середня довжина вільного шляху молекул набагато менша характеристичних розмірів вакуумного об'єму, наприклад діаметру трубопроводу, відповідає низькому вакууму. Низький вакуум відповідає $Kn \ll 1$. При цьому обмін енергією відбувається виключно між найближчими

молекулами. Такі умови проявляються у вигляді в'язкості газу, а відповідні процеси називаються в'язкісними.

Область тиску, коли середня довжина вільного шляху молекул приблизно рівна характеристичним розмірам вакуумного об'єму, отримала назву середнього вакууму. В цьому діапазоні тиску зіткнення молекул зі стінками і одна з одною рівноімовірні. Середній вакуум відповідає $Kn \approx 1$.

В області високого і надвисокого вакууму середня довжина вільного шляху молекул набагато більша розмірів вакуумного об'єму, і молекули переважно стикаються зі стінками посудини. В цьому випадку кожна молекула виступає індивідуально, а процеси в газах називаються молекулярними. В високому вакуумі $Kn \gg 1$.

Області тиску, що відповідають тому чи іншому вакууму, представлені на рис. 1.4.

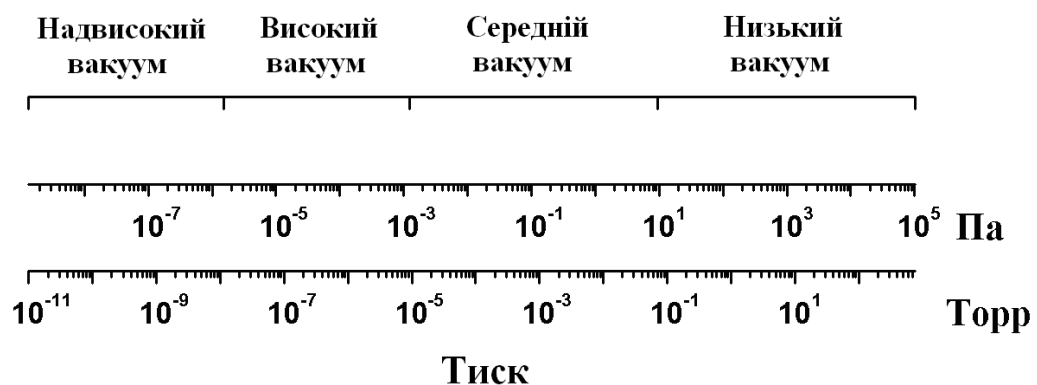


Рис. 1.4. Умовний розподіл областей вакууму

Вакуум-пакувальне обладнання харчової промисловості працює в областях низького вакууму (200 Па).

Характеристики вакуумних систем і їх елементів

Будь-яка вакуумна система (ВС) складається з вакуумної камери (ВК), групи приєднаних до неї або вбудованих вакуумних насосів (ВН), комутуючої і регулюючої арматури, засобів контролю і вимірювання параметрів

розрідженого газового середовища. Поведінка цього середовища однозначно визначається сукупністю ряду характеристик, що описують окремі елементи ВС чи їх сукупність. Найважливішими серед цих характеристик є:

- 1) для ВК – об'єм, поверхня, лінійні розміри, температурне поле, поле десорбційних і дифузійних потоків;
- 2) для ВН – граничний залишковий тиск, продуктивність, швидкість дії, коефіцієнти використання;
- 3) для з'єднувальних трубопроводів, арматури і інших елементів ВС – пропускна здатність, температурне поле, поле десорбційних і дифузійних потоків;
- 4) для системи «насос – трубопровід – камера» – швидкість відкачування, газокінетична стала.

Наведений набір характеристик не є достатнім для опису і розрахунку неоднорідних і незрівноважених ВС. Але для більшості порівняно нескладних ВС він допускає наглядну інтерпретацію і дає прості аналітичні співвідношення.

Загальна характеристика вакуумних насосів

За призначенням вакуумні насоси поділяються на високовакуумні і низьковакуумні. В залежності від фізики дії, що покладена в основу роботи насосу – на механічні, сорбційні і іонні.

Серед механічних насосів можна виділити об'ємні насоси і молекулярні, що основані на передачі руху молекулам газу від рухомих поверхонь.

Переміщення маси газу можна здійснювати періодично, окремими порціями і безперервно. Для видалення порції газу необхідно ізолювати в робочій камері насоса певний об'єм газу, перемістити його від вхідного патрубку насоса до вихідного, стиснути в процесі переміщення до тиску, більшого, ніж тиск у вихідному перерізі насоса, і виштовхнути газ за межі насоса. Вакуумні насоси, які відкачують газ окремими порціями в результаті періодичної зміни об'єму і положення робочої камери, називаються об'ємними

вакуумними насосами. Об'ємними вакуумними насосами є тільки механічні насоси, тобто такі насоси, відкачувальна дія яких заснована на переміщенні газу внаслідок механічного руху робочих частин насоса.

Для безперервного видалення молекул газу необхідно мати тіло, яке постійно захоплювало б і переміщувало газ. Таким тілом може бути безперервно рухома тверда поверхня або потік рідини, пари чи газу. При зіткненні з рухомою твердою поверхнею і в результаті внутрішнього тертя молекули газу набувають переважний напрям руху. Механічні насоси, відкачувальна дія яких заснована на захопленні газу, що видаляється, безперервно рухомими твердими поверхнями, отримали назву молекулярних, оскільки рухомі частини насоса впливають на окремі молекули.

Вакуумні насоси, в яких реалізується другий принцип створення вакууму, отримали назву сорбційних насосів. Газ в сорбційних насосах може зв'язуватися гетером (гетер – речовина, що використовується для хемосорбції газів у вакуумних системах), а також сорбуватися і конденсуватися на охолоджуваній поверхні.

Основні параметри вакуумних насосів

Схема простої вакуумної системи (рис. 1.5) складається з вакуумної камери 1, манометричних перетворювачів 2 і 3, насосу 4 і з'єднувального трубопроводу 5. Витікання газу з вакуумної камери в насос здійснюється за рахунок різниці тисків ($p_1 - p_2$), причому $p_1 > p_2$.

Швидкість дії насоса – це об'єм газу, що видаляється насосом за одиницю часу через вхідний патрубок насоса, л/с, м³/год

$$S_n = dV_2 / dt. \quad (1.6.2)$$

Ефективна швидкість відкачування (S_{ef}) насоса – це об'єм газу, що надходить за одиницю часу з відкачуваного об'єму в трубопровід. Вона залежить від опору трубопроводу.

$$S_{ef} = dV_1 / dt \quad (1.6.3)$$

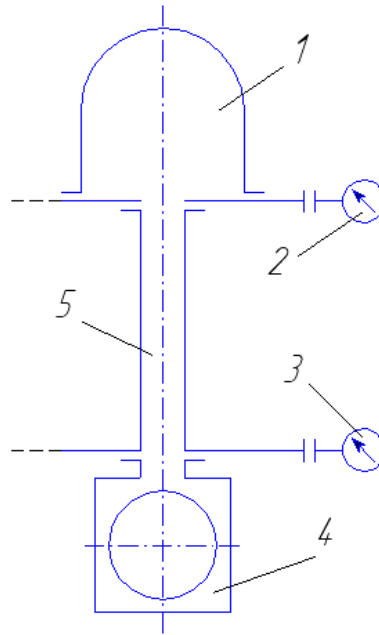


Рис. 1.5. Схема вакуумної системи

Відношення ефективної швидкості відкачування насоса до швидкості дії називається коефіцієнтом використання насоса

$$K_n = S_{ef} / S_n \quad (1.6.4)$$

Продуктивність вакуумного насоса характеризує витрати газу у вхідному перерізі насоса при даному тиску і виражається в $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$. Очевидно, що продуктивність насоса є добуток швидкості відкачування на тиск, при якому вона заміряна

$$Q = p_2 \cdot S_n = p_1 \cdot S_{ef}. \quad (1.6.5)$$

Встановимо зв'язок між трьома основними характеристиками вакуумної системи: швидкістю дії насоса S_n , ефективною швидкістю відкачування об'єкту S_{ef} і провідністю вакуумної системи між насосом і відкачуваним об'єктом U :

$$S_n = Q / p_2 = U (p_1 - p_2) / p_2, \quad (1.6.6)$$

$$S_{ef} = Q / p_1 = U (p_1 - p_2) / p_1. \quad (1.6.7)$$

Якщо записати у вигляді

$$\frac{1}{S_n} = \frac{p_2}{(p_1 - p_2)U}, \quad \frac{1}{S_{ef}} = \frac{p_1}{(p_1 - p_2)U}, \quad (1.6.8)$$

то після віднімання першого виразу від другого отримаємо

$$\frac{1}{S_{ef}} - \frac{1}{S_n} = \frac{1}{U}. \quad (1.6.9)$$

Останнє рівняння називають основним рівнянням вакуумної техніки, яке можна записати у вигляді

$$S_{ef} = S_n U / (S_n + U). \quad (1.6.10)$$

За умови $S_n = U$ отримаємо, що $S_{ef} = 0,5 \cdot S_n$. Якщо $U \rightarrow \infty$, то $S_{ef} \rightarrow S_n$; при $U \rightarrow 0$ слідує $S_{ef} \rightarrow 0$.

Найбільший тиск при пуску вакуумного насоса – це той найбільший тиск в його входному перерізі, при якому насос може почати роботу.

Найбільший робочий тиск вакуумного насоса – це найбільший тиск в його входному перерізі, при якому насос тривалий час зберігає номінальну швидкість дії.

Найбільший випускний тиск – це найбільший тиск у вихідному перерізі насоса, при якому насос може здійснювати відкачування, тобто здійснювати перенесення маси газу зі сторони з низьким тиском в сторону з вищим тиском газу. Ця величина є однією з основних характеристик молекулярних і інших типів насосів.

Система «Насос – трубопровід – вакуумна камера»

Розглядаючи квазістаціонарну систему «Насос (швидкість дії S_n) – трубопровід (пропускна здатність U) – компактна вакуумна камера (об'єм V ,

тиск p)», умову збереження маси відкачуваного газу вздовж тракту відкачування можна представити у вигляді

$$Q = pS = U(p - p_n) = p_n S_n, \quad (1.6.11)$$

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{S_n} + \frac{1}{U}, \quad (1.6.12)$$

де S – швидкість відкачування камери, тобто кількість газу, що проходить за одиницю часу через переріз ВК – Тр.

Останнє рівняння описує головне положення «класичної» вакуумної техніки, що виражає безпосередній зв'язок ефективності відкачування ВК вибраним насосом від пропускної здатності з'єднуючого трубопроводу.

Використане вище поняття «компактна ВК» означає, що характеристичні розміри камери в трьохвимірній системі координат близькі один до одного.

Швидкість відкачування, зберігаючи свій зміст як кількість газу, що проходить через переріз «ВК – Тр» за одиницю часу, може розглядатися як швидкість зміни об'єму відкачуваного газу

$$S = \frac{dV}{dt}. \quad (1.6.13)$$

Для розрахунку можна скористатися умовою ізотермічності процесу відкачування $pV = \text{const}$ і з умови збереження маси в системі «камера – насос»

$$\frac{d(pV)}{dt} = p \frac{dV}{dt} + V \frac{dp}{dt} = 0. \quad (1.6.14)$$

Рівняння балансу газу в камері

$$pS = -V \frac{dp}{dt}. \quad (1.6.15)$$

Розділяємо змінні і інтегруємо вираз

$$\int S dt = \int -V \frac{dp}{p}, \quad (1.6.16)$$

$$S(t_2 - t_1) = -V(\ln p_2 - \ln p_1). \quad (1.6.17)$$

Отримаємо відповідно:

$$S = 2,303 \cdot V(\lg p_1 - \lg p_2)/(t_2 - t_1), \quad (1.6.18)$$

$$\Delta t = 2,303 \cdot \frac{V}{S}(\lg p_1 - \lg p_2). \quad (1.6.19)$$

1.7. Вплив вакууму на біологічні об'єкти

Біологічні об'єкти у більшості випадків мають значну кількість води, а тому слід наголосити на певному взаємозв'язку між термодинамічними параметрами останньої і тиском, який також відноситься до них.

Температурні режими, за якими здійснюється технологічна обробка, складають інтервали від 0 до 100 °С і більше, а активній життєдіяльності мікроорганізмів відповідають дещо вужчі діапазони. Так психрофіли, або холодолюбиві, добре ростуть за відносно низьких температур: мінімальною для їх розвитку є температура $-7... - 2$ °С, оптимальною близько $15...20$ °С і максимальною – $30...35$ °С.

Мезофіли, або ті, що любляють середні температури, ростуть за мінімальної температури $5...10$ °С, оптимальної – $25...35$ °С, максимальної – $40...45$ °С.

Для термофілів нижні температурні режими близькі до 30 °С, оптимальні – до $45...60$ °С, а максимальні – $70...80$ °С.

З наведеного видно, що навіть для температур, які відповідають умовам існування психрофілів, рідинні середовища за вакуумування можуть досягати метастабільних станів. У відповідності з цим очевидно існує необхідність узгоджувати діапазони зміни тиску і відповідно температур середовища з вказаними температурами існування мікроорганізмів.

За вакуумного пакування в окремих випадках слід накладати обмеження на режими адіабатного кипіння рідинної фази. Досягти таких обмежень

можливо за рахунок, наприклад, охолодження продукції до температур, нижчих за температуру кипіння рідинної фази, що відповідають залишковому тиску фасування.

Іншим шляхом для уникнення адіабатного кипіння рідинної фази продукції є обмеження глибини вакуумування. Однак останній вибір повинен підлягати критичному аналізу, оскільки саме в режимах адіабатного кипіння і супроводжуваних останнє кавітаційних явищ можливим є досягнення асептичних ефектів при пакуванні.

Важливим чинником в порушенні умов рівноваги біологічних середовищ є розчинені гази. Відомо, що формування більшості продуктів за їх синтезу і при переробці відбувається в умовах насичення їх рідинної частини повітрям або, наприклад, діоксидом вуглецю в процесах бродіння тощо.

У відповідності з законом Генрі зниження фізичного тиску в рідинній фазі супроводжується виділенням розчиненої газової фази. За законом Генрі і за стабільної температури притаманна кожному з газів стала Генрі визначається як коефіцієнт пропорційності між розчинністю газу і його парціальним тиском. Зважаючи на відносно низьку розчинність азоту N_2 та кисню O_2 , з цієї точки зору і ефекти порушення рівноваги в системі "газ – рідина" можливо оцінювати як відносно обмежені. Однак існує ще один бік зниження ефекту розчинності газів при вакуумуванні. У зв'язку з цим наведемо аналітичну залежність, що відповідає закону Генрі, а саме:

$$C = kP,$$

де C – кількість розчиненого газу; k – стала Генрі; P – парціальний тиск газу.

Звідси видно, що з наближенням тиску P до нуля, до нуля ж прямує і розчинність газу C . Якщо до таких умов переведено біологічне середовище з відповідною мікрофлорою, у якій здійснюється масообмін з середовищем на рівні газових складових (наприклад, процеси бродіння), то вакуумування системи обмежить або зовсім припинить такий масообмін. Пояснити подібну ситуацію слід зростанням опору масопередачі на границі поділу фаз клітина –

середовище. В подібних умовах і за зростання в клітинах розчиненого газу процеси метаболізму уповільнюються, що в подальшому може бути однією з причин бактеріостатичних станів.

1.8. Система пакування в модифікованій атмосфері

На основі вакуумних технологій, на вакуум-пакувальному обладнанні є можливість здійснення пакування продуктів харчування в суміші газів. Система пакування в газовій суміші називається пакуванням в модифікованій атмосфері (МАР). Дана система полягає в заміні повітря в упаковці сумішшю газів з відповідним чином підібраним складом залежно від виду пакованого продукту. Відповідно підібраний для пакованого продукту склад газів гальмує деградаційні процеси, що відбуваються в продукті. Завдяки цьому можливе збереження натуральних властивостей продукту.

Склад газів, введених в упаковку, при зберіганні продукту піддається деяким змінам або внаслідок проникності матеріалу упаковки, або в результаті процесів, що відбуваються в продукті, таких як, наприклад, виділення CO_2 з фруктів, або ж розчинення цього газу в свіжому м'ясі. Останніми роками з'явилися нові можливості поєднання системи МАР з системами, що використовують "активні упаковки". Обов'язковою умовою застосування системи МАР є використання пакувальних матеріалів з високими бар'єрними властивостями для газів.

Основні гази, що використовуються в системі МАР, це двоокис вуглецю, кисень і азот.

Двоокис вуглецю використовується з концентрацією вище 20 % і тільки в деяких випадках нижче цієї концентрації. Відзначається сильними інгібіторними властивостями, що уповільнюють розвиток бактерій і цвілі. Присутність CO_2 , особливо в харчових продуктах, що містять велику кількість води, знижує рН продукту в результаті утворення вугільної кислоти. При великих концентраціях CO_2 , а також більшому вмісті води в продукті, можлива загроза появи кислого присмаку в поверхневому шарі продукту.

Розчинність CO_2 зменшує молекулярний тиск цього газу в суміші, приводячи в крайніх випадках до "усадки" упаковки на продукті, що є ефектом, схожим на вакуумну упаковку. Цей ефект може бути врівноважений введенням в упаковку іншого газу, яким звичайно є азот.

