

УДК 664.8.037.002.5, 664.8.037;664.8.037.002.5, 664.8.037.002.5  
№ держреєстрації 0121U114569  
Шифр 11-22Б

**ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

вул. Алчевських, 44, м. Харків, 61002  
тел. +38(057) 7003888 <http://btu.kharkov.ua>, [info@btu.kharkov.ua](mailto:info@btu.kharkov.ua)



**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Проректор з наукової роботи

Валерій МИХАЙЛОВ

**ЗВІТ  
ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ  
ДОСЛІДЖЕННЯ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТА  
ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ТА ХОЛОДИЛЬНОЇ  
ОБРОБКИ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ  
(заключний)**

Керівник НДР:  
доктор технічних наук, професор

Потапов В.О.

Рукопис закінчено 01 грудня 2023 року

Результати цієї роботи розглянуто на засіданні науково-технічної ради факультету енергетики, робототехніки та комп'ютерних технологій, протокол №4 від 20 грудня 2023 р.

## СПИСОК АВТОРІВ

Роботу виконано на кафедрі інтегрованих електротехнологій та енергетичного машинобудування ДБТУ

Керівник НДР

докт. техн. наук, професор



Потапов В.О.

Наукові співробітники:

канд. техн. наук, професор



Семенюк Д.П.

канд. техн. наук, доцент



Петренко О.В.

канд. техн. наук, доцент



Якушенко Є.М.

канд. техн. наук, професор



Жила В.І.

докторант PhD



Смілик М.М.

докторант PhD

Мольський О.С.

## РЕФЕРАТ

Заключний звіт: 155 сторінок; має в собі 48 рисунків, 105 джерел.

**Метою** дослідження та удосконалення процесів та обладнання для електромагнітної та холодильної обробки харчових продуктів.

**Об'єктом дослідження** є тепломасообмінні процеси та обладнання для електромагнітної та холодильної обробки біологічних об'єктів та харчової сировини.

**Предметом досліджень** є способи електромагнітної та холодильної обробки біологічних об'єктів та харчової сировини, режими обробки та зберігання біологічних об'єктів та харчової сировини, відповідне технологічне обладнання, а також застосування прикладних інженерних рішень та комп'ютерного моделювання у технологічних процесах харчової, мікробіологічної, переробної промисловості, а також у холодильній та кліматичній індустрії.

**Сутність процесу дослідження** полягає у дослідженні існуючих теоретичних і експериментальних методів дослідження процесів тепло- і масоперенесення під час холодильної та електромагнітної обробки, а саме виявленні особливостей тепломасообмінних процесів у цих об'єктах при технологічній обробці, в аналізі енергоефективних фізико-хімічних методів переробки та збереження харчової сировини та біологічних об'єктів, розробці рекомендацій щодо удосконалення процесів електромагнітної та холодильної обробки біологічних об'єктів та харчової сировини. В основу роботи покладено застосування прикладних інженерних рішень та комп'ютерного моделювання щодо досягнення заданої мети.

**Кінцевим результатом** досліджень є визначення перспективних напрямів удосконалення процесів холодильної та електромагнітної обробки в технологіях харчової, мікробіологічної та переробної промисловості та підвищення енергоефективності технологічного обладнання в цих галузях. Удосконалення технологічних режимів при заморожуванні-розморожуванні харчових продуктів та біологічних об'єктів, їх тривалому зберіганні з метою забезпечення якості та безпечності готових продуктів. Розробка практичних рекомендацій щодо удосконалення техніки, спрямованих на підвищення її енергоефективності, екологічності та забезпеченні харчової безпеки при електромагнітній та холодильній обробці харчової сировини та біологічних об'єктів.

Результати роботи також можуть бути використані в харчовій, переробній а також хімічній, фармацевтичній, парфумерній та косметичній промисловості.

## ЗМІСТ

ВСТУП	6
Розділ 1. АНАЛІТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛО-МАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРСПЕКТИВНИХ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ.	7
1.1 Визначення складних теплообміну при вакуумній сушці твердодоволгих і рідков'язких матеріалів	7
1.2 Вплив режиму тепло-масообмінної обробки на вміст доданої вологи у курячому м'ясі	19
1.3. Одержання хладонового екстракту лаврового листа та вивчення його компонентного складу	21
1.4 Теоретичний аналіз процесу кріосублимаційного фракціонування біоматеріалів	30
1.5 Особливості технологічного процесу кріосублимаційного сушіння рослинної сировини	33
1.6 Математичне моделювання міцності гетерогенних драглеутворювальних систем на основі структуроутворювачів полісахаридного та білкового походження	36
Висновки за розділом 1	47
Список використаних джерел за розділом 1	48
Розділ 2. ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ХОЛОДИЛЬНИХ СИСТЕМ ЗА РАХУНОК АКУМУЛЯЦІЇ ХОЛОДУ	51
2.1 Застосування системного підходу під час моделювання, як засіб підвищення ефективності систем холодопостачання	51
2.2 Енергоефективні та ресурсозберіжні технології акумуляції холоду в холодильних системах	53
2.3 Технологія акумуляції холоду шляхом заморожування льоду на поверхні випарника	60
2.4 Технологія акумуляція холоду льодяною сумішшю	62
2.5 Технологія акумуляція холоду з використанням капсул-заповнювачів	63
2.6 Технологія акумуляції холоду з використанням евтектичних розчинів	67
Висновки за розділом 2	74
Список використаних джерел за розділом 2	75
Розділ 3. АНАЛІЗ ТА ШЛЯХИ УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ХОЛОДИЛЬНОЇ ІНДУСТРІЇ УКРАЇНИ. МЕТОДИ ТА ОБЛАДНАННЯ ХОЛОДИЛЬНОЇ ІНДУСТРІЇ УКРАЇНИ	77
3.1. Перспективи впровадження теплових насосів в Україні	77
3.2. Застосування електрофізичних методів в холодильній індустрії	79
3.3. Енергозберігаючі технології на підприємствах торгівлі	82
3.4. Застосування теплового насосу як перспективного обладнання для зниження енерговитрат при сушінні зернової продукції	84
3.5 Холодильне та кліматичне обладнання з використанням	86

теплової енергії	
Висновки за розділом 3	88
Список використаних джерел за розділом 3	89
<b>Розділ 4. ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ МЕТОДІВ У ТЕХНОЛОГІЯХ ПЕРЕРОБКИ МОЛОКА</b>	90
4.1. Формування центрів концентрації кисломолочних бактерій	90
4.2. Інноваційне обладнання для сепарації молока	92
4.3. Удосконалення знезаражувача-молокоочисника	94
Висновки за розділом 4	96
Список використаних джерел за розділом 4	97
<b>Розділ 5. АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗАМОРОЖУВАННЯ М'ЯСНОЇ СИРОВИНИ.</b>	98
5.1. Проблеми підбору хладагенту на сьогодні	98
5.2. Аналіз процесів заморожування курячих субпродуктів	99
5.3. Процеси та обладнання для заморожування м'яса	100
Висновки за розділом 5	101
Список використаних джерел за розділом 5	101
<b>Розділ 6. МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЇ НЕНЬЮТОНІВСЬКИХ РІДИН У КАНАЛАХ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ</b>	103
6.1. Моделювання течії в'язко-пластичного баротропного матеріалу, що стискається в каналах складної геометрії	103
6.2. Метод обчислення енергії дисипації при течії узагальнено-зрушеної рідини у каналах технологічного обладнання	115
6.3. Рівняння теплообміну при течії неньютонівських рідин у каналах технологічного обладнання	130
Висновки за розділом 6	141
Список використаних джерел за розділом 6	142
<b>Розділ 7 СУЧАСНІ ШЛЯХИ ТРАНСФОРМАЦІЇ ХОЛОДИЛЬНИХ СИСТЕМ ПІДПРИЄМСТВ РЕТЕЙЛА УКРАЇНИ</b>	142
Висновки за розділом 7	155
Список використаних джерел за розділом 7	155

## ВСТУП

В умовах сьогодення розробка інноваційних конкурентоспроможних технологій зберігання та переробки харчової сировини безумовно пов'язана з одночасним вирішенням проблем енергоефективності, ресурсозбереження та сталої екології. Це спричинено нестабільністю енергопостачання, зростанням цін на енергоносії, порушенням логістичних ланцюгів внаслідок війни з боку Росії, а також триваючим поглибленням впливу кліматичних змін на аграрну та харчову галузь. Означені проблеми для економіки України в цілому стають дуже актуальними.

Ці проблеми можуть бути вирішені тільки на підставі системного підходу, зокрема виявлення механізмів функціонування харчової галузі адаптованих до нових умов, що постійно змінюються. Такий аналіз показує, що при створенні нових видів харчової продукції перевагу треба надавати виробам підвищеної харчової цінності, покращеної якості з високими споживними властивостями та подовженими термінами зберігання за умов раціонального використання харчової сировини та підтримання екологічної безпеки.

З погляду на це системи охолодження та кондиціонування забезпечують стратегічний рівень щодо безпеки функціонування безперервного холодильного ланцюга шляхом підтримання критично важливого рівня температур на кожній технологічній ланці. В той же час ці системи надають значний внесок у викиди парникових газів внаслідок прямих витоків холодоагентів у атмосферу, а також, як і інше теплоенергетичне обладнання, яке споживає електричну енергію, внаслідок спалювання викопного палива при її виробництві.

В даному звіті проаналізовано та запропоновано перспективні напрямки удосконалення процесів холодильної та електромагнітної обробки в технологіях харчової, мікробіологічної та переробної промисловості та підвищення енергоефективності технологічного обладнання в цих галузях. Особливу увагу приділено удосконаленню технологічних режимів при екстрагуванні, тепломасообмінній обробці харчових продуктів та біологічних об'єктів: заморожуванні-розморожуванні, сушінні, екстрагуванні, їх тривалому зберіганні з метою забезпечення якості та безпечності готових продуктів.

Розглянуто питання аналітичного моделювання зазначених процесів, розроблено практичні рекомендації щодо удосконалення обладнання переробної та харчової промисловості, підприємств рітейлу, комунального господарства спрямованих на підвищення енергоефективності, екологічності та забезпеченні харчової безпеки при електромагнітній та холодильній обробці харчової сировини та біологічних об'єктів.

Результати роботи також можуть бути використані в харчовій, переробній а також хімічній, фармацевтичній, парфумерній та косметичній промисловості.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛО-МАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРСПЕКТИВНИХ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

1.1 Визначення складних теплообміну при вакуумній сушці твердодоволгих і рідков'язких матеріалів.

Численні дослідження вакуумного сушіння харчових продуктів підтверджують її ефективність [1-3]. На відміну від вакуумного сублімаційного сушіння, вакуумна дегідратація відбувається без попереднього заморожування матеріалу, що висушується, при значно високих значеннях тиску середовища і позитивних температурах. Це дозволяє досягти значної енергоефективності за хорошої якості кінцевого продукту. Як правило, рівень вакууму середовища знаходиться в середньому та низькому діапазоні, що і визначає особливості механізму теплообміну при вакуумному сушінні.

Теплообмін у термічних процесах може здійснюватися трьома способами: конвекцією, теплопровідністю та випромінюванням. При кондукції передача тепла відбувається через тверді тіла за рахунок коливань ґрат або зіткнення частинок. Конвекція заснована на русі рідин для передачі тепла. Радіація не потребує середовища передачі тепла, а використовує електромагнітні хвилі, випромінювані об'єктом для теплообміну [4]. Більшість способів сушіння є комбінацією перерахованих вище способів, тобто. складаються із двох або трьох прийомів підведення тепла. При цьому частка кожного виду теплообміну може бути різною і змінюватись в залежності від виду та режиму сушіння, геометричних параметрів оброблюваного продукту і т. д. Так, при атмосферному сушінні передача теплоти відбувається переважно за рахунок конвекції та теплопровідності. При вакуумному сублімаційному сушінні, що відбувається в глибокому вакуумі, тепло передається в основному за рахунок теплопровідності та випромінювання. Sh.Rambhatla і M.Pikal відзначають, що домінуючими механізмами теплопередачі при сублімаційному сушінні фармацевтичних препаратів є теплопровідність і випромінювання, причому частка останнього може змінюватись в залежності від виду матеріалу поверхонь в сушильній камері [5]. Стверджують, що при низькому тиску, тобто при сублімаційному сушінні, тепло зазвичай передається продукту за рахунок теплопровідності, іноді шляхом випромінювання, а конвекція зустрічається рідко, оскільки у вакуумі дуже мало молекул рідини або газу, і коефіцієнт теплопередачі можна знехтувати [6, 7]. Семенов Г.В. та ін. підтверджують, що при сублімаційному сушінні тепло передається теплопровідністю, випромінюванням, мікрохвилями або їх комбінацією [8].

Між тим, Арнаб Гангуліта ін. виявили, що при ліофільному сушінні з тиском більше 100 мТорр конвективна складова порівняна з кондуктивною [9]. Єрмолаєв В.А. вважає, що якщо вакуумне сушіння протікає при залишковому тиску вище 1-2 кПа, то тепло і вологоперенесення продукту, що висушується,

підпорядковується закономірностям перенесення тепла і вологи при конвективному сушінні [10].

Новіковим П.А. встановлено, що при вакуум-сублімаційному сушінні нафталіну частка променистого теплообміну лежить у межах (30÷50)% від загального теплового потоку [11]. Однак у науковій літературі відсутні аналогічні відомості з вакуумної сушіння, що протікає, як правило, при низьких і середніх ступенях розрідження, а також при позитивних температурах.

Відомо, що залежно від рівня вакууму змінюється механізм процесу теплообміну [12]. Пропонується ступінь вакууму розділити на 4 види.

До першого виду автори відносять перенесення теплоти та маси речовини в інтервалі тиску від атмосферного до 40 мм рт. ст. Перший вид характерний тим, що зі зниженням загального тиску пароповітряного середовища інтенсивність випаровування зростає незначно, маючи майже прямолінійну залежність. У цьому випадку перенесення теплоти та маси речовини в основному відбувається молекулярною дифузією та конвекцією. Режим перебігу пароповітряної суміші – ламінарний.

Другий тип характеризує інтенсивний процес вакуум-сублімаційного випаровування, коли висока швидкість сушіння призводить до зміни механізму тепломасоперенесення. При випаровуванні волога збільшується в обсязі і спрямовується в розріджене середовище. Цей гідродинамічний ефект значний, якщо тиск парів речовини можна порівняти за величиною з тиском у субліматорі. Теплообмін повністю визначається масообміном, гідродинаміка якого залежить від повного тиску та швидкості зміни агрегатного стану вологи. Цей вид тепломасообміну відбувається у діапазоні тисків від 40 до 0,5 мм рт.ст.

Для третього виду перенесення характерний молекулярно-в'язкісний режим, при якому починає позначатися вплив тонкого пристінкового шару, який безпосередньо прилягає до поверхні, що сублімується.

До четвертого виду тепло- та масообміну відноситься вільно-молекулярний процес перенесення, який характеризується відсутністю зіткнень між молекулами. Механізм цього виду перенесення теплоти та речовини описується молекулярно-кінетичною теорією газу.

Технологія вакуумної сушіння харчових продуктів та встановлення для її здійснення описані раніше [13-14]. Він включає попередню підготовку сировини, приміщення його у вакуумну камеру і сушіння до необхідної вологості. Слід зазначити, що розглядається лише період постійної швидкості сушіння. На цій ділянці температура продукту постійна та дорівнює температурі мокрого термометра, яка вимірювалася мідно-константовими термопарами.

У цьому науковому дослідженні ступінь розрідження середовища у вакуумній камері коливався в межах (4÷10) кПа, температурний рівень нагрівання – (35÷55)<sup>0</sup>С. Даний рівень розрідження відноситься до області низького та початку середнього вакууму [13], а інтервал температур характеризує помірне нагрівання.

Таким чином, у вакуумній камері теплообмін здійснюється за рахунок



- теплопровідності ( $q_t$ ) від нагрітої полиці, на якій розташований матеріал,
- конвекції ( $q_v$ ) від повітряного середовища, що нагрівається електронагрівачами,
- випромінювання ( $q_r$ ) від електронагрівачів та полиць.

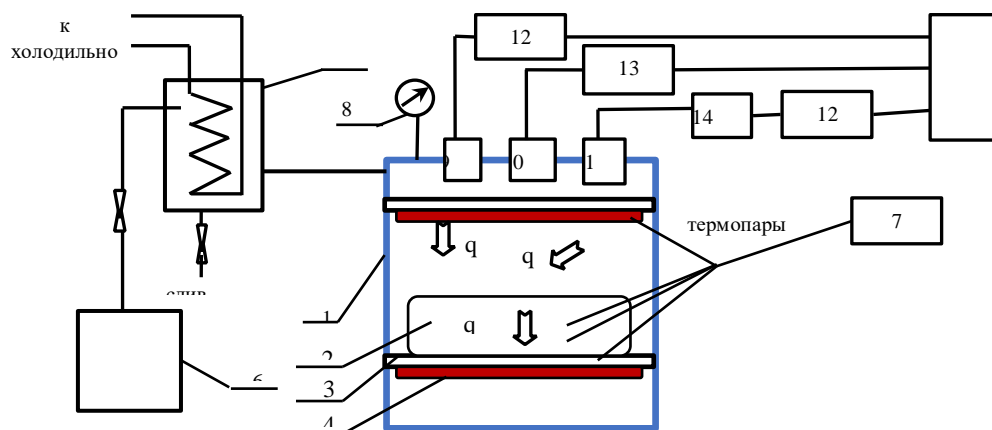
При цьому всередині твердо-вологих матеріалів теплообмін передається кондуктивним шляхом, у рідких матеріалах – конвекцією.

Метою дослідження є визначення частки кожного виду теплообміну при вакуумному сушінні твердо-вологих та рідков'язких матеріалів.

Для досягнення мети було сформульовано такі завдання:

- вибрати матеріали дослідження, що мають твердо-вологу та рідко-в'язку структуру;
- експериментально визначити чисельні значення складових теплообміну;
- конвекції, теплопровідності та випромінювання та визначити їх частки у загальному тепловому потоці;
- проаналізувати зміну цих величин залежно від тиску середовища, температури нагріву та висоти шару матеріалу.

Дослідження ролі кожного виду теплообміну при вакуумному сушінні твердовологих та рідков'язких матеріалів проведено на експериментальній сушарці, схема якої представлена на рис. 1.1.



**Рисунок 1.1 – Схема вакуумної сушарки та шляхи передачі теплоти ( $q_v$  - конвекція;  $q_r$  - Випромінювання;  $q_t$  - Теплопровідність):** 1 – корпус вакуумної камери; 2 - продукт, що висушується; 3 – полиця; 4 – електричні нагрівачі; 5 – виморожувач вологи; 6 – вакуумний насос; 7 - стрілочний вакуумметр; 8 – цифровий вольтметр постійного струму; 9 - датчик зміни тисків вакуумованого середовища; 10 - датчик зміни температури вакуумованого середовища; 11 - датчик зміни поверхні стінок циліндра; 12 – тензостанція; 13 - міст постійного струму; 14 – магазин опорів; 15 - багатоканальний осцилограф.

Вимірювання температури продукту, що висушується, здійснювалися ешелонованими по глибині і ширині продукту мідь-константовими термопарами діаметром 0,15 мм з використанням в якості реєструючого приладу цифровий вольтметр постійного струму 8.

Вимірювання стаціонарних тисків середовища у вакуумній камері проводилося вакуумметром 7, а зміни тиску середовища реєструвалися тензотримічним мембранним датчиком тиску 9 [15].

Вимір змін температури середовища у вакуумній камері проводилося малоінерційним термометром опору 10 з платиновим дротом діаметром 5 мкм з використанням моста постійного струму 13, що має клас точності 0,1 [16].

Вимірювання температурних коливань на робочій поверхні стінки камери здійснювалося плівковим термометром опору 11 з чутливим елементом з напівпровідникового сплаву, напиленим на підкладку з полікору, і має товщину чутливого елемента близько 600 Å і початковий опір при температурі 290К порядку.

В якості реєструючих приладів імен температур і тисків вакуумованого середовища і стінок вакуумної камери використовувався багатоканальний осцилограф 15. При цьому сигнал з датчика тисків попередньо посилювався тензостанцією 12. Розшифровка осцилограм змінних температур і тисків вакуумованого середовища і стінок вакуумної камери вироблялася. Міст постійного струму 13 і магазин опорів 14, класу точності 0,1, використовувалися для виділення постійних складових сигналів з датчиків температур і тисків, а також для розшифрування осцилограм безпосередньо за шкалою осцилографа.

Як твердо-вологий матеріал були обрані подрібнені у вигляді кубиків бульби топінамбуру. Топінамбур (*Helianthus tuberosus*) - багаторічна бульбова рослина з лікувальними властивостями. Бульби містять розчинний полісахарид інουλін, азотисті речовини, вітамін С та комплекс вітамінів групи В, органічні та жирні кислоти. Мінеральними речовинами топінамбуру є цинк, кремній, фосфор, залізо, калій, магній та мідь. Багато досліджень підтверджують доцільність застосування топінамбуру як функціонального продукту [17-19].

Розмір грані кубика дорівнює 5 мм. Матеріал розміщували на полицях у вигляді щільного шару. Полиці обігрівалися електричними обігрівачами, які встановлені під ними (рис. 1.1).

Як рідков'язкі матеріали досліджувалися верблюже і кобиляче молоко. Верблюже молоко багатше залізом, цинком, міддю, калієм, натрієм, кальцієм і вітаміном С, ніж коров'яче молоко, що робить його ближче до грудного молока людини. Верблюже молоко також має цінні терапевтичні властивості, оскільки воно містить високу концентрацію антибактеріальних, протигрибкових, противірусних та антипаразитарних сполук, які допомагають боротися з такими серйозними захворюваннями, як гепатит, ротавірусна діарея, туберкульоз і шистосомоз [20]. Верблюже молоко, як натуральний і безпечний продукт, може бути використане як альтернативна схема лікування цукрового діабету [21].

Кобиляче молоко має сильні бактерицидні властивості. Порівняно з коров'ячим молоком кобилля містить менше жиру, білка, мінеральних речовин, але вміст вітаміну С вищий у 5-7 разів [22]. Мінеральний склад кобилячого молока представлений кальцієм, фосфором, калієм, натрієм, кобальтом, міддю, йодом, марганцем, цинком, титаном, алюмінієм, кремнієм та залізом. Висока

кількість йоду свідчить про високий вміст ненасичених жирних кислот (у тому числі поліненасичених), завдяки яким молочний жир швидко окислюється. Кобиляче молоко містить імуноглобуліни, лактоферин та лізоцими, які виявляють високу біологічну активність та приносять користь організму людини [23]. Крім того, кобиляче молоко, яке не є молоком жуйних тварин, схоже на грудне молоко за поживним складом; модифіковане кобиле молоко є безпечним заміником коров'ячого молока у немовлят з алергією [24].

Вакуумне сушіння бульб топінамбуру та молока проводили в незамороженому шарі при помірному температурному нагріванні.

Вакуумне сушіння бульб топінамбуру проводили за таких умов:

- тиск середовища 4...8 кПа з кроком 2 кПа;
- температура нагріву 35...55 °С кроком 10 °С;
- Висота шару матеріалу, що висушується в межах 0,01 ... 0,04 м з кроком 0,01 м.

Вакуумне зневоднення верблючого та кобилячого молока проводили на режимах:

- тиск середовища 6 ... 10 кПа з кроком 2 кПа;
- температура нагріву 35...45 °С кроком 5 °С;
- висота осушеного шару 0,01 м.

Вибір інтервалів температур і тисків при вакуумному сушінні обґрунтовувався необхідністю максимального збереження біохімічного складу досліджуваних сушильних матеріалів за досить високої інтенсивності процесу сушіння.

Експериментальні дослідження проводять у наступному порядку.

1. За 30 хвилин до початку досвіду включаються компресор та електронагрівачі для підготовки сушильної установки. Необхідна температура кипіння холодоагенту (-4 °С) встановлюється регулюванням дросельного вентиля. Температуру нагрівачів у вакуумній камері регулюють у межах (35÷55) зі зміною сили струму, що подається на електронагрівачі.

2. Підготовлений матеріал (кубики топінамбуру розміром 5×5×5 мм) укладають у сітчасті ємності. Товщина шару матеріалу варіюється від 10 до 40 мм.

3. Молоко фільтрують, охолоджують до (2÷8) °С і наливають у скляну ємність. Висота молока у ємності 10 мм.

4. Маса матеріалу зважується на аналітичних терезах з точністю до 0,001г.

5. Ємності укладають на полиці у вакуумну камеру. Кришка камери щільно закривається.

6. Включають вакуумний насос. Рівень розрідження середовища в камері (4; 6; 8; 10 кПа) встановлюється за допомогою регулюючого вентиля. Момент початку експерименту фіксується після досягнення необхідного рівня вакууму.

7. Інтервал між вимірами маси висушеного матеріалу становить 60 хвилин. При цьому визначається кількість вологи, що випаровується. Спочатку за допомогою вакуумного клапана рівень вакууму камері знижують до 80 кПа; потім вакуумний насос вимикається та відкривається кришка.

8. Вологовміст матеріалу розраховується за рівнянням (1.1):

$$\omega = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100, \% \quad (1.1)$$

де  $\omega$  - вологість матеріалу по відношенню до початкової маси матеріалу, %;  
 $m_1$  і  $m_2$  – початкова та кінцева маси матеріалу, р.

Зважений матеріал знову поміщався у вакуумну камеру і піддавалася сушінню з проміжним виміром втрат маси матеріалу до досягнення матеріалом критичної вологості.

Величини критичної вологості визначають експериментально шляхом побудови кривих сушіння.

У роботі досліджено бульби топінамбуру, вирощені у Південному Казахстані. Початковий вміст вологи вмісту топінамбуру склало 77%. Вихідна вологість верблюжого молока становить 86%, кобильського - 90%.

Масу висушуваного матеріалу вимірювали на лабораторних аналітичних терезах.

Кількість теплоти, витрачена на нагрівання  $Q_{\text{ч}}$  та випаровування  $Q_{\text{це}}$  вологи з матеріалу, що висушується, визначали за рівнянням (1.2):

$$Q = Q_{\text{ч}} + Q_{\text{це}} = cm\Delta T + rm, \quad (1.2)$$

де  $c$  – питома теплоємність продукту, Дж/кг К;  
 $m$  – маса продукту, кг;  
 $\Delta T$  – різниця кінцевої та початкової температур продукту, К;  
 $r$  – питома теплота пароутворення, Дж/кг.

Кількість теплоти, переданої теплопровідністю  $Q_t$ :

$$Q_t = -\lambda F \Delta T \frac{\Delta \tau}{c}, \quad (1.3)$$

де  $\lambda$  – ефективна теплопровідність матеріалу за його температури, Вт/м·К,  
 $F$  – площа, якою проходить тепло;  
 $s$  – потужність шару, м;  
 $\Delta \tau$  – тривалість періоду постійної швидкості сушіння, с.

Кількість тепла, переданого випромінюванням  $Q_r$ :

$$Q_r = \varepsilon \sigma F (T_1^4 - T_2^4) \Delta \tau, \quad (1.4)$$

де  $\sigma$  – стала Стефана-Больцмана, рівна  $5.669 \times 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>;  
 $\varepsilon$  - наведений коефіцієнт теплового випромінювання;  
 $T_1$  - температура нагрівачів;  
 $T_2$  - температура продукту.

Наведений коефіцієнт теплового випромінювання розраховується як для випадку теплообміну між двома пластинами, тобто. нагрівачів та продукту [25]:

$$\varepsilon = \left[ \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right]^{-1}, \quad (1.5)$$

де  $\varepsilon_1$ - Коефіцієнт теплового випромінювання нагрівачів;  
 $\varepsilon_2$  - Коефіцієнт теплового випромінювання продукту.

Величини питомої теплоємності і теплопровідності  $\lambda$  продукту при температурі мокрого термометра розраховують за рівнянням, взятим з довідкової літератури [26]. Значення коефіцієнта теплового випромінювання металевих нагрівачів<sub>1</sub> взято з [27].  $\varepsilon_2$  визначається експериментально за рівнянням:

$$\varepsilon = 0,0347\sqrt{r_0}T \text{ [28]}, \quad (1.6)$$

де  $r_0$ - Питомий опір при 273К, Ом см;  
Т - температура продукту, К.

Кількість теплоти, передана конвекцією  $Q_B$ :

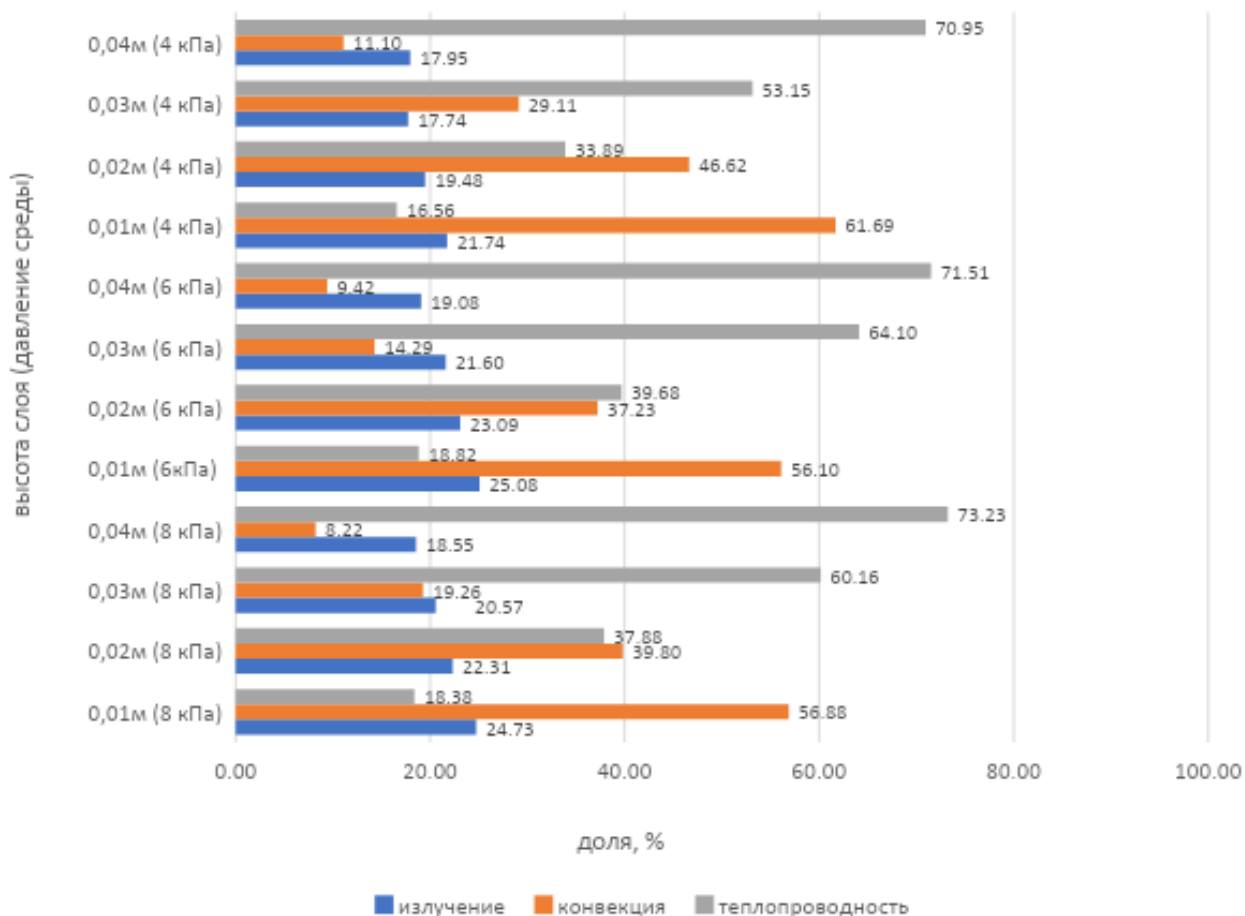
$$Q_B = Q - Q_t - Q_r. \quad (1.7)$$

За отриманими даними (1.1-1.7) розраховували частку кожного виду теплообміну по відношенню до загальної кількості спожитого тепла.

Відповідно до метою дослідження експериментально визначено чисельні значення складових теплообміну - конвекції, випромінювання та теплопровідності та розраховано їх частки у загальному тепловому потоці. Отримані результати оброблені як діаграм, представлених на рис. 1.2–1.4 для бульб топінамбуру та на рис. 1.5-1.6 для кобилячого та верблюжого молока.

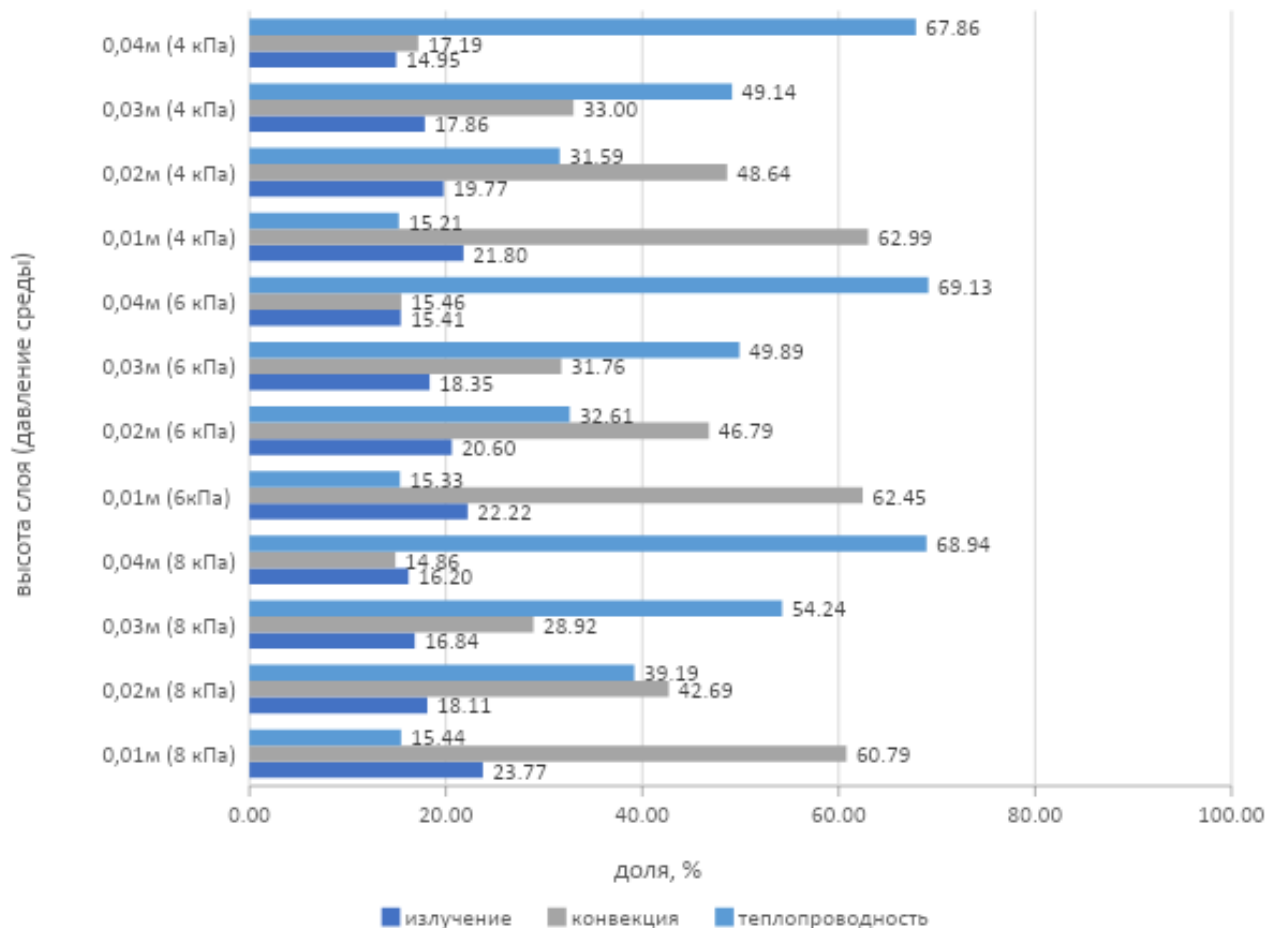
На рис.1.2 показані співвідношення складових теплообміну в залежності від тиску середовища та висоти шару при температурі нагріву 35 °С для бульб топінамбуру. Спостерігаються незначні зміни частки випромінювання залежно від величини вакууму та висоти шару матеріалу. Вона варіюється не більше 17,74...25,08 %. При цьому значення конвективних теплових потоків значно змінюються. При тиску середовища 8 кПа зі збільшенням висоти шару від 0,01 до 0,04 м величина конвективного потоку зменшується з 56,9 до 8,22 %, при тиску середовища 6 кПа - з 56,10 до 9,42 %, при 4 кПа – з 61,69 до 11,10 %. З цього випливає, що частка конвективного потоку практично не змінюється в залежності від ступеня розрідження в діапазоні (8...4) кПа, але значно зменшується приріст висоти шару. Це тим, що зі збільшенням висоти шару збільшується частка кондуктивної теплопередачі, тобто. теплопровідності, що

логічно. Так, із збільшенням висоти шару від 0,01 до 0,04 м частка теплоти, що підводиться за рахунок теплопровідності, при тиску середовища 8 кПа збільшується з 18,38 до 73,23 %, при 6 кПа - з 18,82 до 71, 5%, при 4 кПа – з 16,56 до 73,23%. 70,95%, тобто прямо пропорційно.