Азот не впливає безпосередньо на стабільність пакованого продукту. Проте використання цього газу для "обмивання" продуктів в упаковці перед заповненням сумішшю газів і замиканням, забезпечує максимально можливе видалення залишків кисню, тим самим, протидіючи розвитку анаеробних бактерій, а також оберігаючи від окислення жири. При високому вмісті N_2 в упаковці легше підтримувати постійну концентрацію суміші газів у зв'язку з тим, що молекулярний тиск N_2 в упаковці і в атмосферному повітрі ближчий до стану рівноваги. У випадках, коли можливе використання високого вмісту N_2 не можна випускати з уваги економічний чинник, пов'язаний з нижчою ціною N_2 в порівнянні з іншими газами.

При пакуванні багатьох продуктів можна виключити присутність в упаковках кисню, що відповідає за процеси окислення, прогіркання жирів і псування продуктів в результаті збільшення бактерій аеробів. Проте бувають випадки, коли рекомендується, щоб вміст кисню в упаковці, який приймає участь, наприклад, в ензиматичному окисленні свіжого м'яса, був відповідно більшим. Збереження яскраво-червоного кольору яловичини, що асоціюється з її свіжістю, і окислення міоглобіну пурпурно-червоного кольору, характерного для свіжого м'яса, вимагає вмісту O_2 в упаковці, що досягає навіть 80 %.

На сьогоднішній день є вже досить великий досвід підбору складу суміші газів залежно від виду продукту.

Переваги пакування в модифікованій атмосфері:

- Збільшення безпеки продуктів для здоров'я, завдяки обмеженню розвитку мікроорганізмів;
- Збереження поживних речовин шляхом запобігання окисленню жирів, біологічно активних сполук, вітамінів;
- Гальмування розвитку небажаних фізико-хімічних процесів;

- Значне подовження періоду стабільності продукту.

В табл. 1.2. наведені дані використання контрольованого газового середовища для пакування різних продуктів харчування і терміни їх зберігання.

1.9. "Активна упаковка"

Серед сучасних систем пакування харчової продукції виділяють "активні упаковки", що певним чином можуть мати спільні риси з вакуумним пакуванням.

Системи, пов'язані із застосуванням "активних упаковок" є новою областю розвитку пакувальної галузі. Вони є спростуванням існуючих прагнень виключити всі взаємодії між упаковкою і її вмістом. Завданням "активної упаковки" є спрямована дія на продукт для забезпечення вищої його якості, а також для подовження періоду стабільності і придатності його для споживання. Технології, пов'язані з "активними упаковками", розширили функції упаковок від пасивного бар'єру по відношенню до зовнішнього впливу до активного захисту продукту.

Технології пакування із застосуванням "активних упаковок" можуть охоплювати:

- введення в упаковку або ж в пакувальні матеріали хімічних або ензиматичних речовин, що адсорбують кисень з атмосфери всередині упаковки;
- введення в упаковку речовин, що створюють або адсорбують двоокис вуглецю;
- регулювання кількості етилену в упаковці за допомогою адсорбції окислюючих речовин або металоорганічних сполук, наявність етанолу у вигляді пари всередині упаковки як чинника, що гальмує розвиток мікрофлори;
- використання консервантів, бактерицидних речовин і антиокислювачів, що виділяються з пакувального матеріалу;
- використання регуляторів вологості;

- використання технології, що дозволяє контролювати запах і смак;
- використання поглиначів світла;
- використання плівок, що виділяють мінеральну речовину, яка зберігає колір продукту;
- облагородження поверхні плівки для зміни її проникності;
- застосування суццепторів, тобто плівок, що управляють нагріванням продукту в мікрохвильовій печі.

Повне видалення кисню, навіть у разі вакуумного пакування, а також змивання інертним газом, практично неможливе. У багатьох випадках навіть невеликий залишок кисню в упаковці має шкідливий вплив на якість продукту. В той же час видалення цих залишків може мати позитивний вплив на захист від:

- збільшення мікроорганізмів;
- окислення жирів;
- зміни кольору;
- зміни запаху і смаку.

Перед введенням в упаковку хімічної речовини, що реагує з киснем, рівень його вмісту може бути знижений до мінімуму. Для цього використовуються, наприклад, сполуки заліза, такі як: оксид заліза і карбонат заліза разом з каталітичними системами, що ініціюють реакцію. Застосовують також неметалічні і металоорганічні речовини.

Залежно від виду речовини, а також способу її введення в упаковку, досягається зменшення вмісту кисню в упаковці. Є також багато доступних в торговій мережі препаратів, що призначені для описаних застосувань. Прикладом можуть бути засоби японської фірми Mitsubishi, під назвою "Agelles" і "Freshmax". "Agelles", що використовується у вигляді саше, вводяться в упаковку з високими бар'єрними властивостями і дозволяють вже через декілька годин знизити залишки кисню до рівня менше 0,1 %, зберігаючи такий вміст протягом декількох місяців. Такого виду саше, використовуються,

наприклад, в упаковках з арахісом, запобігають зростанню перекисного числа, чого не вдається досягти у вакуумних упаковках, що навіть промиваються азотом. "Freshmax" може знаходитися, наприклад: у поверхневому шарі, у внутрішній стінці упаковки або в насиченому цим засобом шматочку картону, що введений в упаковку. Його використання дозволяє знизити вміст кисню в упаковці до рівня 0,01 %. Інший препарат, що називається Smarlcap Barrier, розроблений американською фірмою, вводиться в прокладку ущільнювача закупорювання пивної пляшки, дозволяє знизити рівень кисню в просторі над пивом до рівня, що не викликає відчутних змін смаку пива. Цікавим рішенням є препарат японської фірми, який, усуваючи кисень, одночасно утворює двоокис вуглецю, що запобігає западанню стінки гнучкої упаковки внаслідок вакууму, який виникає в результаті зниження концентрації кисню.

РОЗДІЛ 2. Аналітичне моделювання процесів вакуумного пакування

2.1. Фізичні і технологічні ефекти вакуумного пакування

З метою підвищення продуктивності обладнання для вакуумного пакування час вакуумування намагаються обмежувати. Звичайно цей показник визначається можливостями вакуумного насоса і коливається в межах від 10-15 секунд до 1-2 хвилин. Деякі з технологічних ефектів вакуумної обробки відомі достатньо давно. Так у виробництві соків, маринадів, компотів виконується операція очищення плодів від оболонок. Традиційною технологією тут передбачалася їх обробка парою з тиском 0,6-1,5 МПа в герметичних камерах і різке скидання тиску за час 0,1-0,2 секунди. В результаті цих дій досягається підривання оболонки і подальше відокремлення останньої.

Ефект, що досягається, пояснюється гідролізом протопектину в поверхневих шарах, що прилягають безпосередньо до оболонки. Не заперечуючи такої можливості, все ж таки звернемо увагу на тиск пари, при якому ведеться теплова обробка. Час нагрівання складає 25-40 секунд, а вказаному тиску в 0,6-1,5 МПа відповідає температура пари 158-198 °С. Очевидно, що вказаний час нагрівання і термодинамічні параметри пари забезпечують нагрівання лише поверхневих шарів. Проте, якщо прилеглі до оболонки шари плоду нагріються до температур більше 100 °С, то в результаті різкого зниження тиску відбувається адіабатне кипіння вологи і утворення парової фази, тиск якої забезпечує ефект відокремлення оболонки.

Останнім часом на зміну операціям бланшування плодів приходить вакуумна обробка. При цьому плоди поміщають в закритий резервуар, заповнений гарячим сиропом з температурою 90-95 °С, і в робочому об'ємі створюється тиск 21,3-34,6 кПа, що супроводжується кипінням середовища і утворенням вторинної пари. Вакуумування забезпечує видалення залишків розчиненого повітря, полегшує проникнення сиропу в тканину через міжклітинні переходи і запобігає окисленню фарбувальних речовин. Оскільки

плоди мають температуру середовища, то хоча б в поверхневих шарах також досягається адіабатне кипіння соку з підривом і відокремленням оболонки.

Паковані продукти харчування мають певний рівень вологості. При цьому міжклітинна і внутріклітинна волога знаходяться під різним тиском. Тиск міжклітинної вологи близький до тиску навколишнього середовища, тоді як внутріклітинна волога має суттєво вищий тиск, співрозмірний з осмотичним, що визначається складом клітинного соку. У зв'язку з цим саме міжклітинна волога при певних температурах продукту і тиску в результаті вакуумування швидше переходить в метастабільний стан, що завершується адіабатним кипінням. В експериментальних дослідженнях спостерігається виражене «кипіння» і утворення пухирів парової фази, що швидко руйнуються, на зрізах плодів, ягід, овочів, м'яса, риби, сиру і т.д. Інтенсивність такого пароутворення значною мірою залежить від температури продукту, посилюючись з підвищенням останньої. Наслідком пароутворення є швидке зниження температури вакуумованого об'єкту, і його припинення при певній температурі. Можна припускати, що інтенсивність пароутворення певного рівня відповідає за руйнування не тільки міжклітинних структур, але і клітинних оболонок. Зміни структури рослинного матеріалу добре видно під мікроскопом.

Досліди по вакуумуванню ягід винограду на макрорівні підтверджують цей механізм дії. Із зниженням тиску в камері спостерігається збільшення розмірів ягід з подальшим розривом оболонок і виходом парової фази в місцях розривів. Пояснити цей ефект вакуумування можна наступним. Відомо, що в соку і тканинах ягід присутні розчинені гази в кількостях, які відповідають їх насиченню. Відповідно до закону Генрі граничне насичення тим або іншим газом визначається величиною парціального тиску і залежить від температури. Зниження тиску при вакуумуванні призводить до порушення рівноважного стану, і розчинені гази виділяються у формі мікропухирів. До цих процесів додається генерація парової фази, а інтенсивність утворення газової і парової фаз визначається глибиною входження рідкої фази в метастабільний стан.

Розрив міжклітинних і клітинних структур супроводжується виділенням рідкої фази. У дослідженнях на промисловій установці «Easy Pack» виробництва фірми WEBOMATIC досягався 30 % - ний рівень виділення виноградного соку, без додаткової механічної дії. Крім того, подальше віджимання не вимагало традиційних зусиль. Таким чином, фізичні ефекти вакуумування завершуються помітними технологічними діями на рівні деструкції початкової сировини і виділення рідкої фази.

З погляду інтересів вакуумного пакування вказані ефекти повинні вважатися негативними. Розуміння фізики явищ, разом з тим, дозволяє значною мірою їх обмежити за рахунок регламентації початкової температури продукції. Для цього достатньо звернутися до таблиці 2.1., в якій представлені взаємозв'язки між тиском і температурою кипіння води.

Таблиця 2.1.

Співвідношення між тиском і температурами кипіння води

P, МПа	$6,025 \cdot 10^{-4}$	$8,61 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$7,28 \cdot 10^{-3}$	$1,22 \cdot 10^{-2}$	$1,965 \cdot 10^{-2}$	$3,075 \cdot 10^{-2}$
t(к), °C	0	5	10	20	30	40	50	60	70

Охолодженням продукту до температури нижче за температуру кипіння при тиску вакуумування повністю виключається адіабатне кипіння його рідкої складової. Якщо, наприклад, відомо, що мінімальний тиск у вакуумній камері складає $1,2 \cdot 10^{-3}$ МПа, то це означає необхідність охолодити продукт до температури нижче 10 °C. Відомо, що рідкі фракції продукції рослинного і тваринного походження далеко не вода і температура їх кипіння за інших рівних умов декілька відрізняється від температури кипіння води, проте, в першому наближенні приведена таблиця придатна до використання.

Разом з тим ефекти, що супроводжують вакуумування, можуть знайти серйозне прикладне значення. Так, отримання виноградного суслу як початкової сировини у виробництві шампанського вимагає певного обмеження тиску, що діє на ягоди при пресуванні. Попереднє вакуумування ягід перед

пресуванням дозволяє поєднати вимоги обмеження тиску і підвищення виходу цільового продукту.

Завершується вакуумне пакування герметизацією пакету (упаковки) і розгерметизацією камери, що супроводжується ударною дією атмосферного тиску. При цьому слід звернути увагу на нові умови, в які потрапляє як продукт, так і оболонка упаковки.

2.2. Визначення часу перехідних процесів вакуумування

Рівень вакуумування обмежується технічними можливостями і остаточний тиск складає 0,0002...0,01 МПа. За таких тисків і певних температур оброблюваних біологічних середовищ вакуумування може супроводжуватись активним пароутворенням та кипінням вологи. Фазові переходи супроводжуються кавітацією, оскільки рідинна фаза швидким зниженням тиску переводиться у метастабільний стан. При цьому саме переведення рідини у метастабільний стан і адіабатне кипіння відносяться до групи найпотужніших впливів на середовища з усіма наслідками, які стосуються кавітаційних явищ, інтенсифікації масообмінних процесів, гомогенізації, летальних ефектів по мікрофлорі тощо. Важливе значення при цьому має динаміка зміни тиску $P_{дин}$ створюваного системою вакуумування. Можна стверджувати, що перехідний процес відбувається у рамках певного часу, протягом якого буде зменшуватись і температура середовища.

Час перехідного процесу у певних випадках має принципове значення, а тому більш детально зупинимось на його оцінці.

Витікання газів і пари з вакуумної камери здійснюється за рахунок розрідження в системі. Якщо початковий тиск в камері позначити як $P_{дин}$, то за витікання повітря через насадку співвідношення його з тиском у системі вакуумування порівнюється з критичним значенням:

$$\left(\frac{P_{\text{вак}}}{P_{дин}} \right)_{кр} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}, \quad (2.2.1)$$

де $P_{\text{вак}}$ – тиск в системі вакуумування; k – показник адіабати.

Для двоатомних газів (повітря) $k = 1,4$; $\left(\frac{P_{\text{вак}}}{P_{\text{дин}}}\right)_{\text{кр}} = 0,528$.

Якщо адіабатне витікання здійснюється за умови

$$\left(\frac{P_{\text{вак}}}{P_{\text{дин}}}\right) \leq \left(\frac{P_{\text{вак}}}{P_{\text{дин}}}\right)_{\text{кр}}, \quad (2.2.2)$$

то швидкість газу у насадці буде дорівнювати критичній швидкості

$$\omega_{\text{кр}} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} RT_1}, \quad (2.2.3)$$

де R – газова стала; T_1 – температура у вакуумній камері.

За вказаних значень k для повітря одержуємо

$$\omega_{\text{кр}} = 1,08 \sqrt{RT_1}. \quad (2.2.4)$$

У випадку коли $\left(\frac{P_{\text{вак}}}{P_{\text{дин}}}\right) > \left(\frac{P_{\text{вак}}}{P_{\text{дин}}}\right)_{\text{кр}}$, то швидкість витікання газу

$$\omega = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} RT_1 \left[1 - \left(\frac{P_{\text{вак}}}{P_{\text{дин}}}\right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}. \quad (2.2.5)$$

Оскільки вакуумне пакування здійснюється за тисків, що зумовлені можливостями машини і забезпечують кипіння при температурі 10...35 °С, то це визначає на першому етапі вакуумування

$$P_{\text{вак}} \approx 0,0002 \dots 0,004 \text{ МПа.}$$

Тоді за початкового значення $P_n = P_{\text{дин}} = 0,1 \text{ МПа}$, одержуємо

$$\frac{P_{\text{вак}}}{P_{\text{дин}}} = 0,002 \dots 0,04 < \left(\frac{P_{\text{вак}}}{P_{\text{дин}}}\right)_{\text{кр}} = 0,528 \quad (2.2.6)$$

і робимо висновок про необхідність визначення $\omega_{\text{кр}}$ на першому етапі за формулою (2.2.4).

В результаті зниження $P_{\text{дин}}$ і стабільній величині $P_{\text{вак}}$ буде досягнуто співвідношення

$$\left(\frac{P_{\text{вак}}}{P_{\text{дин}}}\right) = 0,528, \quad (2.2.7)$$

після чого швидкість витікання визначається за формулою (2.2.5).

Вакуумування камери уподібнюється розширенню газів у необмежений простір, що дає можливість використати відому в термодинаміці залежність параметрів за їх адіабатного розширення:

$$\left(\frac{P_n}{P_{дин}} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \frac{T_1}{T_2}, \quad (2.2.8)$$

де T_1 і T_2 – абсолютні температури газу у вакуумній камері, що відповідають тискам $P_{дин1}$ та $P_{дин2}$.

За змінних значень $P_{дин}$ визначимо плинну температуру T :

$$T = \frac{T_1}{\left(\frac{P_n}{P_{дин}} \right)^{\frac{k-1}{k}}}. \quad (2.2.9)$$

Залежність між тиском і температурою повітря у вакуумній камері графічно представлена на рис. 2.3.

Змінні значення температури T приводять до зменшення $\omega_{кр}$ і на першому етапі отримуємо

$$\omega_{кр} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} R \frac{T_1}{\left(\frac{P_n}{P_{дин}} \right)^{\frac{k-1}{k}}}}; \quad (2.2.10)$$

а на другому –

$$\omega = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} R \frac{T_1}{\left(\frac{P_n}{P_{дин}} \right)^{\frac{k-1}{k}}} \left(1 - \left(\frac{P_{вак}}{P_{дин}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)}. \quad (2.2.11)$$

Виконаємо підрахунки за формулами (2.2.10) і (2.2.11), вважаючи, що $P_{вак} = 0,0002$ МПа, задаючись діапазоном зміни $P_{дин}$ від $P_{дин} = P_{дин(n)}$ до $P_{дин} = \frac{P_{вак}}{0,528}$.