**Рисунок 1.2 - Частка кожного виду теплообміну (%) при вакуумному сушінні бульб топінамбуру при температурі 35 °С.**

Аналогічний характер співвідношення складових теплообміну спостерігається при температурі нагрівання 45 °С (рис.1.3). Значення променистих складових також трохи змінюються при зміні ступеня розрідження, але мають нижчі значення, ніж при температурі нагріву 35 °С, і знаходяться в межах 14,95 ... 22,22%. Значення конвективних складових при тиску середовища 8 кПа зі збільшенням висоти шару від 0,01 до 0,04 м зменшуються з 60,79 до 14,86 %, при 6 кПа - з 62,45 до 15,46 %, при 4 кПа - з 62,99 до 17,19%. Ці значення дещо перевищують значення конвективних складових за температури 35 °С. Частка потоків, що забезпечуються теплопровідністю при 8 кПа зі збільшенням висоти шару від 0,01 до 0,04 м, збільшується прямо пропорційно - з 13,44 до 68,94 %, при 6 кПа - з 15,33 до 69,13 %, при 4 кПа – з 15,21 до 67,86%. Ці значення набагато нижчі, ніж у попередньому режимі нагрівання.



**Рисунок 1.3 - Частка кожного виду теплообміну (%) при вакуумному сушінні бульб топінамбуру при температурі 45 °С.**

При температурі нагріву 55 °С частка радіаційного теплообміну знаходиться в межах 10,06...17,74 %, що значно нижче, ніж при температурі 35 і 45 °С (рис.1.4). Значення конвективних складових вище, ніж за інших температур. Так, при тиску середовища 8 кПа зі збільшенням висоти шару від 0,01 до 0,04 м частка конвективного потоку знижується з 61,60 до 17,10 %, при 6 кПа - з 63,18 до 19,44 %, а при 4 кПа – з 67,65 до 19,44 %. 20,34%. Частка кондуктивного теплообміну збільшується зі зростанням висоти шару. При 8 кПа її значення збільшуються з 20,67 до 70,82 %, при 6 кПа – з 20,81 до 68,62 %, при 4 кПа – з 18,96 до 68,37 %.

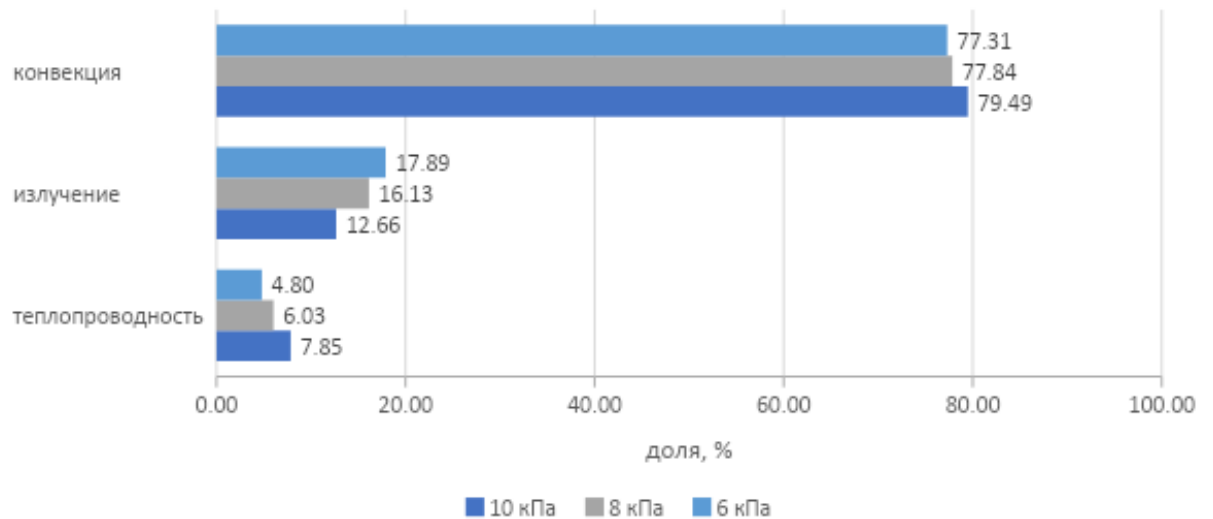
Результати досліджень з вакуумної сушіння рідков'язких матеріалів - верблюжого та кобилячого молока описані нижче.



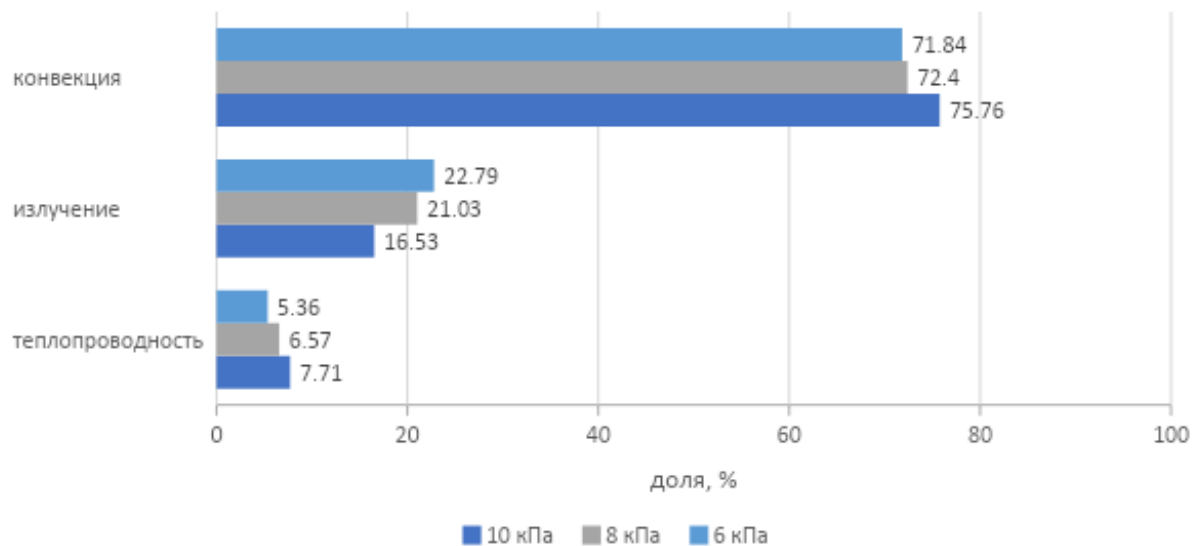
**Рисунок 1.4 - Частка кожного виду теплообміну (%) при вакуумному сушінні бульб топінамбуру при температурі 55 °С.**

Діаграми на рис. 1.5 демонструють характер зміни частки кожного виду теплообміну при вакуумному сушінні верблюжого і кобилячого молока при температурі нагрівання 40°C залежно від тиску середовища 10; 8; 6 кПа. З аналізу даних рис.5 слід, що частки конвективної тепловіддачі при тиску середовища 10 кПа для кобилячого і верблюжого молока становлять 79,49 і 75,76% відповідно, при 8 кПа - 77,84 і 72,40%, для 6 кПа - 77,31 та 71,84%. тобто. у міру поглиблення ступеня розрідження частка конвективного теплообміну зменшується. Навпаки, частка теплообміну випромінюванням із підвищенням ступеня вакуумування від 10 до 6 кПа зростає для кобилячого молока з 12,66 до 17,89 %, для верблюжого молока – з 16,53 до 22,79 %. Частка теплопередачі теплопровідністю з поглибленням рівня вакууму зменшується для кобилячого молока з 7,85 до 4,8%, для верблюжого молока – з 7,71 до 5,36%. В цілому можна відзначити, що для температурного режиму 40°C та інтервалу тисків (6÷10) кПа кількісне співвідношення кожного виду теплообміну (конвекція: теплопровідність: випромінювання) для кобилячого молока становить (%) 78,21:6,23:15, 56, а для верблюжого молока - 73,33:6,55:20,12.





а)

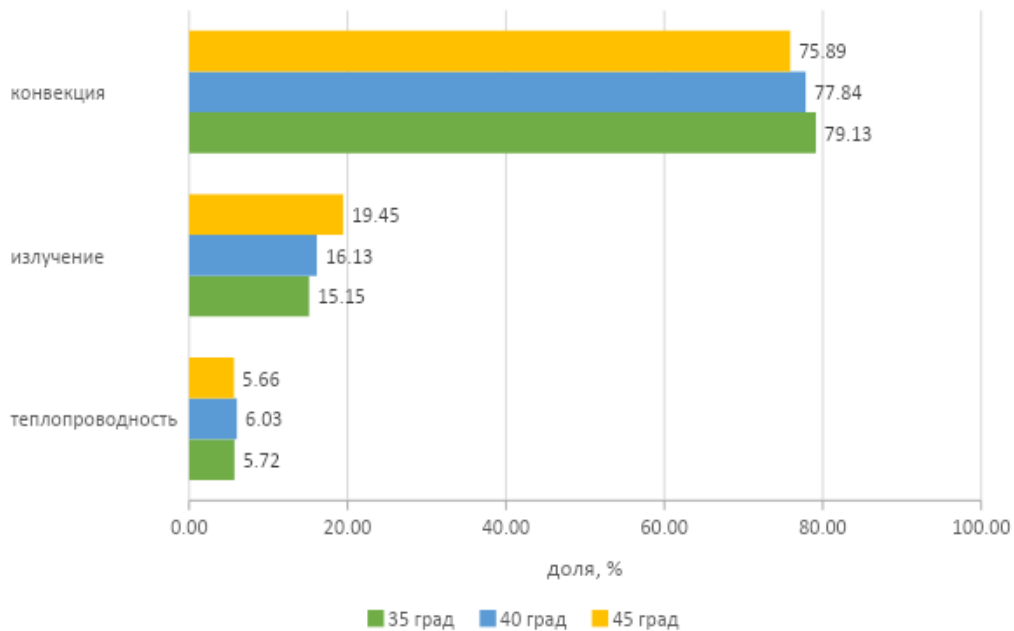


б)

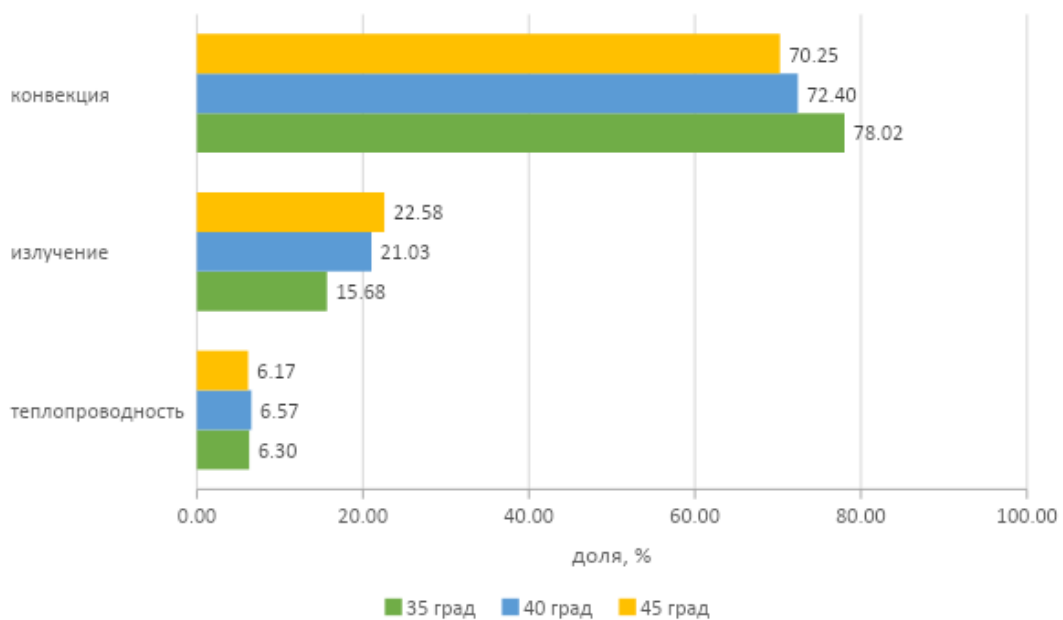
**Рисунок 1.5 - Долі кожного виду теплообміну при вакуумному сушінні кобилячого і верблюжого молока при температурі нагріву 40°C залежно від тиску вакуумного середовища: а – кобиляче молоко; б - верблюже молоко.**

На рис. 1.6 показано зміну частки кожного виду теплообміну при вакуумному сушінні верблюжого та кобилячого молока при тиску середовища 8 кПа в залежності від температур нагрівання 35; 40; 45 °С. Частка конвекції з підвищенням температури від 35 до 45 ° С дещо знижується для кобилячого молока з 79,14 до 75,89%, для верблюжого - з 78,02 до 70,25%. Частка теплообміну випромінюванням зростає для кобилячого молока з 15,15 до 19,45%, для верблюжого - з 15,68 до 22,58%. На відміну від цих способів теплообміну, зміна частки теплопровідності з підвищенням температури

незначна, не є лінійною і має мінімальні значення при максимальній температурі нагрівання 45 °С. Для вищевказаного діапазону температур і тиску середовища 8 кПа кількісне співвідношення кожного виду теплообміну (конвекція: теплопровідність: випромінювання) для кобилячого молока становить 77,62:5,8:16,91, а для верблюжого молока - 73,56:6,35: 19,76.



а)



б)

**Рисунок 1.6 - Частки кожного виду теплообміну при вакуумному сушінні кобилячого та верблюжого молока при тиску середовища 8 кПа залежно від температури нагрівання: а – кобиляче молоко; б – верблюже МОЛОКО.**

Таким чином, вивчивши характер зміни складових теплообміну при вакуумному сушінні бульб топінамбуру, що протікає в умовах низького та середнього вакууму, можна зробити наступні висновки [29]:

- частка променистого теплообміну практично не залежить від рівня вакууму (у заданому інтервалі), але зменшується зі збільшенням температури нагріву та висоти шару матеріалу;

- значення конвективних складових трохи збільшуються з підвищенням температури нагріву, але не залежать від рівня вакууму (в заданому інтервалі); із збільшенням висоти шару значення конвективних складових зменшуються;

- частка тепла, підведеного теплопровідністю, збільшується прямо пропорційно зростанню висоти шару, але підвищення температури нагріву в даному діапазоні незначно впливає на її зміну;

- на висотах шару матеріалу (0,01 ... 0,02) м в тепловому потоці переважає конвективна складова, а при висотах шару (0,03 ... 0,04) м - теплопровідна складова. Тут підтверджується теорія переважання кондуктивного теплообміну всередині твердого матеріалу [11];

- при температурі нагріву 35 °С переважає теплопровідність (7 випадків з 12), при 55 °С - конвекція (7 випадків з 12), при 45 °С їх значення однакові (по 6 випадків).

За результатами аналізу зміни складових теплообміну при вакуумному сушінні рідков'язких матеріалів на прикладі верблюжого та кобилячого молока можна зробити наступні висновки:

- частка променистого теплообміну дещо збільшується при зниженні тиску середовища та підвищенні температури нагріву (у заданому інтервалі);

- значення конвективних складових дещо зменшуються при зниженні тиску та підвищенні температури;

- Частка потоку, що забезпечується теплопровідністю, практично не змінюється з підвищенням температури нагріву, але при зниженні тиску її значення дещо зменшуються. Це також підтверджується результатами досліджень, що збільшення вакууму знижує теплопровідність [6];

- при вакуумному сушінні рідких матеріалів тепло передається в основному конвекцією, меншою мірою випромінюванням і теплопровідністю.

## 1.2 Вплив режиму тепло-масообмінної обробки на вміст доданої вологи у курячому м'ясі.

Технологія виробництва курячого м'яса передбачає обов'язкову тепло-масообмінну обробку яка полягає у охолодженні або заморожуванні готової продукції або напівфабрикатів. Процес охолодження багато в чому визначає зовнішній вигляд готового продукту, термін його зберігання в торговельній мережі і вихід продукції по масі. Таким чином, холодильна техніка визначає рентабельність виробництва.

Найефективніший метод - охолодження тушок в традиційному шнековому охолоджувачі протитоком. Цей процес дозволяє охолоджувати

тушку до температури 4 °С - 6 °С і знижує втрати ваги. При цьому для поліпшення зовнішнього вигляду і терміну зберігання бажано, щоб кількість поглиненої води було як можна менше і піддавалося регулюванню. На підприємствах, де вже є шнековий охолоджувач з протитоком, в такій ситуації після нього часто встановлюють додаткову лінію повітряного охолодження. Довжина такої лінії залежить від маси охолодженої птиці і необхідної кінцевої температури.

Поєднання протivotочного гвинтового охолоджувача з лінією повітряного охолодження має ряд недоліків. Контролювати кількість води, яка поглинається в шнековому охолоджувачі протитечією, можна тільки в обмежених межах. Для подолання цих недоліків на лінії передбачена двоступенева система охолодження. У першому продукти транспортуються по підвісному транспортеру через багатосекційну водяну баню з перемішаною охолодженою водою. На другому етапі використовується повітряне охолодження. Для запобігання пересихання виробів в процесі повітряного охолодження і для контролю зовнішнього вигляду і кольору виробів існує система, яка передбачає використання камер зволоження, які забезпечують надходження вологи або на внутрішню і зовнішню поверхні виробу, або тільки на зовнішню. Поєднання різних технологій зволоження дозволяє точно регулювати кількість поглиненої води і контролювати зовнішній вигляд і колір кінцевого продукту.

На жаль деякі вітчизняні виробники м'яса птиці користуючись тим що вода, яка використовуються для охолодження птиці нічим не відрізняється від води, природно присутньої в м'ясі, використовують цю можливість для фальсифікації м'яса. Тому дуже важливо мати данні про природний рівень вмісту води в м'ясі птиці - всю воду вище цього рівня можна вважати штучно доданою.

Правила і методи контролю встановлені для заморожених цільних тушок курчат-бройлерів в Регламенті Комісії (ЄС) 1538/91 зі змінами, внесеними в 2000 році. При цьому масова частка рідини, що виділяється при розморожуванні, не повинна перевищувати: 1,5% з повітряним охолодженням; 3,3% в аерозольному охолодженні; 5,1% з погрузним охолодженням.

Тому важливо знати як впливають режими тепло-масообмінної обробки на вміст доданої вологи при переробці тушок курчат.

Нами було проаналізовано наявні дані з літературних джерел про вміст доданої вологи при погрузному охолодженні тушок курчат в залежності від їх кінцевої температури та отримано графік наведений на рисунку. Як видно з наведених даних при дотриманні рекомендованих режимів тепло-масообмінної обробки вміст доданої вологи залишається у межах Регламенту Комісії (ЄС) 1538/91. В той же час збільшення кінцевої температури тепло-масообмінної обробки з 5°C до 9°C призводить до зменшення вмісту доданої вологи майже в 1,8 раза.

### 1.3 Одержання хладонового екстракту лаврового листа та вивчення його компонентного складу

Методом газової хроматографії з використанням полуменевіонізаційного детектора досліджено кількісний склад хладонового екстракту лаврового листа. Встановлено, що домінуючими сполуками були 1,8-цинеол і камфен. Показано наявність значних кількостей пальмітинової, лінолевої та ліноленової кислот.

Визначено, що число аромату хладонового екстракту лаврового листа становило  $1122 \pm 20$  мл  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3/100$  г, що дозволяє рекомендувати його в якості ароматичної харчової добавки.

Ключові слова: лавровий лист, *Laurus nobilis L.*, зріджений хладон R406A, екстракт, газова хроматографія, число аромату.

Зростання інтересу до використання біологічно активних інгредієнтів рослинної сировини під час виробництва харчових продуктів та добавок, фармацевтичних та косметичних препаратів обумовлено цілою низкою об'єктивних причин. Вітаміни, мікроелементи, ненасичені жирні кислоти, які містяться в них дозволяють створювати продукцію принципово нової якості [11]. Той факт, що до їх складу входять ефірні олії, натуральні антиоксиданти, молекулярні комплекси, що володіють імуностимулюючою дією, дозволяє застосовувати їх, як інгредієнти рецептури в технологіях лікувально-профілактичних продуктів.

Разом із тим розвиток даного напрямку стикається з певними технологічними проблемами, особливо під час переробки прянощів із вмістом ліпідних фракцій не більше 5-75% від загальної маси. В даний час основними способами, що використовуються під час переробки є пародистиляція та екстракція органічними розчинниками: гексаном, петролейним ефіром, спиртом, ацетоном, перхлоретиленом та ін. [8]. Недоліки цих способів добре відомі. В процесі пародистиляції відбувається часткова або повна деструкція молекулярних термолабільних комплексів, що суттєво знижує їх біологічну цінність. У свою чергу, відомі органічні розчинники володіють певною хімічною агресивністю, яка призводить до деградації кінцевого продукту. Крім того, виникають складнощі під час видалення таких розчинників із місцелли, що призводить до їх підвищеного вмісту в кінцевому продукті. Саме тому в даний час для екстракції ліпідних фракцій із сировини рослинного та тваринного походження все частіше використовуються зріджені хладони та їх композиції [3, 12, 15]. Ліпідні екстракти, які одержують за допомогою зріджених хладонів, зберігають смакові та ароматичні властивості вихідної сировини, нативну структуру та біологічну активність найбільш важливих хімічних речовин. В силу хімічної інертності хладони повністю видаляються з кінцевого продукту і легко рекуперуються [6, 9].

Проведено дослідження по виділенню ліпофільних комплексів із лікарської рослинної сировини різними органічними розчинниками і встановлено, що оптимальним екстрагентом є хладон [1]. Доведено доцільність

використання суміші хладону і аміаку (10:1) в технології отримання ліпофільного комплексу з плодів шипшини й суми алкалоїдів із коріння барбарису [4]. Розроблено технологію отримання ліпофільної фракції плодів нагідок лікарських і ехінацеї пурпурової методом екстракції зрідженим газом (хладоном) [5]. Показано, що обліпихова олія, виділена екстракцією хладоном містить підвищену кількість дилауріна, дистеаріна, трилауріна, трілінолеїна, міристинової та пальмітинової кислот порівняно з олією, яку одержали іншими способами: центрифугуванням і ферментативним гідролізом [2]. Авторами публікації [7] з суміші різних видів лікарської сировини екстракцією хладоном одержано олійний екстракт, що володіє гіпохолестеринемічною дією.

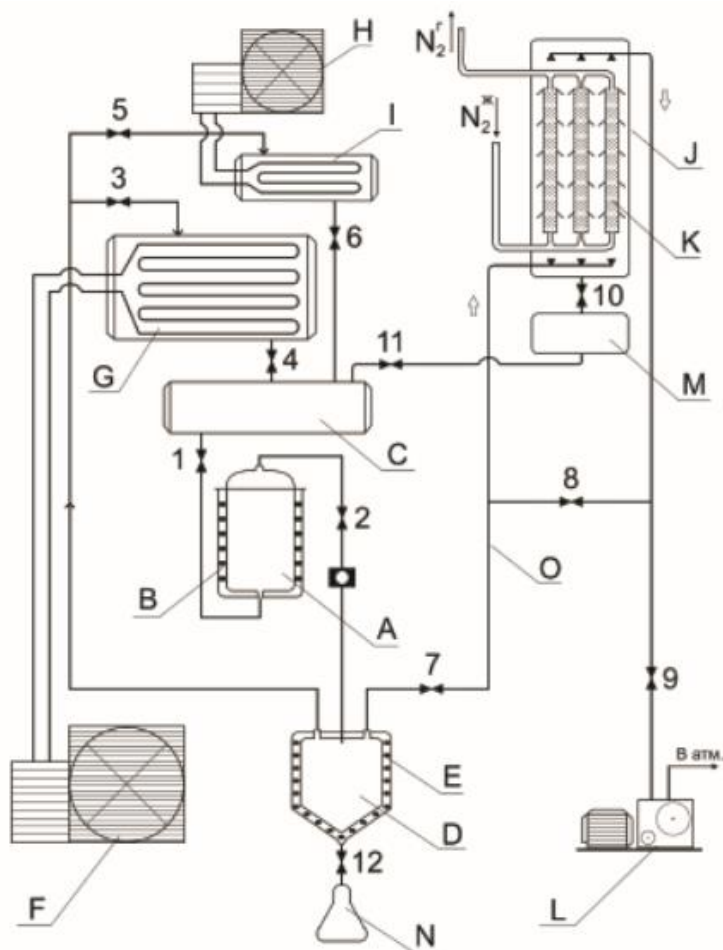
У рамках цих тенденцій у роботі проведено вивчення компонентного складу екстракту лаврового листа, одержаного екстракцією зрідженим хладоном марки R406A

Для одержання олійного екстракту використовували висушене листя лавра благородного, який росте в Грузії. Лавр благородний (*Laurus nobilis* L.) – субтропічне дерево або чагарник, всі частини якого містять ефірну олію, дубильні речовини, смоли, гіркоти, які надають їм типовий ароматний запах і приємно-гіркий смак. До складу лаврового листа входять рослинні білки, насичені і ненасичені жирні кислоти, вітамін С, макроелементи (кальцій, магній, калій, фосфор) і мікроелементи (залізо, цинк, мідь, марганець). Вміст ефірної олії в листі досягає 5,5% [13].

В якості екстрагента в дослідженнях був обраний хладон R406A, є негорючим, невибухонебезпечним, нетоксичним, зрідженим під тиском газом.

Він являє собою ефективну зеотропну суміш трьох добре відомих холодоагентів (хладонів: R22, R142b і R600a в співвідношенні 55:41:4 %). Температура кипіння за атмосферного тиску становить 32,7 °С. Клас безпеки хладону R406A - 4. Його гранично допустима концентрація в повітрі робочої зони складає 3000 мг/м<sup>3</sup>. Серед хладонів, які використовують як екстрагенти, хладон R406A має досить низький показник потенціалу озоноруйнівної здатності - ODP 0,055. Значення для потенціалу глобального потепління у екстрагента R406A становить GWP - 1560.

В експериментах використовувалася установка для екстракції ліпідних фракцій зрідженими газами (рис. 1.7), яка створена в Інституті Проблем Кріобіології і Кріомедицини НАН України.



**Рисунок 1.7 - Схема устаткування для екстракції ліпідних фракцій з біологічної сировини зрідженими хладачами з три-ступеневою криогенною системою рекуперації розчинників:** А - екстрактор, В - нагрівач, С - напірна ємність, D - випаровувач, Е - нагрівальні елементи, F - холодильний агрегат, G - конденсатор рекуперації першого ступеня, H - низькотемпературний холодильний агрегат, I - конденсатор другого ступеня рекуперації, J - вакуумний теплообмінник, K - панелі, які охолоджуються рідким азотом (N<sub>2</sub>), L - вакуумний насос, M - зливна ємність третього ступеня рекуперації, N - приймальна ємність, O - система трубопроводів, 1–12 - технологічні вентиля.

Установка включає в себе екстрактор А з нагрівачем В, напірну ємність С, випарник D з нагрівальними елементами Е, холодильний агрегат F з конденсатором G першого ступеня рекуперації, низькотемпературний холодильний агрегат H з конденсатором I другого ступеня рекуперації, вакуумний теплообмінник J з охолоджуваними рідким азотом панелями K, вакуумний насос L і зливну ємність M третього ступеня рекуперації, а також приймальню ємність N і систему трубопроводів O з технологічними вентилями 1-12.

Головною відмінністю установки від існуючих в даному технологічному напрямку є наявність триступеневої криогенної системи рекуперації використовуваних хладачових розчинників. При цьому технологічні етапи

процесу екстракції ліпідних фракцій реалізуються в наступному порядку. Попередньо висушену і подрібнену до розмірів частинок  $200 \pm 50$  мкм вихідна сировина завантажується в екстрактор А в спеціальних фільтр-касетах і заливається рідким хладоном з напірної ємності С. Температура і тиск в процесі екстракції змінюються в діапазонах  $25...35$  °С і  $1,0...1,5$  Мпа відповідно. Час екстракції підбирається експериментально для кожного виду сировини окремо і лежить в межах 2-8 годин. Після закінчення екстракції місцелла зливається у випарник D і починається рекуперация розчинника. При цьому близько 80% розчинника, який випаровується конденсується і зливається в напірну ємність С за допомогою конденсатора G, температуру на поверхні спіралей якого в межах  $-15... -20$  °С забезпечує холодильний агрегат F.

У міру конденсації використовуваного розчинника знижується тиск в контурі рекуперації, що призводить до різкого зниження його температури конденсації. Так, при зниженні надлишкового тиску в контурі рекуперації до значень  $0,15...0,20$  МПа температура конденсації використовуваного розчинника, наприклад, R406, знижується до значень  $-10...-15$  °С. Це призводить до необхідності включення другої низькотемпературної ступені рекуперації з робочою температурою спіралей в конденсаторі J в діапазоні  $-45 ... -50$  °С.

Для видалення залишкового хладону в кінцевому продукті при тиску в контурі рекуперації нижче  $0,05$  МПа використовується третій ступінь рекуперації. При її роботі пари хладону, що видаляються примусово за допомогою вакуумного насоса L, проходять через вакуумний теплообмінник J і осідають на панелях, охолоджуваних рідким азотом до температури  $-196$  °С. Така температура необхідна для уловлювання парів хладону, що проходять через теплообмінник зі швидкістю не менше  $1$  л/сек [8]. В результаті відбувається повне видалення хладону з кінцевого продукту і мінімізація його втрат в процесі технологічного циклу [8]. Ліпідна фракція, яка залишається в випарнику D після завершення процесу рекуперації розчинника зливається в приймальну ємність N.

Дослідження якісного складу хладонового екстракту лаврового листа проводилися методом газової хроматографії на хроматографі Agilent 7890A GC System з маселективним детектором Agilent 5975C і блоком введення проби Agilent 7697A Headspace sampler. Під час досліджень використовували різні підходи введення проби. Проводили аналіз парів зразка та розчину наважки екстракту в дихлорметані. Для одержання парів зразок нагрівали в герметично закритій віалі,  $1$  мл парової фази вводили в хроматограф. Для одержання розчину наважку зразка масою  $24$  мг розчиняли в  $1$  мл дихлорметану,  $1$  мкл проби вводили в хроматограф. Для розділення компонентів використовували колонку HP-5ms діаметром  $0,25$  мм, довжиною  $30$  м, товщиною нерухомої фази  $0,25$  мкм. Температура інжектора –  $250$  °С, розподіл потоку -  $10:1$ . Потік газу на вході в колонку становив  $1$  мл/хв. Газ-носії – гелій. Використовувався наступний температурний градієнт: початкова температура  $40$  °С, нагрівання до  $270$  °С зі швидкістю  $5$  °С/хв. Виявлення проводилося методом мас-



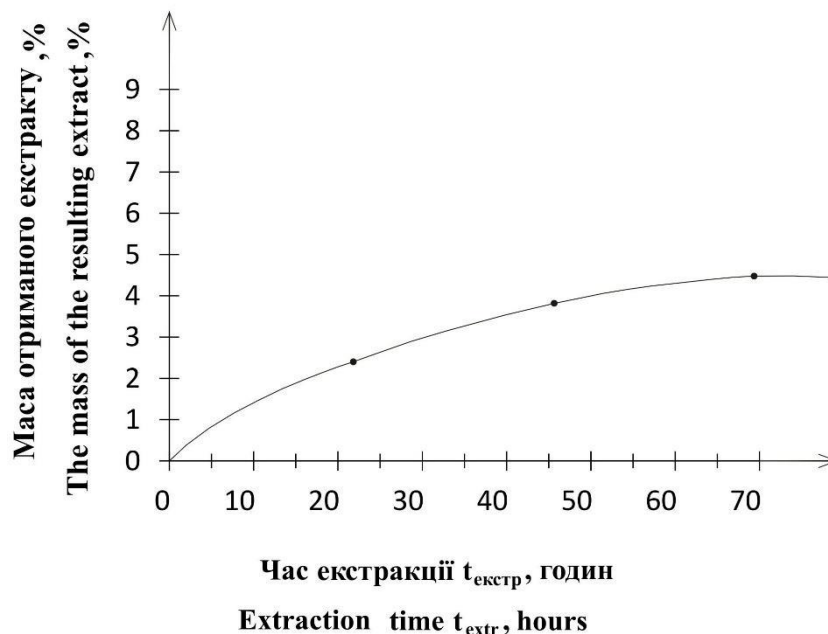
спектрометрії. Діапазон сканування мас становив 35-500 m/z. Для ідентифікації отриманих результатів використовувалися бібліотеки мас-спектрів NIST-08 (National Institute of Standards and Technology, США). Відбиралися результати з мінімальним індексом подібності 80%. Вміст компонентів хладонового екстракту лаврового листа оцінювали методом внутрішньої нормалізації.

Дослідження кількісного складу хладонового екстракту лаврового листа проводилися методом газової хроматографії на хроматографі Agilent 7890A GC System з полуменево-іонізаційним детектором. Для розділення компонентів використовували колонку HP-5 діаметром 0,32 мм, довжиною 30 м, товщиною нерухомої фази 0,25 мкм. Температура інжектора – 300 °С, розподіл потоку 50:1. Потік газу на вході в колонку становив 1 мл/хв. Газ-носії – азот. Початкова температура становила 40 °С, нагрівали до 270 °С зі швидкістю 5 °С/хв. Температура детектора 300 °С. Пробопідготовка – приготування розчину екстракту лаврового листа в дихлорметані (24 мг/1мл). Обсяг проби – 1мкл. Для оцінки кількісного вмісту компонентів хладонового екстракту використовували метод внутрішньої нормалізації.

Визначення числа аромату хладонового екстракту лаврового листа проводилося йодометричним методом. В основі визначення лежить реакція взаємодії ефірних олій із хромовою сумішшю, під час якої відбувається їх окиснення. Речовини, що зумовлюють аромат екстракту лаврового листа, відганяли з водяною парою в приймач із хромовою сумішшю. Одержаний дистилат кип'ятили на водяній бані протягом 1 години, після чого його охолоджували, додавали 25 мл 10% розчину калій йодиду та залишали на 3 хвилини в темряві. Йод, який виділився, відтитрували 0,2 н розчином натрій триоксотіосульфату. Як індикатор використовували 1% розчин крохмалю. За результатами титрування розраховували число аромату (в мл  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3/100$  г).

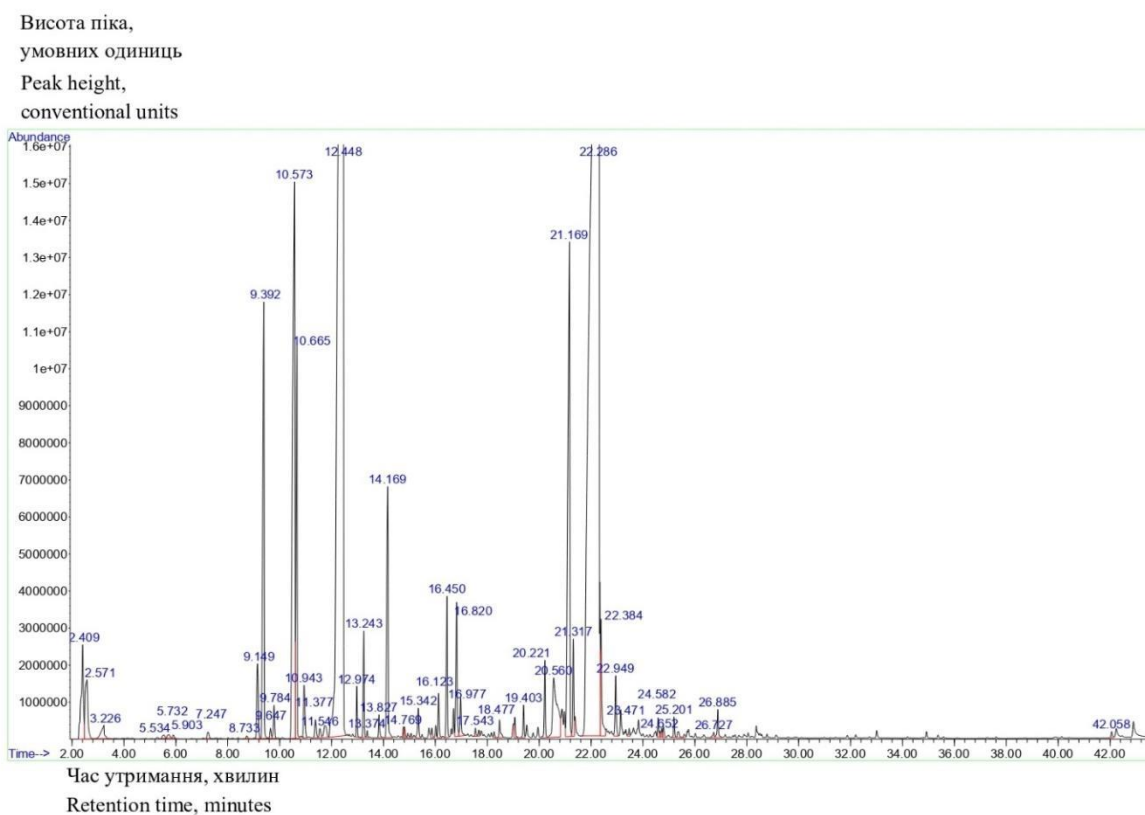
Одержаний за допомогою екстракції зрідженим хладоном R406A екстракт лаврового листа є однорідною в'язкою субстанцією зеленого кольору з добре вираженим смаком і запахом, що властиві лавровому листу.