На другому етапі розрахунки виконаємо за зміни $P_{дин}$ в межах

$$\frac{P_{вак}}{0,528} > P_{дин} = P_{вак}, \quad (2.2.12)$$

$$0,00038 > P_{дин} = 0,0002 \text{ МПа.}$$

Результати розрахунків графічно представлені на рис. 2.1. та рис. 2.2.

Формули (2.2.10) та (2.2.11) дають можливість визначити як початкову швидкість I-го етапу $\omega_{(n)}^I$, так і кінцеві швидкості першого $\omega_{(к)}^I$ та другого

етапів $\omega_{(\kappa)}^{\text{II}}$. Важливою є можливість визначення тривалості перебігу першого та другого етапів.

Об'ємні витрати газу за одиницю часу знайдемо для обох етапів за формулами відповідно

$$V^I = f \cdot \omega_{\text{кр.с}}^I \quad \text{та} \quad V^{\text{II}} = f \cdot \omega_c^{\text{II}}, \quad (2.2.13)$$

де f – площа поперечного перерізу вихідного патрубку.

У першому наближенні середні за етапи швидкості знайдемо як

$$\omega_{\text{кр.с}}^I = \frac{\omega_{(n)}^I + \omega_{(\kappa)}^I}{2}, \quad (2.2.14)$$

$$\omega_c^{\text{II}} = \frac{\omega_{(\kappa)}^I + \omega_{(\kappa)}^{\text{II}}}{2}. \quad (2.2.15)$$

Для розв'язання задачі про час вакуумування системи скористаємося покроковими розрахунками.

Наприклад, при зміні тиску від 0,09 до 0,08 МПа і за $P_{\text{вак}} = 0,0002$ МПа маємо критичні значення швидкості $\omega_{\text{кр}(0,09)} = 313,85$ і $\omega_{\text{кр}(0,08)} = 308,48$ м/с при $T_1 = 303$ К. Середнє значення $\omega_{\text{кр}}$ на цьому діапазоні складає величину

$$\omega_{\text{кр.с}} = \frac{\omega_{\text{кр}(0,08)} + \omega_{\text{кр}(0,09)}}{2} = \frac{308,48 + 313,85}{2} = 311,17 \text{ м/с}. \quad (2.2.16)$$

Тоді за площі перерізу насадки $f = 1 \cdot 10^{-4}$ м² середні об'ємні витрати складуть

$$V_c = f \cdot \omega_{\text{кр.с}} = 0,0311 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2.2.17)$$

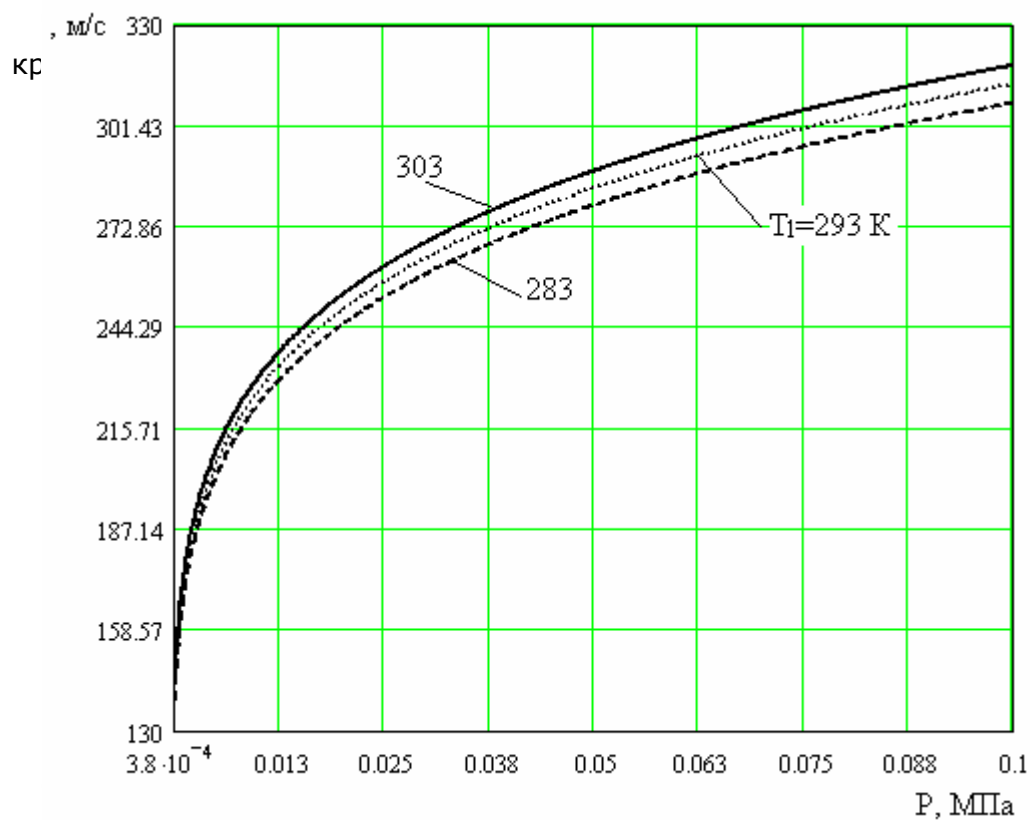


Рис. 2.1. Залежність критичної швидкості витікання повітря від тиску у вакуумній камері (І етап)

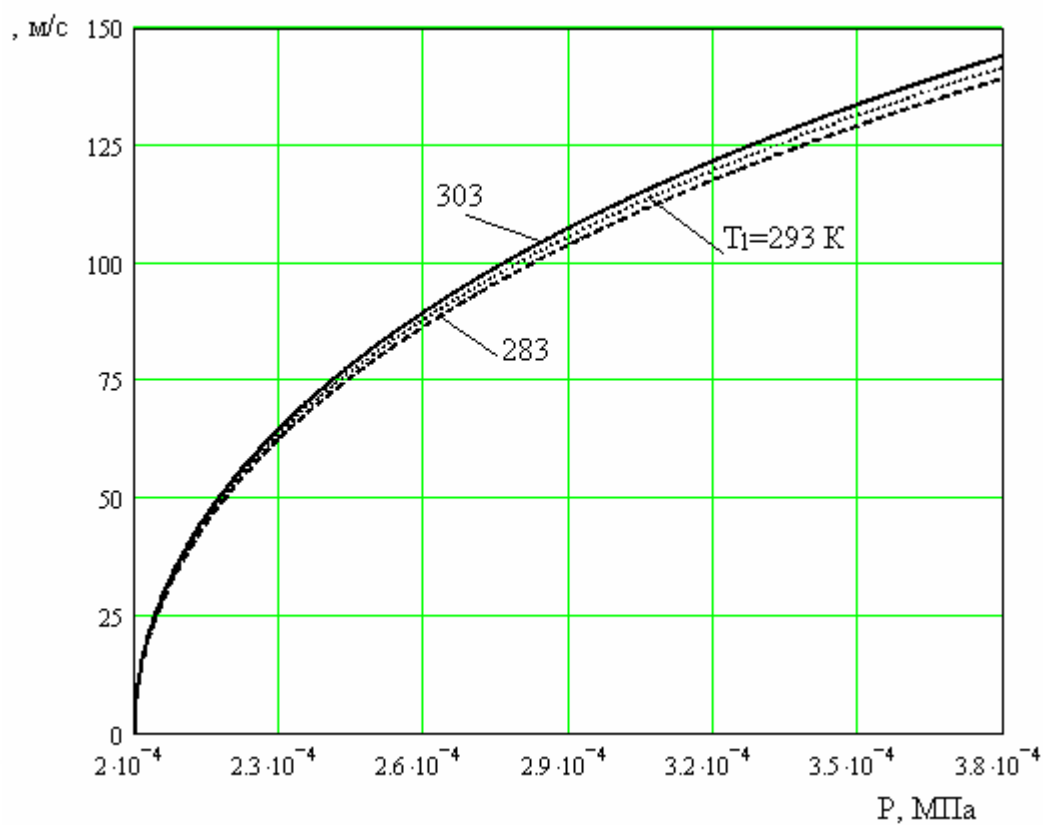


Рис. 2.2. Залежність швидкості витікання повітря від тиску у вакуумній камері (ІІ етап)

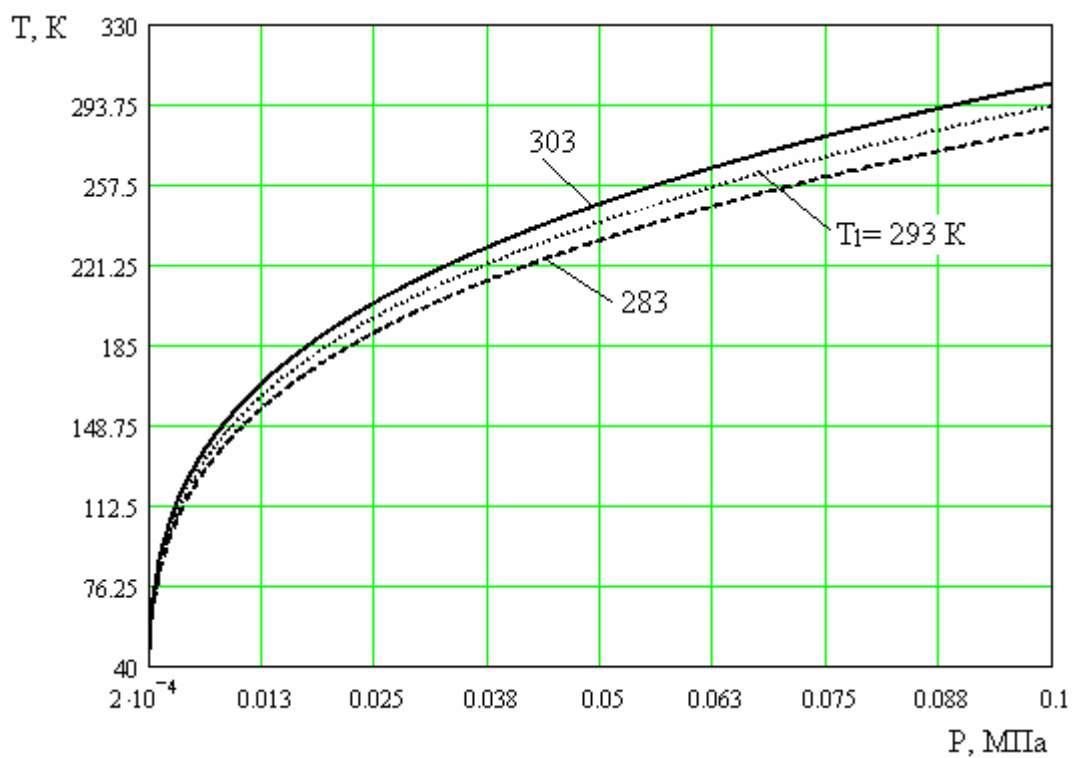


Рис. 2.3. Залежність між тиском і температурою у вакуумній камері

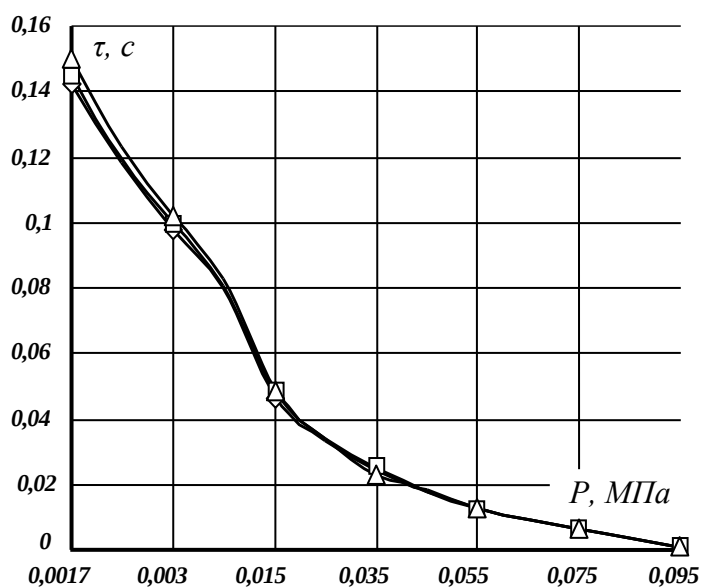


Рис. 2.4. Графік по визначенню часу вакуумування при:

$\diamond$ - $T_1 = 313$; $\square$ - $T_2 = 303$; Δ - $T_3 = 293$ K

Позначимо об'єм камери вакуумування V_0 і, скориставшись рівнянням стану газу, визначимо його початкову масу

$$M_0 = \frac{P_0 V_0}{RT_0}, \quad (2.2.18)$$

де P_0 і T_0 – відповідно початковий тиск і початкова абсолютна температура повітря у камері.

Якщо на першому кроці розрахунків одержуємо відповідно тиск P_1 і температуру T_1 , то маса повітря, що залишається, складає

$$M_1 = \frac{P_1 V_0}{RT_1}, \quad (2.2.19)$$

а маса видаленого повітря

$$\Delta M_1 = M_0 - M_1 = \frac{P_0 V_0}{RT_0} - \frac{P_1 V_0}{RT_1} = \frac{V_0}{R} \left(\frac{P_0}{T_0} - \frac{P_1}{T_1} \right). \quad (2.2.20)$$

Об'ємна маса повітря в камері до вакуумування

$$\rho_0 = \frac{M_0}{V_0}, \quad (2.2.21)$$

а після першого кроку вакуумування

$$\rho_1 = \frac{M_1}{V_0} = \frac{P_1 V_0}{RT_1 V_0} = \frac{P_1}{RT_1}. \quad (2.2.22)$$

Тоді масові витрати на першому кроці

$$m_{(0-1)} = f \frac{\rho_0 + \rho_1}{2} \omega_{кр.с(1)}, \quad (2.2.23)$$

а час перебігу вакуумування на першому кроці

$$\tau_{(0-1)} = \frac{\Delta M_1}{m_{(0-1)}} = \frac{V_0}{R} \left(\frac{P_0}{T_0} - \frac{P_1}{T_1} \right) \frac{2}{f(\rho_0 + \rho_1) \omega_{кр.с(1)}}. \quad (2.2.24)$$

Відповідно для другого кроку записуємо

$$\tau_{(1-2)} = \frac{\Delta M_2}{m_{(1-2)}} = \frac{2V_0}{R} \left(\frac{P_1}{T_1} - \frac{P_2}{T_2} \right) \frac{1}{f(\rho_1 + \rho_2) \omega_{кр.с(2)}}. \quad (2.2.25)$$

Тоді час перебігу вакуумування на n -ому кроці

$$\tau_{(n-(n-1))} = \frac{\Delta M_n}{m_{(n-(n+1))}} = \frac{2V_0}{fR(\rho_n + \rho_{(n+1)})\omega_{kp(n)}} \left(\frac{P_n}{T_n} - \frac{P_{(n+1)}}{T_{(n+1)}} \right), \quad (2.2.26)$$

а загальний час вакуумування на першому етапі

$$\tau^I = \tau_{(0-1)} + \tau_{(1-2)} + \dots + \tau_{(n-(n+1))} + \dots + \tau_{(k-(k+1))}, \quad (2.2.27)$$

де k – номер останнього кроку в розрахунках по першому етапу.

Складові рівняння (2.2.23) на n -ому кроці визначаються за формулами

$$\rho_n = \frac{P_n}{RT_n}, \quad m_{(n-(n+1))} = f \frac{\rho_n + \rho_{(n+1)}}{2} \omega_{kp.c(n)}. \quad (2.2.28)$$

Залежності по визначенню термодинамічних параметрів стану повітря і часу перебігу процесу, записані для першого етапу, відповідають і другому етапу. При цьому кінцеві параметри першого етапу відповідають початковим параметрам другого етапу:

$$M_{(\kappa)}^I = M_{(n)}^{II}; \quad \rho_{(\kappa)}^I = \rho_{(n)}^{II}; \quad T_{(\kappa)}^I = T_{(n)}^{II}; \quad P_{(\kappa)}^I = P_{(n)}^{II}; \quad \omega_{kp(\kappa)}^I = \omega_{(n)}^{II}. \quad (2.2.29)$$

З рисунків видно, що початкова температура T_1 незначно впливає на час вакуумування, оскільки всі три лінії графіків при різних початкових температурах (283, 293, 303 К) розміщуються практично в одну лінію.

Графік по визначенню часу вакуумування за вибраних параметрів – на рис. 2.4. При цьому залежність $\tau = \tau(P)$ показано для обох етапів і перегин кривої відповідає критичному значенню $P_{\text{дин(кр)}}$.

Досягнення заданого рівня вакуумування відповідає часу $\tau \approx 0,145$ с, що дає можливість оцінити вакуумування як швидкоплинний процес.

Таким чином на основі врахування плинних значень термодинамічних параметрів одержана оцінка змінної швидкості витікання повітря на першому і другому етапах і здійснено перехід до визначення часу перебігу процесу.

Останнє має значення в розрахунках технологій, пов'язаних з різкою зміною тиску, які стосуються біологічних середовищ.

Розроблена методика розрахунків стосується різних параметрів у тому числі і величини $P_{\text{вак}}$, а тому може застосовуватись, наприклад, в системах з буферним вакуумним резервуаром.

Разом з тим за подібним алгоритмом може виконуватись розрахунок систем, в яких тиск змінюється від якогось певного значення до атмосферного.

Аналіз одержаних моделей приводить до висновку про існування певної залежності між швидкістю потоку повітря в насадці і швидкістю звуку та величинами середньоарифметичної та середньоквадратичної швидкості молекул.