На рис. 1.8 представлено графік залежності маси одержаного екстракту від тривалості екстракційного циклу ( $t_{\text{екстр}}$ ). Згідно з представленими кривими було одержано до 5% вагових часток кінцевого продукту в результаті трьох послідовних циклів по 23 години кожен.

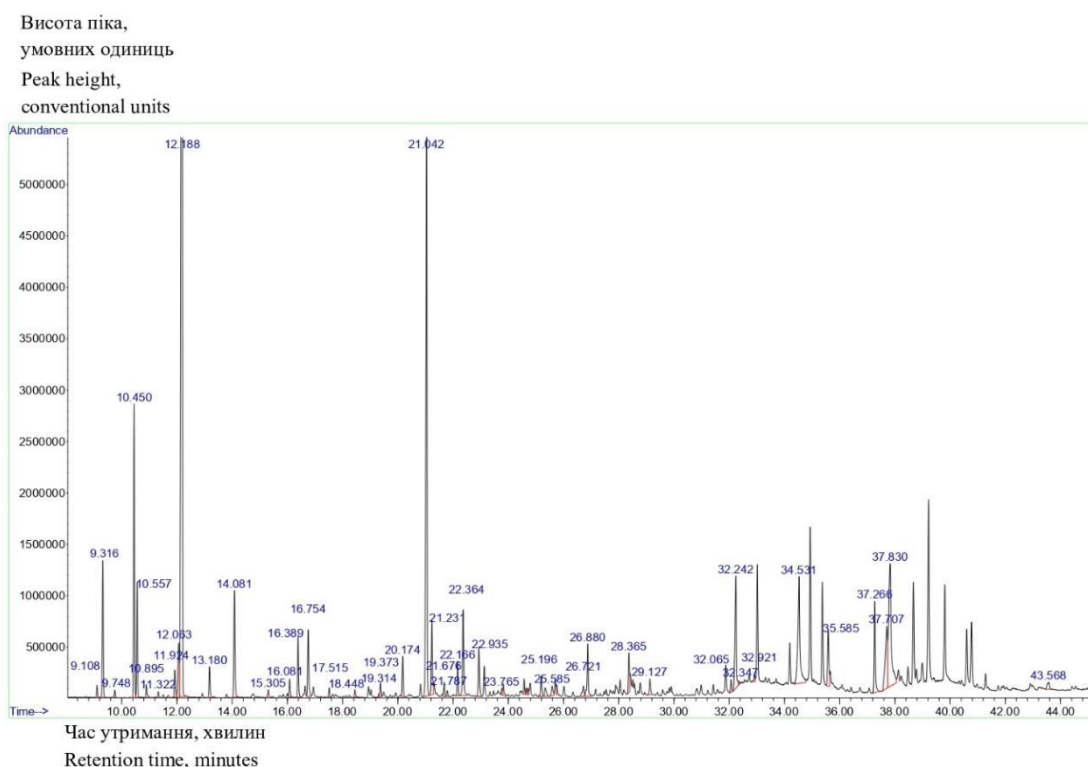


**Рисунок 1.8 - Залежність маси екстракту від тривалості екстракційного циклу**

Хроматограми парів і розчину хладонового екстракту лаврового листа наведено на рис. 1.9, 1.10.



**Рисунок 1.9 - Хроматограма парів хладонового екстракту лаврового листа**



**Рисунок 1.10 - Хроматограма розчину хладоного екстракту лаврового листа**

В результаті проведеного нами дослідження було ідентифіковано 68 компонентів хладоного екстракту лаврового листа (таблиця 1.1). На хроматограмі (рис.1.10) спостерігаються два дуже інтенсивних піки з часом утримування 12,188 і 21,042 хвилин, які відповідають 1,8-цинеолу та камфену відповідно. Дані сполуки виявилися домінуючими в досліджуваному зразку.

Таблиця 1.1

**Час утримування компонентів хладоного екстракту лаврового листа**

№	Компонент	Час утримування компонента (хв.) під час введення проби у вигляді	
		парів	розчину
1	2	3	4
1	Оцтова кислота	3,225	-
2	2,3-Бутандіол	5,534	-
3	Гексаналь	5,903	-
4	3-Гексен-1-ол	7,247	-
5	Дигідро-2(3H)-фуранон	8,731	-
6	<i>a</i> -Туйен	9,149	9,108
7	<i>a</i> -Пінен	9,392	9,316
8	2, 4(10)-Туядіен	9,646	-
9	Камфен	9,783	9,748

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4
10	Сабінен	10,573	10,450
11	<i>b</i> -Пінен	10,665	10,557
12	<i>b</i> -Мірцен	10,942	10,895
13	<i>a</i> -Фелландрен	11,377	11,324
14	<i>a</i> -Терпінен	11,755	-
15	<i>o</i> -Цимол	-	11,924
16	DL-Лімонен	-	12,063
17	1,8-Цинеол	12,448	12,188
18	5-Ізопропіл-2-метилбіцикло [3.1.0.]гексан-2-ол	13,243	13,180
19	Ліналоол оксид	13,374	-
20	<i>a</i> -Терпінолен	13,826	-
21	(±)-Ліналоол	14,169	14,081
22	Мента-1, 4,8-трієн	14,770	-
23	<i>b</i> -Фелландрен	14,809	-
24	1-(4-Метил-3-циклогексен-1-ил)етанон	15,068	-
25	5-(1-Метилетил)-біцикло[3.1.0.]гексан-2-он	15,866	-
26	Терпінен-4-ол	16,450	16,389
27	<i>a</i> -Терпінеол	16,821	16,754
28	Метилхавікол	16,977	-
29	<i>g</i> -Терпінен	12,974 17,543	17,515
30	S(+)-карвон	18,264	-
31	дельта-3-Карен	11,547 18,478	18,448
32	4-Туйєн-2. альфа.-іл ацетат	19,060	19,033
33	Борнілацетат	19,404	19,373
34	1-Метилєн-4-(1-метилетєніл)-циклогексан	20,222	20,174
35	Тріацетин	20,560	-
36	Камфєн	21,168	21,042
37	Євгєнол	21,316	21,231
38	<i>a</i> -Улангєн	-	21,676
39	<i>a</i> -Копаєн	-	21,791
40	<i>b</i> -Єлемен	-	22,166
41	Тєтрадекан	22,302	-
42	Мєтилєвгєнол	22,384	22,364
43	<i>b</i> -Каріюфіллен	22,950	22,935
44	3,7-Гуаядієн	23,470	-
45	1, 5, 9, 9-Тєтраметил-1, 4, 7-циклоундекатрієн	-	23,769
46	<i>b</i> -Гвайєн	-	23,823
47	<i>b</i> -Сєлінен	24,581	24,574
48	<i>цис</i> -Мєтил ізєєвгєнол	24,652	-
49	Ізєгомєгєнол	-	24,650
50	Валєнсєн	24,726	24,718
51	<i>a</i> -Сєлінен	24,794	24,790

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4
52	<i>g</i> -Кадінен	25,200	25,196
53	<i>g</i> -Муролен	25,342	25,338
54	Копасн	25,593	25,585
55	<i>a</i> -Бісаболен	25,757	25,753
56	Спатуленол	26,726	26,721
57	Каріофиллен оксид	26,885	26,880
58	<i>b</i> -Евдесмол	28,369	28,365
59	Неофітадієн	-	32,065
60	6-етеніл-6-метил-3-метиліден-7-(проп-1-ен-2-іл)гексагідро-1-бензофуран-2(3H)-он	-	32,242 32,348
61	Костунолід	-	32,921
62	Пальмітинова кислота	-	34,531
63	Ванілосмін	-	35,584
64	Неофітадієн	-	37,266
65	Лінолева кислота	-	37,707
66	Ліноленова кислота	-	37,829
67	Біс(2-етилгексил) ефір адипінової кислоти	42,058	-
68	Октадекан	-	43,571

У результаті проведених досліджень встановлено, що одержаний хладоновий екстракт лаврового листа містив такі класи сполук: терпенові оксиди, монотерпени, жирні кислоти, монотерпеноли, сесквітерпени, феноли, сесквітерпенові лактони, дитерпени, сесквітерпеноли, складні ефіри та ін.

Згідно з отриманими результатами компонентами, вміст яких перевищував 1,5% були такі речовини: 1, 8-цинеол – 27,83%, камфен - 7,65%, сабінен - 4,83%, ліноленова кислота - 3,25%, пальмітинова кислота - 2,38%, 6-етеніл-6-метил-3-метиліден-7-(проп-1-ен-2-іл)гексагідро-1-бензофуран-2(3H)-он - 2,73%, лінолева кислота - 2,30%, *a*-пінен - 2,09%, *b*-пінен - 1,89%, неофітадієн – 1,89%, ліналоол - 1,89% і п'ять не ідентифікованих сполук із вмістом 1,60-2,56%.

Під час порівняння якісного складу хладонового екстракту лаврового листа з даними для CO<sub>2</sub>-екстракту та екстракту лаврового листа, одержаного паровою дистиляцією [14] встановлено, що 41 сполука селективно екстрагувалась хладоном R406A і зовсім була відсутня в інших екстрактах. 10 компонентів були визначені у всіх зразках, а саме: 1,8-цинеол, ліналоол, терпінен-4-ол, 4-туйєн-2. альфа.-іл ацетат, борнілацетат, евгенол, метилевгенол, *b*-каріофіллен, спатуленол, каріофіллен оксид. Істотною відмінністю було те, що в хладоновому екстракті одна з домінуючих сполук - камфен, а в інших екстрактах - *a*-терпеніл ацетат. Крім того, в хладоновому

екстракті виявлені значні кількості пальмітинової, лінолевої та ліноленової кислот. В інших екстрактах дані кислоти були відсутні.

Таким чином, хладон R406A здатний вилучати широкий спектр неполярних речовин (монотерпенів, сесквітерпенів, терпеноїдів, жирних кислот) з лаврового листа.

Наявність у хладоновому екстракті лаврового листа 1,8-цинеолу, ліналоола, *b*-мірцена, лимонена, *a*- и *b*-піненов, камфена, дельта-3-карена, сабінена, *g*-кадінена, *a*-терпінеола, евгенола обумовлює аромат продукту. Однією з кількісних характеристик вмісту речовин, що обумовлюють аромат сировини і харчових продуктів, є число аромату. В результаті проведеного аналізу встановлено, що число аромату для хладонового екстракту лаврового листа складає  $1122 \pm 20$  мл  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3/100$  г.

Згідно з літературними даними [10] число аромату для водно-спиртового екстракту та наноекстракту з лаврового листа становить 234,8 мл  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3/100$  г. Таким чином хладонова екстракція дозволяє одержати продукт, для якого вміст ароматичних речовин більше в 4,8 рази. Використання хладонового екстракту лаврового листа навіть у невеликих кількостях в якості добавки у виробництві харчових продуктів дозволить додатково надати їм аромат.

#### 1.4 Теоретичний аналіз процесу кріосублімаційного фракціонування біоматеріалів

З метою виробництва високоякісних продуктів харчування та напівфабрикатів для парфумерії, косметології та фармакології впроваджуються ефективні сучасні технології переробки біологічної сировини, які максимально зберігають її молекулярну структуру, вітамінний склад, аромат, колір та смакові якості. Найбільш повно цим вимогам задовольняють кріогенні технології, що забезпечують негативну температуру під час переробки сировини [1]. В результаті застосування таких технологій інгібуються окислювальні процеси в сировині, вдається запобігти денатурації і дисоціації важливих молекулярних комплексів, пігментації і деароматизації вихідної сировини. Кріогенна переробка рослинної сировини дозволяє повністю зберегти натуральну структуру не тільки вітамінів, що знаходяться в ньому, але і молекулярних комплексів, що містять широкий спектр необхідних людині мінеральних речовин, що важливо для їх повноцінного засвоєння [2].

Особливе місце у кріогенних технологіях займає метод сублімаційного сушіння біологічних матеріалів, який набув зараз широкого поширення, незважаючи на високу собівартість одержуваних продуктів. Це спричинено низкою наступних технологічних чинників: попереднє заморожування зразка, що висушується, фіксує його молекулярну структуру; подальше сублімування води виключає механічну усадку, яке особливо проявляється при звичайному висушуванні на повітрі ягід, грибів і фруктів з великим вмістом води.

Той факт, що вільна вода в процесі сублімування знаходиться в об'єкті у вигляді льоду, виключає тривалий вплив на біомолекули рідкої фракції з

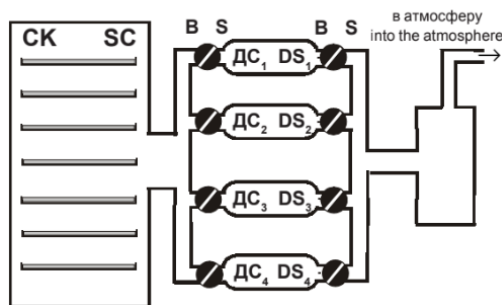
хімічним складом, який безперервно змінюється. Навпаки, при додатних температурах випаровування молекул води підвищує концентрацію солей та інших хімічних елементів у рідких фракціях, що залишаються, і призводить при досягненні критичних концентрацій до незворотних змін конформації біомолекул об'єкту.

У роботі [3] вперше досліджено хімічний склад водних фракцій, які осаджуються на криогенній поверхні десубліматора при ліофілізації рослинної сировини. Отримані результати показують, що в ряді випадків ці фракції не менш цінні і унікальні, ніж сухий залишок, що залишається в сублімаційній камері. Тому в роботі докладно досліджено процес виділення із заморожених біологічних матеріалів, складних за біохімічним складом водних фракцій, який названий криосублімаційним фракціонуванням. Вказується, що цей процес можливий тому, що парціальний тиск над об'єктом залежить від складу замороженої сировини та відповідної йому діаграми фазових станів. Тому кінетика сублімаційного сушіння реальних біооб'єктів значно відрізняється від процесу сублімації чистого льоду. Відзначається, що температура завершення процесу кристалізації води конкретної фракції може не збігатися з температурою переходу цієї фракції в твердий стан. Це характерно для криобіологічних розчинів які мають температуру склування.

Відомий факт, що при заданій температурі сильно пов'язаним станам відповідають менші значення парціальних тисків. Відповідно інтенсивне видалення цих фракцій з сировини в режимі сублімації при заданому зовнішньому тиску можливо при підвищенні температури об'єкта. Таким чином криосублімаційне сушіння об'єктів можна проводити, комбінуючи зміни температури і тиску, тобто вести ліофілізацію за такими режимами при яких одночасно зменшується тиск та підвищується температура, оскільки вони дозволяють прискорити сушіння і завершити його за нижчих температур.

Авторами [3] сформульований принципи криосублімаційного фракціонування біологічних систем. Згідно з яким в режимі сублімування можна послідовно виділяти зі зразка різні за кількісним складом водні фракції. Суть цього процесу полягає в послідовній зміні основних технологічних параметрів сублімаційного сушіння вздовж заздалегідь обраної траєкторії параметрів тиск - температура. Для практичного поділу сублімованих водних фракцій необхідна установка з декількома субліматорами, принципова схема якої показана на рис. 1.11.

В процесі роботи установки молекулярні потоки за даного тиску та температури із сублімаційної камери осідають на криопанелях одного із десубліматорів, тоді як інші десубліматори перекриті вентилями. Таким чином кожному тиску відповідає свій десубліматор та відповідно на ньому осаджується певна фракція з певною енергією зв'язку та молекулярним складом.



**Рисунок 1.11 - Схема установки для криосублимаційного фракціонування біоб'єктів [3].**

Авторами роботи [3] експериментально підтверджено працездатність технології криосублимаційного фракціонування та показана можливість виділення фракцій з молекулярною масою до 300 а. е. м. з натуральної біологічної сировини. Зокрема отримано хімічний склад 10 водних фракцій, отриманих при сублимуванні свіжозаморожених квітів троянди ефіроолійної та ромашки лікарської, а також фрагментів плаценти людини.

В той же час описане дослідження не містить будь якої математичної моделі, яка би надавала змогу прогнозувати відповідні технологічні режими змінювання траєкторії тиск - температура.

Тому метою даного дослідження є формулювання підходів до теоретичного опису процесу криосублимаційного фракціонування. За основу такого підходу нами взята робота [4], в якій застосовний молекулярно-кінетичний метод до аналізу процесу енергоефективності сушіння.

Оскільки в основі технології криосублимаційного фракціонування біоматеріалів лежить припущення, що газова фаза над замороженим біоб'єктом є складною композицією з молекул різної природи: води, амінокислот, ефірів, вітамінів, мінеральних речовин, фрагментів складних молекулярних комплексів, то кінетика зміни як температури об'єкта, так і тиску в сублимаційній камері повинна залежить від спектру енергетичних станів, з яких відбувається сублимація молекул води. Уявимо, що зв'язані біомолекули перебувають у деяких «потенційних полях» з різною енергією зв'язку, що характеризуються певним питомим потенціалом. Натомість молекули вільної води мають «нульову» (або мінімальну) енергію зв'язку з «сухим скелетом» матеріалу.

Таким чином, вільні молекули води в стані динамічної рівноваги здійснюють «броунівський тепловий рух», яке, на думку Ейнштейна, характеризується певним коефіцієнтом дифузії  $D$  [5]:

$$D = \beta kT, \quad (1.8)$$

де  $k$  - постійна Больцмана;  
 $T$  - термодинамічна температура, К;



$\beta$  - рухливість молекули, що визначається в загальному випадку як відношення швидкості молекули до сили, що діє на неї, в залежності від координат.

Формула (1.8) була отримана Ейнштейном для випадку рівноважного стану молекулярної системи, яке визначається умовою, що зміна її вільної енергії  $\delta F = 0$  дорівнює нулю. Однак в разі, коли молекула знаходиться в деякому потенційному полі, зміна її вільної енергії буде дорівнює роботі з подолання певного «потенційного бар'єру», який характеризується питомим потенціалом  $u(x)$  на молекулу.

На підставі рівняння для варіації вільної енергії при довільному переміщення молекул в умовах динамічної рівноваги, що характерно для розглянутого вище процесу кріосублімаційного фракціонування біоматеріалів, в роботі [4] отримано наступний вираз для коефіцієнту дифузії в умовах існування потенційного бар'єру:

$$D = \beta(kT - u), \quad (1.9)$$

Аналізуючи отриманий вираз, можна зробити висновок, що за відсутності потенційної взаємодії ( $u = 0$ ) формула (1.9) перетворюється на (1.8), і, отже, максимальний коефіцієнт дифузії відповідає процесу сублімації “вільної” (чистої) води. По мірі зниження парціального тиску газу у капілярах біологічного об'єкту, зростає потенціал взаємодії біомолекул і для певного тиску, що відповідає температурі  $kT_{min} = u(p_{min})$  коефіцієнт дифузії  $D = 0$ , тобто за таких умов неможливо сублімація певних фракцій з енергією зв'язку молекули більшої ніж  $u(p_{min})$ . Для того щоб подолати цей бар'єр треба або знизити тиск у субліматорі, або збільшити температуру об'єкту що сублімується. Саме це передбачає технологія кріосублімаційного фракціонування біоматеріалів.

Таким чином рівняння (1.9) можна в подальшому використовувати для аналізу та розрахунків режимів кріосублімаційного фракціонування біоматеріалів.

1.5 Особливості технологічного процесу кріосублімаційного сушіння рослинної сировини.

На сьогоднішній день однією з істотних проблем є забезпечення населення якісними і безпечними продуктами харчування. Викликає необхідність у відновленні харчових продуктів з високою біологічною цінністю та екологічною безпекою, розробці продукції збагаченою різними біологічно активними речовинами. Але яскраво виражена сезонність агропромислового виробництва овочевої та плодово-ягідної сировини і складність збереження високих біологічних властивостей без спеціального обладнання не дозволяють її використовувати протягом усього року.

З метою уповільнення фізико-хімічних, біохімічних та інших процесів, які можуть призвести до зниження поживної цінності та запобігання псуванню рослинної сировини, використовується сушильний метод консервування харчової продукції.

Одним із найпоширеніших способів сушіння продуктів є конвективний. Він заснований на передачі тепла продукту, що висушується за допомогою енергії нагрітої парогазової суміші. Таким чином за рахунок передачі об'єкту теплової енергії відбувається випаровування вологи, при якому перенесення парів вологи здійснюється сушильним агентом. Кондуктивний спосіб сушіння, заснований на передачі тепла продукту, що висушується шляхом безпосереднього контакту з нагрітою поверхнею сушильного обладнання. Певний інтерес представляє акустичний спосіб, який заснований на дії інтенсивних ультразвукових хвиль на зневоднений продукт. Даний процес сушіння носить циклічний характер, при якому акустична хвиля видаляє вологу, що знаходиться на поверхні продукту [1].

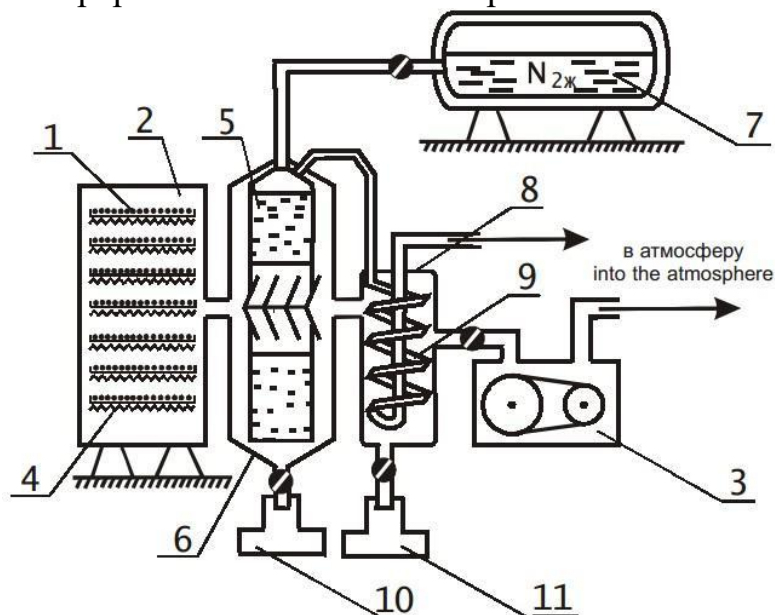
В даний час відомі методи сушіння, що дозволяють інтенсифікувати процеси та отримати зневоднену продукцію високої якості, до яких належать сушіння в полі інфрачервоного випромінювання та сублімації. Одним із сучасних рішень з переробки біологічної сировини з метою виробництва високоякісних продуктів харчування є технологія кріосублімаційного сушіння. В основному застосовується в харчовій та фармацевтичній промисловості, яка зберігає основні якісні характеристики продукту, збільшуючи час зберігання продуктів.

Кріосублімаційна сушка являє собою технологічний процес, при якому попередньо заморожена сировина піддається впливу температури, а об'єкт, що висушується, знаходиться постійно у вакуумі. За рахунок зниження тиску в сушильній камері водна фракція випаровується з кристалізованих структур, тим самим переходячи в газоподібний стан з подальшою утилізацією. Оскільки об'єкт знаходиться при досить низьких температурах, в готовому продукті забезпечується висока схоронність термолабільних молекул і біологічно активних молекулярних комплексів, що становлять основну цінність рослинної сировини, що переробляється.

У процесі сублімаційного сушіння в замороженій рослинній сировині набагато краще зберігаються низькомолекулярні складні ефіри, які відповідають за ароматичні властивості продукту, ефірні олії та інші високолетючі компоненти. В результаті кінцевий продукт має високі ароматичні та смакові якості, збагачений особливими лікувальними властивостями. Таким чином на відміну від інших відомих методів видалення вологи з біологічної сировини при кріосублімаційному сушінні рослинної сировини, можна отримувати продукти більш вищої якості.

Для підвищення концентрації біологічно активних речовин може бути використаний метод кріосублімаційного фракціонування, який включає наступні етапи переробки: кріозаморожування та подрібнення; сублімаційне фракціонування замороженої сировини; десублімаційне фракціонування та

концентрування рідкофазного продукту; екстракційне вилучення з твердофазного продукту ліпофільної фракції зрідженими хладачами [2]. На рис. 1.12 представлена принципова схема установки з криосубліційного фракціонування для переробки біологічних матеріалів.



**Рисунок 1.12 - Установка криосубліційного фракціонування для переробки біологічних матеріалів**

Згідно зі схемою заморожену сировину 1 у спеціальних піддонах поміщають у сублімаційну камеру 2, де при температурі  $-20^\circ\text{C}$  тиску 100 Па, який створюється за допомогою вакуумних насосів 3, де починається процес фракціонування. Підведення тепла до піддонів з сировиною забезпечується інфрачервоними нагрівачами 4. Високолетючі молекулярні комплекси випаровуються із замороженої сировини і осаджуються на криогенних поверхнях панелей 5, розташованих в основному десубліматорі 6. Кріопанелі охолоджуються до температури  $-196^\circ\text{C}$  за допомогою резервуару з рідким 7. Для захисту водної фракції, що осаджується на панелях 5 від молекул масла застосовується захисний десубліматор 8. Парі рідкого азоту, що випаровується в процесі криосублімаційного фракціонування в основному десубліматорі 6, проходять змійовик 9 захисного десубліматора 8, охолоджуючи його до температури  $-30$ - $40^\circ\text{C}$ . Наприкінці криосублімаційного фракціонування та відтайки панелей десубліматорів в ємність зливається чиста криосублімаційна водна фракція з основного десубліматора 6. В ємність 11 із захисного десубліматора 8 – незначна кількість криосублімаційної водної фракції, забрудненої та непридатною для подальшого використання. При цьому в сублімаційній камері залишається суха фракція сировини, що переробляється [3].

На відміну від класичної технології сублімаційного сушіння, кінцевий продукт сублімований методом фракціонування, має високу концентрацію біоактивних речовин, до складу яких входять активні фрагменти вітамінів,

складних ефірів та амінокислот [4]. У порівнянні з іншими способами переробки рослинної сировини розглянута технологія може стати значно ефективнішою і перспективною до впровадження в харчові і фармацевтичні виробництва.

1.6 Математичне моделювання міцності гетерогенних драглеутворювальних систем на основі структуроутворювачів полісахаридного та білкового походження.

Різноманітні кондитерські вироби, зокрема торти, тістечка, печиво, зефіри, та інші, мають значний попит у населення, особливо у дітей. Традиційно для їх виробництва використовують спеціальні речовини, такі як: агар, агароїд, фурцеларан, альгінати (продукти переробки морських водоростей), желатин (продукт тваринного походження), пектин, крохмалі, камеді (продукти рослинного походження), ксантан, гелан (мікробні полісахариди) та ін. [1-6].

В умовах сьогодення розробка інноваційних конкурентоспроможних технологій кондитерських виробів пов'язана з ресурсозбереженням, зі створенням виробів підвищеної харчової цінності, покращеної якості з високими споживними властивостями та подовженими термінами зберігання. Актуальність проблеми полягає у вирішенні важливого завдання харчової індустрії – раціонального використання харчової сировини, у тому числі і структуроутворювачів різного походження.

Сьогодні світовий ринок структуроутворювачів оцінюється приблизно в 4,4 млрд. доларів на рік, а загальний обсяг становить близько 260 тис. тон [7]. Основними принципами вибору структуроутворювачів є їх нешкідливість та висока ефективність дії. При цьому більш доцільним є використання натуральних структуроутворювачів, які синтезуються живими організмами, розкладаються в природних умовах і тому є екологічно чистими високомолекулярними природними сполуками [8].

Агар став першим фітоколоїдом, який більше трьохсот років тому почав використовуватися в якості харчової добавки. В даний час він знаходить широке застосування в якості драглеутворювача, згущувача, стабілізатора, вологоутримуючого агенту [9-10].

Фуруцеларан - речовина, що екстрагуються з водоростей виду *Furcellaria*, відома також як «Датський агар», відповідно до Європейського харчового законодавства, має код E407 [11]. Вивчення фуруцеларану та його практичне значення для харчовій промисловості здійснювалось в наукових працях [12-14].

Желатин - це речовина білкового походження, отримана шляхом деструкції колагену - найпоширенішого білка в природі [15-16]. Фізичні властивості желатина, пов'язані з його структурою, впливають на якість і потенційне застосування [17-18].

Крохмаль - один з найбільш широко застосовуваних загусників і гелеутворювачів, отримуваний з кукурудзи, картоплі, пшениці, рису, гороху та

ін. [19-20]. В даний час область їхнього використання розширилася завдяки створенню модифікованих крохмалів (МК). МК-крохмалі отримують шляхом фізичної, хімічної або комбінованої обробки [21]. Зараз у світі налічується близько 50 видів модифікованих крохмалів, об'єми виробництва яких постійно зростають [22].

Наразі в науковій літературі відсутні завершені теорії та концепції, що дозволяють однозначно прогнозувати технологічні та споживні властивості кондитерських виробів на основі знання молекулярної структури та природи структуроутворювачів, що використовуються для її виготовлення. Відсутні також і методики кількісного визначення функціонально-фізіологічних інгредієнтів, адаптовані для кондитерських виробів з використанням структуроутворювачів різного походження.

Реалізація та подальший розвиток даного напрямку сприятиме раціональному використанню харчової сировини, у тому числі і структуроутворювачів різного походження, у технологіях харчової продукції, залученню до технологічного циклу виробництва вітчизняної сировини, розширенню асортименту готових виробів та забезпеченню ефективності функціонування підприємств галузі.

Раніше, в роботах [23-25] нами були запропоновані нові технології виробництва желевної продукції на основі структуроутворювачів білково-полісахаридної природи з використанням сировини регіонального виробництва, такого як желатин, желуючий картопляний крохмаль, плодово-ягідне і фруктове пюре, що дозволило розширити асортимент кондитерської продукції, підвищити її біологічну цінність, знизити калорійність і створити желевні і збивні напівфабрикати з поліпшеними органолептичними та структурно-механічними властивостями.

В основі зазначених технологій лежить ідея про часткову заміну коштовних сульфатованих полісахаридів, таких як агар, агароїд, фурцеларан - традиційної сировини для отримання зазначеної вище продукції, на комбінований (багатокомпонентний) структуроутворювач, що складається з взятих в певних співвідношеннях агару (або агароїду, або фурцеларану), желатину, та крохмалю [23]. Встановлено що комплексне використання системи «білковий структуроутворювач - сульфатований полісахарид - вода» призводить до збільшення міцності, пружності, пластичності, температури плавлення драглів, при цьому трохи знижується температура застигання розчинів, і тривалість структуроутворення [24]. Так, при співвідношеннях концентрацій компонентів 0.5% агару - 2.0% желатину або 0.5% агару - 2.0% желатину - 1.5% крохмалю можливо отримати структури, які за міцністю не поступаються традиційним на основі 1% розчину агару [25].

Метою дослідження є отримання математичних моделей, які б допомагали складати композиції із структуроутворювачів різної природи з задалегідь заданими структурно-механічними показниками системи при найменшій вартості композицій.

Завдання дослідження:

1. Проведення дослідження міцності драглеутворювальних систем на основі структуроутворювачів полісахаридного та білкового походження.

2. Отримання математичних моделей, які пов'язують міцність досліджених драглеутворювальних систем та масову концентрацію їх компонентів.

3. Отримання рівнянь, які дозволять розраховувати оптимальну концентрацію компонентів гетерогенної драглеутворюючої системи.

Як об'єкт дослідження використовували желатин харчовий П-11 (ТМ «Мрія», Україна), агар CERO Agar Agar powder Type 8925 S (CE Roeser GmbH, Німеччина), фурцеларан із водоростей *Furcellaria fastigiata* виробництва Естонії, модифіковані крохмалі (МК) – оксиаміловий крохмаль картопляний ОПВ-1, Farinex VA 40 – гідроксіпропілований дикрохмаль фосфат картопляний виробництва Нідерланди, оксипропілований гороховий крохмаль Emden ESH 15 виробництва “Emsland Starke GmbH”. Для приготування розчинів використовували воду питну. Всі системи готували розчиненням відповідних наважок сухих компонентів у воді. Зважування проводили на вагах ІКЕА (ІКЕА GmbH, Німеччина) з точністю 0.01 г.

Розчини желатину готували наступним чином. До точної кількості желатину додавалася вода, після чого желатин набухав протягом 30-40 хвилин. Далі на водяній бані ІКЕА (ІКЕА GmbH, Німеччина) з контролем температури проводилося розчинення желатину при температурі 323 К з наступним охолодженням до кімнатної температури. В охолоджений розчин додавалася вода з розрахунком отримання потрібної концентрації розчину. Далі розчин ретельно перемішувався для рівномірного розподілу желатину.

Розчини агару і фурцеларану у воді готували за процедурою, аналогічною для приготуванні водних розчинів желатину, з тією різницею, що розчинення проводили при температурі 368 К.

Приготування водного розчину суміші зазначених компонентів проводили з наважок сухих компонентів. Спочатку розчиняли агар при температурі 368 К в пів обсязі води, потім додавали желатин та модифікований крохмаль в охолоджений до температури 323 К розчин і після його повного розчинення доводили водою до маси, що відповідає зазначеним концентраціям компонентів.

*Визначення міцності* гелів та напівфабрикатів виконували методом Блюма [26]. Метод заснований на встановленні граничного навантаження, необхідного для зруйнування структури гелів грибоподібною насадкою. Тривалість структуроутворення визначали методом, заснованим на встановленні максимальної міцності структури в кінці процесу структуроутворення. Суть методу полягає в тому, що досліджуваний зразок піддавали руйнуванню навантаженням на приладі Валента. Величину навантаження при цьому фіксували при остаточному руйнуванні структури.

*Методика моделювання.* Для моделювання отриманих експериментальних даних міцності модельних систем «желатин – МК – агар –

вода» і «желатин – МК – фуруцеларан – вода» було обрано дві конкуруючі математичні моделі з числом ступені вільності  $n=3$

$$\text{лінійна} \quad y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2, \quad (1.10)$$

$$\text{нелінійна} \quad y = a_0 \cdot x_1^{a_1} \cdot x_2^{a_2}, \quad (1.11)$$

де  $y$  – міцність систем;  
 $x_1, x_2$  – масові концентрації компонентів, що варіюються;  
 $a_0, a_1, a_2$  - емпіричні коефіцієнти.

Для моделювання даних про міцність контрольних систем «агар – вода», «фуруцеларан– вода», «желатин–вода» було обрано дві конкуруючі математичні моделі з числом ступені вільності  $n=2$

$$\text{лінійна} \quad y = a_0 + a_1 \cdot x_1, \quad (1.12)$$

$$\text{нелінійна} \quad y = a_0 \cdot x^{a_1}, \quad (1.13)$$

де  $y$  – міцність контрольної системи;  
 $x$  – масова концентрація драглеутворювача.

Вигляд математичних моделей (1.10) - (1.13) було обрано на основі аналізу характеру графічних залежностей міцності досліджених систем, дані про які наведено у таблицях 1.2 – 1.4.

Для перевірки адекватності математичних моделей використовували критерій Фішера. Для цього обчислювали відношення дисперсій регресії для двох конкуруючих математичних моделей.

Якщо значення критерію Фішера було меншим його критичного значення  $F > F_k$ , то обиралась математична модель, яка має меншу похибку та навпаки. Критичне значення критерію Фішера розраховувалось залежно від числа ступенів моделі при надійності виводу 0,95. Статистична обробка експериментальних даних проводилась в середовищі пакету Mathcad. Коефіцієнти математичних моделей (1.10)-(1.13), дисперсій регресії, критичні значення критерія Фішера обчислювались за допомогою вбудованих функцій пакету Mathcad.

Згідно плану експерименту було досліджено 6 модельних гетерогенних систем (МС) на основі комбінацій гідроколоїдів та модифікованих крохмалів (МК). У таблицях 1.2 та 1.3 наведено експериментальні дані про склад та міцність досліджених систем.

Таблиця 1.2

**Експериментальні показники міцності модельних систем на основі агару, желатину та модифікованих крохмалів**

Вміст гідроколоїдів у модельній системі, %			Показники міцності модельних систем з різними МК, г		
			МС 1	МС 2	МС 3
Агар	Желатин	МК	Оксиаміл ОПВ – 1	Farinex VA - 40	Emden ESH - 15
0.25	1	1,5	90±5.0	80±4.0	85±4.2
0.25	2	1,5	180±9.0	175±8.7	185±9.2
0.25	3	1,5	280±14.0	260±13.0	270±13.5
0.25	4	1,5	350±17.5	320±16.0	340±17.0
0.5	1	1,5	140±7.0	130±6.5	130±6.5
0.5	2	1,5	240±12.0	230±11.5	245±12.2
0.5	3	1,5	370±18.5	350±17.5	360±18.0
0.5	4	1,5	410±10.5	390±18.5	400±20.0

Після статистичної обробки даних про міцність гетерогенних драглеутворюючих систем наведених у таблицях 1.2-1.4 встановлено, що ці експериментальні данні адекватно описуються нелінійною математичною моделлю (1.12), а данні про міцність контрольних систем, наведених у таблиці 1.4 - лінійною математичною моделлю (1.13).

Таблиця 1.3

**Експериментальні показники міцності модельних систем на основі фурцеларану, желатину та модифікованих крохмалів**

Вміст гідроколоїдів у модельній системі, %			Показники міцності модельних систем з різними МК, г		
			МС 4	МС 5	МС 6
Фурцеларан	Желатин	МК	Оксиаміл ОПВ-1	Farinex VA-40	Emden ESH-15
1	1	1,5	110±5.5	100±5.0	105±5.2
1	2	1,5	200±10.0	180±9.0	190±9.5
1	3	1,5	270±13.5	250±12.5	260±13.0
1	4	1,5	350±17.5	320±16.0	340±17.0
1.5	1	1,5	150±7.5	130±6.5	140±7.0
1.5	2	1,5	270±13.5	250±12.5	260±13.0
1.5	3	1,5	360±13.0	330±16.5	350±17.5
1.5	4	1,5	430±21.5	400±20.0	420±21.0

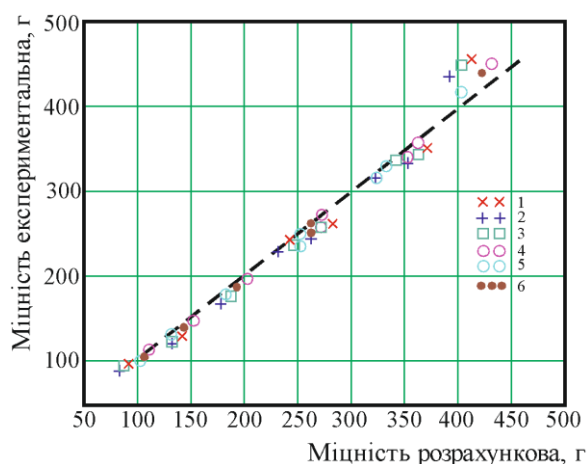
У якості контрольних зразків досліджувались гомогенні системи з традиційних драглеутворювачів, дані про які наведено у таблиці 1.4.



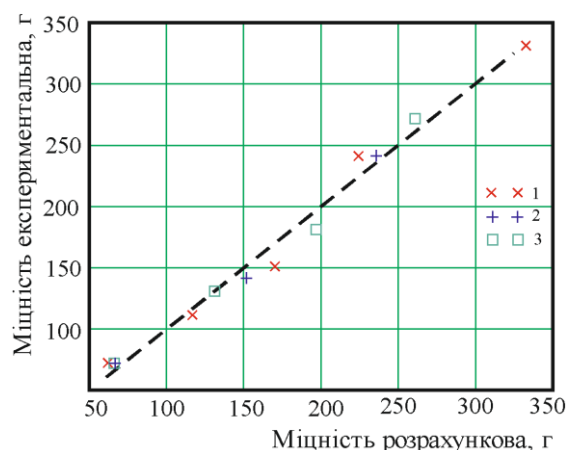
**Експериментальні показники міцності контрольних систем  
на основі традиційних драглеутворювачів**

КС1. Агар		КС2. Фурцеларан		КС3. Желатин	
Вміст гідроколоїду, %	Показники міцності, г	Вміст гідроколоїду, %	Показник і міцності, г	Вміст гідроколоїду, %	Показник і міцності, г
0.25	70±3.5	1.0	70±3.5	2.0	70±3.5
0.5	110±5.5	1.5	130±6.5	3.0	140±7.0
0.75	150±7.0	2.0	180±9.0	4.0	240±12.0
1.0	240±12.0	2.5	270±13.5		
1.5	330±16.5				

На рис. 1.13 наведено кореляційна залежність експериментальних та розрахункових даних за математичною моделлю (1.11) для гетерогенних систем МС1-МС6. На рис. 1.14 наведено кореляційна залежність експериментальних та розрахункових даних за математичною моделлю (1.11) для контрольних систем КС1-КС3.



**Рисунок 1.13 - Кореляційна залежність експериментальних та розрахункових даних про міцність модельних систем «желатин – МК – агар – вода» і «желатин – МК – фурцеларан – вода»: 1 – МС1, 2 – МС2, 3 – МС3, 4 – МС4, 5 – МС5, 6 – МС6.**



**Рисунок 1.14 - Кореляційна залежність експериментальних та розрахункових даних про міцність контрольних систем «гідроколоїд – вода»: 1 – КС1, 2 – КС2, 3 – КС3.**

Відносна похибка апроксимації експериментальних даних гетерогенних модельних систем складає від 2% до 5%, Відносна похибка апроксимації експериментальних даних контрольних систем складає від 5% до 7%.

В таблицях 1.5 та 1.6 наведено параметри математичних моделей, що описують залежність міцності драглеутворюючих систем від їх складу.

Таблиця 1.5

**Параметри математичних моделей модельних систем**

Модельна система	$y = a_0 \cdot x_1^{a_1} \cdot x_2^{a_2}$ , $y$ – міцність, г; $x_1$ – масова концентрація агару, %; $x_2$ – масова концентрація желатину, %			
	$a_0$	$a_1$	$a_2$	Відносна похибка, %
МС1	174.7	5.116	5.116	5.3
МС2	1.523	0.452	0.417	5.4
МС3	2.464	0.919	0.924	5.2
Модельна система	$y = a_0 \cdot x_1^{a_1} \cdot x_2^{a_2}$ , $y$ – міцність, г; $x_1$ – масова концентрація фуцеларану, %; $x_2$ – масова концентрація желатину, %			
	$a_0$	$a_1$	$a_2$	Відносна похибка, %
МС4	113.4	4.616	4.672	2.1
МС5	1.975	0.673	0.684	1.9
МС6	2.218	0.825	0.819	2

Таблиця 1.6

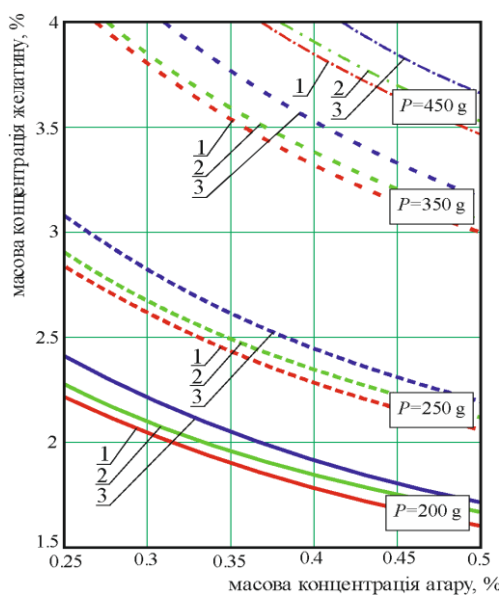
**Параметри математичних моделей контрольних систем**

Модельна система	$y = a_0 + a_1 x$ , $y$ – міцність, г; $x$ – масова концентрація гідроколоїду, %		
	$a_0$	$a_1$	Відносна похибка, %
КС1	7.02	216	7.7
КС2	-105	85	5.5
КС3	-65	130	4.8

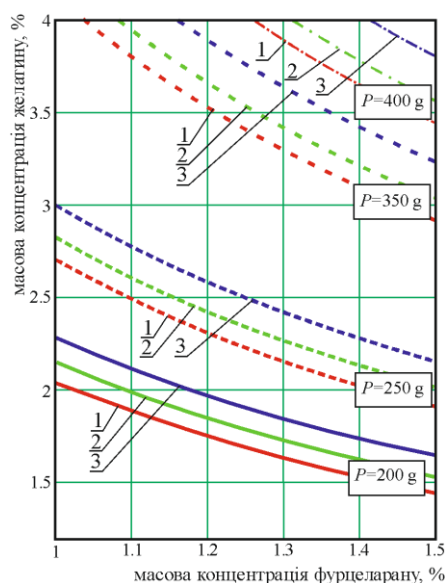
Як впливає з отриманих даних гетерогенні модельні системи у досліджених діапазонах концентрацій мають більшу драглеутворюючу здатність ніж контрольні системи. Максимальна міцність контрольної системи 330 г при масовій концентрації агару 1,5%, 270 г при масовій концентрації фуцеларану 2,5% та 240 г при масовій концентрації желатину 4,0%. Тоді як у модельних системах з додаванням 1,5% модифікованих крохмалів максимальна міцність збільшується майже на 30% - від 350 г до 450 г.

На рис. 1.15 та 1.16 наведено розрахункові міцності модельних систем залежно від масових концентрацій їх компонентів. Наведений діапазон розрахункових значень міцності було обрано з огляду на літературні дані [27] про рекомендовану міцність окремих кулінарних виробів. Так міцність желе для десертів за збірником рецептур на желатині 50% сухих речовин (СВ) складає 200-250 г, желе для оздоблення тортів і фігурок 50% СВ - 350 г, начинки

желейні - 350-400 г, желейні цукерки в глазури кондитерської або шоколаді - 350-400 г.



**Рисунок 1.15 Розрахункова міцність модельних систем «желатин – МК – агар – вода» залежно від масової концентрації желатину та агару:**  
1 – МС1, 2 – МС2, 3 – МС3.



**Рисунок 1.16 Розрахункова міцність модельних систем «желатин – МК – фуцеларан – вода» залежно від масової концентрації желатину та фуцеларану:**  
1 – МС4, 2 – МС5, 3 – МС6

Як впливає з даних на рис. 1.15 та 1.16 однакова задана міцність драглеутворюючої системи може бути отримана за різної комбінації гідроколоїдів та їх концентрацій.

Отримані математичні моделі дозволяють розраховувати необхідні концентрації драглеутворюючих речовин при заданій міцності композиції. З рівняння (1.11) впливають наступні формули для визначення необхідних концентрацій драглеутворюючих речовин, якщо задана міцність системи

$$x_1 = \left( \frac{P}{a_0 \cdot x_2^{a_2}} \right)^{\frac{1}{a_1}}, \quad (1.14)$$

$$x_2 = \left( \frac{P}{a_0 \cdot x_1^{a_1}} \right)^{\frac{1}{a_2}}, \quad (1.15)$$

де  $P$  – задана міцність драглеутворюючої системи, г;  
 $x_1, x_2$  – масові концентрації гідроколоїдів для певної композиції при постійній концентрації відповідного модифікованого крохмалю, %.

Зрозуміло, що таких комбінацій для однієї заданої міцності системи може бути скільки завгодно, зважаючи на монотонний характер формул (1.14), (1.15).

Тому виникає питання, яким чином можна визначити необхідну концентрацію компонентів драглеутворюючої композиції із заданим показником міцності. Існують два варіанти вирішення цієї проблеми: перший концентрації компонентів обираються за органолептичними показниками драглеутворюючої композиції, другий - концентрації компонентів обираються виходячи із вартості цих компонентів. Другий шлях можна проаналізувати аналітично, зважаючи на отримані математичні моделі.

Вартість модельної системи можна приблизно оцінити за сумарною вартістю її компонентів (без урахування води). В нашому випадку, враховуючи, що модельна система складається з трьох компонентів

$$C = C_1 \cdot x_1 + C_2 \cdot x_2 + C_3 \cdot x_3, \quad (1.16)$$

де  $C$  – загальна ціна модельної системи,  $C_i$  – ціна окремого компонента системи;

$x_1$  – масова концентрація агару або фуцелорану в системі;

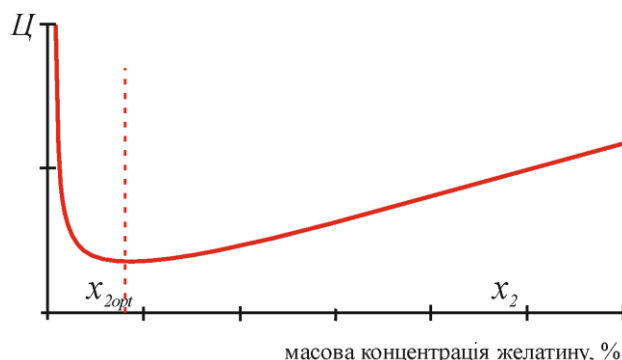
$x_2$  – масова концентрація желатину в системі;

$x_3$  – масова концентрація модифіковано крохмалю в системі.

Якщо врахувати співвідношення, що пов'язують міцність системи та концентрацію компонентів (1.14), то отримуємо

$$C = C_1 \cdot \left( \frac{P}{a_0 \cdot x_2^{a_2}} \right)^{\frac{1}{a_1}} + C_2 x_2 + C_3 x_3. \quad (1.17)$$

Останнє рівняння є функцією тільки однієї змінної ( $x_2$ ) при заданій міцності системи ( $P$ ) та заданій концентрації модифікованого крохмалю ( $x_3=1,5\%$ ). Легко переконатися, що функція ціни (1.17) має локальний мінімум, графічно зображений на рис. 1.17.



**Рисунок 1.17 - Ціна драглеутворюючої композиції залежно від концентрації желатину:**  $x_{2opt}$  – оптимальна концентрація желатину, що відповідає мінімальній ціні композиції.

Цей мінімум ціни можна визначити диференціюванням (1.17) за змінною  $x_2$

$$\frac{d\Pi}{dx_2} = \Pi_2 - \Pi_1 \frac{a_2}{a_1 \cdot x_2} \cdot \left( \frac{P}{a_0 \cdot x_2 a_2} \right)^{\frac{1}{a_1}} = 0. \quad (1.18)$$

Звідки отримуємо оптимальну концентрацію желатину в модельній системі, яка відповідає мінімальній ціні драглеутворюючої композиції

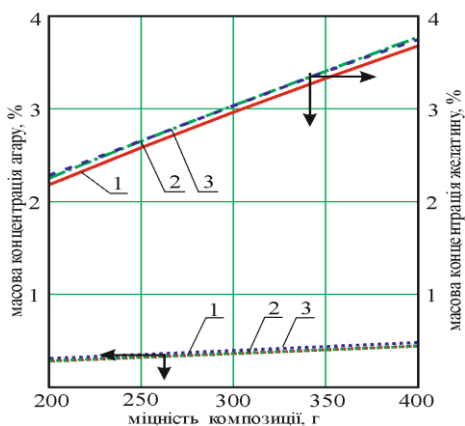
$$x_{2\text{опт}} = \left[ \frac{\Pi_2}{\Pi_1} \cdot \frac{a_1}{a_2} \cdot P^{\frac{1}{a_2}} \cdot \exp\left(-\frac{a_0}{a_2}\right) \right]^{\frac{a_2}{a_1+a_2}}. \quad (1.19)$$

Враховуючи (1.7), отримуємо оптимальну концентрацію іншого компонента в модельній системі

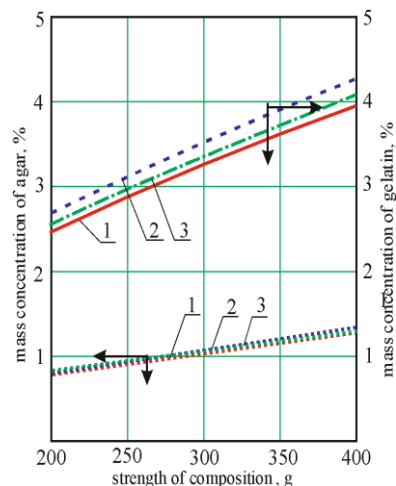
$$x_{1\text{опт}} = \left[ \frac{\Pi_1}{\Pi_2} \cdot \frac{a_2}{a_1} \cdot P^{\frac{1}{a_2}} \cdot \exp\left(-\frac{a_0}{a_1}\right) \right]^{\frac{a_1}{a_1+a_2}}. \quad (1.20)$$

На підставі рівнянь (1.19), (1.20) та даних про параметри математичної моделі з таблиці 1.6 розрахована залежність масової оптимальної концентрації гідроколоїдів для заданої міцності системи. Ці графіки представлено на рис. 1.18 та 1.19.

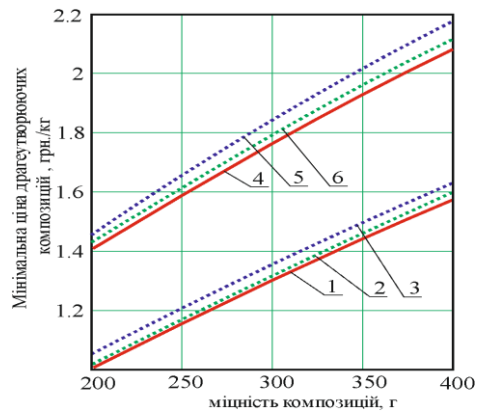
Як показують результати розрахунків наведених на рис. 1.18 оптимальна масова концентрація агару в діапазоні рекомендованої міцності для кулінарних виробів від 200г до 400 г складає від 0,25% до 0,43%, а оптимальна концентрація желатину відповідно від 2,1% до 3,7%. При чому для модельних систем 1.10, 1.11, 1.12 практично не має різниці у оптимальних концентраціях агару.



**Рисунок 1.18 - Оптимальна концентрації гідроколоїдів драглеутворюючої композиції для заданої міцності системи: 1 – МС1, 2 – МС2, 3 – МС3**



**Рисунок 1.19 - Оптимальна концентрації гідроколоїдів драглеутворюючої композиції для заданої міцності системи. 1 – МС4, 2 – МС5, 3 – МС6**



**Рисунок 1.20 - Вартість таких оптимальних за ціною систем**

Оптимальна масова концентрація фуцеларану, згідно результатів наведених на рис. 1.19, складає від 0,79% до 1,31%, а оптимальна концентрація желатину відповідно від 2,47% до 4,20%, При чому для модельних систем 1.14, 1.15, 1.16 практично не має різниці у оптимальних концентраціях фуцеларану.

На рис. 1.20 наведено вартість таких оптимальних за ціною систем. При розрахунку вартості композицій за формулою (1.17) були взяті середні ціни на драглеутворювачі: агар - 550 грн/кг, фуцеларан - 350 грн/кг, желатин - 140 грн/кг, крохмаль ОПВ 1 - 30 грн/кг, крохмаль Farinex VA 40 - 58 грн/кг, крохмаль ESH 15 - 58,5 грн/кг. На рис. 1.20 ціна наведення в умовних одиницях (мінімальна ціна приймається за одиницю, а всі інші вказуються відносно неї).

З рис. 1.20 випливає, що композиції з додаванням крохмалю Farinex VA-40 (MC2, MC5) мають більшу вартість у порівнянні з крохмалями Оксаміл ОПВ-1 та Emden ESH-15 при однаковій з ними масовій концентрації у композиціях – 1,5%.

В цілому модельні драглеутворюючі системи «желатин – МК – фуцеларан – вода» у 1,5 рази дорожче ніж системи «желатин – МК – агар – вода» незважаючи на те, що фуцеларан дешевше ніж агар у 1,5 рази. Це пояснюється тим, що системи з фуцелараном (рис. 1.19) за рівної міцності з системами, що містять агар (рис. 1.18) мають більшу загальну концентрацію гідроколоїдів, а відповідно і більшу вартість.

Таким чином проведене математичне моделювання драглеутворюючої здатності гетерогенних систем на основі структуроутворювачів різної природи дозволяє вирішити два важливих науково-практичних завдання:

1 – скласти композиції із досліджених гідроколоїдів, які забезпечують необхідні органолептичні показники та заданий рівень міцності систем за технологічними вимогами до кулінарних виробів;

2 – розраховувати оптимальну концентрацію композицій гідроколоїдів, що забезпечують заданий рівень міцності систем за показником найменшої вартості композицій.

## Висновки за розділом 1

1. Проведено експериментальне дослідження міцності драглеутворюючих гетерогенних систем «желатин – МК – агар – вода» і «желатин – МК – фуцеларан – вода», де у якості модифікованих крохмалів використано крохмалі Оксаміл ОПВ-1, Farinex VA-40 та Emden ESH-15 та гомогенних систем: агар - вода, фуцеларан – вода, желатин - вода.

2. Показано, що гетерогенні драглеутворюючі системи мають більшу на 30 % міцність ніж контрольні гомогенні системи на основі агару, фуцеларану або желатину.

3. Отримано математичні моделі, які пов'язують міцність досліджених драглеутворюючих систем та масову концентрацію їх компонентів.

4. Адекватність моделей встановлено за критерієм Фішера. Відносна похибка апроксимації експериментальних даних математичними моделями складає 2...5%.

5. Отримано рівняння, які дозволяють розрахувати масову концентрацію компонентів досліджених драглеутворюючих композицій із заданим рівнем міцності систем.

6. Показано, що для заданого рівня міцності гетерогенної драглеутворюючої системи існує оптимальна концентрація її компонентів за показником найменшої загальної вартості системи. Отримано рівняння, які дозволяють розраховувати оптимальну концентрацію компонентів гетерогенної драглеутворюючої системи.

7. Показано, що композиції з додаванням крохмалю Farinex VA – 40 мають більшу вартість у порівнянні з крохмалю Оксаміл ОПВ 1 та Emden ESH – 15 при однаковій з ними масовій концентрації у композиціях – 1,5%.

8. Гетерогенні композиції «желатин – МК – фуцеларан – вода» у 1,5 рази дорожче ніж системи «желатин – МК – агар – вода» незважаючи на те, що фуцеларан дешевше ніж агар у 1,5 рази.

9. Отримані математичні моделі можуть бути використанні для аналізу інших гетерогенних драглеутворюючих композицій при наявності даних про міцність таких систем залежно від концентрації компонентів.

10. Великі частки теплопровідності при сушінні твердо-вологого матеріалу в порівнянні з рідко-в'язким пояснюються тим, що теплообмін усередині бульб топінамбуру відбувається за рахунок теплопровідності, а всередині кобилячого і верблюжого молока - за рахунок конвекції.

11. При порівнянні середнього значення частки променистого компонента для твердовологих і рідков'язких матеріалів (~ 18 %), з таким самим значенням для вакуумно-сублимаційної сушіння нафталіну (30 ÷ 50) % [11], то в 1,66-2,78 рази нижче. Як видно, променистий теплообмін не переважає як для твердо-вологих, так і для рідких продуктів. Це підтверджує теорію у тому, що він зазвичай переважає при глибокому вакуумі [6].

12. У заданому діапазоні тисків і температур як для рідко-в'язкого, так і для твердо-вологого матеріалу (при висоті шару 0,01...0,02 м), конвективний теплообмін має достатній вплив на прискорення процесу зневоднення, що зумовлює схожість механізмів вакуумної сушіння при низькому та середньому розрідженні з атмосферною сушкою. Ця інформація корисна для обґрунтування характеру критеріальних рівнянь теплообміну.

13. Методом екстракції зрідженим газом (хладоном R406A) виділено екстракт ліпідних фракцій лаврового листа. Встановлено, що вихід кінцевого продукту становить до 5% вагових часток.

14. Методом газової хроматографії з наступною мас-спектрометрією досліджено якісний склад хладонового екстракту лаврового листа. Ідентифіковано 68 компонентів. Дослідження кількісного складу екстракту методом газової хроматографії з використанням полуменево-іонізаційного детектора показало, що домінуючими сполуками є 1,8-цинеол та камфен. Показано наявність значних кількостей пальмітинової, лінолевої та ліноленової кислот.

15. Встановлено, що хладоновий екстракт лаврового листа характеризується великим вмістом ароматутворювальних речовин. Число аромату хладонового екстракту складало  $1122 \pm 20$  мл  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3/100$  г, що дозволяє рекомендувати його в якості ароматичної добавки у виробництві харчових продуктів.

#### Список використаних джерел за розділом 1

1. Demarchi, S.M., Irigoyen, R.M.T., Giner, S.A. (2018). Vacuum drying of rosehip leathers: Modelling of coupled moisture content and temperature curves as a function of time with simultaneous time-varying ascorbic acid retention. *Journal of Food Engineering*, 233, 9-16.

2. Ustinova, M.E., Yashonkov, A.A. (2021). Experimental studies into the kinetics of the process of vacuum drying of carrot chips. *Proceedings of International Conference on Food Production and Processing of Agricultural Raw Materials (P2ARM)*, 2-8.

3. Tribuzi, G., de Souza, J.A.R., de Souza, I.G., Laurindo, J.B., Carciofi, B.A.M. (2016). Vacuum impregnation and drying of calcium-fortified pineapple snacks. *LWT – Food Science and Technology*, 72, 501-509. doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.05.016>.

4. Da-Wen Sun (Ed.). (2005). *Thermal Food Processing: New Technologies and Quality Issues*. New York: CRC Press, 664. doi: <https://doi.org/10.1201/9781420027372>

5. Rambhatla, Sh., Pikal, M.J. (2003). Heat and mass transfer scale-up issues during freeze-drying, I: Atypical radiation and the edge vial effect. *AAPS PharmSciTech*, 4 (2), Article 14, 1-10. doi: <https://doi.org/10.1208/pt040214>.



6. Ratti, C. (2008). Freeze and vacuum drying of foods. In Xiao Dong Chen, Arun S. Mujumdar. *Drying Technologies in Food Processing* (225-251). Oxford: BlackwellPublishingLtd.
7. Delgado, J.M.P.Q., Barbosa de Lima, A.G. (Eds).(2014). *Transport Phenomena and Drying of Solids and Particulate Materials*. Heidelberg: SpringerInternationalPublishing, 240. doi: 10.1007/978-3-319-04054-7.
8. Semenov, G.V., Bulkin, M.S., Kuzenkov, A.V. (2015). Modern research trends and technical solutions for the intensification of the process of freeze-drying in the food industry, pharmaceutical production and applied biotechnology (PART 1). *Scientific journal of NRU ITMO. Series: processes and apparatus for food production*, 1, 187-202.
9. Ganguly, A., Nail, S.L., Alexeenko, A. (2013). Experimental determination of the key heat transfer mechanisms in pharmaceutical freeze-drying. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 5(102),1610–1625.doi:<https://doi.org/10.1002/jps.23514>.
10. Ермолаев, В.А. (2021). Разработка математической модели низкотемпературной вакуумной сушки сыров. *Вестник КрасГАУ*, 1(166), 134-142. doi: <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-1-134-142>.
11. Новиков, П.А. (1962). Влияние лучистой составляющей на характер теплообмена при сублимации в вакууме. *Инженерно-физический журнал*, 12 (5), 80-83.
12. Смольский, Б.М., Новиков, П.А. (1961). О механизме тепло- и массообмена при сублимации тел в разреженной среде. *Инженерно-физический журнал*, 11 (5), 41-47.
13. Abdizhapparova, B.T., Khanzharov, N.S., Ospanov, B.O., Pankina, I.A., Orymbetova, G.E. (2019). A way of vacuum-atmospheric drying of Jerusalem artichoke tubers. *News of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan, series of geology and technical sciences*, 6(438), 165-176.doi: <https://doi.org/10.32014/2019.2518-170X.167>.
14. Abdizhapparova, B.T., Khanzharov, N.S., Ospanov, B.O., Pankina, I.A., Kamalbek, D.K., Akhmetov, Zh.M. (2019). Investigation of vacuum-atmospheric drying of camel and mare milk, *News of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan, series chemistry and technology*, 6(438), 55-60.doi: <https://doi.org/10.32014/2019.2518-1491.74>.
15. Баринов, И.Н., Волков В.С. (2013). Чувствительные элементы микромеханических датчиков давлений. *Основы проектирования и разработки*. - Пенза, 79 с.
16. Латышенко, К. П. *Технические измерения и приборы. В 2 т. : учебник для академического бакалавриата / К. П. Латышенко. - 2-е изд., испр. и доп. - М. : Издательство Юрайт, 2016.*
17. Radovanovic, A., Stojceska, V., Plunkett, A., Jankovic, S., Milovanovic, D., Cupara, S. (2015). The use of dry Jerusalem artichoke as a functional nutrient in developing extruded food with low glycemic index, *Food Chemistry*, 177, 81–88.doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.12.096>.

18. Dubkova, N.Z., Kharkov, V.V., Vakhitov, M.R. (2021). Using Jerusalem artichoke powder in functional food production. *Foods and Raw Materials*, 9(1), 69–78. Doi: <http://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-69-78>.
19. Linxi Yang, Quan Sophia He, Kenneth Corscadden, Chibuike C. Udenigwe. (2015). The prospects of Jerusalem artichoke in functional food ingredients and bioenergy production, *Biotechnology Reports*, 5, 77–88. doi: <https://doi.org/10.1016/j.btre.2014.12.004>.
20. Al-Juboori, A.T., Mohammed, M., Rashid, J., Kurian, J., El Refaey, S. (2013) Nutritional And Medicinal Value Of Camel (*Camelus Dromedarius*) Milk. *Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Conference on Food and the Environment - The Quest for a Sustainable Future*, Budapest, 170, 221-232.
21. Hussain, H., Wattoo, F.H., Wattoo, M.H.S., Gulfraz, M., Masud, T., Shah, I., Ali, S., Alavi, S.E. (2021). Camel milk as an alternative treatment regimen for diabetes therapy. *Food Sci Nutr.*, 9, 1347–1356. doi: <https://doi.org/10.1002/fsn3.2078> [in English].
22. Карпеня М.М., Шляхтунов В.И., Подрез В.Н. (2015) Технология производства молока и молочных продуктов. Москва: ИНФРА-М, 410.
23. Pieszka, M., Łuszczynski, J., Zamachowska, M., Augustyn, R., Długosz, B., Hędrzak, M. (2016.) Is mare milk an appropriate food for people? - A review. *Ann. Anim. Sci.*, 16, 33–51. doi: <https://doi.org/10.1515/aoas-2015-0041>.
24. Guo, L., Xu, W.L., Li, C.D. Ya, M., Guo, Y.S., Qian, J.P., Zhu, J.J. (2020). Production technology, nutritional, and microbiological investigation of traditionally fermented mare milk (Chigee) from XilinGol in China. *Food Sci Nutr.* 8, 257–264. doi: <https://doi.org/10.1002/fsn3.1298>.
25. Дмитриев С.М., Хробостов А.Е. (2012). Краткий курс теплообмена. Новый Новгород: НГТУ, 144.
26. Гинзбург, А.С., Громов, М.А., Красовская, Г.И. (1980). Теплофизические характеристики пищевых продуктов. Справочник. Москва: Пищевая промышленность, 288.
27. Коэффициенты излучения для металлов. Доступно: <https://www.flukeprocessinstruments.com/en-us/service-and-support/knowledge-center/infrared-technology/emissivity-metals>
28. Алтухов, И.В. Очиров, В.Д. (2010). Анализ методов и средств определения оптических и терморadiационных характеристик сахаросодержащих корнеплодов. *Вестник АлтГАУ*, 3, 68-72.
29. Сарыпбеков, М.С., Касымбеков, Б.А., Ханжаров, Н.С., Абдижаппарова Б.Т. (2007) Анализ составляющих теплообмена вакуумной сушки крупнодисперсных термолабильных материалов. *Доклады НАН РК* 5, 96-100.

## РОЗДІЛ 2. ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ХОЛОДИЛЬНИХ СИСТЕМ ЗА РАХУНОК АКУМУЛЯЦІЇ ХОЛОДУ

2.1 Застосування системного підходу під час моделювання, як засіб підвищення ефективності систем холодопостачання

При створенні та експлуатації складних систем холодопостачання потрібно зазвичай проводити численні дослідження та розрахунки з:

- оцінкою різних технічних і техніко-економічних показників, що характеризують властивості як окремих підсистем, так і системи в цілому;
- вибором оптимальних структур окремих підсистем та структури всієї системи;
- вибором оптимальних значень параметрів системи.

Виконання таких досліджень можливе лише за наявності методів математичного моделювання із застосуванням системного підходу. При цьому видається, що система холодопостачання складається з безлічі взаємодіючих підсистем та елементів.

Основна мета системного підходу – виявити механізм функціонування системи холодопостачання, а керуючих систем – забезпечити адаптацію до умов експлуатації, що змінюються. Аналіз показує, що система холодопостачання може бути об'єктом системного підходу. Завдання оптимізації холодильних установок збігається з метою системного підходу забезпечити максимальну ефективність роботи системи за змінних умов експлуатації.

Серед системних досліджень особливе місце посідають питання опису будови системних об'єктів. Ці дослідження спираються на ряд понять, серед яких насамперед слід зазначити поняття системи [1, 2].

Системою називають сукупність будь-яким способом виділених реальних чи уявних елементів. Ця сукупність є системою, якщо:

- задані зв'язки між цими елементами;
- кожен із елементів усередині системи вважається неподільним;
- із навколишнім середовищем система взаємодіє як ціле;
- при зміні у часі сукупність вважатиметься однією системою, якщо між її елементами у різні моменти часу можна провести однозначну відповідність.

Система сприймається як цілісна множина взаємозалежних неподільних елементів. Однак такий поділ системного об'єкта на частини носить умовний характер і змінюється залежно від рівня систем, що приймається. Будь-який елемент за певних умов може розглядатися як система.

Системний підхід базується на розгляді холодильної установки у взаємозв'язку з навколишніми підсистемами та об'єктами. При цьому задані зв'язки між окремими елементами холодильної установки; кожен елемент вважається неподільним; з навколишнім середовищем система взаємодіє як

ціле, тобто система сприймається як цілісна множина взаємозалежних умовно неподільних елементів. Наявність зв'язків між окремими елементами холодильної системи означає, що зміна параметрів у будь-якому з елементів викликає зміну параметрів інших елементів системи. Зв'язки між окремими елементами відносяться до категорій внутрішніх зв'язків, за допомогою зовнішніх зв'язків здійснюється взаємодія між холодильною установкою та навколишнім середовищем. Система холодопостачання у випадку може розглядатися як багаторівнева ієрархічна структура, якій властиві такі характеристики:

- вертикальна супідрядність;
- пріоритет дій підсистем верхнього рівня;
- взаємозалежність дій.

Вертикальна супідрядність означає, що будь-яка ієрархія складається з послідовного розташованих вертикально взаємодіючих підсистем, що становлять систему холодопостачання. Пріоритет дій підсистем верхнього рівня носить для рівнів нижче обов'язковий характер.

Оскільки підсистема нижчого рівня діє у напрямі досягнення власних локальних цілей, між ними виникає конфлікт, у результаті якого глобальна мета системи може бути досягнута. Тому завдання координуючих дій [3] полягає у ліквідації такого конфлікту. Вочевидь, конфлікту немає, якщо параметри зв'язків є спільними для підсистем різного рівня.

Слід виділити кілька основних етапів системного підходу:

- виділення системи холодопостачання із загального комплексу технологічних виробництв у вигляді окремої холодоенергетичної системи;
- формування взаємозв'язку системи холодопостачання з іншими системами виробництва;
- формування схеми холодопостачання;
- формування системи взаємозв'язку окремих підсистем;
- формування комплексу моделей, що забезпечує вирішення завдань оптимального проектування або експлуатації системи холодопостачання.

Перелічені етапи системного підходу дозволяють насамперед вирішити проблему розмірності завдання. Подання системи холодопостачання як ієрархічної структури дозволяє значно скоротити розмірність системи. При виділенні системи холодопостачання із загального комплексу підприємства та вирішенні завдань оптимального проектування та управління необхідна організація обміну інформацією із суміжними системами підприємства (енергопостачання, водопостачання, технологія та ін.) за допомогою прямих та зворотних зв'язків.

Найбільше значення мають прямі зв'язки з технологією виробництва, які дозволяють визначити параметри технологічних потоків, що охолоджуються, вимоги технологічного регламенту, точність підтримки параметрів і т.ін., що

значною мірою впливає на значення теплових навантажень, вибір схеми холодопостачання та конструктивних особливостей холодильного обладнання.

Обмін інформацією між окремими підсистемами безпосередньо самої системи холодопостачання здійснюється за допомогою внутрішніх прямих та зворотних зв'язків.

Значна складність схем холодопостачання підприємств визначає доцільність використання принципу декомпозиції, коли передбачається її поділ на ряд підпорядкованих підсистем.

Важливим етапом, що передує розробці математичної моделі холодильної установки, є висування гіпотез про структуру та особливості функціонування об'єкта, що дозволяють сформулювати деяку логічну схему та уявлення про систему холодопостачання, які зрештою перетворюються на деякий фізичний або математичний аналог об'єкта-оригіналу. Перехід від змістовного опису об'єкта для його математичного аналізу називається формалізацією.

І тут можна вважати, що математичні моделі є формалізовані уявлення систем холодопостачання, які служать засобом дослідження та прогнозування їх властивостей, і навіть управління ними.

При системному підході [4] формалізація системи холодопостачання як об'єкта є базою для побудови ієрархії та створення методологій проектування, експлуатації, дослідження. Вона розглядається як окрема багатоелементна система з ієрархічною структурою та як квазістаціонарна фізико-технічна система з великою кількістю зовнішніх впливів, внутрішніх взаємозв'язків та обмежень.

Для реалізації всебічного дослідження системи холодопостачання пропонується:

- запровадження універсальності ієрархічного принципу декомпозиції з використанням узагальнених функціональних особливостей виділених підсистем;

- здійснення декомпозиції системи на підсистеми, які мають максимальну автономність як з позиції проведення попередніх експериментальних та теоретичних досліджень, так і проведення синтезу та оптимізації безпосередньо у процесі проектування.