Відомо, що швидкість поширення звукових хвиль c визначається за залежністю:

$$c = \sqrt{k \frac{p}{\rho}} = \sqrt{kBT}, \quad (2.2.30)$$

де k – показник адіабати; B – питома газова стала і

$$B = \frac{R}{\mu}, \quad (2.2.31)$$

де μ – молекулярна вага газу.

Середньоарифметична та середньоквадратична швидкості молекул визначаються за формулами

$$u_{c.a.} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}; \quad (2.2.32)$$

$$u_{c.g.} = \sqrt{3BT} = \sqrt{\frac{3KE}{\mu}}. \quad (2.2.33)$$

За змінних термодинамічних параметрів газової фази у вакуумній камері змінними будуть і величини $u_{c.a.}$ та $u_{c.g.}$.

За різних абсолютних співвідношень залежностей $w = w(c)$, $w = w(u_{c.a.})$ та $w = w(u_{c.g.})$ їх характер подібний. Існування таких залежностей вказує на можливість використання загальновизнаних у фізиці закономірностей хвильових процесів та співвідношень кінетичної теорії газів з термодинамічними процесами.

Визначимо час вакуумування камери промислової установки «Easy Pack» виробництва фірми WEBOMATIC за наведеною методикою.

Розрахунки виконуємо при $T_1=293$ К (20 °С).

Результати розрахунків зведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2.

Об'єм камери	Час вакуумування t, с		
	I етап $0,1 - 3,8 \cdot 10^{-4}$ МПа	II етап $3,8 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-4}$ МПа	загальний
$V_1 = 0,01924 \text{ м}^3$	2,6	74,2	76,8
$V_2 = 0,01658 \text{ м}^3$	2,3	64,0	66,3
$V_3 = 0,01421 \text{ м}^3$	2,0	54,8	56,8
$V_4 = 0,01125 \text{ м}^3$	1,5	43,4	44,9

З графіків видно, що за час вакуумування досягається тиск приблизно $2,03 \cdot 10^{-4}$ МПа, тобто на 3 Па більше за задане значення вакууму.

Залежність між тиском і часом вакуумування представлена на рис. 2.5.

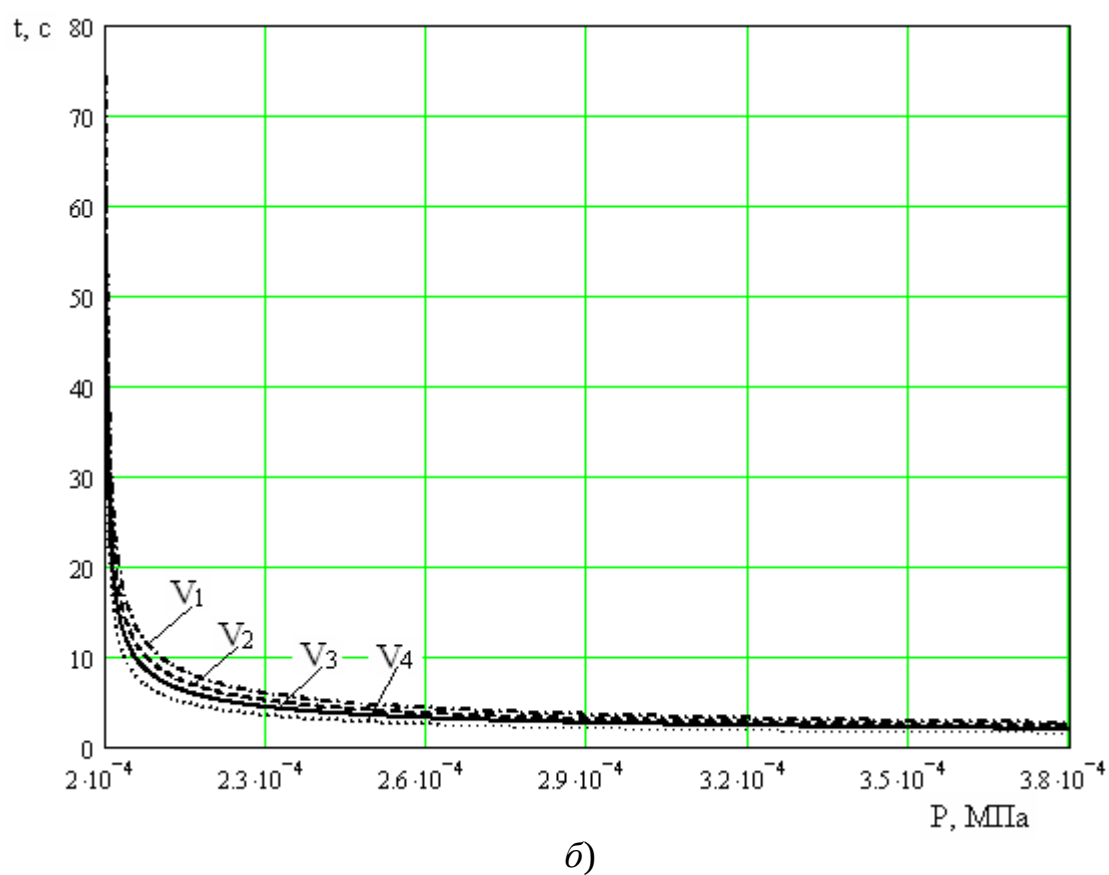
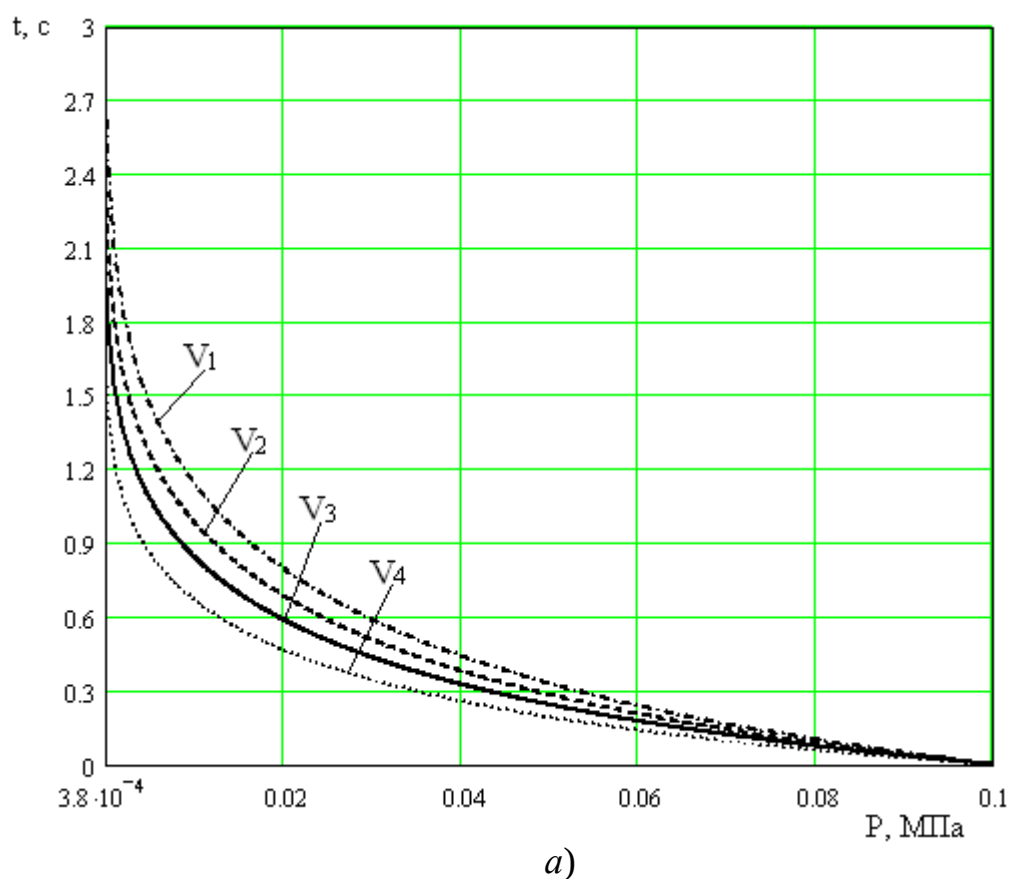


Рис. 2.5. Графік для визначення тривалості вакуумування камери різних об'ємів: а) I етап; б) II етап

2.3. Вакуумне пакування і кавітація

Фазові переходи під час вакуумування супроводжуються кавітацією, оскільки рідинна фаза швидким зниженням тиску переводиться у метастабільний стан.

Відомо, що за фазових перетворень у чистій (без фазових включень) рідині, можливо реалізувати достатньо стійкі метастабільні стани. У такій рідині за даних температури T і тиск P менший за тиск насиченої пари P_ϕ . При цьому тиск P може бути від'ємним.

Знижувати величину тиску P можливо до певного рівня P_k , за якого у рідині виникає кавітація. Величину P_k прийнято називати паровим тиском кавітації.

У чистій рідині можлива парова кавітація, при якій має місце кипіння при тиску у каверні, рівному тиску насиченої пари.

У звичайній рідині завжди є розчинені гази, а також гази у вигляді надмілких бульбашок радіусом 10^{-9} м, які виступають зародками кавітації.

Якщо стан рідини визначити за допомогою рівняння Ван-дер-Ваальса

$$P = \frac{RT}{V - B} - \frac{A}{V^2}, \quad (2.3.1)$$

де A та B сталі величини, для води $A \cdot 10^6 = 5,468 \frac{\text{атм} \cdot \text{см}^6}{\text{моль}^2}$, $B = 30,52 \frac{\text{см}^3}{\text{моль}}$, R

– універсальна газова стала, T – абсолютна температура, V – об'єм, то мінімальний тиск розриву $(P_k)_{\min}$ (за даної температури T) визначається з умови мінімуму ізотерми Ван-дер-Ваальса (рис. 2.5), що відповідає межі стійкості рідинного стану (точка в). Визначена таким чином величина $(P_k)_{\min}$ характеризує ті розтягуючі зусилля, за яких порушується суцільність рідини внаслідок розриву молекулярних зв'язків.

В реальних рідинах мають місце фазові включення різних розмірів, тому одержати $(P_k)_{\min}$ не вдається, і вони розриваються за значень P_k , значно більших за $(P_k)_{\min}$.

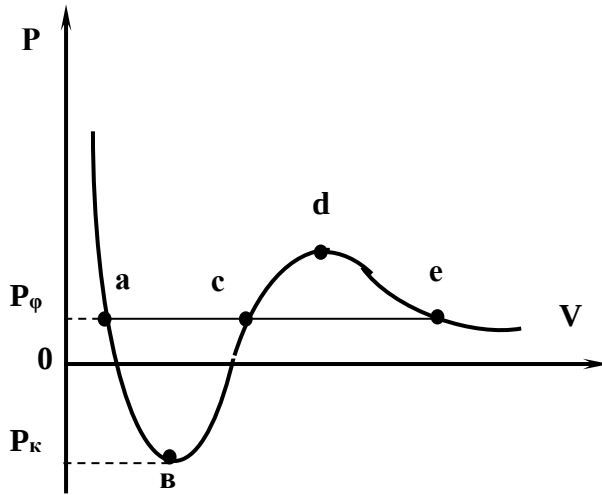


Рис. 2.6. Ізотерма рівняння Ван-дер-Ваальса

Різні зародки кавітації приводять до того, що рідини в різних умовах мають різну міцність на розрив ΔP_k

$$\Delta P_k = P_\phi(T_0) - P_k, \quad (2.3.2)$$

де P_ϕ – тиск насичуючої пари над плоскою поверхнею рідини, що визначається величиною температури T ; P_k – тиск, за якого в рідині виникає розрив суцільності, тобто виникають кавітаційні порожнини.

Оскільки $P_\phi > P_k$, то величина ΔP_k завжди додатна за фазових перетворень у метастабільній рідині, викликаних зниженням тиску нижче тиску насичуючої пари.

Величина ΔP_k зручна для опису кавітаційної міцності за квазістатичного розтягування рідини, що відповідає більшості випадків вакуумного пакування. Однак зменшити тиск до величини P_k можливо також за періодичних або нерегулярних пульсацій тиску. Тоді за кавітаційну міцність приймається величина амплітуди пульсацій тиску P_{mk} , яка досягає значень P_k .

Кавітаційна міцність залежить від різних параметрів рідини, розмірів і природи зародків кавітації, характерного розміру R_0 , температури рідини T . За випадків періодичних змін тиску важливим параметром стає частота пульсацій в потоці або в акустичному полі. Це говорить про необхідність врахування характерного часу τ і для випадків квазістатичного розтягування рідин. Таким чином

$$\Delta P_k = \Delta P_k(T, R_0, 1/\tau, \dots). \quad (2.3.3)$$

Вакуумуванням упаковок досягається метастабільний стан рідинної фази і за інших рівних умов певне значення має час витримки біологічного середовища в умовах низьких тисків. Енергія перегрітого середовища при цьому витрачається на утворення поверхні поділу рідинної і паро-газової фаз, утворення пари та генерацію кавітаційних явищ. Останні супроводжуються цілим рядом фізичних ефектів.

Зіхлопування кавітаційних бульбашок супроводжується виникненням ударних хвиль з великою амплітудою тиску. Релей на основі ідеалізації картини розвитку кавітаційної бульбашки (рідина нестискувана, в ній відсутні гази, а в'язкістю можна знехтувати) показав, що максимальний тиск в рідині на відстані $r = 1,587R$ від центру бульбашки становить

$$P = 0,163P_0 \left(\frac{R_0}{R} \right)^3, \quad (2.3.4)$$

де R_0, R – відповідно початковий і кінцевий радіуси газової бульбашки; P_0 – гідростатичний тиск в рідині.

За підрахунками вказана амплітуда піднімання тиску становить $(40 \dots 50)10^7$ Па.

Зіхлопування бульбашок здійснюється за час

$$t = 0,915R_0 \sqrt{\frac{\rho}{P_0}}, \quad (2.3.5)$$

де ρ – густина рідини.

Оскільки зіхлопування бульбашок здійснюється за мінімальний час, то процес стискання є близьким до адіабатичного, що приводить до різкого зростання температури газової фази (до 2000 K). За Френкелем за рахунок перерозподілу зарядів на поверхні поділу фаз створюються електричні поля напруженістю до 100–600 В/см. Малі розміри стиснутої бульбашки спричиняють за таких напружень електричний пробій, що супроводжується випромінюванням в ультразвуковій частині спектру.

При цьому у кавітаційній порожнині виникають іонізовані збуджені молекули та іони, вільні радикали тощо. У відповідності з цими уявленнями молекули води розщеплюються на валентнонасичені атоми водню H і гідроксильні радикали OH . В результаті зіхлопування каверн, вони переходять у водне середовище. Такому переходу допомагає те, що час існування кавітаційних порожнин складає $0,5 \cdot 10^{-6}$ секунд і є меншим за час існування вільних радикалів ($10^{-2} \dots 10^{-4}$ секунд). Важливі наслідки для біологічних середовищ має утворення перекису водню H_2O_2 і озону O_3 . Останні процеси суттєво залежать від наявності у рідинному середовищі розчиненого кисню.

Механізм хімічних впливів кавітації, які є наслідком фізичних дій, пояснюється кавітаційно-механічною, кавітаційно-резонансною та кавітаційно-фотохімічною теоріями. Остання відноситься саме до біологічних середовищ.

Інтенсивність кавітаційних процесів в значній мірі залежить від концентрації зародків в рідинній фазі. За рахунок зародків долається бар'єр внутрішнього тиску P' у бульбашці, який визначається сумою статичного тиску P і тиску поверхневого натягу

$$P' = P + \frac{2\sigma}{R}, \quad (2.3.6)$$

де σ – поверхневий натяг; R – радіус бульбашки.

Умовою початку утворення кавітаційних порожнин є рівність суми статичного тиску і тиску поверхневого натягу – тиску P_ϕ насичуючої пари, тобто

$$P_\phi = P + \frac{2\sigma}{R}. \quad (2.3.7)$$

Оскільки величина P_ϕ є функцією температури T середовища, то статичний тиск початку кавітації

$$P = P_\phi - \frac{2\sigma}{R}. \quad (2.3.8)$$

Оскільки теоретична нижня межа статичного тиску $P = 0$, то мінімальні або критичні радіуси бульбашок (або зародків бульбашок) можна підрахувати за прийнятих значень P_ϕ для води. Наприклад, за $t = 20^\circ\text{C}$ маємо для води

$$P_\phi = 2336,8 \text{ Па}; \quad \sigma = 0,0729 \text{ Н/м.}$$

Тоді

$$R_{кр} = \frac{2\sigma}{P_\phi} = \frac{2 \cdot 0,0729}{2336,8} = 6,239 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 62,39 \text{ мкм.}$$

Для порівняння наведемо співвідношення параметрів за інших температур:

$$\begin{aligned} t = 62^\circ\text{C}, \quad P_\phi &= 21837 \text{ Па}, \quad \sigma = 65 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}, \quad R_{кр} = 6,67 \text{ мкм}; \\ t = 72^\circ\text{C}, \quad P_\phi &= 33957 \text{ Па}, \quad \sigma = 63 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}, \quad R_{кр} = 4,3 \text{ мкм}; \\ t = 100^\circ\text{C}, \quad P_\phi &= 101325 \text{ Па}, \quad \sigma = 57 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}, \quad R_{кр} = 1,56 \text{ мкм.} \end{aligned}$$

З наведених даних видно важливе значення температури середовища на переведення його у метастабільний стан і досягнення режимів кавітації.