## 2.2 Енергоефективні та ресурсозберіжні технології акумуляції холоду в холодильних системах

На час воєнного стану та у найближчій перспективі проблема функціонування холодильного та кліматичного обладнання в умовах відсутності надійного електропостачання є однією із важливих проблем національної безпеки України. Робота об'єднаної енергетичної системи України супроводжується постійними аварійними та плановими відключеннями електричної енергії, що негативно впливає на підтримку необхідних умов зберігання продуктів, які швидко псуються, медичних препаратів та інших видів продукції та надійність функціонування

холодильного обладнання, що призводить до великих матеріальних втрат.

Однією із основних цілей російських ракетних ударів є об'єкти інфраструктури, до яких належать складські приміщення для зберігання харчових продуктів та медичних препаратів. В зв'язку з військовими діями виникли проблеми з логістикою та транспортуванням, що не дозволяє швидко доставляти необхідні об'єми продукції до споживачів. Що в свою чергу вимагає розміщення певних запасів харчових продуктів та медичних препаратів недалеко від місця дислокації споживачів. За наявними даними 44% підприємств відчувають труднощі, пов'язані з логістикою та транспортуванням. Спостерігається розрив звичних транспортних ланцюжків, зокрема безперервного холодильного ланцюга (БХЛ) виробник-склад-споживач. Відомо, що коливання температури зберігання швидкопсувних продуктів та інших термочутливих матеріалів в межах 5-10°C може призвести до часткового, а в деяких випадках до остаточного їх псування.

Особливо гостро ця проблема стоїть в питаннях продовольчого та медичного забезпечення, як Збройних сил України, так і інших спеціалізованих підрозділів. Виходячи з інформації служб тилового забезпечення та волонтерів у військах існують проблеми з польовим та мобільним холодильним обладнанням для доставки та зберігання м'яса, риби та інших продуктів, що швидко псуються, а також медикаментів. Питання зберігання цієї продукції в польових умовах особливо є гострою в теплі періоди року, адже не завжди є можливість застосування холодильного обладнання з підключенням до електричної мережі, або використання автономних електрогенераторів особливо недалеко від зони бойових дій. Також аналогічні проблеми зі зберіганням харчових продуктів виникають у населення, що проживає в зоні бойових дій при відсутності електричної енергії.

Таким чином, для забезпечення функціонування безперервного холодильного ланцюга в польових та мобільних умовах треба вирішити чотири взаємопов'язаних проблеми: технологічну, що пов'язана з технологією зберігання і перевезення продукції, що вимагає дотримання певних температурних режимів; експлуатаційну, що пов'язана з технічним оснащенням різного виду холодильного обладнання за об'ємами та температурними режимами, транспортними і допоміжними засобами; енергетичну, що пов'язана з надійним забезпеченням електричною енергією для функціонування всього БХЛ; економічно-екологічну, що пов'язана із енергоефективністю та екологічною безпекою такого обладнання впродовж всього періоду експлуатації.

Одним із шляхів вирішення вищезазначених проблем на сучасному рівні є застосування систем акумулювання енергії, зокрема теплоти. Відомо, що можливість акумулювання теплової енергії заснована на використанні фізичного або хімічного процесу, пов'язаного з поглинанням і виділенням теплоти. До основних із них відносяться накопичення-виділення внутрішньої енергії під час нагрівання-охолодження твердих або рідких тіл, фазові переходи з поглинанням-виділенням прихованої теплоти, процес сорбції-десорбції або

оборотна хімічна реакція, що перебігає з виділенням-поглинанням теплоти<sup>1</sup>. Вищеназвані процеси реалізуються в спеціальних пристроях – акумуляторах теплоти<sup>2</sup>.

Застосування акумуляторів теплоти дозволяє згладити нерівномірне надходження теплової енергії, знизити енерговитрати за рахунок використання альтернативних джерел енергії та підвищити ефективність роботи енергетичного обладнання<sup>3</sup>.

За типом процесів у акумуляторах теплоти розрізняють<sup>4</sup> такі види акумуляції:

- теплоємнісне акумуляування теплової енергії твердими та рідкими тілами за рахунок зміни температури речовини;
- латентне акумуляування теплової енергії за допомогою використання теплоти фазового переходу речовин;
- термохімічне акумуляування теплової енергії.

Окремим випадком систем акумуляування теплоти є системи акумуляування холоду, які застосовуються в холодильній та кліматичній індустрії.

Робота вищеназваних холодильних систем заснована на накопиченні теплової енергії в акумуляторах холоду при температурі робочої речовини нижче температури навколишнього середовища.

Для акумуляції холоду в холодильній і кліматичній індустрії найчастіше використовують ємнісний і латентний способи акумуляування теплової енергії.

Основне завдання акумуляторів холоду – згладжування нерівномірної потреби в холодопостачанні протягом доби, зменшення встановленої потужності холодильної системи та споживання енергоресурсів (за даними багатьох дослідників відсоток економії може становити від 30 до 70%). Прикладами саме такого використання акумуляторів холоду є, зокрема, системи кондиціонування повітря в промислових цехах, будинках, офісах, системи із сонячними колекторами, системи охолодження молока та молочних продуктів на молокозаводах. Незалежно від специфіки конкретного виробництва нерівномірність теплових навантажень на відповідні холодильні системи визначається періодичною зміною зовнішніх теплонадходжень в приміщення (схід і захід сонця), а на прикладі молокозаводів – періодичністю надходжень молока впродовж доби, необхідністю його охолодження та переробки негайно і в стислі терміни. А в умовах військових дій та за відсутності надійного електропостачання включення в холодильні системи

---

<sup>1</sup> Thermal energy storage: G. Beckman and P. V. Gilli. Springer Verlag, ISBN 3-211-81764-6, 1984, XI – P. 130.

<sup>2</sup> Kreith F. Principles of Solar Engineering / F. Kreith, J. F. Kreider. – Hemisphere Publishing Corporation – Washington, London, DC: 1978. – P. 534.

<sup>3</sup> Левенберг В. Д. Акумуляування тепла : монографія / В. Д. Левенберг, М. Р. Ткач, В. А. Гольстрем. – К. : Техніка, 1991. – С. 93.

<sup>4</sup> Shah YT, editor. Thermal Energy: Sources, Recovery, and Applications. Boca Raton, FL, USA: CRC Press; 2018. – P. 650. <https://doi.org/10.1201/9781315305950>.

акумуляторів холоду дозволить згладити температурні коливання охолоджуючого середовища.

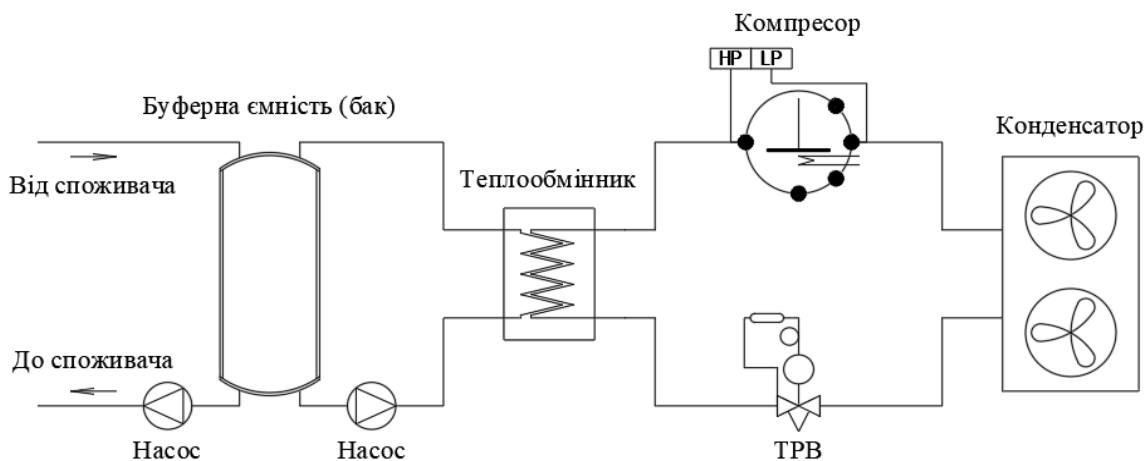
Сьогодні розрізняють холодильні системи з акумуляторами холоду «вода–лід» та евтектичні холодильні системи<sup>5</sup>.

У системах кондиціонування повітря (СКП), холодильних установках підприємств харчової та переробної промисловості найпоширенішими є акумулятори холоду, що використовують теплоту фазового переходу «вода–лід». Найчастіше застосовують акумулятори холоду із заморожуванням льоду на поверхні випарника холодильної машини та акумулятори холоду з льодоводяною сумішшю<sup>6</sup>.

Ці системи мають свої переваги та недоліки. До переваг слід віднести екологічну чистоту робочої речовини, дешевизну, доступність, не токсичність, вибухобезпечність. Недоліки слід розглядати окремо, відповідно до реалізації способу акумулявання холоду та його конструктивного виконання<sup>7</sup>. Розглянемо основні конструктивні рішення вище зазначених холодильних систем.

Технологія акумуляції холоду з накопичувальною (буферною) ємністю

Найпростішим за конструктивними виконанням є холодильна система на базі чілерів з рідинним акумулятором холоду виконаним у вигляді буферної ємності<sup>8</sup>. Для забезпечення можливості постачати холодом кілька споживачів з непостійною витратою рідини та змінними тепловими навантаженнями, з необмеженим перепадом температур, використовують систему охолодження рідини з накопичувальною (буферною) ємністю (рис. 2.1).



**Рисунок 2.1 - Схема холодильної системи з буферною ємністю**

<sup>5</sup> Холодильні установки : підручник / І. Г. Чумак [та ін.] ; за ред. І. Г. Чумака. – 6-е вид., перероб. та доп. – Одеса : Пальміра, 2006. С. 342.

<sup>6</sup> Перспективні напрями розвитку холодильних систем з акумуляцією холоду / В.О. Потапов, О.В. Петренко, В.В. Золотарьов // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. пр. : в 2 ч. Ч. 2 / Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. – Харків, 2013. – Вип. 2.(18) – С. 72.

<sup>7</sup> <https://www.energy.gov/energy-storage-grand-challenge/energy-storage-grand-challenge>.

<sup>8</sup> Бондарь Е. С. Энергозберігаючі системи кондиціонування повітря з акумуляцією холоду [Електронний ресурс] / Е. С. Бондарь, П. В. Калугін. – Режим доступу : <http://www.sun-ice.com.ua/news/>.



Буферний бак має подвійне призначення. По-перше, він необхідний для згладжування нерівномірності теплового навантаження на холодильну машину, викликаною зниженням витрати рідини, що охолоджується. В даному випадку ємність буферного бака визначається різницею між холодопродуктивністю установки та мінімальною кількістю теплоти, яку необхідно відвести від об'єкта під час обов'язкової стоянки компресора.

По-друге, буферний бак використовують як акумулятор холоду збільшення холодопродуктивності установки в період пікових теплових навантажень. У цьому випадку мінімальний обсяг буферного бака визначається з різниці між необхідною та середньою холодопродуктивністю холодильної машини.

Розрахунок буферних баків полягає у визначенні акумуляуючої здатності запасеного обсягу води. Акумуляуюча здатність води визначена її теплоємністю, що дорівнює  $4,187 \text{ кДж} \cdot \text{кг}/^\circ\text{C}$ .

Таким чином, холодопродуктивність установки в пікові періоди підвищується без збільшення встановленої потужності компресора. Зниження встановленої потужності компресора знижує навантаження на електричні мережі, і зрештою дозволяє знизити витрату електроенергії.

Технологія акумуляції холоду з рідинними акумуляторами-резервуарами витискувального та випорожнювального типів з відокремленими контурами циркуляції.

Розглянемо конструктивні особливості рідинних акумуляторів-резервуарів витискувального та випорожнювального типів з відокремленими контурами циркуляції<sup>9</sup>. Так, в акумуляторі-резервуарі витискувального типу холодоносії з різною температурою відокремлені перегородкою, переливаючись через яку, один із них витискує інший, до певної міри змішуючись з ним. Найчастіше такі акумулятори є акумуляторами-резервуарами з відкритою (до атмосфери) поверхнею холодоносія. Акумулятори випорожнювального типу характерні для замкнених та закритих систем циркуляції холодоагенту (без розриву течії). З іншого боку, для зарядження таких акумуляторів холоду можна використовувати як природний, так і штучний холод. Тому частіше передбачається відокремлення джерела холоду та акумулятора-резервуара.

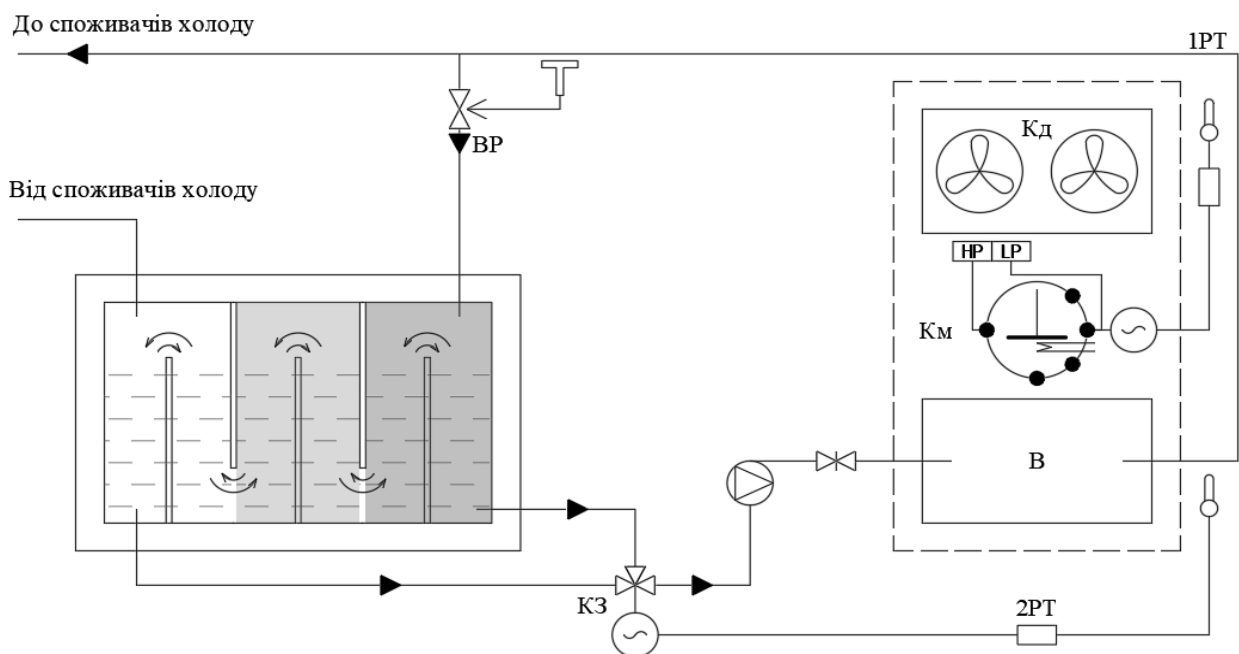
Одна із типових схем холодопостачання з використанням рідинного акумулятора холоду витискувального типу наведена на рис. 2.2.

Коли витрати холодоносія на лінії «до споживачів холоду» зменшуються, зростає тиск у цій лінії і надлишки холодоносія за допомогою регулятора тиску «після себе» спрямовуються в акумулятор-резервуар. Цей резервуар поділено вертикальними перегородками, що мають перешкоджати швидкому змішуванню теплого (від споживача холоду) та охолодженого потоків холодоносія. Коли теплове навантаження є меншим, ніж холодопродуктивність

---

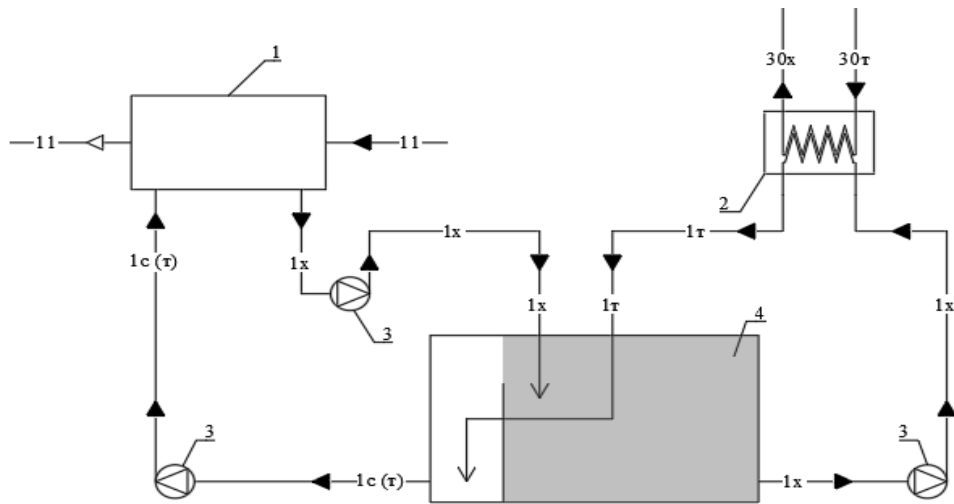
<sup>9</sup> Вторинні холодоносії [Електронний ресурс] / – Режим доступу : <http://www.nio-holod.com.ua>.

холодильної установки, необхідна температура холодоносія підтримується циклічною роботою холодильних машин за допомогою реле температури 1РТ. При підвищенні коефіцієнта робочого часу до 1 та збільшенні температури холодоносія вище заданого значення реле 2РТ подає сигнал на клапан змішування КЗ. Тоді помпа починає забирати холодоносії, як отеплений, так і охолоджений. У випарник почне надходити більш холодний холодоносіє, відповідно знизиться і температура холодоносія на лінії «до споживача холоду». Очевидний недолік наведеної схеми полягає у несталості температури холодоносія, що спрямовується до споживача (порушення технологічних вимог), у зміні теплових навантажень на випарник (небезпека зміни режимів кипіння холодоагенту) тощо. Чим більшим є об'єм акумулятора, тим меншими будуть діапазони змін температур холодоносія на лінії «до споживачів холоду» і теплових навантажень на холодильну установку.



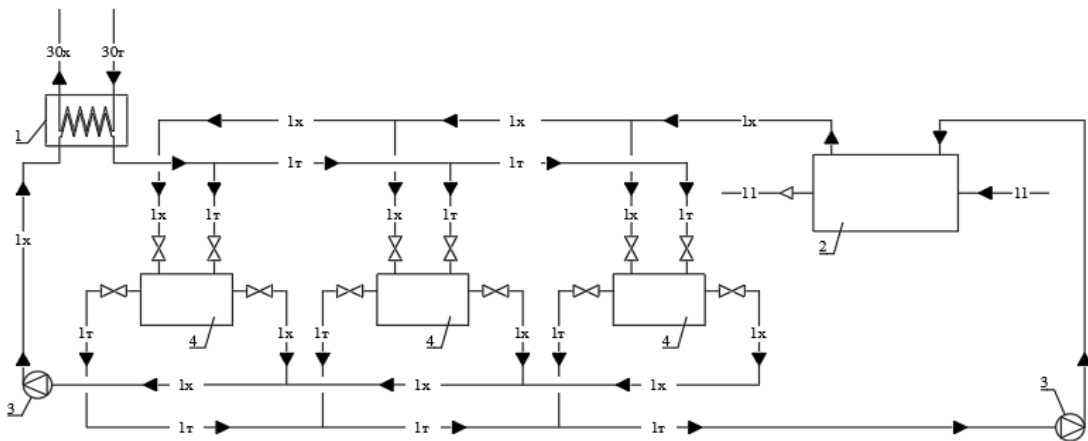
**Рисунок 2.2 - Принципова схема холодопостачання з проміжним холодоносієм та рідинним акумулятором холоду: В – випарник; КМ – компресор; Кд – конденсатор; 1РТ, 2РТ – реле температури; КЗ – клапан змішувальний; ВР – регулювальний вентиль.**

На рис. 2.3 наведена схема з відокремленими контурами циркуляції отепленого та охолодженого холодоносіїв, принцип роботи аналогічний вище наведеній холодильній системі, допускає такий самий рівень автоматизації за діапазоном змін температур чи теплових навантажень на холодильну установку. Особливих переваг даної схеми в порівнянні з схемою наведеною на рис. 2.2 немає.



**Рисунок 2.3 - Принципова схема охолоджувальної системи з проміжним холодоносієм та рідинним акумулятором холоду з двома відокремленими контурами циркуляції холодоносія: 1 – випарник; 2 – теплообмінний апарат; 3 – помпи; 4 – акумулятор; 1х – охолоджений холодоносія; 1т – отеплений холодоносіій; 1с(т) – холодоносіій після змішування; 11 – аміак; 30х – холодний продукт; 30т – теплий продукт.**

Принципові можливості стабілізації температури холодоносія, що спрямовується до споживача холоду, можливості регулювання витрат холодоносія за умов стабільної роботи холодильної установки, можливості достатньо надійної автоматизації роботи всіх елементів холодильної установки у процесах «зарядження», «розрядження» акумулятора холоду дає холодильна система із незалежними контурами циркуляції отепленого та охолодженого холодоносіїв (рис.2.4).



**Рисунок 2.4 - Принципова схема холодопостачання з проміжним холодоносієм, акумулятором холоду та з незалежними контурами циркуляції отепленого й охолодженого холодоносія: 1 – теплообмінний апарат; 2 – випарник; 3 – помпи; 4 – акумулятори; 1х – охолоджений холодоносіій; 1т – отеплений холодоносіій; 11 – аміак; 30х – холодний продукт; 30т – теплий продукт.**

Тут можливо заздалегідь «зарядити» два із трьох резервуарів, а в третій порожній зливати отеплений холодоносії після теплообмінних апаратів. У робочому ж циклі акумулятора кожний із резервуарів по черзі знаходиться в одному із таких станів:

- «зарядження», коли холодоносії в резервуарі охолоджується від температури на виході із теплообмінного апарата до температури, необхідної на його вході;

- «робота», коли холодоносії із «зарядженого» резервуара подається в технологічні апарати;

- «очікування», коли резервуар заповнюється отепленим холодоносієм із технологічних апаратів.

Наприклад, коли резервуар після закінчення стану «робота» випорожниться повністю, переключення системи вентилів та pomp переводить його у стан «очікування» і т. д.

Автоматизована система керування холодильної системи регулює роботу pomp, вентилів з електроприводом за сигналами регуляторів температури у резервуарах, системи термометрів, трипозиційних сигналізаторів рівня холодоносія у резервуарах, сигналізаторів тиску у трубопроводах, а також приладів ручного керування. Відповідний алгоритм керування розроблено до рівня електронної інтегральної схеми (мікропроцесора). Нерівномірність температури холодоносія, що подається із «зарядженого» акумулятора-резервуара, може виникнути за рахунок стратифікації холодоносія по висоті резервуара. Але якщо резервуар теплоізолюваний ззовні, а внутрішня стінка резервуара виготовлена із теплопровідного матеріалу, то за рахунок природної конвекції температура холодоносія вирівнюється по всьому об'єму.

Кількість резервуарів у схемі, наведеній на рис. 4, може бути збільшена, що надає низку технологічних переваг, але збільшує необхідну кількість pomp, вентилів тощо. Необхідні об'єми акумуляторів (у схемах на рис. 2.2-2.4) розраховуються, виходячи з найбільш напруженого плану виробництва, витрат холодоносія протягом доби, гідравлічних характеристик контурів його циркуляції, характеристик теплообмінних апаратів тощо. Але заздалегідь ясно, що такі об'єми будуть досить великі і це є істотним недоліком.

### 2.3 Технологія акумуляції холоду шляхом наморожування льоду на поверхні випарника

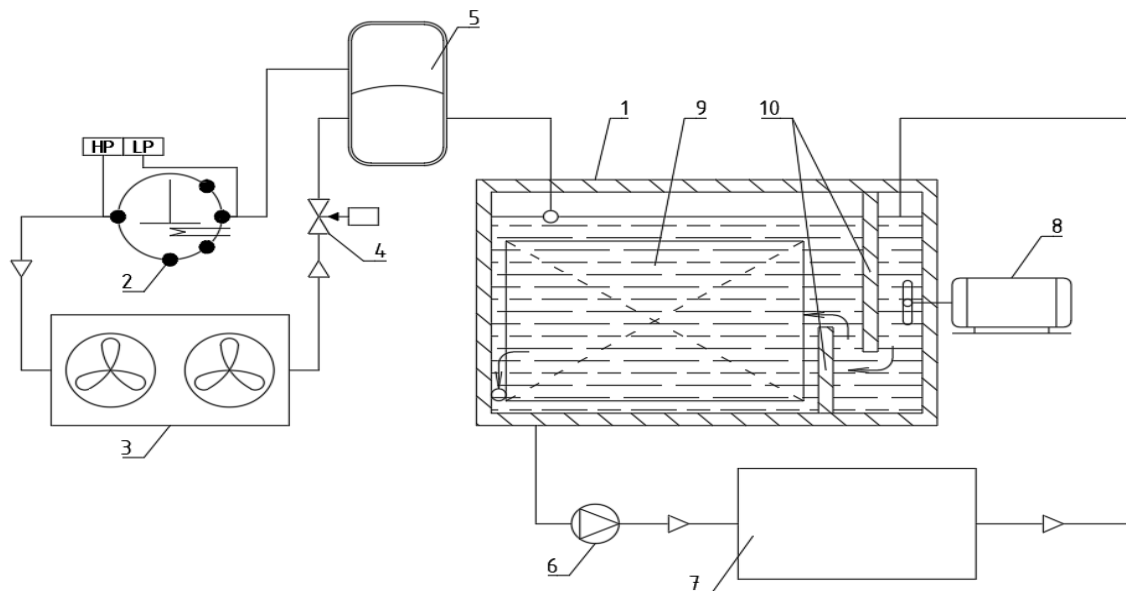
Розглянемо технологію акумуляції холоду із наморожуванням льоду на поверхні випарника холодильної машини, у цьому випадку наморожування шару льоду на теплообмінній поверхні випарника товщиною 20...40 мм приводить до зменшення коефіцієнта теплопередачі в 2...2,5 рази та зниження температури кипіння холодоагенту<sup>10</sup>. Зниження ж температури кипіння

---

<sup>10</sup> Холодильні машини та установки. Дипломне проектування: навчальний посібник / О.В. Петренко, В.О. Потапов, Д.П. Семенюк та ін. – Харків: ХДУХТ, 2019. – С. 128.

холодоагенту на  $1^{\circ}\text{C}$  у діапазоні  $-10\dots-20^{\circ}\text{C}$  приводить до зниження холодопродуктивності та відповідно збільшення витрат електроенергії на виробництво холоду до 2%.

Ця технологія застосовується для отримання крижаної води та накопичення запасу льоду (при явно виражених короткочасних піках теплових навантажень споживача). Крижану воду отримують за допомогою занурювальних випарників (рис. 2.5).



**Рисунок 2.5 - Система охолодження з панельним льодоакумулятором:**

1 – бак акумулятора; 2 – компресор; 3 – конденсатор; 4 – регулюючий вентиль; 5 – елімінатор рідини; 6 – насос; 7 – охолоджувач; 8 – електродвигун мішалки; 9 – панель випарника; 10 – перегородка

Випарник занурений у воду та забезпечує її охолодження, інтенсивність якого посилюють за допомогою мішалки або барботажу повітря. На випарнику проводиться наморожування льоду. Лід може наморожуватися на випарнику у значній кількості під час знижених теплових навантажень. При пікових навантаженнях лід тане, забезпечуючи додаткові можливості охолодження установки. В установках із занурювальним випарником при збільшенні товщини льоду холодильна машина працює на нижчі температури кипіння, що знижує її продуктивність. До того ж інтенсивність танення льоду нижча. При пікових навантаженнях спостерігається підвищення температури води на виході залежно від температури вхідної води.

До настання пікового навантаження на поверхні випарника холодильної машини наморожується шар льоду, що плавиться в період пікового навантаження. В описаний акумулятор холоду на базі випарника панельного типу з площею поверхні  $30\text{ м}^2$ . При товщині наморожування льоду  $40\text{ мм}$ , масі льоду намороженого  $1\text{ т}$  час наморожування становить  $3,8\text{ год}$ , температура води на виході з випарника  $+1^{\circ}\text{C}$ , ємність водяного бака  $2,51\text{ м}^3$ . Питома теплова

навантаження становить середньому  $1337 \text{ Вт/м}^2$ , коефіцієнт тепловіддачі –  $300 \dots 800 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ .

Льодоакумулятори, що застосовуються в даний час мають такі основні недоліки:

- наморозування льоду здійснюється на поверхні випарника, що збільшує її термічний опір, знижує температуру кипіння холодоного агенту і підвищує витрати електроенергії на акумулювання холоду;

- зберігання в ряді випадків льоду на поверхні випарника значно збільшує металоємність і масу акумуляторів;

- використання льоду з температурою плавлення  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  у випадках, коли необхідна температура холодоносія значно вище (наприклад, в системах кондиціонування повітря, де споживається вода з температурою  $8 \dots 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ), викликає перевитрату електроенергії, призводить до додаткових капітальних затрат на теплоізоляцію обладнання;

- низькі швидкості плавлення льоду і обмежена теплообмінна поверхня при розрядці льодоакумуляторів призводить до змін температури холодоносія при пікових теплових навантаженнях.

Незважаючи на ці недоліки, акумулятори з наморозуванням на поверхні випарника використовуються в ряді обладнання, наприклад в установках для охолодження молока при транспортуванні.

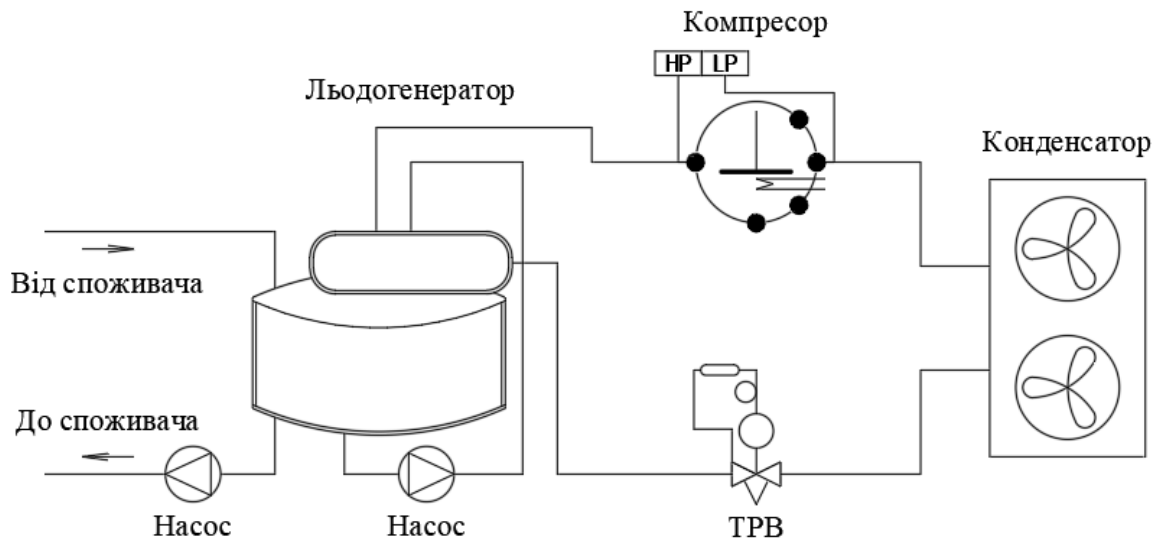
#### 2.4 Технологія акумуляція холоду льодяною сумішшю.

У разі застосування акумуляторів холоду із льодоводяною сумішшю лід виготовляють за допомогою льодогенератора та завантажують в акумулятор холоду (рис. 2.6).

Поверхня теплообміну льоду в цьому способі значно більша, ніж в акумуляторах з накопиченням льоду на поверхні випарника, акумуляція холоду відбувається при постійній температурі кипіння холодоагенту в льодогенераторі. У роботі запропоновано застосування «лускатого» льоду<sup>11</sup>. За твердженням авторів, важливою перевагою акумуляторів холоду з лускатим льодом є відбір води постійної температури  $+1^\circ\text{C}$  навіть при піковому навантаженні. Коефіцієнт теплопередачі теплообміннику охолоджувача при застосуванні пневматичної циркуляції води досягає  $580 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ . Для отримання 1 т льоду використовується бак об'ємом  $4 \text{ м}^3$  [3].

---

<sup>11</sup> . Рідкий лід та холодильні технології: навчально-методичний посібник / В. М. Кухаренко, – Харків, ХПІ : 2019. – С. 78.



**Рисунок 2.6 - Схема холодильної системи з льодогенератором**

Однак недоліком акумуляторів з льодоводяною сумішшю є необхідність перемішування цієї суміші та низька температура кипіння холодильного агента, що знижує показники роботи холодильних машин.

У літературі описані різні методи підвищення ефективності акумуляторів холоду з льодяною сумішшю, наприклад, зрошення генератора холоду циркулюючою водою, барботаж повітря в акумуляторах, розміщення випарника льодогенератора в баку акумулятора та ін.

Негативну роль у разі використання акумуляторів холоду «вода-лід» відіграє й кінетика танення льоду, зумовлена по-різному спрямованими діями градієнта температур і піднімальної архімедової сили, обумовленою аномальною залежністю густини від температури. Акумуляований у такий спосіб холод складно використати повністю при різкозмінній у ньому потребі. Це виражається в тому, що не вдається стабілізувати температурний рівень крижаної води та тим самим гарантувати охолодження рідин і продуктів до необхідної температури.

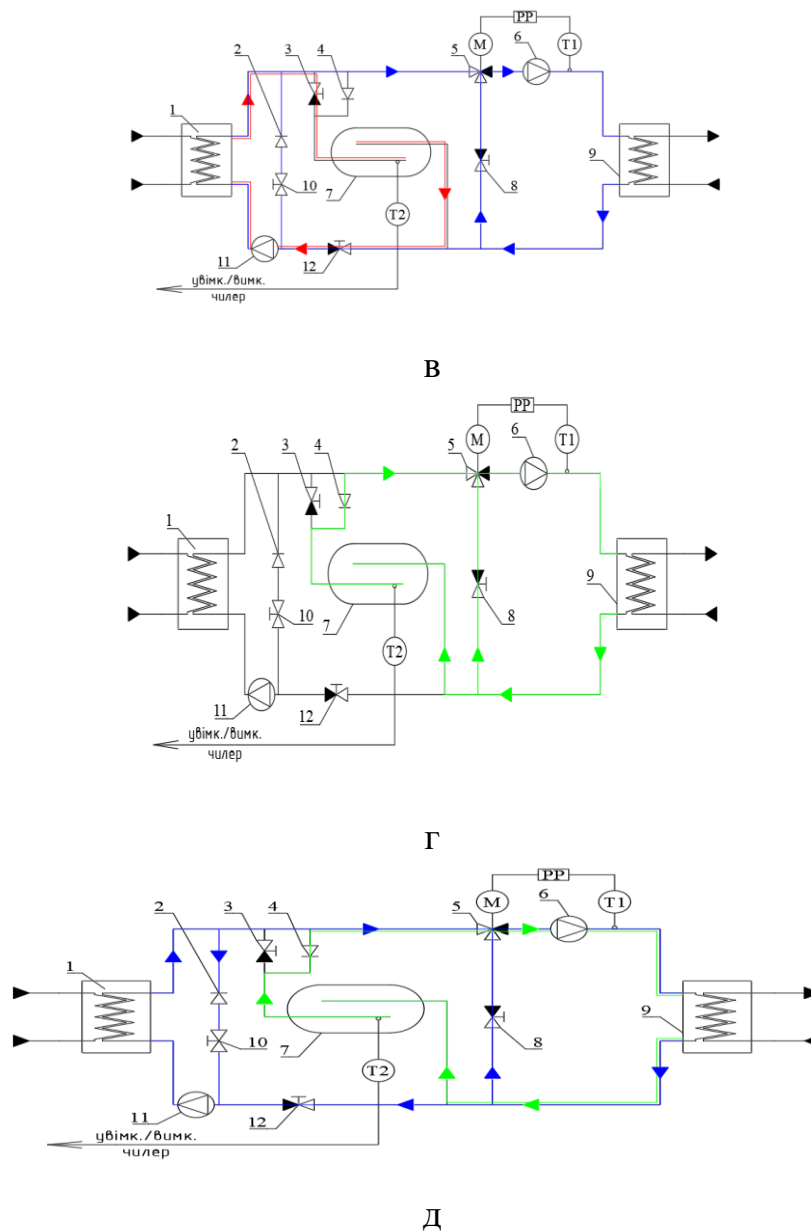
## 2.5 Технологія акумуляція холоду з використанням капсул-заповнювачів

Ефективнішим є поєднання ємнісного та латентного способів акумуляції холоду з використанням проміжного холодоносія та капсул-заповнювачів. У цьому випадку лід в акумуляторі холоду не має безпосереднього контакту з рідиною, що охолоджується, а його утворення відбувається в поліетиленових капсулах-накопичувачах<sup>12</sup>. Цей акумулятор холоду є теплоізольованим резервуаром, що заповнюється такими капсулами. Капсули відливаються під тиском із поліетилену високої щільності та заповнюються рідинним розчином кристалогідратів.

<sup>12</sup>Сайт компанії «Cristopia» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.cristopia.com>.







**Рисунок 2.7 - Гідравлічна схема акумуляторів холоду:** а – накопичення холоду в акумуляторі; б – пряме охолодження; в – пряме охолодження та накопичення холоду в акумуляторі; г – розрядження акумулятора холоду; д – розрядка акумулятора холоду та пряме охолодження; 1 – теплообмінник водоохолоджувача; 5 – триходовий вентиль; 6, 11 – насоси; 7 – акумулятор холоду; 9 – теплообмінник кондиціонера

Схема складається з двох контурів – первинного і вторинного. Первинний контур служить для заряджання акумулятора холоду. У цьому контурі охолоджувальна рідина циркулює з постійною витратою і температурою, що змінюється. У вторинному контурі рідина, що охолоджує, циркулює з постійною температурою, але зі змінною витратою.

У теплообміннику (випарнику) водоохолоджувача (рис. 2.7, поз. 1) фреон випаровується і знижує температуру рідини, що охолоджує.

Насоси (6) і (11) забезпечують циркуляцію рідини за первинним та вторинним контурами. Регулювання витрати охолоджуючої рідини за вторинним контуром здійснюється триходовим вентиляем (5).

Робота системи включає 5 режимів.

Режим накопичення холоду в акумуляторі (рис.2.7, а)

У період, коли не потрібно охолоджувати навантаження (в ВКВ – приміщення), працює лише первинний контур. Температура рідини, що охолоджує, знижується до температури, меншої точки кристалізації заповнювача в капсулах. Фазовий стан заповнювача змінюється, абсорбується енергія охолодження. У цьому режимі працює тільки насос (11), відкриті клапани (3) та (12), а триходовий вентиль (5) повністю закритий.

У міру кристалізації коефіцієнт теплопередачі поступово зменшується і температура рідини, що охолоджує, знижується. Зниження температури характеризує закінчення циклу заряджання. За встановленої температури термостат Т2 відключає холодильну машину.

Режим прямого охолодження (рис. 2.7, б).

У разі, коли акумулятор холоду заряджений, а навантаження не перевищує настановної продуктивності водоохолоджувача, реалізується режим прямого охолодження. Вентиль (3) закритий, регулювання продуктивності здійснюється триходовим вентиляем за температурою охолодженої рідини. Подача рідини по контуру здійснюється насосами (6) та (11).

Режим прямого охолодження та накопичення холоду в акумуляторі (рис.2.7, в).

Цей режим використовується, коли потреба в холоді менша за продуктивність водоохолоджувача, а температура рідини вище заданої. У цьому режимі працюють насоси (6) та (11). Клапан (10) закритий. Накопичення холоду здійснюється через клапан (3) до спрацьовування термостату. Регулювання продуктивності проводиться триходовим вентиляем датчику Т1.

Режим розряджання акумулятора холоду (рис. 2.7, г).

Якщо необхідно провести регламентні та ремонтні роботи з чілером, використовується холод, накопичений в акумуляторі. У цьому режимі клапани (3), (10) і (12) закриті, компресор холодильної машини вимкнений і в теплообмінник кондиціонера надходить рідина, що охолоджується в акумуляторі холоду.

Режим розряджання акумулятора холоду та пряме охолодження (рис. 2.7,д).

При пікових навантаженнях, коли продуктивності водоохолоджувача недостатньо, акумулятор холоду вмикається на розрядку. Насоси (6) та (11) працюють, регулювання продуктивності здійснюється триходовим вентиляем (5).

Таким чином, для розглянутих холодильних систем з акумуляторами холоду «вода-лід» перспективним напрямом підвищення енергоефективності є пошук конструктивних рішень, направлених на усунення безпосереднього контакту льоду з рідиною, що охолоджує, та застосування речовин, здатних

змінювати свій фазовий стан у широкому інтервалі температур (як у плюсовому так і в мінусовому) та не змінювати фізичних та хімічних властивостей протягом багатьох робочих циклів.

## 2.6 Технологія акумуляції холоду з використанням евтектичних розчинів

На підприємствах торгівлі, холодильному автотранспорті, контейнерних перевезеннях, а також у побуті застосовують акумуляторні системи, що використовують теплоту плавлення евтектичних розчинів – евтектичні холодильні системи<sup>13</sup>.

Евтектичний лід виготовляють шляхом заморожування водних розчинів солей кріогідратної концентрації, органічних речовин та їхніх сплавів і сумішей у закритих металевих або пластмасових ємностях. Заморожені евтектичні розчини мають низьку постійну температуру плавлення – нижче 0°C (до мінус 80°C).

Прикладом перспективного застосування ЕХС є безмашинне охолодження із застосуванням АХ в ізотермічному холодильному транспорті для внутрішньоміських перевезень.

За кордоном цей вид охолодження широко розповсюджений, перш за все завдяки екологічній чистоті, зокрема фірма «Carrier Transicold» (Франція) пропонує серію установок з машинно-акумуляційним охолодженням «Vatna» для ізотермічних автофургонів об'ємом від 4 до 23 м<sup>3</sup> із температурою замерзання евтектичного розчину мінус 32°C. Установки призначені для перевезення морозива та швидкозаморожених продуктів і розраховані на 14 годин безперервної роботи при температурі навколишнього повітря 30°C<sup>14</sup>. Світовий лідер у виробництві евтектичних плит – фірма «FIT s.p.a.» з Італії – пропонує серії евтектичних плит моделей EBS, EFR і ES.

Транспортний засіб для перевезення заморожених продуктів має бути оснащений ізотермічною будкою та приєднаннями для холодильного агрегату, що підключається до евтектичних плит. Евтектичні плити, своєю чергою, встановлюються всередині ізотермічної будки на її стелі, що дозволяє підтримувати постійну температуру в усьому обсязі ізотермічного відсіку (рис. 2.8).

---

<sup>13</sup> Семенюк Д.П., Петренко О.В. Холодильное оборудование : учебник. – Х.: Світ книг, 2021. – С. 355, ISBN 978-966-2678-69-7

<sup>14</sup> Сайт компанії «Carrier Transicold» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <[www.carriertransicoldeurope.com](http://www.carriertransicoldeurope.com)>.



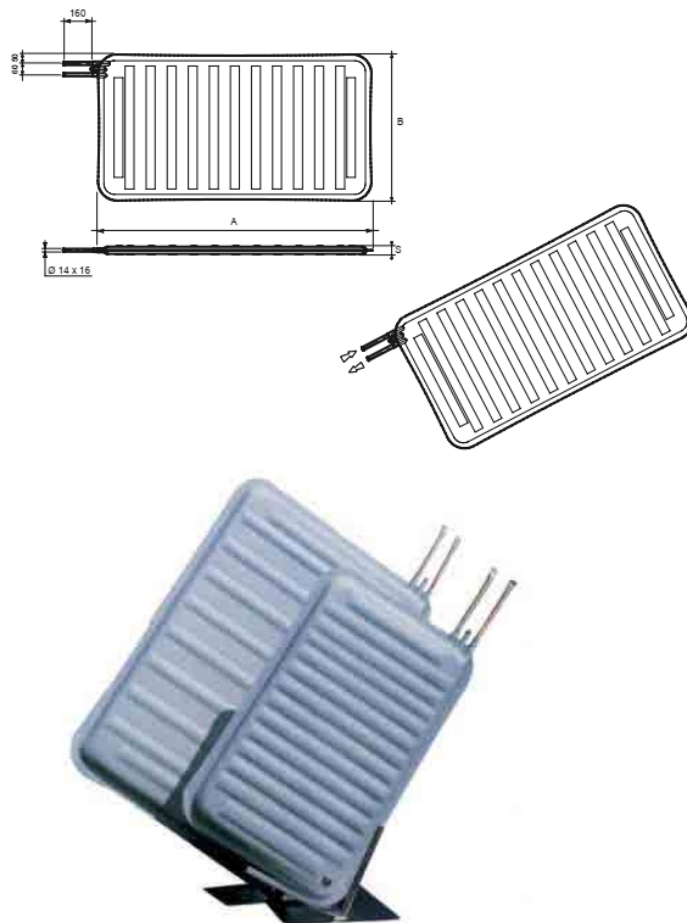
**Рисунок 2.8 - Приклад монтажу евтектичних плит в рефрижераторному транспорті**

Евтектична плита EFR складається з двох холодноштампованих листів сталі, спаяних між собою контактним електричним зварюванням, між якими прокладено змієвиковий випарник. Зовнішня поверхня плит покрита тонким шаром цинку, напилення якого виконується спеціальним роботом. Порожнина плити заповнена евтектичним розчином, точка замерзання та плавлення якого має певне постійне значення. Змієвиковий випарник охолоджує евтектичний розчин до повного замерзання (рис. 2.9).

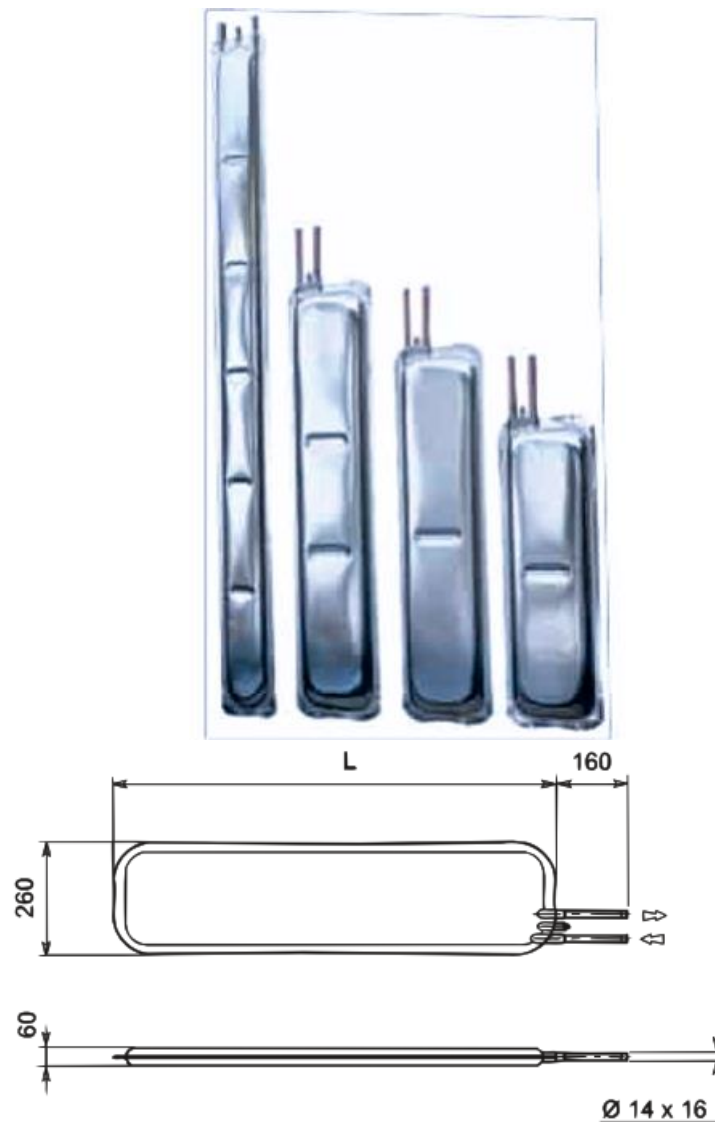
Щоб забезпечити коректну роботу евтектичної плити необхідно, щоб замерзання розчину проходило від її периферії до центра. Розташований особливим чином змієвик і зовнішні фітинги контуру дозволяють задати фреону потрібний напрямок і вирішити це завдання.

Для монтажу евтектичних плит рекомендується використовувати спеціальне кріплення, яке включає профілі з нержавіючої сталі і набір болтів і гайок, а також спеціальні прокладки з протиковзної гуми.

Серія EBS повністю виконана з нержавіючої сталі та має конструкцію, аналогічну моделі EFR. Основною відмінністю моделей серії EBS від плит серії EFR, крім матеріалу виконання, є їх подовжена форма, що дозволяє використовувати їх у сфері «торгівлі з коліс» (різні автолавки), а також у інших випадках, де допускається контакт з продуктами харчування, наприклад вітрини для охолодженої чи замороженої продукції тощо (рис. 2.10).



**Рисунок 2.9 - Загальний вигляд евтектичної плити EFR**

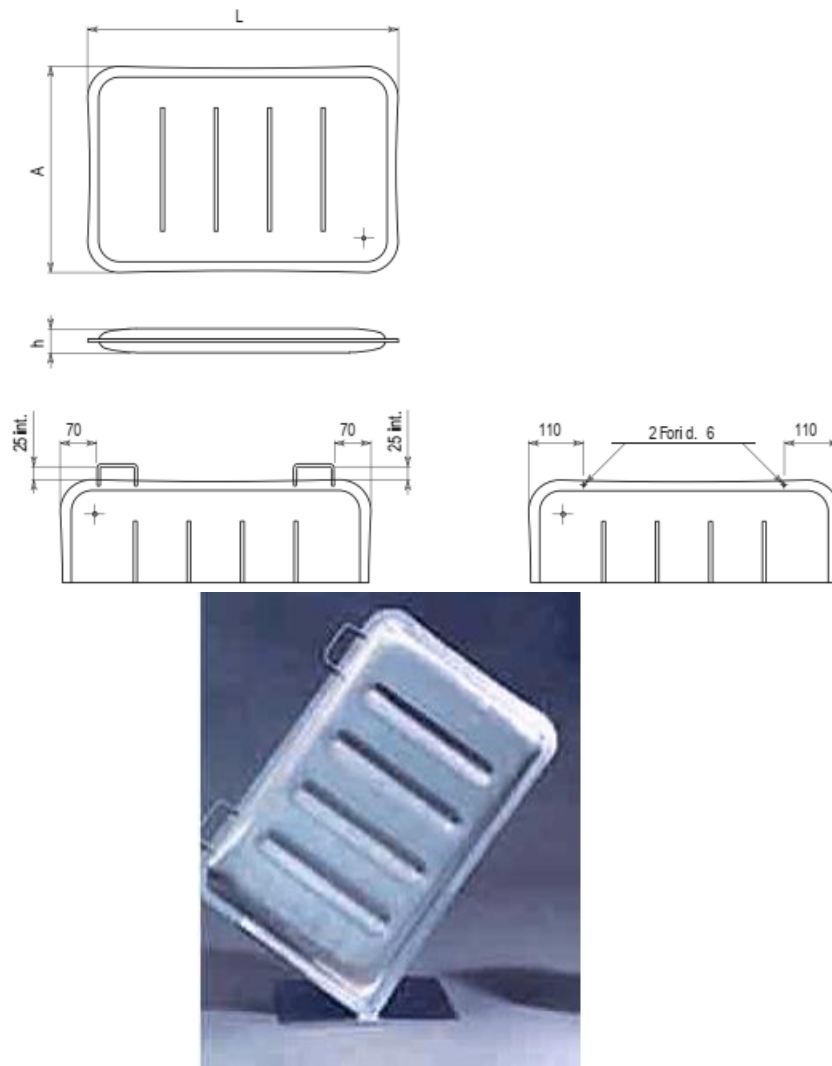


**Рисунок 2.10 - Загальний вигляд евтектичної плити серії EBS**

Серія ES також повністю виповнена з нержавіючої сталі та конструктивно відрізняється від серій EFR та EBS тим, що у неї відсутній змієвик (рис. 2.11).

Таким чином, на відміну від EFR та EBS, вона не може підключатися до холодильного агрегату та повинна заморожуватися у низькотемпературній холодильній камері. Будучи портативними акумуляторами холоду, плити серії ES можуть використовуватися для підтримки потрібного температурного режиму в будь-яких ізотермічних камерах для зберігання, перевезення, роздрібної торгівлі тощо, будь то кузов автомобіля, катер, візок для торгівлі морозивом або камера зберігання продукції.

Комбіновані технології акумуляції холоду (рефрижераторні засоби підвезення для забезпечення потреб військ Збройних Сил України).



**Рисунок 2.11 - Загальний вигляд евтектичної плити серії ES**

У з'єднаннях (частинах) Сухопутних військ Збройних Сил України для підвезення і короткочасного зберігання м'яса та інших швидкопсувних продуктів у особливий період використовуються<sup>15</sup>: автомобіль-рефрижератор – ЛуМЗ-890Б; причепи-рефрижератори – ЛуМЗ-853Б і ПР-0,6. Причеп-рефрижератор ПР-0,6, крім того, виконує ще одну функцію – заряджання (заморожування) 28 зероторів з 0,5%-м водним розчином хромпіку, які призначені для охолодження контейнерів ізотермічних КІ-50. Автомобіль-рефрижератор ЛуМЗ-890Б може використовуватися як самостійно, так і у складі автопоїзда АР-1 (у комплекті з причепом-рефрижератором ЛуМЗ-853Б), а холодильна установка може бути змонтована на зовнішній або внутрішній стороні передньої стінки кузова-фургона.

Кузов автомобіля-рефрижератора ЛуМЗ-890Б суцільнометалевий, в якості ізоляції використовується пінопласт. Кузов розділений на два відділення.

<sup>15</sup> Сапіга Р.І., Задерієнко С.І., Яковлев М.Ю., Неуров І.В. Технічні засоби підвезення і зберігання продовольства та води: Навчальний посібник. – Львів: АСВ, 2009. – С. 48.

У передньому відділенні розміщується холодильна машина, у вантажному відсіку є 12 гаків для підвішування напівтуш, а на підлозі укладені дерев'яні грати для укладання замороженого м'яса навалом.

Автомобіль-рефрижератор ЛуМЗ-890Б складається з трьох основних частин: бази монтажу автомобіля ЗИЛ-130, ізотермічного кузова, холодильної машини АР-4, що працює автономно від бензинового двигуна, або від електродвигуна підключеного до зовнішньої електромережі напругою 220/380 В. Кузов автомобіля-рефрижератора суцільнометалевий, зварний із вантажним теплоізолюваним відсіком і машинним відділенням. Він встановлюється на шасі автомобіля і кріпиться до рами за допомогою драбин. Вантажний відсік герметично закривається позаду утепленими дверима за допомогою ексцентрикового замка, який при необхідності може бути опломбований. Вантажний відсік має гаки для підвішування м'ясних туш і підлогові грати. Машинне відділення розташоване в передній частині кузова і має двоє бічних дверей. Кузов має металевий каркас, утеплений пінопластом і фанерований зовні тонколистовою сталлю, а зсередини – оцинкованою сталлю. Наявність дерев'яних брусів у конструкції каркаса, до яких кріпиться внутрішнє облицювання, виключає безпосередній контакт її із зовнішнім металевим покриттям і утворення «теплових містків», що приводять до збільшення коефіцієнта теплопередачі кузова. Захист теплоізоляції підлоги від зволоження виконаний так, що шви пропаяні усередині облицювання харчовим оловом на висоту 250 мм. Холодильна машина АР-4 змонтована в машинному відділенні і призначена для автоматичної підтримки у вантажному відсіку температури від -15 до +4°C при перевезенні заморожених і охолоджених вантажів. Холодильна машина складається з наступних елементів: компресора, конденсатора, ресивера, теплообмінника, фільтра-осушувача, терморегулювального вентиля (ТРВ), повітроохолоджувача, приладів автоматики (реле тиску і двох реле температури) і контрольно-вимірювальних приладів (двох манометрів).

Розглянемо конструктивні особливості холодильної системи. Компресор ФВ-6 – фреоновий вертикальний не прямоточний, двоциліндровий, холодовиробнича потужність 7500 Вт. Привод компресора під час роботи на стоянці – від бензинового двигуна або від електродвигуна, за наявності мережі змінного струму; під час руху автомобіля – від бензинового двигуна. Конденсатор – ребристо-трубний з примусовою циркуляцією повітря від чотирилопатевого вентилятора. Ресивер – вертикального типу циліндричної форми.

Теплообмінник – змійовикового типу ізолюваний азбестовим шнуром. В якості поглинача вологи в фільтрі-осушувачі використовується силікагель. Терморегулювальний вентиль ТРВ-7М із зовнішнім зрівнюванням. Повітроохолоджувач виконаний у вигляді трисекційної, змійовикової батареї з пластинчастими ребрами з латуні і примусовою циркуляцією повітря від чотирилопатевого вентилятора. Повітроохолоджувач з щитом огорожі, вентилятором і ТРВ змонтований на передній стінці вантажного відсіку.



Генератор служить для заряджання акумулятора, що живить ланцюг управління холодильної машини напругою 12 В при її роботі від бензинового двигуна. Прилади автоматики складаються з двоблокового реле тиску для заисту компресора шляхом його зупинки, та двох реле температури марки РДА-3. Два манометри показують тиск кипіння і конденсації фреону.

Щит управління роботою холодильної машини розташований у лівій частині машинного відділення. Холодильна машина має два електричних ланцюги управління з напругою живлення 220 В – при роботі від електродвигуна і 12 В – при роботі від бензинового двигуна.

Причип-рефрижератор ЛуМЗ-853Б має аналогічну будову з автомобілем-рефрижератором ЛуМЗ-890Б і відрізняється базою монтажу і вантажопідйомністю. Причип-рефрижератор ПР-0,6 призначений для транспортування і зберігання швидкопсувних продуктів у польових умовах, а також для заморожування евтектичного розчину в зероторах, необхідних для охолодження ізотермічних контейнерів КІ-50.

Причип-рефрижератор ПР-0,6 складається зі спеціального кузова-фургона, змонтованого на шасі двовісного низькорамного причепа 2-ПН-2М. Кузов-фургон має два відсіки: холодильну камеру і машинне відділення. Холодильна камера є суцільнозварною конструкцією з листової іржостійкої сталі. Порожнина між зовнішніми і внутрішніми стінками каркаса заповнена пінопластом. Усередині холодильної камери змонтовані дві стельові і чотири пристінні батареї акумуляції, що є ємкостями, звареними з іржостійких гофрованих сталевих листів. У батареях знаходяться змійовикові випарники холодильних машин. Їх місткість заповнена евтектичним розчином: натрій азотнокислий  $\text{NaNO}_3$  – 35,8%, селітра калієва  $\text{KNO}_3$  – 6,3%, натрію силікат  $\text{NaSiO}_3$  – 0,5%, натрій азотисто-кислий  $\text{NaNO}_2$  – 0,5%, вода  $\text{H}_2\text{O}$  – 57%. Крім того, можуть бути використані й інші суміші речовин. Наприклад, хлористого натрію, калію або кальцію з відповідними антикорозійними інгібіторами. У нижній частині холодильної камери, на правій і лівій стінках, змонтовані дві касети, в які через невеликі дверцята встановлюються по 14 штук зероторів, заповнених 0,5%-й розчином хромпіку. Після заморожування розчину в зероторах їх використовують для забезпечення температурного режиму при зберіганні м'яса в ізотермічних контейнерах КІ-50. Зеротори є плоскими прямокутними банками місткістю три літри кожна. У торцевій стороні банки зроблений заливний отвір, що герметично закривається різьбовою металевою заглушкою. У центрі площини банки є крізний отвір для кріплення зеротора на кришці контейнера. У машинному відділенні ПР-0,6 змонтовані два герметичних низькотемпературних компресорно-конденсаторних агрегати холодовиробничою потужністю по 1625 Вт кожен. Для енергоживлення холодильних агрегатів, у разі відсутності зовнішнього джерела, служить бензиновий електричний агрегат АБ-8-Т/230М або АБ-8-Т/400. За наявності зовнішньої електромережі живлення здійснюється від неї. У машинному відділенні є щити управління й автоматичного захисту від перевантажень

струмів короткого замикання та автоматичного перемикавання напруги мережі живлення.

Контроль за процесом акумуляції холоду здійснюється за допомогою датчика реле (реле температури) TP-5, який кріпиться до бічної стінки машинного відділення, а його термічний патрубок знаходиться в гільзі усередині бічної акумуляційної плити. Холодильні агрегати працюють автономно, кожен від свого реле температури. Охолодження об'єму повітря в холодильній камері здійснюється від шести плит акумуляції із замороженим евтектичним розчином до температури  $-24^{\circ}\text{C}$  за рахунок кипіння фреону R-22 у змішувачах усередині плит. При цьому одночасно заморожується 0,5%-й розчин хромпіку в 28 зероторах, установлених у касетах. При пониженні температури повітря в холодильній камері до  $-18^{\circ}\text{C}$  вимикаються холодильні агрегати й охолодження здійснюється за рахунок акумуляції холоду – танення (тепло поступає через стінки холодильної камери від зовнішнього середовища) евтектичного розчину в плитах акумуляції. Підвищення температури повітря до  $+4^{\circ}\text{C}$  у холодильній камері відбувається протягом трьох діб. Повторне заряджання (заморожування) плит триває близько 10 годин. При досягненні евтектичним льодом температури  $-24^{\circ}\text{C}$  на щиті управління спалахує сигнальна лампа, що вказує на вихід у робочий режим, тобто камера підготовлена до завантаження, транспортування і зберігання швидкопсувних продуктів.

## Висновки за розділом 2

За результатами проведеного дослідження можна зробити наступні висновки:

- для систем акумуляції холоду, які працюють за технологією вода-лід перспективним напрямом підвищення їхньої енергоефективності є пошук конструктивних рішень, направлених на усунення безпосереднього контакту льоду з рідиною, що охолоджує, за рахунок використання додаткових елементів заповнених речовинами здатними змінювати свій фазовий стан у широкому інтервалі температур;

- для систем акумуляції холоду з евтектичними розчинами перспективним напрямом енергоефективного застосування є пошук речовин, які можна використовувати для акумуляторів холоду, здатних працювати в широкому температурному режимі з багаторазовою термоциклічністю;

- для комбінованих технологій акумуляції холоду перспективним напрямом енергоефективного застосування є використання евтектичних холодильних систем та холодильних систем з наморожуванням льоду на теплообмінних поверхнях.

Для забезпечення холодопостачання в польових умовах найбільш актуальним є використання комбінованої технології акумуляції холоду, яка потребує подальших детальних досліджень з пошуку оптимальних конструктивних рішень, нових евтектичних розчинів та параметрів роботи холодильних систем.

Також потребує дослідження проблема незалежного енергозабезпечення холодильних систем за рахунок використання альтернативних джерел енергії, що забезпечить їх безперебійну роботу та гарантуватиме зберігання харчової продукції в польових умовах.

#### Список використаних джерел за розділом 2

1. Thermal energy storage: G. Beckman and P. V. Gilli. Springer Verlag, ISBN 3-211-81764-6, 1984, X1 – 230 p.
2. Kreith F. Principles of Solar Engineering / F. Kreith, J. F. Kreider. – Hemisphere Publishing Corporation – Washington, London, DC: 1978. – 778 p.
3. Левенберг В.Д. Акумуляування тепла : монографія / В.Д. Левенберг, М. Р. Ткач, В. А. Гольстрем. – К. : Техніка, 1991. – 112 с.
4. Shah YT, editor. Thermal Energy: Sources, Recovery, and Applications. Boca Raton, FL, USA: CRC Press; 2018. – 888p.
5. Холодильні установки : підручник / І.Г. Чумак [та ін.] ; за ред. І. Г. Чумака. – 6-е вид., перероб. та доп. – Одеса : Пальміра, 2006. – 552 с.
6. Перспективні напрями розвитку холодильних систем з акумуляцією холоду / В.О. Потапов, О.В. Петренко, В.В. Золотарьов // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. пр. : в 2 ч. Ч. 2 / Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. – Харків, 2013. – Вип. 2.(18) – С.69-78.
7. <https://www.energy.gov/energy-storage-grand-challenge/energy-storage-grand-challenge>.
8. Бондарь Е.С. Энергозберігаючі системи кондиціонування повітря з акумуляцією холоду □Електронний ресурс□ / Е.С. Бондарь, П.В. Калугін. – Режим доступу : <http://www.sun-ice.com.ua/news/>.
9. Вторинні холодоносії □Електронний ресурс□ / – Режим доступу : <http://www.nio-holod.com.ua>.
10. Холодильні машини та установки. Дипломне проектування: навчальний посібник / О.В. Петренко, В.О. Потапов, Д.П. Семенюк та ін. – Харків: ХДУХТ, 2019. –176 с.
11. Рідкий лід та холодильні технології: навчально-методичний посібник / В. М. Кухаренко, – Харків, ХПІ : 2019. – 132 с.
12. Сайт компанії «Cristopia» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.cristopia.com>.
13. Семенюк Д.П., Петренко О.В. Холодильне обладнання : підручник. – Х.: Світ книг, 2021. – 633 с, ISBN 978-966-2678-69-7.
14. Сайт компанії «Carrier Transicold» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <[www.carriertransicoldeurope.com](http://www.carriertransicoldeurope.com)>.
15. Сапіга Р.І., Задерієнко С.І., Яковлев М.Ю., Неуров І.В. Технічні засоби підвезення і зберігання продовольства та води: Навчальний посібник. – Львів: АСВ, 2009. – 92 с.

16. Бусленко М.П. Моделювання складних систем. – М.: Наука, 1978. – 399 с.
17. Месаровіч М., Такахара Я. Загальна теорія систем: математичні основи / Пер. з англ.; Під ред. С.В. Ємельянова. – М.: Мир, 1978. – 311 с.
18. Попирін Л.С. і ін. Автоматизація математичного моделювання теплоенергетичних установок. – М.: Наука, 1981. – 236 с.
19. Руднев В.Є. і ін. Формування технічних об'єктів на основі системного аналізу. – М.: Машинобудування, 1991. – 320 с.

### РОЗДІЛ 3.

## АНАЛІЗ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ХОЛОДИЛЬНОЇ ІНДУСТРІЇ УКРАЇНИ. МЕТОДИ ТА ОБЛАДНАННЯ ХОЛОДИЛЬНОЇ ІНДУСТРІЇ УКРАЇНИ

### 3.1 Перспективи впровадження теплових насосів в Україні

В умовах дефіциту, що загострюється, і зростання цін на енергоносії, внаслідок війни з боку Росії, проблема енергозбереження для економіки України в цілому і для її житлово-комунального сектору зокрема стає дуже актуальною.

Відомо, що житлово-комунальне господарство (ЖКГ) є найважливішою соціальною галуззю, де функціонують тисячі підприємств та організацій, експлуатується майже 25% основних фондів країни, зайнято близько 7% працездатного населення та використовується близько 26% паливно-енергетичних ресурсів України. У той же час ця галузь економіки є найбільш технічно відсталою з цілою низкою проблем, що все загострюються. Середня витрата теплової енергії, що використовується для опалення житлового фонду, перевищує 600 кВт•год/рік на 1 м<sup>3</sup>, що у 4-5 разів вище, ніж аналогічні показники для таких «холодних» країн як Норвегія, Швеція та Фінляндія.

Альтернативою енергозатратним теплогенераторам, що традиційно використовуються для забезпечення теплом децентралізованих споживачів, можуть служити теплові насоси (ТН), що є енергозберігаючим екологічно чистим технологічним обладнанням, впровадження якого дозволяє не тільки зменшити витрати органічного палива на отримання теплоти, а й суттєво знизити забруднення навколишнього середовища.

Основні матеріали досліджень. Для оцінки енергетичної ефективності ТН використовується коефіцієнт перетворення (COP), що представляє собою відношення теплоти, що віддається тепловому споживачеві, до витраченої роботи приводу компресора, практично перебувають у межах 1,5-6,0. Це означає, що у одиницю витраченої електричної енергії, тепловому споживачеві передається у 1,5-6 разів більше теплової енергії. Ефективність теплових насосів останніми роками значно зросла внаслідок змін, внесених у конструкцію компресорів, теплообмінників та мікропроцесорних систем управління. Застосування двоступінчастого стискування і впорскування в компресор рідкого фреону дозволяє суттєво збільшити діапазон тисків випаровування та конденсації, тим самим значно підвищуючи максимальну температуру теплоносія (аж до 70°C) при температурах навколишнього середовища до -20°C. Джерелами низькопотенційної теплоти є атмосферне повітря природних водойм, ґрунт, ґрунтові води, сонячна радіація, а також джерела теплоти, що виникли в результаті діяльності людини, такі, як вода із

систем охолодження обладнання або технологічних процесів, витягне повітря систем вентиляції, очищена вода станцій аерації та інші вторинні низькопотенційні енергоресурси (ВЕР). Теплонасосні установки є також багатофункціональними, що використовуються в тому числі в системах кондиціювання (одночасно виробляють теплоту і холод), мобільними, відносно простими у виготовленні та експлуатації.

Дослідження, виконані в деяких наукових установах базуються при оцінці енергетичної ефективності різних систем тепlopостачання на понятті коефіцієнта використаної первинної енергії, показують, що при раціонально організованій системі на базі теплових насосів із середнім коефіцієнтом перетворення 3,5 витрат палива можуть бути зменшені в порівнянні з великими опалювальними котельнями в 1,2-1,8 разів, у порівнянні з дрібними котельними та індивідуальними теплогенераторами – у 2-2,6 рази та в порівнянні з електронагрівачами – у 3-3,6 рази за нинішніх тарифів на енергоносії. Враховуючи той факт, що за прогнозами вартість теплових насосів може збільшуватися не більше ніж на 2-3% на рік, а тарифи зростатимуть порівняно з рівнем інфляції (порядку 10-15% на рік), терміни окупності можуть суттєво знизитися. рекуперацією теплоти низькопотенційних скидних енергопотоків та використанням теплонасосного обладнання для кондиціювання повітря в приміщеннях у літню пору терміни окупності можуть бути менше 2-3 років.

Досвід експлуатації мільйонів теплонасосних установок у різних країнах світу підтверджує, що на сьогодні вони, без сумніву, є альтернативою енергорозтратним теплогенераторам, які традиційно використовуються в децентралізованих системах тепло- та холодопостачання житлово-комунального сектору. На жаль, якщо в розвинених країнах, що розвиваються, рахунок працюючих ТН ведеться на мільйони або сотні тисяч, в Україні працюють одиничні установки, створені в основному на елементній базі холодильного обладнання, що ввозиться з країн Західної Європи.

Аналіз ситуації в економіці та ЖКГ України показує, що є колосальні невикористані потенційні можливості заощадження дорогого органічного палива та зниження забруднення довкілля продуктами згоряння та/або технологічними скиданнями при впровадженні теплонасосних установок різного функціонального призначення в областях, де це впровадження є доцільним. Областями найбільш раціонального застосування є:

- застосування ТН у житлово-комунальному секторі для гарячого водопостачання та опалення будівель;

- застосування ТН у системах створення оптимального мікроклімату у великих громадських будівлях, спортивних та кіноконцертних комплексах, де поряд з проблемами термостатування та утилізації теплоти скидних повітряних та водяних потоків створюються умови, що виключають умови конденсації вологи на металевих та залізобетонних будівельних конструкціях;

- застосування ТН у різних технологічних процесах промисловості та сільського господарства.

Виконаний короткий аналіз проблем та можливостей використання теплонасосної технології перетворення низькопотенційної теплоти дозволяє зробити певні висновки.

Теплонасосна технологія перетворення низькопотенційної природної енергії або теплоти вторинних низькотемпературних енергоресурсів у високопотенційну теплову енергію, придатну для практичного використання, є не черговою модернізацією традиційних енергоджерел, а впровадженням щодо нового, прогресивного, високоефективного та екологічно чистого способу отримання теплоти.

На сьогоднішній день для вирішення проблем енергозбереження ТН є найперспективнішими серед джерел нетрадиційної енергетики завдяки можливості черпати відновлювану енергію з навколишнього середовища.

У світі експлуатуються мільйони теплонасосних установок різного функціонального призначення, забезпечуючи колосальну економію первинних енергоресурсів та значне зниження емісії CO<sub>2</sub> та інших шкідливих викидів в атмосферу.

Україна суттєво відстає від країн світової спільноти як з виробництва, так і щодо запровадження ТН у різні галузі економіки. В Україні немає промислового виробництва ТН, впроваджені установки виробляються, як правило, у поодиноких примірниках, але навіть за своїх не оптимальних параметрів підтверджують переваги та унікальність застосування ТН як ефективних енергозберігаючих джерел теплоти у різних галузях економіки.

Без державної підтримки, що полягає у належному фінансуванні програм створення вітчизняних ТН, конкурентоспроможних щодо імпорتنих аналогів, без запровадження спеціальних тарифів на електроенергію для користувачів ТН, без пільг та вигідних кредитів при купівлі, без зменшення ПДВ при ввезенні комплектуючих вітчизняними виробниками техніки проблеми впровадження ТН залишаться декларативними.

### 3.2 Застосування електрофізичних методів в холодильній індустрії

Одним із основних завдань продовольчого забезпечення країни є зниження втрат харчової сировини. У сфері переробки харчової сировини таяться невикористані можливості, які б служили додатковими резервами отримання продовольства. Ці резерви пов'язані з усуненням або зменшенням таких негативних явищ, що виникають при переробці, як втрата маси, порівняно низький вихід готової продукції, зниження її біологічної цінності та ін. Однак реалізувати ці можливості на основі традиційних методів обробки надзвичайно важко, оскільки ці методи у своєму розвитку наблизилися до природної межі досконалості.