Вважається, що у більшості випадків зародками кавітаційних порожнин виступають газові (повітряні) бульбашки, які у зв'язку з їх відносно малими розмірами мають сферичну форму.

Окрім газових бульбашок у воді завжди присутні молекули або групи молекул розчинених газів, впроваджені в молекулярні структури води.

Концентрація розчинених газів залежить від розчинності їх у воді. У відповідності з законом Генрі насичена рівноважна концентрація розчиненого газу C_n прямопропорційна парціальному тиску газу над поверхнею P_ϕ , тобто

$$C_n = k_\phi P_\phi, \quad (2.3.9)$$

де k_ϕ – коефіцієнт Генрі, різний для різних газів.

Для кожного газу коефіцієнт k_ϕ залежить тільки від температури T , зі зростанням якої величина k_ϕ знижується.

Розчинений у воді газ у вигляді молекул не може суттєво знизити її кавітаційну міцність, однак за вакуумування внаслідок різкого зниження тиску окремі молекули газу або групи молекул швидко утворюють бульбашки достатньо великих розмірів.

Кавітація може також виникати на твердих зародках різної геометричної форми, мікроорганізмах або продуктах їх життєдіяльності. Наприклад, розміри бактеріальних клітин складають ≈ 1 мкм, дріжджових клітин $\approx 5 \dots 9$ мкм. Порівнюючи їх зі значеннями $R_{кр}$, приходимо до висновку, що ця мікрофлора продуктів харчування може виступати за певних умов зародками кавітаційних порожнин.

Як відмічалось, енергетичним джерелом кавітації є власний потенціал середовища і за введення якого у метастабільний стан відбувається його перерозподіл з досягненням вказаних фізичних і хімічних процесів. За рахунок вакуумування має місце активне випаровування вологи і зміна температури середовища.

Встановимо взаємозв'язок між термодинамічними параметрами вакуумізованого середовища.

Вихідними даними для такого випадку будуть початкова маса середовища $m_{(n)}$, його початкова температура $t_{(n)}$, кінцева температура $t_{(к)}$, яка визначає кінцевий тиск вакуумування $P_{(к)}$. Вважаємо при цьому, що пароутворення відбувається у всьому об'ємі рідинної фази.

Кількість теплоти Q_1 , що втрачається середовищем, визначається за формулою

$$Q_1 = c \frac{m_{(n)} + m_{(к)}}{2} (t_{(n)} - t_{(к)}), \quad (2.3.10)$$

де $m_{(к)}$ – кінцева маса середовища.

Кількість Q_1 за умовою теплового балансу рівна тій кількості Q_2 , що необхідна для пароутворення

$$Q_2 = r(m_{(n)} - m_{(к)}). \quad (2.3.11)$$

Прирівнявши значення Q_1 і Q_2 , запишемо

$$c \frac{m_{(n)} + m_{(к)}}{2} (t_{(n)} - t_{(к)}) = r(m_{(n)} - m_{(к)}), \quad (2.3.12)$$

де c – теплоємкість середовища; r – теплота пароутворення.

Розв'язання умови (2.3.12) відносно $m_{(к)}$ дозволяє знайти

$$m_{(к)} = \frac{m_{(n)}(ct_{(к)} + 2r - ct_{(n)})}{2r - ct_{(к)} + ct_{(n)}}. \quad (2.3.13)$$

В багатьох випадках вакуумування пляшок, банок перед фасуванням у них продукції чи напоїв, ампул, мілких упаковок тощо доцільно видалити залишки вологи. Тоді одержуємо $m_{(к)} = 0$ і прирівнявши до нуля праву частину рівняння (2.3.13), одержуємо залежність між початковою, кінцевою температурою, теплоємкістю і теплотою пароутворення:

$$t_{(к)} = \frac{ct_{(n)} - 2r}{c}. \quad (2.3.14)$$

Теплота пароутворення в свою чергу також залежить від температури, а формула (2.3.14) виконується в температурному діапазоні існування рідини. З залежності (2.3.13) витікає, що за рахунок вакуумування можливо охолоджувати рідинні середовища аж до замерзання. Утворенню твердої фази відповідає $t_{(к)} = 0$ °C і тоді

$$\frac{m_{(к)}}{m_{(n)}} = \frac{2r - ct_{(n)}}{2r + ct_{(n)}}. \quad (2.3.15)$$

Поєднати в собі вимоги повного випаровування за рахунок власної теплоти середовища і досягнення величини $t_{(к)} = 0$ неможливо, оскільки за умовами (2.3.14) та (2.3.15) потрібно мати $t_{(n)} \approx 1100$ °C, тоді як критична температура води дорівнює лише 374 °C.

Подальше зменшення величини $m_{(к)}/m_{(n)}$ можливе лише за рахунок підведення теплоти до системи, тобто не в режимі адіабатного процесу. При цьому процес адіабатного кипіння таким може вважатися лише умовно,

оскільки система є відкритою і такою, в якій здійснюється тепло-масообмін з зовнішнім середовищем.

За умови швидкого вакуумування системи відбувається зміна статичного тиску, що знаходить різку зміну розмірів газопарових бульбашок. В сучасному обладнанні для вакуумного пакування тиск може змінюватися на порядок і більше. Якщо статичний тиск до початку вакуумування складав величину P_1 , а після вакуумування – P_2 , то параметри окремої бульбашки повинні визначатися співвідношенням в ізотермічному процесі

$$\left(P_1 + \frac{2\sigma}{R_1}\right)V_1 = \left(P_2 + \frac{2\sigma}{R_2}\right)V_2. \quad (2.3.16)$$

Вважатимемо також, що бульбашка при цьому зберігає форму сфери і тоді

$$V_1 = \frac{4}{3}\pi R_1^3; \quad V_2 = \frac{4}{3}\pi R_2^3. \quad (2.3.17)$$

Тоді відповідною підстановкою одержуємо

$$\frac{4}{3}\pi R_1^3 \left(P_1 + \frac{2\sigma}{R_1}\right) = \frac{4}{3}\pi R_2^3 \left(P_2 + \frac{2\sigma}{R_2}\right);$$

$$\frac{R_2^3}{R_1^3} = \frac{P_1 + \frac{2\sigma}{R_1}}{P_2 + \frac{2\sigma}{R_2}}, \quad (2.3.18)$$

і звідси

$$\frac{R_1}{R_2} = \sqrt[3]{\frac{P_2 + \frac{2\sigma}{R_2}}{P_1 + \frac{2\sigma}{R_1}}}. \quad (2.3.19)$$

Розв'язання умови (2.3.18) можна здійснити ітераціями, задаючись значеннями $R_1 = 0,0002; 0,0004; 0,0006\dots$

Якщо прийняти початковий тиск P_1 стабільним, то тоді функція відгуку, якою є радіус R_2 залежить від таких факторів, як радіус R_1 , кінцевий тиск P_2 і поверхневий натяг σ .

Вакуумування біологічного середовища відбувається за умов, коли

поверхневий натяг залишається сталим, а режими розглядаються ізотермічними, якщо час вакуумування обмежений. При цьому початок процесу і перебіг у певному часі характеризуються наявністю бульбашок з радіусами від $R_1 > 0$ і до $R_1 = R_{1\max}$ і тому утворювана вакуумна система "газ – рідина" характеризується певним розподіленням по R_2 . Зростання розмірів бульбашок означає зростання поверхні поділу та інтенсифікує швидкість її оновлення та процеси масообміну.

Наявність залежності $R_2 = R_2(P_2)$ за фіксованих R_1 , P_1 та σ не дозволяє перейти до опису динаміки пульсацій бульбашок. Однак в інтересах багатьох досліджень (в тому числі і дискретно-імпульсних технологій) важливо узгоджувати частоту зовнішніх для системи збурень з частотою власних коливань в системі "середовище – бульбашка". При цьому бульбашка в середовищі повинна розглядатись як пружне утворення.

2.4. Моделювання процесів гідродинаміки газорідинних середовищ в умовах дискретно-імпульсних технологій

Дискретно-імпульсні технології супроводжуються перевагами в інтересах тепло- і масообміну, які забезпечують їх поширене використання. Нерідко вибір параметрів зміни тиску здійснюється таким чином, що рідинна фаза при певних параметрах втрачає «кавітаційну міцність» і це супроводжується колапсом парових або парогазових бульбашок і відповідним фізичним і хімічним ефектами. Природа явищ кавітації знаходиться у полі зору багатьох досліджень, одержано достатньо надійні математичні моделі, однак у більшості випадків вони стосуються визначення початкових і кінцевих параметрів стану системи «бульбашка-рідина». Перехідні ж процеси таких систем у сучасних публікаціях відсутні, хоча відповіді на питання про їх перебіг мали б суттєвий як теоретичний, так і практичний ефект.

Інтенсифікація процесів сорбції і десорбції в газорідинних системах, можливості досягнення кавітаційних режимів, досягнення летальних ефектів в умовах вакуумного пакування тощо в значній мірі залежать від частоти зовнішніх збурень подібних систем, у тому числі і від наближення їх до резонансу.

У відповідності з фізикою явища вакуумування парова або парогазова бульбашка знаходиться у рідинному середовищі весь час перехідного процесу, а початковий статичний тиск на неї складає величину P_1 . Тоді тиск у середині бульбашки визначається сумою статичного та Лапласівського тисків, і

$$P_{(n)} = \left(P_1 + \frac{2\sigma}{R_1} \right), \quad (2.4.1)$$

де $P_{(n)}$ – початковий тиск газу у бульбашці; σ – поверхневий натяг рідини; R_1 – початковий радіус бульбашки.

У момент зниження тиску до величини $P_{\text{вак}}$ різниця тисків у середині і ззовні бульбашки становить

$$\Delta P = \left(P_1 + \frac{2\sigma}{R_1} \right) - P_{\text{вак}}. \quad (2.4.2)$$

Зі зростанням розмірів бульбашки тиск в ній зменшується і його плинне значення пов'язане з такими параметрами як σ , R і S (де S – площа поверхні бульбашки).

Оскільки бульбашка знаходиться у рідинному середовищі, а розширення бульбашки супроводжується зниженням тиску і температури газу, то тут можливі два випадки. Якщо тиск вакуумування $P_{\text{вак}} = P_{\text{вак}}(\tau)$, де τ – час процесу змінюється повільно, то температура газового середовища бульбашки близька до сталої і наближена до температури рідинного середовища. Тому з деяким наближенням подібний процес можливо віднести до ізотермічного.

За різкої зміни тиску $P_{\text{вак}}$ розширення бульбашки буде швидким і його надалі будемо відносити до адіабатного.

Ізотермічний процес. Стосовно ізотермічного процесу маємо співвідношення

$$\left(P_1 + \frac{2\sigma}{R_1}\right)V_1 = \left(P + \frac{2\sigma}{R}\right)V, \quad (2.4.3)$$

де V_1 і V – відповідно початковий і плинний об'єм бульбашки.

$$V_1 = \frac{4}{3}\pi R_1^3; \quad V = \frac{4}{3}\pi R^3.$$

Відповідною підстановкою отримуємо

$$P = \frac{\left(R_1^3\left(P_1 + \frac{2\sigma}{R_1}\right) - 2\sigma R^2\right)}{R^3}. \quad (2.4.5)$$

Визначимо радіус R через площу поверхні бульбашки S і тоді

$$P = \frac{\left(R_1^3\left(P_1 + \frac{2\sigma}{R_1}\right) - \frac{\sigma S}{2\pi}\right)}{\left(\sqrt{\frac{S}{4\pi}}\right)^3}. \quad (2.4.6)$$

Одержана залежність дає взаємозв'язок між плинним тиском в середині бульбашки і плинною поверхнею. Рушійний фактор процесу розширення

$$P_{\text{руш}} = \frac{\left(R_1^3 \left(P_1 + \frac{2\sigma}{R_1} \right) - \frac{\sigma S}{2\pi} \right)}{\left(\sqrt{\frac{S}{4\pi}} \right)^3} - P_{\text{вак}}. \quad (2.4.7)$$

Фактори опору розширення бульбашки представимо двома складовими. Одна з них є інерційним фактором приведеної маси і

$$P_i = \rho \frac{d^2 S}{d\tau^2}, \quad (2.4.8)$$

де τ – плинний час процесу; ρ – густина рідинного середовища.

Друга складова визначається опором середовища і тиск його протидії визначається за формулою

$$P_{\text{сер}} = \xi \rho \frac{w_0^2}{2}, \quad (2.4.9)$$

де w_0 – швидкість зміни радіуса бульбашки у процесі розширення; ξ – коефіцієнт опору середовища

$$w_0 = \frac{dR}{d\tau}; \quad (2.4.10)$$

Встановимо зв'язок між швидкістю зміни радіуса і площі поверхні сфери бульбашки. Оскільки

$$R = \sqrt{\frac{S}{4\pi}}, \quad (2.4.11)$$

то диференціюванням по S знайдемо

$$\frac{dR}{dS} = \frac{1}{2\sqrt{\frac{S}{4\pi}}} \cdot \frac{1}{4\pi} = \frac{1}{4\sqrt{\pi S}}. \quad (2.4.12)$$

Тут величина $\frac{dR}{dS}$ є аналогом зміни радіуса бульбашки по площі поверхні бульбашки. Швидкість зміни радіуса знайдемо за формулою

$$\frac{dR}{d\tau} = \frac{dR}{dS} \cdot \dot{S}, \quad (2.4.13)$$

де $\dot{S}$ – швидкість зміни поверхні. Тоді

$$P_{\text{сер}} = \xi \frac{\rho}{2} \left(\frac{1}{4\sqrt{\pi S}} \dot{S} \right)^2 = \xi \frac{\rho}{32\pi S} \dot{S}^2. \quad (2.4.14)$$

Одержані залежності дають можливість записати диференціальне рівняння розширення бульбашки за вакуумування

$$\rho \frac{d^2 S}{d\tau^2} = \frac{\left(R_1^3 \left(P_1 + \frac{2\sigma}{R_1} \right) - \frac{\sigma S}{2\pi} \right)}{\left(\sqrt{\frac{S}{4\pi}} \right)^3} - P_{\text{вак}}(\tau) - \xi \frac{\rho}{32\pi S} \dot{S}^2. \quad (2.4.15)$$

Початкові умови одержаного нелінійного диференціального рівняння другого порядку записуємо у вигляді

$$\tau_{(п)} = 0; \quad S_{(п)} = 4\pi R_1^2; \quad \dot{S}_{(п)} = 0. \quad (2.4.16)$$

Кінцеву умову по параметру S знайдемо ітераціями з формули

$$P_{(к)} = P_{(к)\text{вак}} = \frac{\left(R_1^3 \left(P_1 + \frac{2\sigma}{R_1} \right) - \frac{\sigma S_{(к)}}{2\pi} \right)}{\left(\sqrt{\frac{S_{(к)}}{4\pi}} \right)^3}. \quad (2.4.17)$$

Знайдене з рівняння (2.4.17) значення $S_{(к)}$, підставлене до розв'язання формули (2.4.15) дає можливість визначити кінцевий час розширення $\tau_{(к)}$. Окрім того, існує інша можливість визначити $\tau_{(к)}$ безпосереднім розв'язанням рівняння (2.4.15), яким визначаються залежності

$$S = S(\tau) \quad \text{і} \quad \dot{S} = \dot{S}(\tau). \quad (2.4.18)$$

При цьому одержуємо $\dot{S}_{(к)} = 0$ при $\tau = \tau_{(к)}$.

Зупинимося на можливостях визначення коефіцієнту опору середовища. Скористаємося відомими залежностями, за якими в режимі ламінарного розширення бульбашки ($Re = w_0 d \rho / \mu \leq 2$) і

$$\xi = \frac{24}{Re}. \quad (2.4.19)$$

Для турбулентного режиму ($Re > 500$) $\xi = 0,44$, а у перехідному режимі ($2 < Re \leq 500$) маємо

$$\xi = \frac{18,5}{Re^{0,6}}. \quad (2.4.20)$$

У критерії Рейнольдса d – діаметр бульбашки, μ – коефіцієнт динамічної в'язкості середовища.

Припустимо, що розширення бульбашки відбувається у ламінарному режимі. Відобразимо величину критерію Re через параметри, які входять до рівняння (2.4.15)

$$Re = \frac{2w_0 R \rho}{\mu} = \frac{\frac{1}{\sqrt{\pi S}} \cdot \dot{S} \cdot \sqrt{\frac{S}{4\pi}} \rho}{2\mu} = \frac{\dot{S} \rho}{4\pi \mu}. \quad (2.4.21)$$

Тоді

$$\xi = \frac{96\pi \mu}{\dot{S} \rho}; \quad (2.4.22)$$

$$P_{сеп} = \frac{3\mu \dot{S}}{S}. \quad (2.4.23)$$

Підстановкою останньої величини одержуємо

$$\rho \frac{d^2 S}{d\tau^2} = \frac{\left(R_1^3 \left(P_1 + \frac{2\sigma}{R_1} \right) - \sigma \frac{S}{2\pi} \right)}{\left(\sqrt{\frac{S}{4\pi}} \right)^3} - P_{\text{вак}}(\tau) - \frac{3\mu \dot{S}}{S}. \quad (2.4.24)$$

Адіабатний процес. В адіабатному процесі розширення мають місце співвідношення

$$\frac{P}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V} \right)^k, \quad (2.4.25)$$

де $k = 1,4$ – показник адіабати.