Серед найважливіших тенденцій подальшого прогресу сучасної холодильної техніки помітна роль належить зменшенню енерговитрат при

отриманні штучного холоду і зниження втрат при його споживанні. Можна вважати, що традиційні напрями розв'язання цієї проблеми на сьогодні практично вичерпані. Для холодильної техніки та технології характерно порівняно повільне перебіг процесів, тепло- та масообміну, як в апаратах холодильних машин, так і при консервуванні холодом харчових продуктів. Основні напрями вирішення цієї проблеми – розробка методів та засобів, що інтенсифікують тепло- та масообмінні процеси як на стадії виробництва штучного холоду, так і на стадії його споживання; при цьому методи та засоби не повинні негативно впливати на якість холодильного консервування харчових продуктів.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває розробка систем охолодження з інтенсифікованим теплообміном, де енерговитрати на виробництво холоду значно менші. Так, зі зниженням температури кипіння холодоагенту в камерному обладнанні на 1 К через інтенсивне перетворення на поверхні теплообміну холодопродуктивність компресора зменшується приблизно на 4% при роботі його в умовах, близьких до стандартного режиму; приблизно стільки ж збільшується питома витрата електроенергії. Один з найбільш ефективних і можливих виходів із становища – застосування електротехнології.

Електротехнологія, як показала практика, порівняно з існуючими технологіями має низку переваг: електричне поле впливає безпосередньо на сировину біологічного походження та середовище без проміжної трансформації енергії, що дозволяє проводити тонке регулювання процесів; спрощується автоматизація у зв'язку з безінерційністю керування потоком заряджених частинок; скорочується споживання енергії; інтенсифікуються тепло- та масообмін в апаратах та технологічних процесах. Універсальність даної технології полягає в тому, що в природі немає таких середовищ і речовин, які б не піддавалися під дією електричного поля зарядці і не були носіями зарядів, тобто не піддавалися б силовому впливу поля. Силовий вплив поля на частинки може бути використаний у різних процесах, наприклад, при відділенні кедрових горіхів від дрібних домішок або пари холодоагенту від масляних включень в масловідділювачах холодильних установок. Інтерес до використання електротехнології особливо зріс останнім часом у зв'язку з настанням у низці країн енергетичної кризи та підвищенням вимог до охорони навколишнього середовища.

Використання енергетичних полів в умовах промислового виробництва – складне науково-технічне завдання, яке потребує вирішення низки питань, зокрема таких, як:

- виявлення областей виробництва, де економічно ефективно застосовувати електрофізичні методи з урахуванням раціонального поєднання їх із традиційними технологічними;

- дослідження комплексу властивостей продукту: електрофізичних, структурно-механічних, теплофізичних та інших та встановлення їх взаємозв'язків;



- дослідження процесів тепло- та масообміну в умовах використання нових концентрованих джерел енергії;
- розробка теоретичних основ розрахунку та конструювання апаратів для холодильної обробки харчових продуктів в енергетичних полях;
- комплексна оцінка якості виробів.

Одним із способів інтенсифікації тепломасообміну при холодильній обробці (охолодження, заморожування, розморожування, атмосферне та сублімаційне сушіння) є використання електроконвективного повітряного потоку.

У промисловості починають знаходити застосування морозильні апарати, які використовують сильні електричні поля для інтенсифікації процесів холодильної обробки харчових продуктів. Стає можливим використовувати електротехнологію при зберіганні заморожених продуктів.

Одним із напрямів електротехнології є електронно-іонна обробка (ЕІО). Електроантисептування харчових продуктів, один із видів ЕІО, дозволяє зберігати їх якість при холодильній обробці та зберіганні. Застосування електростимуляції дозволяє зберегти якість охолодженого м'яса, прискорити процеси його дозрівання, покращити консистенцію м'яса, уповільнити гідролітичні та окислювальні процеси у жировій тканині при заморожуванні туш у парному стані, а також знизити втрати маси при розморожуванні.

Використання мікрохвильового (надвисокочастотного, або, як його зазвичай називають, НВЧ) нагріву дозволяє значно інтенсифікувати технологічні процеси харчових виробництв, пов'язані з нагріванням продукції, наприклад такі, як розморожування та сублімація, а також розробити нові, зокрема комбінуючи НВЧ-нагрів із традиційними способами електропідведення. При НВЧ-нагріві зберігається якість продукції, а також покращуються санітарно-гігієнічні умови праці.

Перспективне застосування електротехнології в основних та допоміжних апаратах холодильних установок (конденсатори повітряного охолодження, масловідділювачі та ін.), що дозволяє підвищити ефективність їх роботи.

Утворення інею на поверхні теплообміну камерного обладнання суттєво впливає на умови його роботи: знижується інтенсивність теплообміну внаслідок появи додаткового термічного опору та погіршуються аеродинамічні характеристики апаратів. Використання електроконвективних явищ у роботі камерного обладнання дозволяє інтенсифікувати теплообмін та збільшити тривалість роботи камерного обладнання без розморожування.

До одного з видів електротехнології відноситься також кріорозподіл диспергованої сировини в електричному полі. Надалі у вітчизняній та зарубіжній практиці не припинялися роботи з використання поділу різних видів диспергованої сировини в електричному полі. Останнім часом увагу фахівців привернув кріорозподіл сировини біологічного походження в електричному полі, що дозволило розширити можливості застосування нових електрофізичних методів для скорочення втрат сировини та збереження якості харчових продуктів.

### 3.3 Енергозберігаючі технології на підприємствах торгівлі

Понад 50% витрат магазину посідає експлуатацію холодильного устаткування. Не дивно, що технічні рішення, які дозволяють знизити ці витрати, набувають сьогодні – за умов серйозної ринкової конкуренції – дедалі більшої актуальності. Розглянемо найефективніші технології енергозбереження в магазині, про те, яку економію вони дозволяють отримати і коли окупаються.

Сучасний рівень розвитку автоматизації надає широкі можливості для енергозбереження. Наведемо основні технології, які дадуть максимальний ефект у зниженні енергоспоживання магазину, при цьому мають низький термін окупності і можуть бути рекомендовані для повсюдного використання.

Енергозберігаюче фасадне скління. Установка фасадного скління на стелажні вітрини на сьогоднішній момент найпростіший та ефективніший спосіб зниження холодоспоживання та, у свою чергу, енергоспоживання обладнання. Принцип роботи простий: при стандартному виконанні стелажної вітрини близько 80% навантаження створює тепле повітря, що надходить у вітрину із торгового залу. Практично холодильні вітрини починають працювати на кондиціонування торгового залу. Установка скління дозволяє знизити, а в деяких випадках виключити надходження повітря робочий об'єм вітрини. Основна перевага скління – це можливість його встановлення у стандартне обладнання, тобто не лише на стадії реалізації об'єкта, а й під час експлуатації. При монтажі такого скління в торгове обладнання гарантовано суттєвий ефект зниження витрат на електроенергію, що споживається. Рішення із застосуванням гартованого скла є більш простим способом зниження холодоспоживання обладнання. У стандартну вітрину встановлюється рама, в периметрі якої розміщуються шибки. Саме скло не оснащується несучими конструкціями і має відносно легку вагу, за рахунок чого скління практично непомітно. Таке рішення дозволяє скоротити холодоспоживання вітрини на 30-40%. Використання даної технології не виключає попадання повітря у вітрину, тому що конструкція не має щільного прилягання до рами, а також гартоване скло не є ефективним утеплювачем. Рішення зі склопакетом застосовувалося в основному для низькотемпературного обладнання і віднедавна знайшло застосування на середньотемпературному. Конструкція зі склопакетом аналогічна склінню з загартованого скла з тією різницею, що склопакет максимально ізолює робочий об'єм вітрини від надходження теплих потоків повітря зовні з торгового простору, оскільки склопакет щільно прилягає до рами без зазорів і до того ж сам є ефективним утеплювачем. Використання склопакета для закриття стелажних вітрин дозволяє знизити холодоспоживання від 50 до 80%, а отже, суттєво зменшити потужність холодильного агрегату, конденсатора та об'єм монтажних матеріалів. Саме тому цю технологію можна назвати найефективнішою на сьогоднішній момент.

Функція плаваючого тиску конденсації. Дана функція дозволяє електронній системі керування автоматично коригувати параметри роботи

системи залежно від температури навколишнього середовища: чим нижча температура навколишнього середовища, тим навантаження на компресори менше і тим нижче енергоспоживання системи. Налаштування функції плаваючого тиску конденсації дозволяє заощаджувати до 20% енергоспоживання холодильної системи. Фактично окупність такого рішення настає протягом одного дня, оскільки для реалізації базової функції необхідні встановлення датчика зовнішнього повітря та включення функції у контролері.

Функція плаваючого тиску кипіння. Вона ґрунтується на машинному аналізі стану кожної вітрини або холодильної камери, підключеної до центральної холодильної машини. Такий аналіз проводить у автоматичному режимі система централізованого управління. На підставі отриманих даних про температуру всередині охолоджуваних об'ємів система змінює установку компресорів, підвищуючи тиск кипіння, якщо температура повітря у вітринах і камерах знаходиться на необхідному рівні. Відомо, що робота компресорів з вищим тиском набагато ефективніша в плані споживання електричної енергії.

Плавне регулювання продуктивності лідерного компресора. Суть цієї технології полягає у можливості максимально точно налаштувати продуктивність компресорів щодо потреб споживачів. У процесі роботи центральної холодильної установки навантаження на компресори постійно змінюється, адже в магазині багато споживачів, які працюють кожен на свій об'єм. Підібрати компресори так, щоб не виникало надлишків потужності при мінімальному навантаженні (наприклад, робота 5 вітрин з 60), неможливо, оскільки кількість компресорів на рамі агрегату, як правило, обмежена 4-5 шт. Стандартний супермаркет при цьому має близько 60 різних обсягів, що охолоджуються. Таким чином, при низькому навантаженні не може забезпечуватися стабільна робота компресорів, запуск компресора призводить до його відключення через нетривалий час та повторного включення на повне навантаження. Такий режим роботи призводить до надмірного споживання електричної енергії. Використання плавного регулювання із застосуванням перетворювача частоти дозволяє підлаштувати роботу компресорів щодо зміни навантаження. При мінімальному навантаженні може працювати один компресор на 50% продуктивності, а, наприклад, за середньої можлива робота одного компресора на 100%, а лідерного на 75%. Крім того, використання перетворювача частоти дозволяє форсувати двигун компресора понад 50 Гц, що, у свою чергу, збільшує продуктивність компресора за тих же встановлених потужностей. На сьогоднішній момент ця технологія дозволяє економити енергію та забезпечувати задану продуктивність холодильного агрегату [1].

Електронний терморегулюючий клапан (ЕТРВ). Використання ЕТРВ дозволяє підтримувати точне значення перегріву газу у випарнику за будь-яких змінних умов. У порівнянні, наприклад, з механічним терморегулюючим клапаном (ТРВ) електронний забезпечує постійну ефективну роботу випарника за рахунок точного заповнення його холодильним агентом, змушуючи повноцінно працювати всю теплообмінну площу. Існує два типи ЕТРВ: імпульсний, кроковий. Кроковий ЕТРВ за принципом дії схожий на

механічний, тобто діаметр прохідного отвору для подачі холодильного агенту змінюється в залежності від потреби, тільки для зміни діаметра використовується кроковий двигун. Імпульсний ЕТРВ є більш простою конструкцією. У даному ЕТРВ присутній дросельний отвір, який закривається та відкривається у процесі роботи. Подача холодильного агенту регулюється тривалістю циклу. Застосування ЕТРВ на стандартному об'єкті забезпечить близько 10-12% зниження споживання електроенергії в порівнянні з механічним за умови застосування контролера зі спеціальними алгоритмами управління ЕТРВ, що дозволяють забезпечити оптимальне заповнення випарника у всьому діапазоні навантажень та в комплексі з розглянутою функцією плаваючого тиску кипіння.

Адаптивне розморожування. Спеціальний електронний алгоритм, дозволяє електронній системі управління відстежувати зниження продуктивності кожного випарника та приймати рішення щодо необхідності включення режиму відтавання. Середньотемпературні торгові меблі – зниження на 31%. Середня кількість циклів відтаювань за добу 2,8 замість 4. Низькотемпературні торгові меблі – зниження на 46%. Середня кількість циклів відтаювань за добу 2,1 замість 4. Для реалізації цієї функції необхідні імпульсний ЕТРВ та система моніторингу.

Електронно-комутовані вентилятори (ЕС-технологія). ЕС-технологія – це інтелектуальна технологія, яка використовує інтегральну електронну систему керування, що дозволяє переконатися, що двигун завжди працює з оптимальним навантаженням. Виробництво холоду засноване на теплообміні повітря з холодильним агентом, при цьому на стандартному об'єкті є велика кількість вентиляторів, які працюють у режимі нон-стоп. В даний час широке застосування знаходять енергозберігаючі вентилятори в холодильних меблях. Встановлення вентиляторів з технологією ЕС дозволяє знизити енергоспоживання у понад три рази. Ефективним рішенням також можна назвати заміну енергоємних вентиляторів конденсатора на енергоефективні вентилятори, адже саме в даному теплообміннику відбувається утилізація тепла, відібраного від продукту, що охолоджується.

Таким чином можна зазначити, що використання енергозберігаючих технологій у сукупності дозволяє знизити енергоспоживання обладнання у порядку 39%. Для формату супермаркет площею 1000 м<sup>2</sup> це дозволяє заощадити близько 135 тис. кВт/год електроенергії на рік.

### 3.4 Застосування теплового насосу як перспективного обладнання для зниження енерговитрат при сушінні зернової продукції

У післяжнивний період важливим є зберігання сільськогосподарської продукції, особливо з урахуванням вологості. Зерно, що надходить на хлібоприймальні пункти, має підвищену вологість, що іноді досягає 25...30%, у зв'язку з чим воно непридатне для тривалого зберігання. З цієї ж причини знижується вартість зерна, що приймається на елеватор. Недостатне

просушування призводить до інтенсивного протікання біохімічних процесів у вологому зерні, де мікроорганізми, що швидко розмножуються, і хлібні шкідники, відбувається самозігрівання і псування продукції. Для збереження врожаю вологе зерно сушать до кондиційної вологості (14...16 %). За багаторічними статистичними даними, з розрахунку зниження вологості на 6% (з 20 до 14%) щорічно підлягає сушінню близько 45% валового збору. Сушіння є не тільки теплотехнічним, а й технологічним процесом, що впливає на властивості матеріалу, що прискорює процес дозрівання свіжоприбраного зерна, зберігає, а також збільшує схожість та енергію проростання насіння. Крім того, якщо зерно підсушене, продуктивність та якість продукції підприємств борошномельно-круп'яної промисловості підвищуються при зменшенні витрати електроенергії та зниженні зносу основного обладнання. У процесі сушіння вода видаляється за рахунок використаного тепла витраченої енергії. Сушіння є складним процесом, за участю комбінованого виробництва тепла та масопереносу. Сушіння – процес енергоємний, внаслідок необхідності подачі теплоти в матеріал. До того ж на підприємствах найчастіше працюють морально та фізично застарілі конструкції сушильних установок, які споживають велику кількість енергії (табл. 3.1).

Наведені дані вказують на необхідність енергозбереження у процесах сушіння. Сушіння може бути здійснене декількома способами:

- механічний – видалення вільної вологи з матеріалу шляхом фільтропресування або центрифугування;
- сорбційний – змішування на певний час вологого матеріалу з вологопоглиначем. Механічне та сорбційне зневоднення не супроводжуються зміною агрегатного стану вологи, що видаляється;
- тепловий – основний спосіб зниження вологості більшості матеріалів.

Таблиця 3.1

**Витрата теплоти при сушінні зерна пшениці**

Початкова волога, $w_0$ , %	Кінцева волога, $w_1$ , %	Кількість вологи, яка випаровується, $W$ , кг/год	Сумарні питомі затрати теплоти на випаровування 1 кг вологи при сушінні зерна пшениці, $\Sigma q$ , кДж/кг
16	11,81	1520,3	7531,7
18	12,82	1901,4	6022,1
20	14,0	2232,6	5128,7
22	15,36	2510,4	4561,2
24	16,92	2727,0	4198,9
26	18,69	2876,8	3980,3
28	20,63	2971,5	3853,4
30	22,84	2969,3	3856,3
32	24,8	3063,7	3737,4
34	26,8	3147,5	3637,9
36	28,8	3235,8	3538,7

Теплове сушіння може бути природним та штучним. У першому випадку використовується теплова енергія сонця, у другому – тепло, яке отримується за допомогою різноманітних технічних засобів. Тепло матеріалу, який сушать може бути передано різними способами: конвективним, кондуктивним (контактним), радіаційним. Можливе сушіння струмами високої частоти. Застосовуються також різні комбіновані способи: конвективний з кондуктивним, радіаційний з високочастотним та ін. Одним із способів, що дозволяють суттєво знизити експлуатаційні витрати процесу сушіння та отримати високоякісний продукт, є технологія сушіння з тепловим насосом. Поряд із сушінням використання теплового насоса виконує комплекс завдань, таких як зберігання, заморожування та кондиціонування повітря. Даний спосіб відомий понад двадцять років, проте не набув широкого поширення в промислових масштабах. Переваги сушіння з використанням теплового насоса: підвищення ефективності процесу сушіння; точний контроль температури, вологості та повітряного потоку; широкий діапазон умов сушіння; підвищення якості продукції. Для використання теплонасосної установки необхідно визначити її основні параметри, і вибрати джерело низькопотенційного тепла. Використанням теплового насоса на основі замкнутого циклу слугуватиме підвищенню ефективності процесу сушіння.

### 3.5 Холодильне та кліматичне обладнання з використанням теплової енергії

В реаліях сучасного стану нашої держави виникає велика потреба забезпечення функціонування холодильного та кліматичного обладнання з використанням альтернативних (нетрадиційних) джерел енергії. Найбільшої актуальності це питання набуває для забезпечення мобільним холодом в польових умовах. Холодильні машини з альтернативним джерелом успішно застосовують у районах з високими навантаженнями на систему електропостачання як альтернативу компресорним машинам.

До холодильних машин в яких для одержання холоду використовується теплова енергія належать парожекторні та абсорбційні холодильні машини. В них, по суті, реалізуються два цикли: прямий цикл, який перетворює теплову енергію у механічну, та зворотний цикл, що використовує цю енергію для одержання холоду. Як правило, у цих установках використовується тепло низького потенціалу, що сприяє їх використанню за наявності достатньої кількості зайвого та вторинного тепла.

В установках, які працюють за принципом абсорбції, холод утворюється за рахунок теплової енергії. При цьому теплову енергію отримують за допомогою безпосереднього спалювання палива (наприклад, природного газу), так і при утилізації. В останньому випадку може бути утилізовано теплову енергію, яка є побічним продуктом технологічного процесу.

Абсорбційна холодильна машина (АБХМ) – пароконденсаційна холодильна установка, у якій холодоагент випаровується за рахунок його поглинання (абсорбції) абсорбентом. Процес випаровування відбувається з поглинанням теплоти. Потім пари холодоагенту за допомогою нагрівання (зовнішнім джерелом теплової енергії) виділяється з абсорбенту і надходить у конденсатор, де рахунок підвищеного тиску конденсуються.

Одна з можливих областей застосування установок – будівлі з високими піковими навантаженнями на систему електропостачання. Витрати електроенергії на кондиціонування повітря становлять істотну частину загального електричного навантаження будівлі. При обмеженні максимальної електричної потужності використання АБХМ є добрим способом мінімізації або «згладжування» пікового електричного навантаження.

Застосовують також гібридні системи. У типовій установці холодильну машину з електричним приводом використовують у години позапікових навантажень на систему електродів в установці.

В одноконтурних, або одноступінчастих, АБХМ холодоагент послідовно переміщається через чотири основні компоненти машини – випарник, абсорбер, десорбер та конденсатор.

Ідеальна одноконтурна АБХМ могла б забезпечити холодильний ефект, що дорівнює кількості теплової енергії, підведеної до генератора, проте через термодинамічні втрати в реальних установках холодильний ефект завжди буде нижчим, ніж витрати теплової енергії.

Коефіцієнт корисної дії одноконтурної АБХМ дещо низький, що обмежує їх сферу застосування. В даний час їх часто встановлюють у тих будівлях, де є доступні джерела скидної теплоти. Машини цього типу використовуються у складі систем кондиціонування повітря та як джерело охолодженої води для різних технологічних процесів. Установча потужність одноконтурних АБХМ становить, як правило, від 25 до 5000 кВт.

У двоконтурних АБХМ відбувається більш ефективно виділення холодоагенту з абсорбенту за менших витрат теплової енергії.

Двоконтурні АБХМ можуть бути різних конфігурацій. Дві основні конфігурації – системи з подвійним конденсатором та системи з подвійним абсорбером. Принцип їх дії заснований на тому, що охолодна здатність холодильної машини залежить насамперед від кількості холодоагенту, який може бути переведений в газову фазу у випарнику, і, використовуючи теплову енергію, що відводиться від конденсатора або утворюється на стадії абсорбції, можна підвищити кількість холодоагенту, десорбуючи з абсорбенту.

Як джерело теплової енергії в машинах цього типу може використовуватися перегріта пара високого тиску або різні види палива, найчастіше природний газ. Двоконтурні АБХМ доцільно використовувати у тих випадках, коли вартість електроенергії висока щодо вартості природного газу (або іншого палива).

Крім того, двоконтурні АБХМ можуть застосовуватися у випадках, коли є джерело перегрітої пари високого тиску. Вони ефективніші, але при цьому

відрізняються вищою вартістю порівняно з одноконтурними. Більш висока вартість двоконтурних АБХМ обумовлюється в тому числі застосуванням більш дорогих матеріалів високої корозійної стійкості (через більш високі робочі температури), з більшою площею поверхні теплообмінника, складнішими системами управління.

Триконтурні АБХМ є подальшим логічним розвитком двоконтурних АБХМ. В даний час ця технологія знаходиться на початковому етапі свого розвитку. Триконтурна АБХМ, як і двоконтурна, може бути реалізована різними способами, кількість можливих конфігурацій тут ще більша порівняно з двоконтурними АБХМ. Системи з триконтурними АБХМ настільки ефективні, як і традиційні системи з електричними чілерами. Однак при цьому вартість таких АБХМ буде вищою, тому економічна доцільність їхнього застосування має визначатися індивідуально залежно від особливостей конкретного об'єкта.

Ефективність АБМХ характеризується холодильним коефіцієнтом (coefficient of performance, COP), що визначається як відношення холодопродуктивності установки до витрат теплової енергії. Одноконтурні АБХМ характеризуються величинами холодильного коефіцієнта, рівними 0,6-0,8 (при максимально можливому 1,0). Оскільки холодильний коефіцієнт установок цього типу завжди менший за одиницю, одноконтурні АБХМ доцільно використовувати у випадках, коли є можливість утилізації теплової енергії (наприклад, скидна тепла енергія від електростанцій, котлів тощо).

Двоконтурні АБХМ характеризуються величинами холодильного коефіцієнта, рівними приблизно 1,0 за максимально можливого 2,0. Ще не доступні для комерційного використання прототипи триконтурні АБХМ характеризуються величинами холодильного коефіцієнта від 1,4 до 1,6.

Ефективність традиційних компресорних холодильних машин також характеризується холодильним коефіцієнтом, проте, оскільки в них використовується електроенергія від джерела централізованого електропостачання, необхідно враховувати ефективність вироблення електроенергії та втрати її під час транспортування. З цих причин пряме порівняння ефективності компресорних холодильних машин з електроприводом та ефективності газових АБХМ некоректне. Можна порівняти холодильний коефіцієнт з урахуванням втрат під час вироблення енергії та її транспортуванні.

### Висновки за розділом 3

Таким чином ефективність реальних холодильних машин значно нижча за ефективність ідеальної холодильної машини, багато в чому за рахунок складних незворотних процесів, що проходять у робочих рідинах. Для холодоагенту АБХМ крім звичайних пред'являється ряд специфічних вимог, обумовлених особливостями реалізації абсорбційного холодильного циклу. Серед цих вимог:



- висока розчинність в абсорбенті за заданої робочої температури абсорбера;
- низька розчинність в абсорбенті за заданої робочої температури десорбера;
- нездатність до хімічної реакції з абсорбентом у всьому діапазоні робочих температур.

Можна зауважити, що сфера застосування електротехнології швидко розширюється, і наведені напрямки є лише прикладом широких можливостей використання електрофізичних методів.

### Список використаних джерел за розділом 3

1. Теплові насоси: загальні світові тенденції застосування. Режим доступу: <https://ese-dp.com.ua/ua/trends-heat-pumps>. (дата звернення 30.10.2023). Назва з екрана.

2. Система опалення тепловими насосами. Режим доступу: [https://columbusenergy.com.ua/for\\_home/sistema-opalennja-teplovimi-nasosami](https://columbusenergy.com.ua/for_home/sistema-opalennja-teplovimi-nasosami). (дата звернення 30.10.2023). Назва з екрана.

3. Технологічні особливості електроконтактних методів обробки харчових продуктів / О.І. Черевко, В.М. Михайлов, І.В. Бабкіна, А.О. Шевченко // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. пр. – Х.: ХДУХТ, 2010.

4. Соколенко А.І. Фізико-хімічні методи обробки сировини і харчових продуктів: підруч. для студ. ВНЗ / Соколенко А.І., Піддубний В.А., Гіджеліцький В.М та ін. – К.: Кондор-Видавництво, 2015. – 324 с.

5. ДанфосС-Україна [Електронний ресурс]: офіційний сайт. – Режим доступу : <https://www.danfoss.com/uk-ua/>

6. Семенюк Д.П. Технологічне холодильне обладнання [Електронний ресурс] : навч. посібник : у 2 ч. Ч. 1 / Д.П. Семенюк, О.В. Петренко. – Електрон. дані. – Х. : ХДУХТ, 2018. – С. 241.

7. Забезпечення холодом об'єктів в умовах відсутності стаціонарного енергопостачання / Є.М. Якушенко, В.О. Потапов, Д.П. Семенюк, О.В. Петренко // ПОВНОЦІННЕ ХАРЧУВАННЯ: тренди енергоефективного виробництва, зберігання та маркетингу: колективна монографія / за ред. проф. В.В. Євлаш, проф. В.О. Потапова, проф. Н.Л. Савицька, доц. Л.Ф. Товма. – Х. : НА НГУ, 2020. – 635 с.

## РОЗДІЛ 4. ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ МЕТОДІВ У ТЕХНОЛОГІЯХ ПЕРЕРОБКИ МОЛОКА

### 4.1 Формування центрів концентрації кисломолочних бактерій

Актуальність дослідження. Питання енергозбереження в будь якій галузі економіки є завжди актуальним, однак для підприємств, які займаються переробкою молока це особливо важливо з огляду на те, що виробництво молокопродуктів намагаються розмістити ближче до сировини. Агрофірми розташовані на значній відстані одна від одної і обмежені в потужності електропостачання на окремих територіях, що теж необхідно враховувати при реконструкції і модернізації виробництва. Розробка інноваційних енергозберігаючих технологій при виробництві молочних продуктів харчування може сприяти як розвитку молочного скотарства, так і створення умов цілорічного функціонування виробництва, що забезпечить підтримку соціальної стабільності в окремих територіальних громадах за рахунок постійної зайнятості населення.

За останні 20 років динаміка виробництва молока за категоріями господарств свідчить про суттєве скорочення об'ємів валового виробництва більше ніж у двічі. Причому деструктивні перетворення в галузі молочного скотарства негативно вплинули не лише на обсяги виробництва, але, що важливо, на рівень споживання молока та продуктів його переробки населенням. Наприклад у 1990 р., споживання на одну особу за цими видами продукції тваринництва було забезпечено практично на 100 % фізіологічної норми, тобто 380 кг, а в 2016 р. знизилось до 55 % і склало 210 кг, то нині, економічний потенціал молочної галузі взагалі не використовується і на 50 %. Цільовою Державною програмою розвитку передбачається довести в 2030 р. валове виробництво молока до 15,3 млн т, що в свою чергу вимагає і від переробної галузі нарощувати відповідні об'єми виробництва [1].

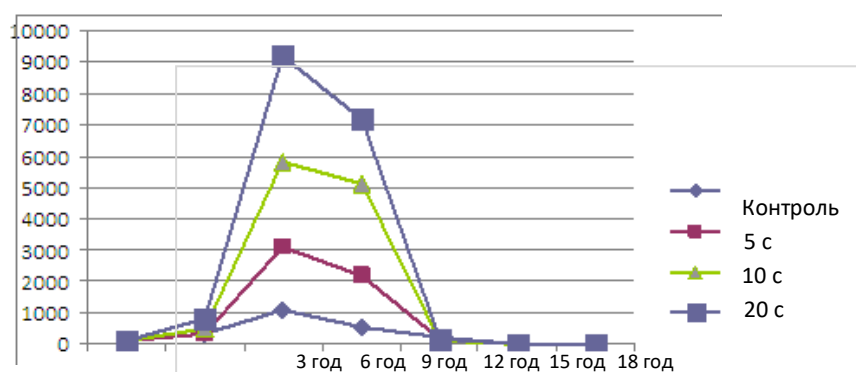
Мета дослідження. Розробка інноваційних, екологічно чистих, енергозберігаючих технологій активізації розвитку кисломолочних продуктів харчування.

Основні матеріали досліджень. Останнім часом для активізації життєдіяльності біологічних об'єктів різного рівня організації, від клітини до цілісного організму, все більше знаходять лазерні технології. Завдяки специфічним властивостям лазерного випромінювання (монохроматичність, когерентність, висока щільність потужності випромінювання тощо) можна змінювати швидкість протікання біохімічних та фізіологічних процесів. Однак, при цьому необхідно враховувати той факт, що лазерну обробку проводять індивідуально та адресно з урахуванням оптичних характеристик об'єкту впливу і технологічність застосування в промисловому виробництві [2].

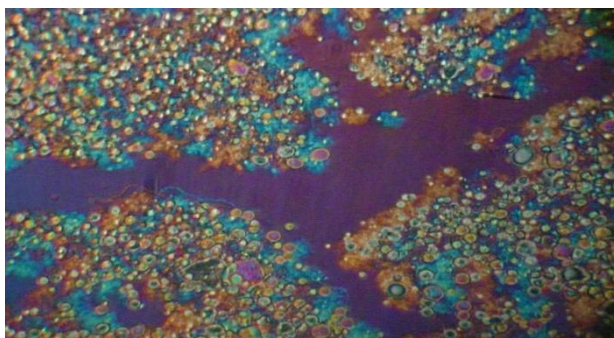
На основі розробленої математичної моделі впливу лазерного випромінювання на колонії кисломолочних бактерій у молочному середовищі,

були проведені розрахунки параметрів процесу лазерної обробки. Аналіз технології виробництва кефірів та йогуртів дозволив сформулювати технічні умови до пристрою для лазерної обробки молочної суміші в потоці, щоб не порушувати технологічний процес та не змінювати серійно виготовлені комплекси обладнання з виробництва кисломолочних продуктів [3].

Для визначення кількості колоній бактерій та оцінки ефективності дії лазерного випромінювання, на кожному етапі технологічного процесу отримання кисломолочних продуктів використовували метод інтерференційної мікроскопії. Так, використання інтерференційного мікроскопу МРІ-5 дозволяє спостерігати та оцінювати не тільки кількість колоній бактерій, а і визначати якісні показники клітин: розміри, кількість сухої речовини, білків, тощо. Причому, при спостереженні клітин бактерій додатково утворюється диференційний інтерференційний контраст, завдяки якому при збільшенні у 200-1000 разів в інтерференційному сірому змінюється жовто-коричневий або голубий колір. Це покращує контрастність у разі роздвоєння зображення клітин в однорідному інтерференційному полі за методом Плюте-Номарського. На рис. 1 спостерігається скупчення *Propionibacterium* у пробі навколо явно виділених центрів. Проведені експериментальні дослідження діючого макетного зразка приладу показали ефективність запропонованого способу лазерної активізації життєдіяльності кисломолочних бактерій. Причому виявилось, що найбільш ефективною є обробка молочної суміші (молока й закваски) лазерним випромінюванням із довжиною хвилі 405 нм. У порівнянні з обробкою хвилями 552 нм і 630 нм кількість колоній бактерій відрізняється відповідно у 3 і 4 рази. Статична обробка результатів експериментів із дослідження процесу кисломолочного бродіння після лазерної обробки показало зростання числа бактерій у пробах кефіру та йогурту (рис. 4.1). На початку процесу зростання колоній бактерій відбувається за експоненціальним законом залежно від терміну інкубації, а на етапі відмирання бактерій при вичерпуванні субстрату і високої кислотності рідини, число бактерій зменшується за логарифмічним законом.



**Рисунок 4.1 - Динаміка зміни концентрації кисломолочних бактерій після обробки лазерним променем (50 мВт, 405 нм)**



**Рисунок 4.2 - Формування центрів концентрації кисломолочних бактерій після лазерної обробки молочної суміші (молоко і закваска)**

#### 4.2 Інноваційне обладнання для сепарації молока

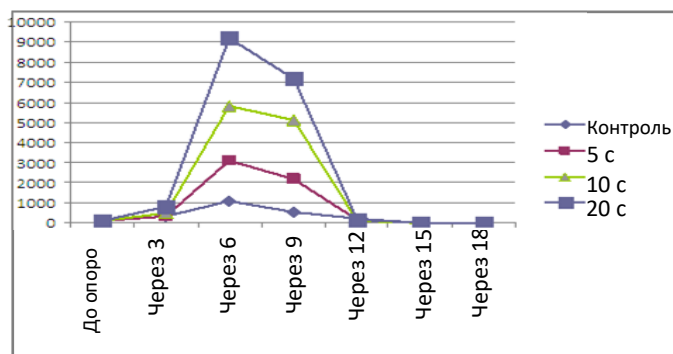
Актуальність дослідження. Аналіз виробництва молока в Україні показує, що останнім часом частка виробничих потужностей у категорії сільськогосподарських підприємств складала 76 % (1990 р.), а останнім часом скоротилась до 26 %, все інше виробляється у господарствах населення. Після 2020 р. спостерігається тенденція зростання частки підприємств, які утримують понад 1000 гол., однак, як і раніше основну частину поголів'я корів (до 40 %) зосереджена у дрібнотоварних господарствах, де утримується 100-200 гол. До 2030 р. передбачається збільшення валового виробництва молока до 15,3 млн т, що вимагає збільшення чисельності молочних корів до 2,6 млн гол. Зрозуміло що досягнення цільових показників виробництва вимагає і удосконалення відповідно технології утримання, якості годування, удосконалення технічних засобів, ін. [1].

Досвід провідних аграрних країн свідчить про високу ефективність діяльності агрофірм, оскільки така форма дає змогу розв'язувати низку проблем, що особливо гостро постають перед дрібнотоварним виробництвом, а саме: – покращення якості молока за рахунок забезпечення ефективної заготівлі, охолодження, транспортування; – впровадження нового технологічного обладнання для доїння, очищення, зберігання, переробки; – здійснювати якісне ветеринарне обслуговування; – проводити заходи з відтворення поголів'я, ін. Причому, в розвитку агроформувань для виробництва продукції тваринництва зацікавлена територіальна громада, яка сприяє збереженню сільського укладу життя та збільшенню суспільній вартості і продовженню традицій виробництва місцевих продуктів для здорового харчування сімей і використання природного потенціалу [2]. Особливо нині ця тенденція є актуальною внаслідок збільшення внутрішньої, вимушеної міграції населення в країні.

Мета досліджень. Розробка інноваційного обладнання для покращення якості молока для приготування молочнокислого сиру.

Основні матеріали досліджень. Відомий пристрій для відцентрового очищення молока, що має високошвидкісний електропривод (понад 10 000 об/хв), барабан сепаратора з пакетом тарілок, приймально-вивідний пристрій та

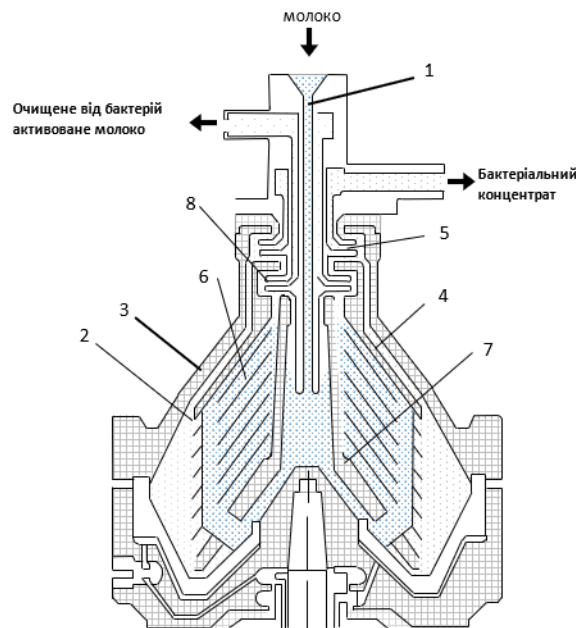
систему відведення бруду [3]. Крім того, раніше проведені дослідження довели високу ефективність активації біохімічних процесів у молоці, що відбувається в результаті опромінення продукту лазерним випромінюванням фіолетового діапазону (440 нм), рис. 4.3 [4].