Підстановкою початкового V_1 і плинного V об'ємів одержуємо ;

$$\frac{P + \frac{2\sigma}{R}}{P_1 + \frac{2\sigma}{R_1}} = \frac{R_1^{3k}}{R^{3k}}. \quad (2.4.26)$$

Звідси

$$P = \frac{P_1 R_1^{3k} + 2\sigma(R_1^{3k-1} - R^{3k-1})}{R^{3k}}, \quad (2.4.27)$$

або підстановкою $R = \sqrt{\frac{S}{4\pi}}$ знайдемо

$$P = \frac{P_1 R_1^{3k} + 2\sigma R_1^{3k-1} - 2\sigma \left(\sqrt{\frac{S}{4\pi}} \right)^{3k-1}}{\left(\sqrt{\frac{S}{4\pi}} \right)^{3k}}. \quad (2.4.28)$$

За знайденого значення P диференціальне рівняння адіабатного розширення бульбашки записується у формі

$$\rho \frac{d^2 S}{d\tau^2} = \frac{P_1 R_1^{3k} + 2\sigma R_1^{3k-1} - 2\sigma \left(\sqrt{\frac{S}{4\pi}} \right)^{3k-1}}{\left(\sqrt{\frac{S}{4\pi}} \right)^{3k}} - P_{\text{вак}}(\tau) - \frac{3\mu \dot{S}}{S}. \quad (2.4.29)$$

Початкові умови цього випадку співпадають з початковими умовами (2.4.16), які стосуються ізотермічного розширення.

Кінцеву умову по величині S знайдемо ітераціями з формули

$$\frac{P_1 R_1^{3k} + 2\sigma R_1^{3k-1} - 2\sigma \left(\sqrt{\frac{S}{4\pi}} \right)^{3k-1}}{\left(\sqrt{\frac{S}{4\pi}} \right)^{3k}} = P_{(\kappa)\text{вак}}. \quad (2.4.30)$$

або з безпосереднього розв'язання рівняння (2.4.29), при $\tau_{(\kappa)}$, за якого $\dot{S}_{(\kappa)} = 0$.

Загальний вигляд диференціальних рівнянь (2.4.15) і (2.4.29) вказують на те, що результати їх розв'язання багато в чому залежать від початкового радіуса R_1 бульбашки і визначених ним початкових умов.

Дискретно-імпульсні технології передбачають існування певних законів, за якими змінюються зовнішні тиски. В періоди перехідних процесів, коли зовнішній тиск зростає, бульбашки зменшуються в своїх розмірах і рушійні фактори визначаються залежністю

$$P_{\text{руш}} = P_{\text{зовн}}(\tau) - \frac{R_1^3 \left(P_1 + \frac{2\sigma}{R_1} \right)}{\left(\sqrt{\frac{S}{4\pi}} \right)^3} \quad (2.4.31)$$

для ізотермічних процесів.

Для адіабатних процесів одержуємо

$$P_{\text{руш}} = P_{\text{зовн}}(\tau) - \frac{P_1 R_1^{3k} + 2\sigma R_1^{3k-1} - 2\sigma \left(\sqrt{\frac{S}{4\pi}}\right)^{3k-1}}{\left(\sqrt{\frac{S}{4\pi}}\right)^{3k}}. \quad (2.4.32)$$

В умовах стискання знехтуємо складовою опору середовища (2.4.14) і тоді для ізотермічного процесу отримуємо

$$\rho \frac{d^2 S}{d\tau^2} = P_{\text{зовн}}(\tau) - \frac{R_1^3 \left(P_1 + \frac{2\sigma}{R_1}\right)}{\left(\sqrt{\frac{S}{4\pi}}\right)^3}. \quad (2.4.33)$$

Аналогічно для адіабатного процесу

$$\rho \frac{d^2 S}{d\tau^2} = P_{\text{зовн}}(\tau) - \frac{P_1 R_1^{3k} + 2\sigma R_1^{3k-1} - 2\sigma \left(\sqrt{\frac{S}{4\pi}}\right)^{3k-1}}{\left(\sqrt{\frac{S}{4\pi}}\right)^{3k}}. \quad (2.4.34)$$

Початкові умови для рівнянь (2.4.33) і (2.4.34) мають форму:

$$\tau_{(n)} = 0; \quad S_{(n)} = 4\pi R_1^2; \quad \dot{S}_{(n)} = 0. \quad (2.4.35)$$

Кінцевим умовам відповідають параметри

$$\tau = \tau_{(k)}; \quad \dot{S}_{(k)} = 0. \quad (2.4.36)$$

Одержані рівняння (2.4.33) та (2.4.34) є нелінійними і їх розв'язання можливе з використанням числових методів за відомих початкових умов.

РОЗДІЛ 3. Експериментальні дослідження по визначенню часу вакуумування

В попередніх розділах були розглянуті аналітичні моделі, які описували роботу вакуум-пакувального обладнання. Але теоретичний опис процесів вакуумування базувався на використанні деяких загальноприйнятих і окремих припущень термодинаміки і опору матеріалів. В зв'язку з цим виникає необхідність проведення експериментальних досліджень, співставлення теоретичних і експериментальних параметрів та придатності розглянутих аналітичних моделей і теоретичних методів розрахунку. Крім того, окремі із складових процесу, що виникають під час вакуумування і зберігання продукції моделювати важко через значну кількість практично неконтрольованих факторів.

У наукових дослідженнях для опису процесу, що відбувається, використовується поняття математичної моделі. Математичною моделлю називають співвідношення між величинами, що характеризують явища, процеси або об'єкти.

На базі використання відомих законів природи, аналізу матеріальних, енергетичних і інших балансів можна скласти теоретичну математичну модель у вигляді диференціальних, інтегральних, інтегро-диференціальних, алгебраїчних рівнянь або їх систем. Математична модель, побудована методом ідентифікації, при якому основні залежності отримані шляхом безпосередніх вимірів, називається емпіричною математичною моделлю. Принципова відмінність емпіричної моделі в тому, що її параметри розраховуються експериментальними методами, отже, є величинами випадковими. Тому при аналізі розглянутих моделей використовується апарат теорії імовірності та математичної статистики.

Експериментом називається послідовність заздалегідь спланованих дій для отримання величин, що є результатами експерименту.

Планування експерименту – процедура вибору кількості й умов проведення дослідів, потрібних для розв’язання задачі досліджень з достатньою точністю.

Задачі, для яких може бути використано планування експерименту, такі: пошук оптимальних умов, побудова інтерполяційних формул, вибір суттєвих факторів, що впливають на процес, визначення або уточнення констант теоретичної математичної моделі.

У теорії експерименту вхідні параметри називаються факторами, а вихідні – відгуком.

Розрізняють пасивний і активний експерименти. Пасивний експеримент є традиційним методом дослідження, під час якого вхідні параметри не можуть змінюватись, а тільки реєструються вхідні та вихідні величини. До пасивного експерименту відносять збирання статистичного матеріалу в режимі нормальної експлуатації промислового об’єкта. Опрацювання даних для отримання емпіричної математичної моделі при цьому проводиться методами класичного регресійного і кореляційного аналізу. Активний експеримент ставиться за попередньо складеним планом, при цьому передбачається одночасна зміна всіх параметрів, які впливають на процес, що дає змогу встановити рівень взаємодії факторів з одночасним скороченням загальної кількості дослідів. У даному разі можна отримати рівняння регресії з оцінкою впливу кожного фактора на вихідну величину.

Залежно від кількості факторів експерименти поділяють на одно- й багатofакторні. Коли змінюється тільки одна вхідна величина і реєструється відгук, то експеримент називається однофакторним. Якщо факторів, що впливають на процес, більше одного, то проводять багатofакторний експеримент. Переважно процеси характеризуються впливом кількох факторів. Якщо кожен фактор набуває тільки два рівня, то експеримент називається дворівневим.

Сучасний стан теорії експерименту дає можливість розв’язувати такі задачі:

1) розкриття механізму процесу чи явища – побудова в умовах невизначеності математичної емпіричної моделі процесу, яка в кількісній формі показує вплив різних факторів на вихідну величину;

2) оптимізація об'єктів – знаходження сукупності значень параметрів керування, які забезпечують екстремум вихідної величини;

3) виявлення факторів з усієї сукупності змінних, які суттєво впливають на вихідну величину;

4) ідентифікація об'єктів – визначення їх стану і параметрів у процесі функціонування;

5) екстраполяція поведінки об'єкту в часі й просторі.

Для організації та проведення експерименту потрібно сформулювати його мету, обґрунтувати величину, що приймається за відгук, вибрати суттєві незалежні вхідні фактори, що варіюються у процесі експерименту, скласти план проведення дослідів, опрацювати отримані дані та проаналізувати результати.

3.1. Опис експериментальної установки

Машина "WEBOMATIC Easy PACK"

Експериментальні дослідження виконувались на однокамерній настільній вакуум-пакувальній машині «Easy Pack» виробництва фірми WEBOMATIC, яка призначена для роботи з невеликими і середніми об'ємами продукції. Вона відрізняється простотою конструкції і легкістю в обслуговуванні, розрахована на періодичний режим роботи і невелику продуктивність.

Машина оснащена процесором WEBOMATIC 3000S або 4000S і забезпечує оптимальний, регульований за допомогою датчика граничний вакуум з визначенням температури кипіння, що дозволяє зменшити втрату ваги при пакуванні харчових продуктів при використанні вакууму максимально можливого значення.

Корпус машини виготовлений з нержавіючої сталі, камера з анодованого алюмінію. Машина має прозору кришку, що дозволяє спостерігати за процесом пакування. Запаювання здійснюється пневматичним способом, процес регулюється за допомогою електронного блоку.

Процес упаковки полягає в тому, що оператор кладе в камеру продукт, попередньо розміщений в спеціальному пакеті, горловину якого вводить в зазор між затискачами зварювального пристрою. Після чого кришка камери закривається і повітря відкачується, пакет герметизується термозварюванням, а камера знову заповнюється повітрям і йде підготовка нової порції для пакування.



Рис. 3.1. Експериментальна установка на базі машини «Easy Pack»

Характеристики машини наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1.

Характеристики машини

Габарити машини, мм	400x500x380
Габарити камери, мм	370x400x130
Довжина зварювальної планки, мм	350
Кількість запаячних струн	1
Продуктивність вакуумного насосу, м ³ /год	18
Напруга живлення, В	220
Споживана потужність, кВт	0,55
Вага нетто, кг	38

У вакуум-пакувальній машині "WEBOMATIC Easy PACK" використовується насос марки KB0018 D, технічні характеристики якого представлені в табл. 3.2. Зовнішній вигляд насоса показаний на рис. 3.2.

Технічна характеристика насосу KB0018 D

Таблиця 3. 2.

Продуктивність, м ³ /годину	18
Частота обертання ротора, об/хв	3000
Залишковий тиск, мбар	2
Потужність, кВт	0,55
Рівень шуму, дБ	60
Вага, кг	18

Даний насос за принципом дії є пластинчасто-роторним. Будова насосу показана на рис. 3.3.

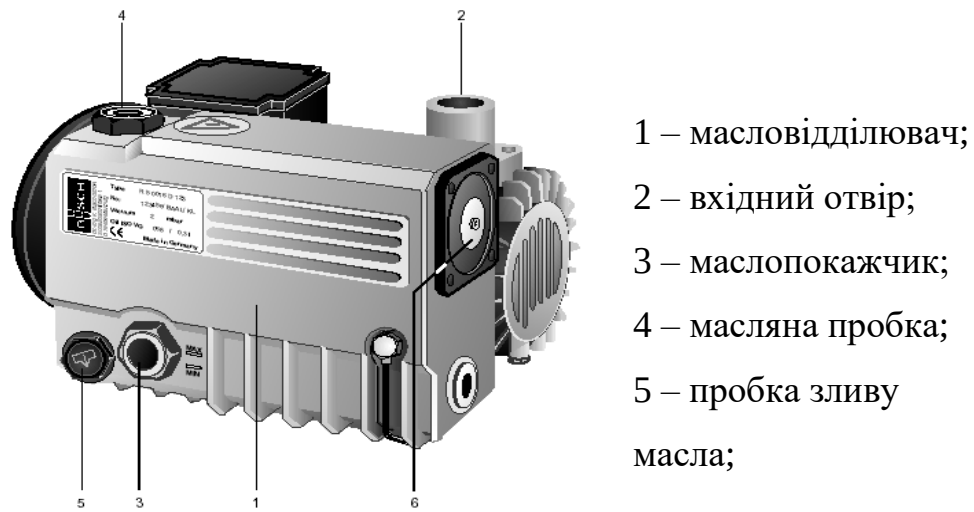


Рис. 3.2. Насос марки KB0018

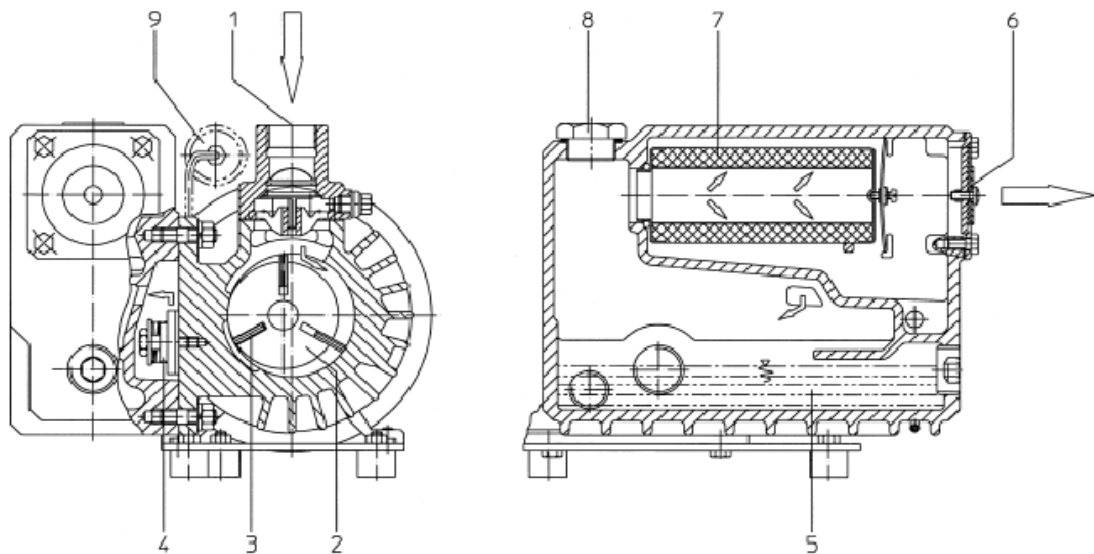


Рис. 3.3. Будова пластинчасто-роторного насосу:

1 – вхідний отвір; 2 – ротор; 3 – пластини; 4 – перехідний отвір;
 5 – масляна ванна; 6 – вихідний отвір; 7 – вихлопний фільтр; 8 –
 масляна пробка; 9 – клапан баласту газу.

Принцип роботи насосу

На рис. 3.4. схематично зображений пластинчасто-роторний насос. В циліндричній робочій камері корпусу 1 симетрично на валу (на рисунку не показаний) розташований ротор 2, вісь якого зміщена відносно осі робочої камери. В наскрізному прорізі ротора розміщені пластини 3' і 3". Пружиною 4 вони притискаються до корпусу насоса.

В положенні ротора, зображеному на рис. 3.4.а, пластинами 3' і 3" і площиною контакту ротора із статором корисний об'єм робочої камери розділений на три частини: I – порожнина всмоктування, II – порожнина переміщення і часткового стискання газу, III – порожнина витіснення газу.

При обертанні ротора в напрямку, вказаному стрілкою, порожнина I збільшується і додаткова кількість газу з відкачуваної посудини по вхідному каналу 5 поступає в робочу камеру насоса. Порожнина II зменшується в об'ємі, в ній здійснюється стискання газу. Порожнина III зменшується, і газ з неї через випускний канал під клапаном 6 витісняється з насоса.

При положенні ротора, зображеному на рис. 3.4.б, закінчується витіснення газу з порожнини III. При подальшому обертанні ротора порожнина II переходить в порожнину III, тобто, настає момент, коли стає можливим витіснення наступної порції газу (рис. 3.4.в).

В положенні ротора, зображеному на рис. 3.4.г, порожнини I і II з'єднуються між собою. Лише коли ротор обернеться на 180° від початкового положення і займе положення, тотожне початковому (рис. 3.4.а), відбувається розділення порожнин I і II, і від відкачуваного об'єму відділяється чергова порція газу. У цей момент порожнина II має найбільший об'єм.

У пластинчасто-роторному насосі за один оберт ротора здійснюється два цикли відкачування, тобто відділяються від відкачуваного об'єму і витісняються з насоса дві порції газу.

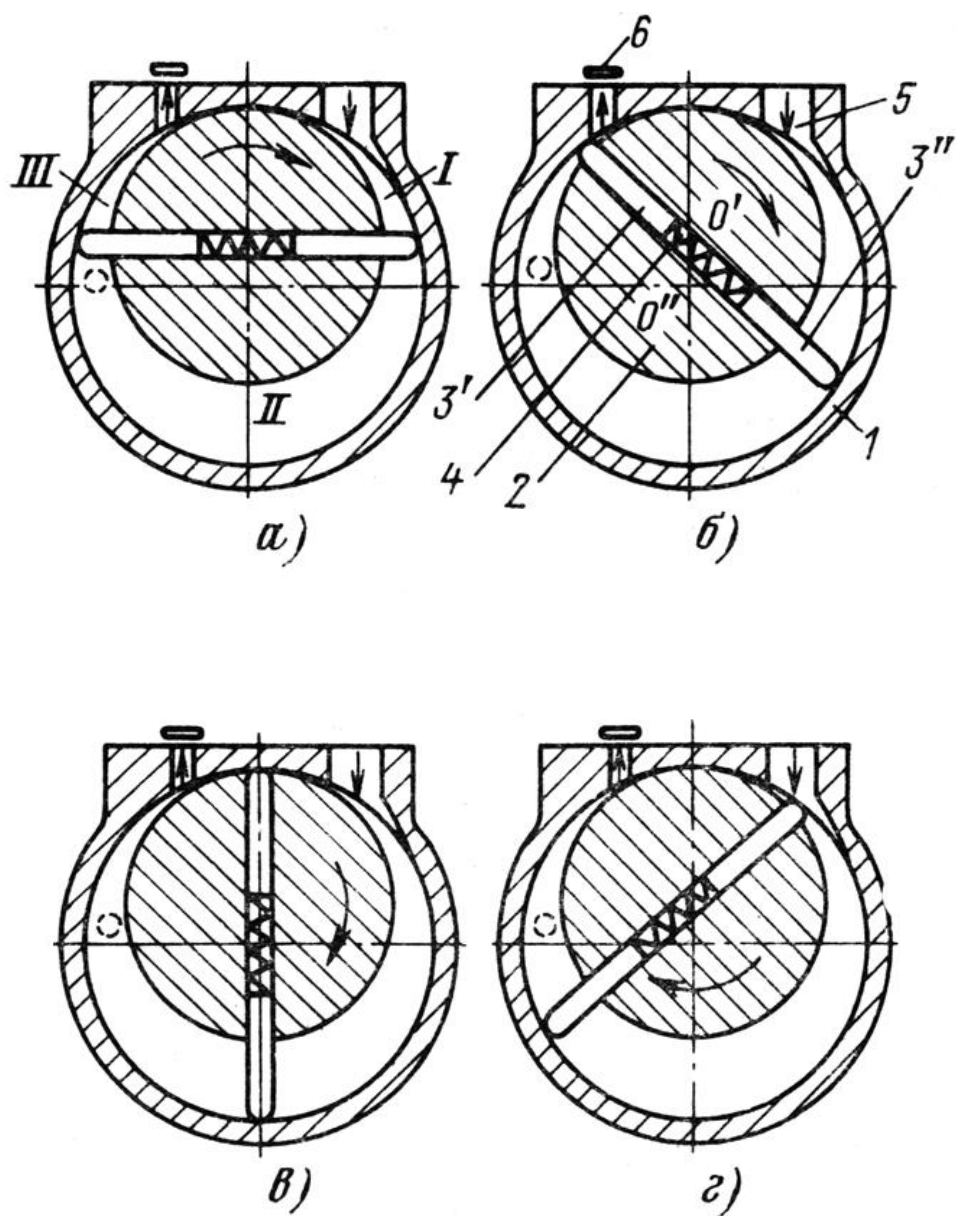


Рис. 3.4. Схема работы пластинчато-роторного насоса

3.2. Організація та проведення експериментальних досліджень

Мета експериментального дослідження – визначення залежності часу вакуумування харчового продукту у вакуумній камері від об'єму вакуумної камери і початкової температури продукту.

Дата проведення експерименту – 5. 04. 10.

Температура середовища 20 °С.

Сировина – яблука сорт симиренка, нарізані дольками завтовшки 3-4 мм.

Досліджувана суміш – яблука + цукор у співвідношенні 1:1,5, тобто 200 г яблук + 300 г цукру.

Упаковка – вакуумні пакети з ПА+ПЕ розміром 140 x 300 мм.

Початкова температура продукту – 20°С і 40°С.

Об'єм камери – 0,01125 м³ і 0,01924 м³.

Кількість дослідів $n=4$, кількість паралельних дослідів $m=3$.

Параметри процесу вакуумного пакування наведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3.

Параметри проведення експериментальних досліджень

n	1	2	3	4
T, К	293	293	313	313
V, м ³	0,01125	0,01924	0,01125	0,01924

Виконання дослідів

Досліджувану суміш поміщаємо у вакуумний пакет, забезпечуємо за допомогою мікрохвильової печі відповідну температуру продукту, горловину пакету вводимо в зазор між затискачами зварювального пристрою і закриваємо кришку камери. Попередньо встановлюємо необхідний об'єм вакуумної камери за допомогою підкладних дощечок. Повітря відкачується, пакет герметизується термозварюванням, кришка відкривається і камера знову заповнюється повітрям. За допомогою секундоміра визначаємо час роботи установки.

Перебіг процесу

Під час вакуумування спостерігається виражене «кипіння» і утворення пухирів парової фази, що швидко руйнуються, на зрізах плодів. В результаті інтенсивного пароутворення відбувається, скоріш за все, руйнування міжклітинних структур і клітинних оболонок. Розрив міжклітинних і клітинних структур супроводжується виділенням рідкої фази.

Завершується вакуумне пакування герметизацією пакету (упаковки) і розгерметизацією камери, що супроводжується ударною дією атмосферного тиску. При цьому продукт і оболонка упаковки потрапляють в нові умови, а саме тривісне стискання.

Внаслідок пароутворення швидко знизилась температура вакуумованого об'єкту.

3.3. Отримання математичної моделі для визначення часу вакуумування

У загальному вигляді функцію можна представити так:

$$\tau = f(V, T), \quad (3.3.1)$$

де τ – час вакуумування продукту, с;

V – об'єм камери, м³;

T – початкова температура продукту, К.

Рівні та крок варіювання

Таблиця 3.4.

	$V, \text{м}^3$	$T, \text{К}$
Нульовий рівень	0,01525	303
Верхній рівень	0,01924	313
Нижній рівень	0,01125	293
Інтервал вимірювання	0,0039	10

Для отримання математичної моделі застосуємо двохфакторний експеримент.

Попередньо передбачаємо справедливність лінійної моделі і отримуємо рівняння регресії виду:

$$y = b_0 \cdot X_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_1 \cdot X_2, \quad (3.3.2)$$

де b – коефіцієнти регресії.

Для полегшення визначення коефіцієнтів регресії складаємо спеціальну матрицю планування експерименту. При варіюванні всіх двох факторів на двох рівнях маємо ПФЕ 2^2 , в якому досліджувані фактори змінюються на двох рівнях: верхньому та нижньому. У безвимірному виразі верхній рівень буде позначатись $(+1)$, а нижній рівень (-1) .

Побудову плану ПФЕ 2^n виконуємо у наступному порядку:

- 1) визначаємо кількість дослідів за формулою

$$N = 2^n = 2^2 = 4; \quad (3.3.3)$$

- 2) плануємо кількість дублюючих дослідів $m=3$;
- 3) нормалізуємо вихідне рівняння регресії, а саме перетворюємо змінні X_i в безрозмірні нормалізовані змінні Z_i :

$$Z_i = (X_i - X_0) / \Delta X_i, \quad (3.3.4)$$

де X_i – значення фактора на $(+)$, $(-)$ рівні;

X_0 – значення фактора на 0-му рівні;

ΔX_i – інтервал вимірювань.

Після нормалізації маємо:

$$y = b_0 \cdot Z_0 + b_1 \cdot Z_1 + b_2 \cdot Z_2 + b_3 \cdot Z_1 \cdot Z_2, \quad (3.3.5)$$

де b – коефіцієнти регресії.

Так як нормалізовані змінні можуть набувати значень $(+1)$ чи (-1) , то матриця експерименту буде містити лише $(+1)$ чи (-1) .

- 4) будуємо матрицю плану активного експерименту, вона містить $N=4$ рядків та стовпці. Стовпець для фіктивної змінної Z_0 заповнюємо символами верхнього рівня інтервалу варіювання $(+)$. Рядок для дослідів $N=1$ заповнюємо

символами нижнього рівня варіювання (–1), а наступні рядки заповнюємо символами варіювання кожного фактору, дотримуючись вимог.

Матриця планування двохфакторного експерименту

Таблиця 3.5.

Номер досліду	Z_0	Z_1	Z_2	$Z_1 \cdot Z_2$
1	+	–	–	+
2	+	+	–	–
3	+	–	+	–
4	+	+	+	+

Результати експериментів

Таблиця 3.6.

Результат досліду Номер досліду N	$y_1,$ с	$y_2,$ с	$y_3,$ с	$\bar{y},$ с
1	47,7	44	43	44,9
2	77	77	76,4	76,8
3	45,5	42	43	43,5
4	76	73,2	74	74,4

Опрацювання експериментальних даних

Опрацювання експериментальних даних здійснюєм за допомогою програми EXPER1.EXE «Планування і обробка результатів двохфакторного двухрівневого експерименту»

КОДИРОВАНИЕ ФАКТОРОВ

Введите нижний уровень 1 фактора Xн=? 0.01125
 Введите верхний уровень 1 фактора Xв=? 0.01924
 Введите нижний уровень 2 фактора Xн=? 293
 Введите верхний уровень 2 фактора Xн=? 313

Получены следующие данные

основные уровни:

- первого фактора X₀₁= .015245
- второго фактора X₀₂= 303

интервалы варьирования:

- первого фактора h₁= 3.994999E-03

ВЫВОД ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Получены следующие средние значения по строкам:

y_{1ср}= 44.9 y_{2ср}= 76.8 y_{3ср}= 43.5 y_{4ср}= 74.4

Получены следующие значения дисперсий по строкам:

<S₁>²= 6.130328 <S₂>²= .1215234

<S₃>²= 3.25 <S₄>²= 2.079777

Гипотеза об однородности дисперсий подтверждается

Дисперсия воспроизводимости <S_y>²= 2.895407

Получено уравнение регрессии:

y = 59.9 + < 15.7 >x₁ + < 0 >x₂ + < 0 >x₁x₂

Оценка дисперсии адекватности <S_{ад}>²= 5.789973

Критерий адекватности F_{ад}= 1.99971

Ваша модель адекватна

Розрахунок b-коефіцієнтів та перевірка їх статичної значущості

Розрахуємо коефіцієнти рівня регресії за формулою:

$$b_i = \frac{1}{N} \cdot \sum_1^N (Z_i \cdot \bar{y}), \quad (3.3.6)$$

$$b_0 = \frac{1}{4} \cdot (44,9 + 76,8 + 43,5 + 74,4) = 59,9$$

$$b_1 = \frac{1}{4} \cdot (-44,9 + 76,8 - 43,5 + 74,4) = 15,7$$

$$b_2 = \frac{1}{4} \cdot (-44,9 - 76,8 + 43,5 + 74,4) = -0,95$$

$$b_3 = \frac{1}{4} \cdot (44,9 - 76,8 - 43,5 + 74,4) = -0,25$$

Серед визначених коефіцієнтів можуть бути статично незначущі. Вони не несуть корисної інформації про об'єкт дослідження і можуть бути виключені з рівняння регресії.

Проведемо оцінку коефіцієнтів регресії. Для цього визначимо дисперсію оцінки коефіцієнтів:

$$S_{bi} = \sqrt{\frac{S_{\hat{a}\hat{a}}^2}{N \cdot m}} = \sqrt{\frac{2,89}{4 \cdot 3}} = 0,49. \quad (3.3.7)$$

Знаходимо розрахунковий критерій Стюдента для кожного коефіцієнта за формулою:

$$t_{ip} = \frac{|b_i|}{S_{bi}}; \quad (3.3.8)$$

$$t_{0p} = \frac{|59,9|}{0,49} = 122,24$$

$$t_{1p} = \frac{|15,7|}{0,49} = 32,04$$

$$t_{2p} = \frac{|-0,95|}{0,49} = 1,94$$

$$t_{3p} = \frac{|-0,25|}{0,49} = 0,51$$

Значення $t_{кр}$ вибираємо з таблиці розподілення Стюдента за числом ступенів свободи $f=N \cdot (m-1)=4 \cdot (3-1)=8$, рівні значущості $\alpha=0,05 \rightarrow t_{кр}=2,12$.

Оскільки розрахункові критерії t_{0p} , t_{1p} більші табличного значення, то ці коефіцієнти є значними і їх вплив є суттєвим, іншими коефіцієнтами знехтуємо.

Тоді рівняння регресії буде мати вигляд:

$$y = 59,9 \cdot Z_0 + 15,7 \cdot Z_1. \quad (3.3.9)$$

Математична модель процесу

Для подальшого використання отриманої емпіричної математичної моделі потрібно отримати рівняння регресії для натуральних змінних.

Для переходу до натуральних значень критеріїв використаємо формули:

$$Z_1 = \frac{H_1 - H_{01}}{h_1}, \quad Z_2 = \frac{H_2 - H_{02}}{h_2}, \quad (3.3.10)$$

де H_1, H_2 , – натуральні значення критерію;

H_{01}, H_{02} , – значення критерію на нульовому рівні;

h_1, h_2 , – інтервали вимірювань.

Підставивши значення отримаємо:

$$Z_1 = \frac{H_1 - H_{01}}{h_1} = \frac{H_1 - 0,01525}{0,0039};$$

$$Z_2 = \frac{H_2 - H_{02}}{h_2} = \frac{H_2 - 303}{10}.$$

Тоді рівняння регресії має вигляд:

$$y = 59,9 - 15,7 \cdot \frac{V - 0,01525}{0,0039} \quad (3.3.11)$$

Отже, отримано математичну модель:

$$\tau = 121,29 - 4025,64V \quad (3.3.12)$$

де τ – час вакуумування продукту, с; V – об'єм камери, м³.

З математичної моделі видно, що початкова температура T незначно впливає на час вакуумування продукту.

ВИСНОВКИ

На сьогоднішній день вакуумне пакування є одним з найперспективніших видів пакувальних технологій. Воно дозволяє за рівних умов збільшити в декілька разів терміни зберігання продуктів, виключає втрату продукту при зберіганні. Позитивним моментом вакуумного пакування є висока біологічна цінність продукції, збереження натуральних речовин, мікроелементів і вітамінів.

Якість пакованої продукції залежить не тільки від технології процесу пакування, пакувальних матеріалів, а в значній мірі і від обладнання, що здійснює процес пакування. Існують кілька пакувальних систем, що дозволяють пакувати у вакуумі і контрольованому газовому середовищі. Вакуум-пакувальне обладнання харчової промисловості працює в областях низького вакууму (200 Па). Самим розповсюдженим видом пакувальних систем є камерні вакуумні машини.

Аналіз даних і відомих положень щодо вакуумного пакування показує важливість бар'єрних властивостей пакувальних матеріалів і необхідність індивідуального підходу до режимів пакування, стосовно виду продукту і передбачуваного терміну його зберігання.

Глибоке вакуумування скляної тари перед фасуванням забезпечує асептичну обробку і охолодження об'єктів обробки. Відмову від вакуумування пляшок на багатьох виробництвах слід вважати помилковою.

В роботі створені і проаналізовані аналітичні моделі, які описують роботу вакуум-пакувального обладнання.

Розглянуто явище кавітації, що супроводжується цілим рядом фізичних ефектів. Вважається, що у більшості випадків зародками кавітаційних порожнин виступають газові (повітряні) бульбашки. Одержані залежності, що дають можливість записати диференціальне рівняння розширення бульбашки за вакуумування.

В результаті проведених досліджень, враховуючи плинні значення термодинамічних параметрів, одержана оцінка змінної швидкості витікання

повітря на першому і другому етапах процесу вакуумування і здійснено перехід до визначення часу перебігу процесу. Виконані розрахунки часу вакуумування камери промислової установки «Easy Pack» виробництва фірми WEBOMATIC. Встановлено, що при зменшенні об'єму камери вакуумування збільшується час витримки об'єкту під вакуумом, що не можна не приймати до уваги під час вакуумного пакування харчової продукції на вакуум-пакувальних машинах такого класу.

Під час процесу вакуумування переведення рідини у метастабільний стан і адіабатне кипіння відносяться до групи найпотужніших впливів на середовища з усіма наслідками, які стосуються кавітаційних явищ, інтенсифікації масообмінних процесів, гомогенізації, летальних ефектів по мікрофлорі тощо.

Якщо в технологіях квашення овочів або фруктів ці ефекти можуть розглядатися як позитивні, то стосовно традиційних вакуумних упаковок їх слід обмежувати. Для зменшення виділення рідкої фракції з вологоємких продуктів в упаковках слід вибирати початкові температури продукту, які виключають адіабатне кипіння при вакуумуванні.

Проведено експериментальне дослідження по визначенню залежності часу вакуумування харчового продукту у вакуумній камері від об'єму вакуумної камери і початкової температури продукту. Для отримання математичної моделі застосували двохфакторний експеримент. З математичної моделі видно, що початкова температура T незначно впливає на час вакуумування продукту.

Залежно від геометрії упаковки і продукту, цілісності і ступеня однорідності останнього, адгезійних властивостей матеріалу упаковки по відношенню до продукту і ін. при рівномірному тиску повітря об'єкт пакування може витримувати різні напружені стани. Слід прагнути до забезпечення умов рівномірного стискання продукту в упаковці під час вакуумування.

Разом з тим ефекти, що супроводжують вакуумування, можуть знайти серйозне прикладне значення. Вакуумні технології мають перспективи застосування для інтенсифікації і збільшення виходу цільової продукції у виробництві соків, морсів, вина, напоїв і ін.

Позитивним моментом вакуумного пакування є висока біологічна цінність продукції, збереження натуральних речовин, мікроелементів і вітамінів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Фізико-хімічні методи обробки сировини і стабілізація харчових продуктів / А.І. Соколенко, О.Ю. Шевченко, В.А. Піддубний, К.В. Васильківський, І.М. Миколів – К.: ПП. Люксар, 2009. – 454 с.
2. Антипкин Ю.Г., Лебедев В.Н., Хода Е.Г. и др. Паровакуумные упаковывания // Упаковка. – 2003. – № 2. С. 32-35.
3. Єрмолаєв О. М., Рашба Г. І. Вступ до статистичної фізики і термодинаміки: Навчальний посібник. – Х.: ХНУ, 2004. – 516 с
4. Гавва А.Н., Марченко Н.Б., Мегедь Д.А., Крищук В.Ю. Вакуумное упаковывание // Упаковка. – 2001. – № 4. – с.36-38.
5. Г.П. Гладышев. Термодинамика и макрокинетика природных иерархических процессов. – М.: Наука, 1988. – 287 с.
6. Лобода В.Б. Фізичні основи вакуумної техніки. – С: Університетська книга, 2020. – 253 с.
7. Вакуумне пакування: теорія і практика / І.В. Бондаренко, О.В. Ковальова, О.В. Степаненко, О.В. Шевченко. – К.: Техніка, 2019. – 192 с.
8. Вакуумні технології в харчовій промисловості: навч. посіб. / О.Є. Кузьмін, О.В. Савченко, В.М. Черненко. – К.: НТУУ "КПІ", 2015. – 184 с.
9. Кузнецов В.И., Немилов Н.Ф., Шемякин В.Е. Эксплуатация вакуумного оборудования. – М.: Энергия, 1978.
10. Куркин А. Барьерные гибкие материалы для упаковывания мясных продуктов // Упаковка – 2005. – № 1. С. 39-41.
11. Лебедєв Д.П., Перельман Т.Л. Тепло- та масообмін у процесах сублімації у вакуумі. - М.: Енергія, 1973. - 335с.
12. Механические вакуумные насосы/Е.С. Фролов, И.В. Автономова, В.И. Васильев и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 288 с.: ил.

13. Пипко А.И., Плисковский В.Я., Пенченко Е.А. Конструирование и расчет вакуумных систем. – М.: Энергия, 1970.
14. Соколенко А.І., Костін В.Б., Васильківський К.В. та ін. Фізико-хімічні методи обробки сировини та продуктів харчування. К.: АртЕк. – 2000. – 306 с.
15. Г. Стенли. Фазовые переходы и критические явления. – М.: Мир, 1973. – 419 с.
16. Федоткин И.М., Гулый И.С. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности. Часть 1. – К.: Полиграфкнига, 1997. – 831 с.
17. Шевченко О.Ю. Асептична обробка тари // Упаковка – 2003. – № 5. С.24-25.
18. Шевченко О.Ю. Визначення параметрів вакуумного пакування харчових продуктів // Харчова промисловість – 2004. – № 3. С.140-143.
19. Шевченко О.Ю., Піддубний В.А. Технології різкої зміни тиску в пакуванні // Упаковка – 2004. – № 5. С.28-31.
20. Шевченко О.Ю. Вплив різних факторів на умови вакуумного пакування продукції // Упаковка – 2005. – № 2. С.24-26.
- Конспект лекцій з дисципліни “Математично-статистичні методи досліджень”
21. Методичні вказівки до постановки і оброблення результатів багатофакторного експерименту для студентів спец. 7.09.0223 “Машини і технологія пакування ” ден. форми навч. та аспірантів / Уклад. К.В. Васильківський, А.І. Соколенко, О.Ю. Шевченко. – К.:УДУХТ, 2000. – 16 с.
22. А.Е. Егоров, Г.Н. Азаров, А.В. Коваль / Исследование устройств и систем автоматики методом планирования эксперимента – Х.: Вища шк. изд-во при Харьк. ун-те, 1986. – 240 с.

ДОДАТКИ

Програми в середовищі MathCAD

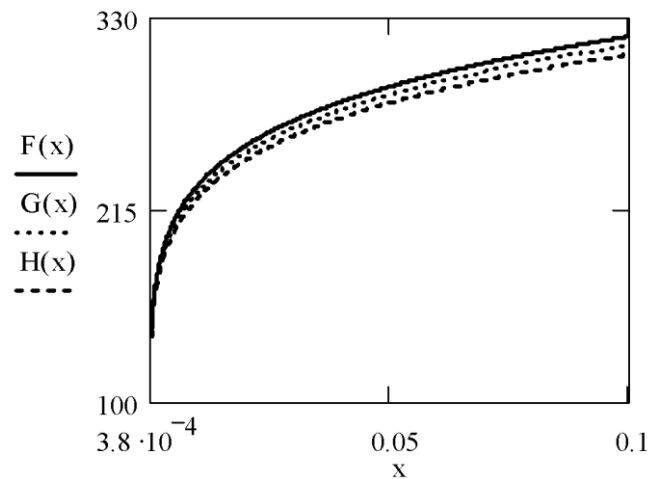
1. Залежність критичної швидкості витікання повітря від тиску у вакуумній камері (І етап) (рис. 2.1)

$$k := 1.4 \quad R := 287$$

$$F(x) := \left[2 \cdot \frac{k}{k+1} \cdot R \cdot \frac{303}{\left(\frac{0.1}{x}\right)^{\frac{k-1}{k}}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$G(x) := \left[2 \cdot \frac{k}{k+1} \cdot R \cdot \frac{293}{\left(\frac{0.1}{x}\right)^{\frac{k-1}{k}}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$H(x) := \left[2 \cdot \frac{k}{k+1} \cdot R \cdot \frac{283}{\left(\frac{0.1}{x}\right)^{\frac{k-1}{k}}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

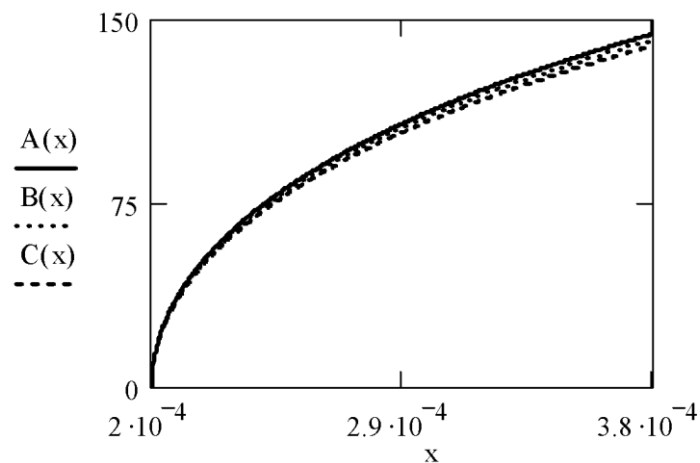


2. Залежність швидкості витікання повітря від тиску у вакуумній камері (ІІ етап) (рис. 2.2)

$$C(x) := \left[\frac{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot \frac{283}{\left(\frac{0.1}{x}\right)^{\frac{k-1}{k}}} \cdot \left[1 - \left(\frac{0.0002}{x}\right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}{\left(\frac{0.1}{x}\right)^{\frac{k-1}{k}}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$B(x) := \left[\frac{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot \frac{293}{\left(\frac{0.1}{x}\right)^{\frac{k-1}{k}}} \cdot \left[1 - \left(\frac{0.0002}{x}\right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}{\left(\frac{0.1}{x}\right)^{\frac{k-1}{k}}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$A(x) := \left[\frac{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot \frac{303}{\left(\frac{0.1}{x}\right)^{\frac{k-1}{k}}} \cdot \left[1 - \left(\frac{0.0002}{x}\right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}{\left(\frac{0.1}{x}\right)^{\frac{k-1}{k}}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

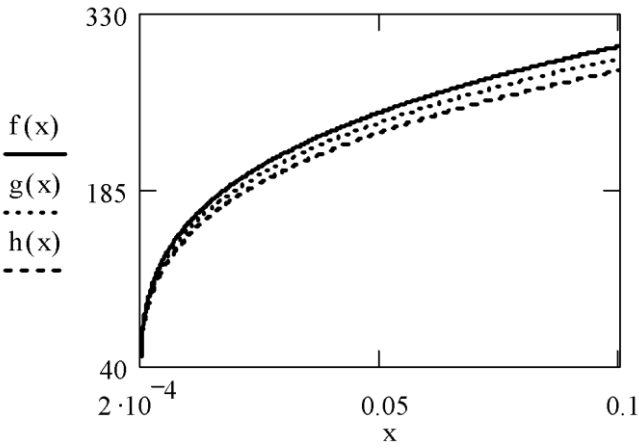


3. Залежність між тиском і температурою повітря у вакуумній камері (рис. 2.3)

$$f(x) := \frac{303}{\left(\frac{0.1}{x}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}}}$$

$$g(x) := \frac{293}{\left(\frac{0.1}{x}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}}}$$

$$h(x) := \frac{283}{\left(\frac{0.1}{x}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}}}$$



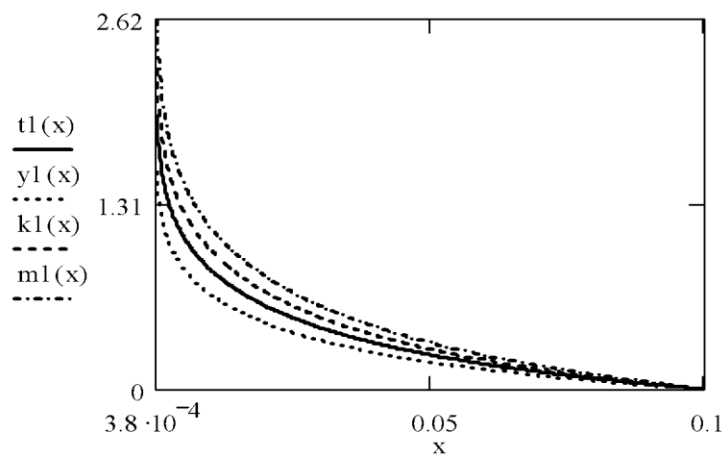
4. Залежність між тиском і часом вакуумування камери різних об'ємів
(І етап) (рис.2.5.a)

$$y1(x) := \frac{0.01125}{R} \cdot \left[\frac{0.1}{293} - \frac{x}{293} \cdot \frac{0.4}{\left(\frac{0.1}{x}\right)^{1.4}} \right] \cdot \frac{2}{0.0001 \cdot \left[\frac{0.1}{R \cdot 293} + \frac{x}{R \cdot \frac{293}{\left(\frac{0.1}{x}\right)^{1.4}}} \right]} \cdot G(x)$$

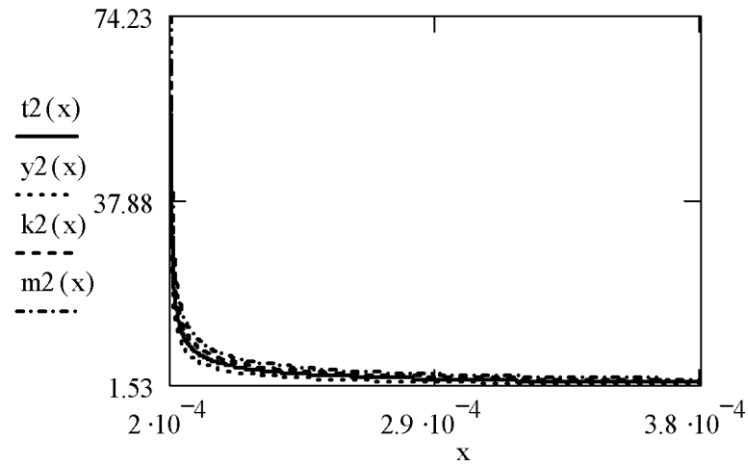
$$t1(x) := \frac{0.01421}{R} \cdot \left[\frac{0.1}{293} - \frac{x}{293} \cdot \frac{0.4}{\left(\frac{0.1}{x}\right)^{1.4}} \right] \cdot \frac{2}{0.0001 \cdot \left[\frac{0.1}{R \cdot 293} + \frac{x}{R \cdot \frac{293}{\left(\frac{0.1}{x}\right)^{1.4}}} \right]} \cdot G(x)$$

$$k1(x) := \frac{0.01658}{R} \cdot \left[\frac{0.1}{293} - \frac{x}{293} \cdot \frac{0.4}{\left(\frac{0.1}{x}\right)^{1.4}} \right] \cdot \frac{2}{0.0001 \cdot \left[\frac{0.1}{R \cdot 293} + \frac{x}{R \cdot \frac{293}{\left(\frac{0.1}{x}\right)^{1.4}}} \right]} \cdot G(x)$$

$$m1(x) := \frac{0.01924}{R} \cdot \left[\frac{0.1}{293} - \frac{x}{293} \cdot \frac{0.4}{\left(\frac{0.1}{x}\right)^{1.4}} \right] \cdot \frac{2}{0.0001 \cdot \left[\frac{0.1}{R \cdot 293} + \frac{x}{R \cdot \frac{293}{\left(\frac{0.1}{x}\right)^{1.4}}} \right]} \cdot G(x)$$



5. Залежність між тиском і часом вакуумування камери різних об'ємів
(II етап) (рис. 2.5.б)



$$y2(x) := \frac{0.01125}{R} \cdot \left[\frac{0.1}{293} - \frac{x}{\frac{293}{\left(\frac{0.1}{x}\right)^{1.4}}} \right] \cdot \frac{2}{0.0001 \cdot \left[\frac{0.1}{R \cdot 293} + \frac{x}{R \cdot \frac{293}{\left(\frac{0.1}{x}\right)^{1.4}}} \right] \cdot B(x)}$$

$$t2(x) := \frac{0.01421}{R} \cdot \left[\frac{0.1}{293} - \frac{x}{\frac{293}{\left(\frac{0.1}{x}\right)^{1.4}}} \right] \cdot \frac{2}{0.0001 \cdot \left[\frac{0.1}{R \cdot 293} + \frac{x}{R \cdot \frac{293}{\left(\frac{0.1}{x}\right)^{1.4}}} \right] \cdot B(x)}$$

$$k2(x) := \frac{0.01658}{R} \cdot \left[\frac{0.1}{293} - \frac{x}{\frac{293}{\left(\frac{0.1}{x}\right)^{1.4}}} \right] \cdot \frac{2}{0.0001 \cdot \left[\frac{0.1}{R \cdot 293} + \frac{x}{R \cdot \frac{293}{\left(\frac{0.1}{x}\right)^{1.4}}} \right] \cdot B(x)}$$

$$m2(x) := \frac{0.01924}{R} \cdot \left[\frac{0.1}{293} - \frac{x}{\frac{293}{\left(\frac{0.1}{x}\right)^{1.4}}} \right] \cdot \frac{2}{0.0001 \cdot \left[\frac{0.1}{R \cdot 293} + \frac{x}{R \cdot \frac{293}{\left(\frac{0.1}{x}\right)^{1.4}}} \right] \cdot B(x)}$$

Використання газового середовища для пакування різних продуктів харчування (Таблиця 1.1)

Продукт	Газова суміш, %	Об'єм газу, мл/ вага продукту, г	Термін зберігання		Температура зберігання, °C
			повітря	газове середовище	
Сире м'ясо	80 O ₂ + 20 CO ₂	100-200/100	2-4 дні	5-8 днів	2 – 3
Птиця	50-80 CO ₂ + 20-50 N ₂	100-200/100	7 днів	16-21 день	2 – 3
Ковбаса	20 CO ₂ + 80 N ₂	50-100/100	2-4 дні	4-5 тижнів	4 – 6
Нарізка	20 CO ₂ + 80 N ₂	50-100/100	2-4 дні	4-5 тижнів	4 – 6
Жирна риба	60-70 CO ₂ + 30-40 N ₂	200-300/100	3-5 днів	5-9 днів	0 – 3
Риба	30-40 O ₂ + 30-70 CO ₂ + 0-30 N ₂	200-300/100	3-5 днів	5-9 днів	0 – 3
Готова рибна продукція	20 CO ₂ + 80 N ₂	50-100/100	2-4 дні	4-5 днів	4 – 6
Твердий сир	80-100 CO ₂ + 0-20 N ₂	500-100/100	2-3 тижні	4-10 тижнів	4 – 6
Твердий сир (нарізка)	80-90 CO ₂ + 10-20 N ₂	50-100/100	2-3 тижні	4-10 тижнів	4 – 6
М'який сир	20-40 CO ₂ + 60-80 N ₂	500-100/100	4-14 днів	1-3 тижні	4 – 6
Салат	3-10 CO ₂ + 3-10 O ₂ + 80-94 N ₂	100-200/100	2-5 днів	5-10 днів	3 – 5
Гриби	3-10 CO ₂ + 3-10 O ₂ + 80-94 N ₂	100-200/100	2-3 дні	5-6 днів	3 – 5
Пироги	50-70 CO ₂ + 30-50 N ₂	50-100/100	3-5 дні	2-3 тижні	4 – 6

Тістечка, торти	20-40 CO ₂ + 60-80 N ₂	50-100/100	Кілька тижнів	1 рік	20 – 25
Печений хліб	80-100 CO ₂ + 0-20 N ₂	50-100/100	5 днів	20 днів	20 – 25
Піца	30-60 CO ₂ + 40-70 N ₂	50-100/100	1-2 тижні	2-5 тижнів	4 – 6
Салати с соусом	100 N ₂	50-100/100	1-2 тижні	2-3 тижні	4 – 6
Готові м'ясні продукти	20 CO ₂ + 80 N ₂	50-100/100	1-2 тижні	4-5 тижнів	4 – 6