**Рисунок 4.3 - Результати лазерної обробки молока**

Реалізація процесу лазерної обробки здійснюється завдяки пристрою для покращення якості молока, який має барабан відцентрового очисника у внутрішній частині якого на тарілотримачі встановлено пакет проміжних тарілок накритий роздільною тарілкою, які виготовлені із оптично прозорого матеріалу полікарбонату - лексану, через який лазерне випромінювання проходить до центральної трубки в основі барабану що виготовлена з харчової нержавіючої сталі і має поліровану зовнішню поверхню для відбивання променів у напрямку шару молока, що рухається між тарілками з контрольованою товщиною для рівномірної та одночасної обробки (рис. 4.2) [5].

Молоко поступає до нерухомої центральної трубки барабану 1 та крізь отвори в нижній частині надходить до барабану відцентрового очисника 2, що швидко обертається і починає обертатися разом із ним. Відцентрові сили діють на кожну часточку продукту і створюють тиск, який збільшується в радіальному напрямку. Часточки бруду, мікрофлора, що має густину більшу, ніж густина молока, осідають на стінці кришки барабану 3 і далі видаляються назовні завдяки роздільній тарілці 4 через камеру бактеріального концентрату 5. Очищене молоко потрапляє до каналів, утворених сусідніми проміжними тарілками 6 зібраними в пакет і розміщеними на тарілотримачі 7 та опромінюється в тонкому шарі контрольованої товщини променями синього спектру діапазону оптичного випромінювання з поверхні кожної тарілки, що надходить від лазера а далі рухається до камери 8.



**Рисунок 4.4 - Конструкція удосконаленого сепаратора-очисника**

#### 4.3 Удосконалення знезаражувача-молокоочисника

Аналіз виробництва молока в Україні показує, що останнім часом частка виробничих потужностей у категорії сільськогосподарських підприємств складала 76 % (1990 р.), а останнім часом скоротилась до 26 %, все інше виробляється у господарствах населення. Після 2020 р. спостерігається тенденція зростання частки підприємств, які утримують понад 1000 гол., однак, як і раніше основну частину поголів'я корів (до 40 %) зосереджена у дрібнотоварних господарствах, де утримується 100-200 гол. До 2030 р. передбачається збільшення валового виробництва молока до 15,3 млн т, що вимагає збільшення чисельності молочних корів до 2,6 млн гол. Зрозуміло що досягнення цільових показників виробництва вимагає і удосконалення відповідно технології утримання, якості годування, удосконалення технічних засобів, ін. [1].

Досвід провідних аграрних країн свідчить про високу ефективність діяльності агрофірм, оскільки така форма дає змогу розв'язувати низку проблем, що особливо гостро постають перед дрібнотоварним виробництвом, а саме: – покращення якості молока за рахунок забезпечення ефективної заготівлі, охолодження, транспортування; – впровадження нового технологічного обладнання для доїння, очищення, зберігання, переробки; – здійснювати якісне ветеринарне обслуговування; – проводити заходи з відтворення поголів'я, ін. Причому, в розвитку агроформувань для виробництва продукції тваринництва зацікавлена територіальна громада, яка сприяє збереженню сільського укладу життя та збільшенню суспільній вартості і продовженню традицій виробництва місцевих продуктів для здорового харчування сімей і використання природного потенціалу. Особливо нині ця

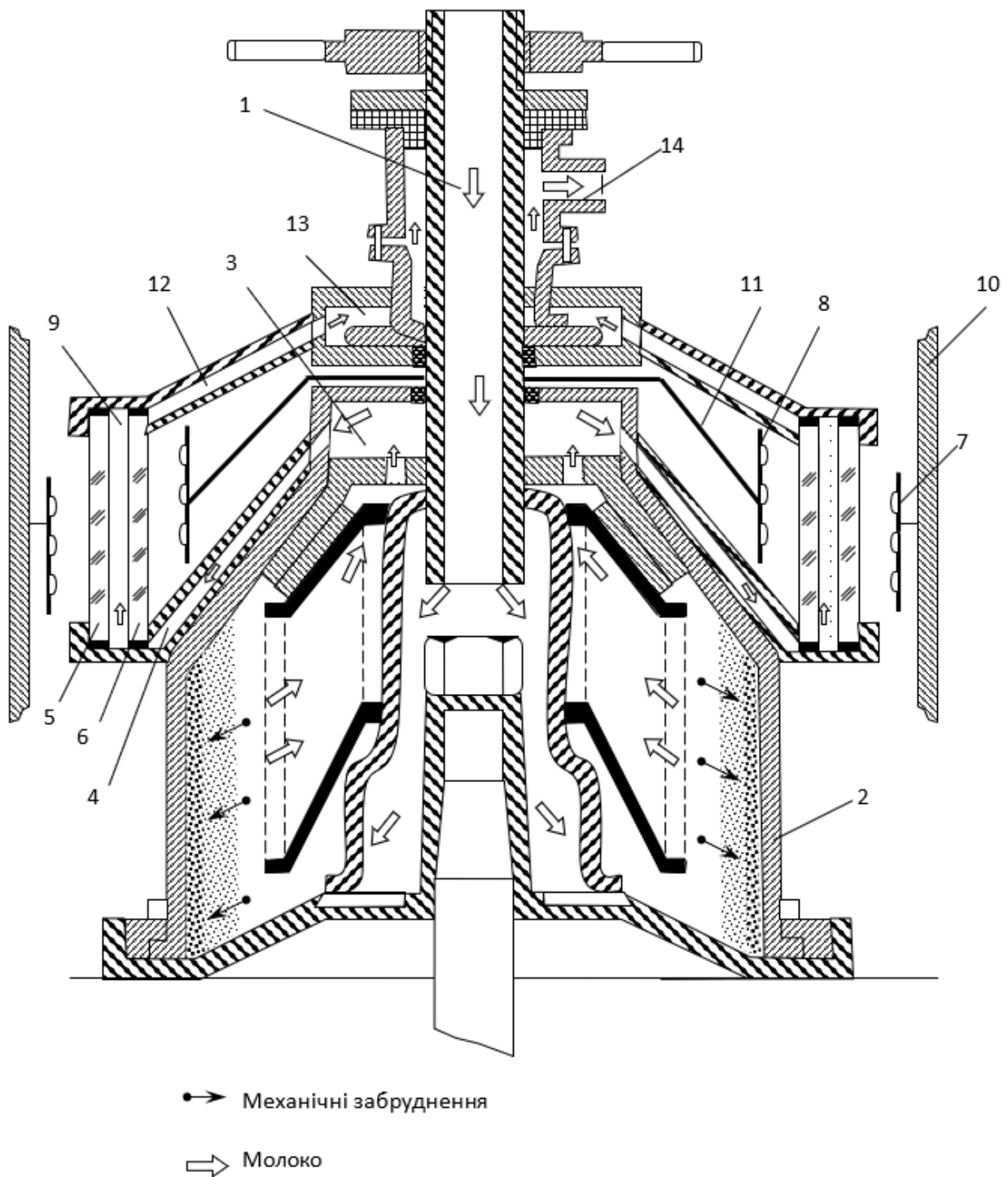
тенденція є актуальною внаслідок збільшення внутрішньої, вимушеної міграції населення в країні [2].

В процесі виробництва молока однією з важливих технологічних операцій є первинне очищення і знезаражування перед охолодженням і зберіганням до його наступної переробки. Відомі наступні способи знезаражування молока завдяки: – інактивації мікрофлори короткохвильовим ультрафіолетом випромінюванням з експозицією 210-250 Дж/см<sup>2</sup> ; – обробці інфрачервоними та ультрафіолетовими променями, ін., однак, недоліками існуючих способів є необхідність застосування додаткових приладів і обладнання [3].

Сформульована мета досягається завдяки подачі молока, після очищення в барабані молокоочисника, в ротор з оптично прозорою секцією двостороннього УФ-опромінення з контрольованою товщиною шару обробки молока утворену двома коаксіальними кварцовими трубками різного діаметру, що обертається разом з барабаном, обробці продукту ультрафіолетовим світлом світлодіодів із довжиною хвилі 254 нм в тонкому прошарку ( $\leq 0,1$  мм), що утворюється під дією відцентрової сили.

Завдяки поєднанню процесу сепараційного очищення та УФ-обробки молока опромінюванням напівпровідниковими світлодіодами зменшуються загальні технологічні витрати на придбання окремих пристроїв та енерговитрати на додатковий електропривод. Розширюються експлуатаційні можливості устаткування за принципом 2 в 1, покращується екологічна безпека за рахунок відмови застосування екологічно шкідливих УФ ламп.

По центральній металевій трубці 1 молоко надходить до барабану очисника 2. Після очищення від механічних домішок та слизу, через приймальник очищеного молока 3 та канал 4 ротору воно потрапляє до секції двостороннього УФ-опромінення молока з двома коаксіальними кварцовими трубками різного діаметру 5 та 6 де опромінюється УФ світлом зовнішніх 7 та внутрішніх 8 світлодіодів із довжиною хвилі 254 нм в тонкому прошарку ( $\leq 0,1$  мм), що утворюється в робочому зазорі 9 між оптично прозорими трубками під дією відцентрової сили. УФ-світлодіоди: зовнішні встановлені по периферії ротора на кожусі 10, а внутрішні – на світильнику 11 розміщеному концентрично внутрішній трубці та прикріпленому на нерухомій центральній металевій молочній трубці 1. Бактерії, що знаходяться в дисперсному середовищі та мають щільність більшу за щільність продукту, при обертанні ротора під дією відцентрових сил зміщуються від центру до периферії та утворюють тонкий прошарок на внутрішній поверхні зовнішньої кварцової трубки 5. Дрібніші та легші бактерії розміщуються біля зовнішньої поверхні внутрішньої кварцової трубки 6. Ці шари першими опромінюються УФ-світлодіодами з обох сторін. Молоко, примусово рухаючись по зазору між кварцовими трубками, продовжує перемішуватись і обробляється та поступає через вивідний канал 12 до вивідного приймальника 13, а далі – до приймально-вивідного пристрою 14 [4].



**Рисунок 4.5 - Конструкція знезаражувача-молокоочисника**

#### Висновки за розділом 4

Обробка лазерним променем з довжиною хвилі 405 *нм* здійснює стимулюючу дію на кисломолочні бактерії, що прискорює швидкість поділу клітин та утворення колоній на початковому етапі фази експоненціального росту. Крім того, запропонована лазерна технологія сприяє формуванню центрів концентрації колоній кисломолочних бактерій, що значно пришвидшує весь процес приготування продукту.



Завдяки поєднанню процесу сепараційного очищення та активації біохімічних процесів в молоці, яке відбувається в результаті його лазерної обробки під час руху в зазорі між тарілками барабану, як показали експериментальні дослідження – покращується якість молока для приготування молочнокислого сиру.

Таким чином, запропонована конструкція знезаражувача-молокоочисника забезпечує зменшення загальних витрат на придбання окремих технологічних пристроїв та енерговитрат на додатковий електропривод, розширюються експлуатаційні можливості пристрою, покращується екологічна безпека завдяки відмови від застосування екологічно шкідливих УФ ламп, які містять ртуть.

#### Список використаних джерел за розділом 4

1. Тваринництво України: стан, проблеми, шляхи розвитку (1991-2017-2030 рр.) / за ред. акад. НААН М. І. Бащенко – К.: Аграр. Наука, 2017. – 160 с.
2. Современные аспекты лазерной терапии / Под ред. В.Д. Попова – Черкассы: Вертикаль, издатель Кандыч С.Г., 2011. – 609 с.
3. Новий напрямок глибокої переробки харчової сировини / Під ред. Р.Ю. Павлюк, В.В. Погарської – Х.: Факт, 2017. – 380 с.
4. Закон України. Про добровільне об'єднання громадян. 5 лютого 2015 р. №157-VIII. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/157-19#Text>
5. Бабанов І.Г. Інноваційне обладнання молокопереробних підприємств: підручник / І.Г. Бабанов, О.М. Гавва, О.І. Бабанова [та ін.]; Нац. Ун-т харч. технол. Київ: Інкос, 2019. 718 с.
6. Васильев В.С. Лазерное облучение молочных бактерий / В.И. Жила, Н.Л. Лисиченко, О.В. Дорич, и др. // Матер. XLVII Міжнар. наук.-прак. конф. «Застосування лазерів у медицині та біології» (12-14 жовтня 2017 р.). Київ: 2017. С.122.
7. Патент на корисну модель №145547, Україна МПК А 23С 3/07, А23С 7/04. Знезаражувач-молокоочисник / Жила В.І., Лисиченко М.Л., Холін В.В. № u 2020 02644; заявл. 30.04.2020; опубл. 28.12.2020; Бюл. №24.
8. Маценюк О.С., Мельник Л.М. Процеси і апарати харчових виробництв: Підручник. Київ, НУХТ, 2011. 407 с.

## РОЗДІЛ 5. АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗАМОРОЖУВАННЯ М'ЯСНОЇ СИРОВИНИ

### 5.1 Проблеми підбору хладагенту на сьогодні

До початку 1990-х рр. питання вибору холодоагенту для холодильних установок мало турбує споживача. На жаль, як з'ясувалося в даний час, хімічні сполуки, які використовуються в якості холодоагенту в холодильних установках, при їх випуску в атмосферу виявилися здатними привести до небажаних і непередбачуваних ефектів.

Скорочення озонного шару і глобальне потепління - ось дві різних екологічних проблеми, з якими людство зіткнулося сьогодні. Озонний шар, який захищає поверхню нашої планети від надмірних доз ультрафіолетової радіації, може бути пошкоджений стійкими сполуками хлору і бромю. Ці сполуки - CFC (chlorofluorocarbon - хлор-фтор-вуглець) і HCFC (hydrochlorofluorocarbon - водень-хлор-фтор-вуглець) - містяться в хладагентах, в зв'язку з чим останні сприяють руйнуванню озону в стратосфері і глобального потепління клімату.

Завдяки Монреальського Протоколу виробники всього світу з 1990 р припинили випуск озоноруйнуючих сполук на основі CFC-з'єднань і замінили їх на менш екологічно шкідливі HCFC-з'єднання. Так як для більшості випадків поки не знайдено більш підходящих з'єднань. У Європі застосування обладнання, в якому використовується хлор-фтор-вуглець, буде зупинено, а поставки нового обладнання на основі водень-хлор-фтор-вуглецю будуть заборонені.

Цей факт міркування повинен враховувати потенційний покупець холодильного обладнання. Незнання цих речей може призвести до того, що придбане за чималі гроші обладнання доведеться серйозно модернізувати ще задовго до того, як закінчиться його реальний ресурс. Також незнання подібних фактів може призвести до фінансових втрат, так само як і втрат часу і обладнання.

З урахуванням глобального потепління, скорочення енергоспоживання і його ефективністю можна зробити наступний висновок. Нові холодоагенти можуть мати більш низьку ефективність, і, як наслідок, вимагати підвищеної витрати енергії, але цілком імовірно, що прийдешні екологічні обмеження можуть торкнутися і скорочення енергоспоживання. Потенційний споживач холодильного обладнання вже найближчим часом опиниться перед дилемою нелегкого вибору - зіткнутися з жорсткістю вимог до витоку холодоагенту, з вимогами забезпечити ефективне використання обладнання і вимогами використовувати тільки відповідним чином підготовлений персонал.

## 5.2 Аналіз процесів заморожування курячих субпродуктів

Актуальність даної теми обумовлена необхідністю підвищення ефективності процесу охолодження та заморожування курячих субпродуктів, зменшення енергоспоживання холодильного обладнання, підвищення якості мороженої продукції та раціональне використання холодильних приміщень для поліпшення процесу заморозки и зберігання продукції. Ці технологічні рішення направлені на підвищення економічної доцільності виробництв які торгують курячими субпродуктами.

Для того щоб продукція не зіпсувалась при перевезенні, курячі лапки потрібно заморозити до температури нижче нуля, зазвичай до  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Заморожування м'яса до такої низької температури дуже енергоємний процес, в якому треба враховувати не тільки втрати електроенергії, а також час заморожування та якість готової продукції яка може погіршитися при неправильній холодильній обробці. [1]

При заморожуванні змінюється колір. Забарвлення м'язів поверхневого шару мороженого м'яса яскравіше забарвлення свіжого охолодженого м'яса, внаслідок висушування, що викликає згущення кров'яного пігменту, і перетворення гемоглобіну в метгемоглобін. Колір замороженого м'яса залежить від швидкості заморожування. Швидкість утворення метгемоглобіну зменшується з пониженням температури при заморожуванні і зберіганні в повітрі і значно збільшується при заморожуванні в розсолі. Особливо швидко протікає процес знебарвлення м'язової тканини, замороженої в розсолі, при відтаванні.

При дуже швидкому заморожуванні в рідкому повітрі, в сухому льоді або в апаратах непрямого контакту м'язи мають блідо-рожевий колір з жовтуватим відтінком. При повільному заморожуванні м'ясо має темно-червоний колір. При швидкому заморожуванні виходять дрібні кристали льоду, рівномірно розподілені по всій поверхні. Відображення і розсіювання світла від такої поверхні і додає м'ясу блідо-червоний колір.

Швидке заморожування м'яса супроводжується також явищем підсушування поверхневого тонкого шару м'яса. Плівка при подальшому зберіганні мороженого м'яса потовщується. Тому після дефростації мало що зберігався м'яса плівка підсихання зникає внаслідок набрякання м'язової тканини за рахунок вологи, дифундуючої з внутрішніх шарів, а при дефростації довго зберігався м'яса вона не зникає повністю; на поверхні таке м'ясо зберігає білуватий наліт в найбільш зневоднених місцях. [2]

Змінення кольору та консистенції м'яса погано впливає на зовнішній вигляд продукту тому потрібно приділяти увагу швидкості заморозки субпродуктів. Необхідно провести дослідження по підбору оптимального обладнання та способу розташування продукції, завдяки якому можна знайти найбільш ефективній и економічній (в плані вартості обладнання) спосіб заморозки продукції.[3]

Оптимальне застосування апаратів для заморожування курячих субпродуктів та ретельний підбір обладнання може забезпечити швидкий та якісний продукт який можна експортувати у інші країни світу за розумні витрати.

### 5.3 Процеси та обладнання для заморожування м'яса

Заморожування забезпечує запобігання розвитку мікробіологічних процесів і різке зменшення швидкості ферментативних і фізико-хімічних реакцій, тому його використовують переважно у разі потреби тривалого зберігання м'яса.

Заморожування здійснюють за температури повітря в камері від -23 до -35 °С протягом 18 - 36 год до досягнення в найтовщій частині туш температури, що не перевищує -8°С. Тривалість по-дальшого зберігання м'яса при -18 -25 °С становить від 4 до 18 місяців залежно від температури та виду сировини.

У результаті заморожування волога кристалізується. Кількість вільної вологи в клітинах зменшується, завдяки чому в міру вимерзання вологи життєдіяльність мікрофлори знижується, а потім і припиняється. За нерівномірного росту кристалів льоду клітини мікроорганізмів можуть руйнуватися. При низькотемпературному зберіганні (-10 - -50 °С) мікроорганізми частково відмирають, змінюються морфологічна структура м'яса і стан його колоїдних систем, інгібують біохімічні процеси, причому чим нижчі швидкість і температура заморожування, тим більшою мірою змінюється якість сировини, яку використовують, при подальшому розморожуванні [1].

Вимерзання вологи і кристалоутворення зумовлюють у м'ясі перерозподіл води між структурними елементами, порушення цілісності м'язових волокон, часткову агрегацію і денатурацію м'язових білків, зменшення їх розчинності (міозин), розпушення сполучнотканинних з'єднань, що призводить до зниження волого зв'язувальної здатності, погіршення смаку і консистенції м'яса, значних втрат м'ясного соку після його розморожування.

У процесі тривалого зберігання замороженого м'яса втрачаються вітаміни, маса (усихання), розвиваються гідролітичні процеси та процеси окиснення, змінюється колір м'язової тканини, на поверхні туш можуть з'явитися безколірні або світлі ділянки холодного опі-ку. Вибір раціональних режимів заморожування та зберігання дає змогу зменшити негативний вплив низькотемпературного оброблення на якість м'яса. Використання пакувальних матеріалів сприяє зменшенню ступеня змін технологічних властивостей сировини і втрат маси.

Від способу та умов заморожування залежить збереження вихідної якості харчових продуктів і рівень витрат на його здійснення. Властивості замороженого м'яса і економічні показники процесу значною мірою зумовлені характером автолізу м'яса, яке над-ходить на заморожування. Залежно від стану такого м'яса розрізняють одно- і двофазний способи. За однофазного способу

парне м'ясо заморожують безпосередньо після первинного оброблення, за двофазного - після попереднього охолодження.

Перевагою однофазного способу є скорочення тривалості технологічного процесу заморожування м'яса, ефективніше використання виробничих площ, зменшення втрат маси за вищої якості м'яса, скорочення затрат праці на транспортування продукції. Інтенсивне охолодження парного м'яса різко знижує швидкість хімічних та біохімічних реакцій, що сприяє збільшенню термінів зберігання замороженого м'яса. [2]

М'ясо і субпродукти, які використовують для промислової переробки, доцільно заморожувати у блоках, сформованих після обвалювання м'яса. При цьому значно підвищується ефективність виробництва за рахунок скорочення втрат маси, економії холодильних площ, витрат холоду і транспортних витрат, раціональнішої організації технологічного процесу виготовлення ковбас та напівфабрикатів.

Способи заморожування. М'ясо і м'ясопродукти заморожують у повітрі, в розчинах солей або деяких органічних сполук, у киплячих холодоагентах, при контакті з охолоджуваними металевими плитами. Відповідно до використовуваного способу та характеристик продукту встановлюють швидкість і глибину заморожування.

Заморожування у повітрі є найпоширенішим способом відведення теплоти від продукту. Інтенсифікація процесу заморожування досягається зниженням температури (до  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), підвищенням швидкості руху повітря (до 4 - 5 м/с), зменшенням товщини продукту. При заморожуванні м'ясних напівфабрикатів, субпродуктів доцільно інтенсифікувати процес, а при заморожуванні м'ясних туш і відрубів інтенсивність процесу істотно не впливає на їх якість, оскільки внаслідок особливостей утворення кристалів розбіжність у структурі тканин периферійних і внутрішніх зон практично неминуча.

## Висновки за розділом 5

1. Найбільш поширеними способами у промисловості є одно- і двофазний способи заморожування м'яса. При однофазному заморожуванні парне м'ясо з температурою в товщі м'язів стегна не нижче ніж  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  відразу надходить у камеру заморожування. На заморожування двофазним способом м'ясо надходить попередньо охолодженим до температури  $0 - 4\text{ }^{\circ}\text{C}$  у товщі м'язів стегна [3].

2. Оптимальне застосування апаратів для заморожування м'ясної сировини та ретельний підбір обладнання може забезпечити швидкий та якісний продукт який можна експортувати у інші країни світу за розумні витрати.

## Список використаних джерел за розділом 5

1. Доссат Р.Дж. Основи холодильної техніки\ Principles of Refrigeration \ Рой Дж. Доссат, Томас Дж. Хоран.

2. М.М. Клименко. Технологія м'яса та м'ясних продуктів: Підручник / М.М. Клименко, Л.Г. Віннікова, І.Г. Береза та ін.; За ред. М.М. Клименка. — К.: Вища освіта, 2006. — 640 с.: іл. Стр 198-202.
3. Алан Р. Сэмс Переробка м'яса птиці \Poultry Meat Processing Edited by Alan R. Sams, Ph.D. Department of Poultry Science Texas A&M University стр. 50-52 .
4. Доссат Р.Дж. Основи холодильної техніки\ Principles of Refrigeration \ Рой Дж. Доссат, Томас Дж. Хоран/ [1]
5. М.М. Клименко. Технологія м'яса та м'ясних продуктів: Підручник / М.М. Клименко, Л.Г. Віннікова, І.Г. Береза та ін.; За ред. М.М. Клименка. — К.: Вища освіта, 2006. — 640 с.: іл. Стр 198-202 [2]
6. Алан Р. Сэмс Переробка м'яса птиці \Poultry Meat Processing Edited by Alan R. Sams, Ph.D. Department of Poultry Science Texas A&M University стр. 50-52 [3]

## РОЗДІЛ 6. МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЇ НЕНЬЮТОНІВСЬКИХ РІДИН У КАНАЛАХ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

6.1 Моделювання течії в'язко-пластичного баротропного матеріалу, що стискається в каналах складної геометрії

Розглянуто особливості моделювання руху в'язко-пластичного матеріалу, що стискається з показниками, залежними від тиску в каналах складної геометрії технологічного обладнання.

Як матеріал обрано бінгамовські (в'язко-пластичні) рідини з двома постійними параметрами – в'язкістю та порогом зрушення, які залежать від тиску. Розглядається течія в плоскому каналі. Рух границь передбачається чисто поздовжнім, а поле течії при цьому не є поздовжнім. Поява поперечної складової швидкості обумовлене залежністю параметрів реологічної моделі від тиску. Моделювання течії здійснювалось в два етапи. На першому етапі розглядається реологічна модель течії бінгамівського матеріалу, але без стискання. На другому етапі проводилось вивчення впливу фактора баротропного стискання. При розгляді моделі течії використано метод суперпозицій.

За результатами проведеного моделювання отримано модель течії неklasичного бінгамовського матеріалу, яку можна розповсюдити на матеріали, що стискаються та задовольняють умовам баротропності. У рамках запропонованої моделі отримані рівняння нульового та другого наближення для визначення характеристик бінгамівської течії в плоскому каналі. Отримані формули дозволяють визначити швидкість руху квазітвердого ядра яка визначається мірою відхилення величин в'язкості і порогу зрушення, та середнім значенням величини зворотної в'язкості на тому ж інтервалі тисків. Швидкість твердого ядра залежить як від суми, так і від різниці швидкостей на межах каналу. Стискаємість в'язко-пластичного матеріалу показана у величинах тиску та різниці швидкостей на границях каналу.

Встановлено, що для довгих каналів у нульовому наближенні стискаємість не має суттєвого впливу на течію, а чинить вплив тільки у другому наближенні, при цьому середній градієнт тиску залишається кінцевою величиною, тобто різниця тисків на кінцях каналу стає нескінченною величиною. Для баротропного стискаємого матеріалу це означає, що якщо на одному кінці каналу величина тиску стає нескінченною, то густина матеріалу на цьому кінці теж повинна стати нескінченною. Таким чином при прагненні величини тиску до нескінченності, величина густини залишається кінцевою величиною.

Математичний опис течії в'язко-пластичної баротропної рідини у каналах складної геометрії технологічного обладнання дозволяє з максимальною узагальненістю параметрів встановити залежність в'язкості і граничного значення напруження зрушення від тиску.

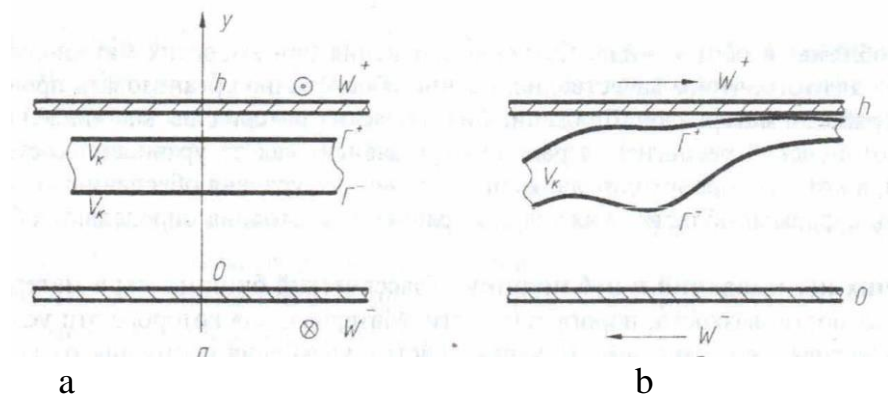
Класичний бінгамівський матеріал має на увазі сталість густини, в'язкості, порога плинності. Матеріал, для котрого ці умови не виконані, є неklasичним [6]. Залежність показників рівняння стану від аргументів має статечну чи раціональну функцію від інваріантів тензора швидкості деформацій [7, 8]. Введення як аргумент тиску в рівняння стану зустрічається значно рідше, але цілком відповідає традиції, сенс якої полягає в тому, що класичні рівняння стану, будучи нездатними відповідати реальним матеріалам, вимагають неklasичного розширення. Одним з таких видів розширення є введення рівняння стану залежності від тиску через в'язкість і поріг плинності [9]. У поєднанні з умовами баротропності виходить модель, яка як прототипи охоплює багато реальних матеріалів харчової та хімічної технологій. Матеріали, що використовуються там, відрізняються великою різноманітністю властивостей, особливо, в харчовій промисловості. Часто зустрічаються суміші матеріалів різної природи, що виступають як сполучні, наповнювачі, згущувачі, барвники, ароматизатори, стабілізатори і т.д. [10, 11]. Кожен із перелічених тут, з погляду їхніх функцій у готовому продукті, матеріалів робить певний внесок у рівняння стану. Для малов'язких матеріалів роль компонентів у суміші грає меншу роль, ніж для високов'язких, обмежуючись конвективним масообміном [12, 13]. Для високов'язких матеріалів компоненти у суміші змінюють рівняння стану, зумовлюючи загальні властивості перебігу. Виникаючі під час течії локальні значення тиску напруги зсуву визначають рівень механофізичних та механохімічних впливів на компоненти матеріалу. Залежність в'язкості від тиску відбиває на макрорівні міжмолекулярні взаємодії, а залежність від тиску порога плинності в бінгамівському матеріалі зазвичай відображає змінну ступінь консолідації структурних елементів матеріалу.

Особливості руху високов'язких матеріалів, бінгамівських у тому числі, є основним фактором при конструюванні черв'ячних (шнекових) машин [14]. У цих машинах основним елементом робочої камери є канал трапецеїдальної форми, сторони якого можуть бути відрізками прямих або кривих [15, 16, 17]. Поперечні перерізи таких каналів прийнято апроксимувати прямокутником [18, 19]. При такій апроксимації виникає питання про те, який прямокутник є найкращим. Зазвичай використовують ізопериметричне наближення [20]. Вся робоча камера черв'ячної машини є сукупністю каналів з різними поперечними перерізами, які замінюються сукупністю прямокутних каналів тієї ж довжини. Стінки каналів утворюються внутрішньою поверхнею корпусу машини та зовнішніми поверхнями черв'яків (шnekів) або черв'ячних елементів (якщо черв'як є складовим) [14, 15, 16, 17]. Рух черв'яка щодо корпусу означає рух різних стінок каналу у різних напрямках. Незважаючи на чисельні відмінності, швидкості руху всіх стінок каналу пропорційні швидкості обертання черв'яка, і залежать від кута підйому його гвинтової лінії [16, 17]. Для збільшення тиску та напруг зсуву в матеріалі, розташованому в робочій камері машини, канали, з яких вона складається, робляться дрібними [15, 16, 17]. У таких каналах висоту прямокутника, що лежить у поперечному перерізі, можна вважати малою порівняно з шириною так, що канал можна вважати плоским.



Нами розглядається течія баротропного стискаючого матеріалу в пласкому каналі, в'язкість і поріг зрушення, якого залежать від тиску. Рух границь передбачається чисто поздовжнім, а поле течії при цьому поздовжнім не являється. Поява поперечної складової швидкості обумовлена залежністю параметрів реологічної моделі від тиску. Моделювання течії здійснюється в два етапи. На першому етапі розглядається реологічна модель течії бінгамівського матеріалу, але без стискання. На другому етапі проводилось вивчення впливу фактора баротропного стискання. При розгляді моделі течії нами використано метод суперпозицій [21, 22, 23].

Течію в каналі в поперечному та поздовжньому розрізах наведено на рис. 6.1.



**Рисунок 6.1 - Схема течії матеріалу в каналі:** а - поперечний розріз; б - поздовжній розріз

Рівняння течії в напруженнях мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial z} &= \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y}; & v_z &= v_z(z, y); & \tau_{ik} &= \left(\mu + \frac{\tau}{\sqrt{I_2}}\right) \left(\frac{\partial v}{\partial F_k} + \frac{\partial v}{\partial F_i}\right); \\ \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{\partial v_y}{\partial y} &= 0; & v_y &= v_y(z, y); & \mu &= \mu(P); I_2 = \sum_{ik} \left(\frac{\partial v}{\partial F_k} + \frac{\partial v_k}{\partial F_i}\right)^2 \\ \tau^2 &= 2\tau_{zz}^2 + 2\tau_{zy}^2; & \tau &= \tau(P). \end{aligned} \quad (6.1)$$

- де  $\tau_{zz}$  і  $\tau_{zy}$  – компоненти тензора напруг зсуву в матеріалі;  
 $P$  – тиск в матеріалі;  
 $z$  і  $y$  – продольна і поперечна координати в каналі відповідно;  
 $v_z$  і  $v_y$  – продольна і поперечна складові швидкості матеріалів в каналі відповідно;  
 $\mu$  і  $\tau$  – в'язкість и поріг текучесті матеріалу відповідно.

На підставі методу суперпозицій, який викладений у роботах [21, 22, 23], співвідношення (6.1) приводимо до задачі течії з поздовжньою швидкістю  $v_z$ ,

що залежить від змінних  $z$  і  $y$ , яка визначається як тричлен за змінною  $y$ , коефіцієнти якої залежать тільки від поздовжньої координати. Таке уявлення є факторизацією рішення і є наближенням до точного рішення. Рішення в такому вигляді відповідає граничним умовам течії, у результаті чого отримуємо два рівняння відносно ширини твердого ядра і його границь. Якщо течія бінгамівського матеріалу відбувається з постійними величинами в'язкості та порогом зрушення, рівняння моделі відразу отримують значення границі ядра й швидкість його руху [24]. У цьому випадку, коли в'язкість і поріг зрушення залежать від тиску кінцеві рівняння є не алгебраїчними, а змішаними, тобто диференційно-алгебраїчними. Рівняння також дозволяють знайти і залежність тиску від поздовжньої координати, після чого можна отримати залежності для границь твердого ядра й визначити швидкість його руху.

Сутність запропонованого підходу полягає в тому, щоб виразити компонент тензора напруження  $\tau_{zz}$  через компонент  $\tau_{zy}$  як для рівняння рівноваги в напруженнях, так і для умови на границях ядра [21, 22]. Таким чином, компонента  $\tau_{zz}$  виражається через компонент  $\tau_{zy}$  наступним чином:

$$\frac{\tau_{zz}}{\tau_{zy}} = F_L \frac{\frac{\partial v_z^\pm}{\partial \zeta_L} \cdot (1 \pm \gamma)}{\frac{\partial v_z^\pm}{\partial \xi} - F_L^2 \frac{\partial}{\partial \zeta_L} \int \frac{\partial v_z^\pm}{\partial \zeta_L} d\xi};$$

$$\zeta = \frac{z}{L}; \quad 0 \leq \zeta_L \leq 1;$$

$$\xi = \frac{y}{h}; \quad 0 \leq \xi_L \leq 1;$$

$$F_L = \frac{h}{L}; \quad \gamma^\pm = \frac{\Gamma^\pm}{h},$$
(6.2)

де  $L$  – довжина прямокутного каналу;

$h$  – висота прямокутника в перерезі каналу;

$\Gamma^\pm$  - координати меж твердого ядра, знаки «+» і «-» значення швидкостей течій, розміщених між верхньою межею каналу і ядра (плюс) і розміщених між нижніми межами каналу і ядра (мінус).

Якщо використовувати для поперечної похідної поздовжньої швидкості

течії оцінку:  $\frac{\partial v_z^\pm}{\partial \xi} \approx (w^\pm - v_k)(1 \mp \gamma^\pm)$ , в якій  $w^\pm$  – значення поздовжніх швидкостей границь каналу, а  $v_k$  – значення швидкості руху твердого ядра, то відношення

$\frac{\tau_{zz}}{\tau_{zy}}$

можна записати так:

$$\frac{\tau_{zz}}{\tau_{zy}} = F_L \rho^\pm \cdot (1 \pm \gamma) \quad , \quad \rho^\pm = \frac{\frac{\partial v_z^\pm}{\partial \zeta_L}}{w^\pm - v_k - F_L^2 \frac{\partial}{\partial \zeta_L} \int \frac{\partial v_z^\pm}{\partial \zeta_L} d\xi} \quad (6.3)$$

Слід зазначити, що запис рівняння течії в напруженнях за допомогою безрозмірних координат  $\zeta_L$  та  $\xi$  приводить до того, що похідна від тиску по поздовжній координаті набуває множник  $F_L$ , який завдяки геометрії каналів, завжди набагато більше одиниці. У граничному випадку, коли  $F_L > 0$  зникне рушійна сила процесу, тобто поздовжній градієнт тиску. Але слід зазначити, що з необмеженим ростом довжини каналу, збільшується й різниця тисків на його кінцях таким чином, що градієнт тиску залишається кінцевою величиною. Щоб показати цей факт, необхідно використовувати безрозмірний тиск  $\bar{P}$ . При цьому тиск  $P$  пов'язаний з безрозмірним тиском  $\bar{P}$  множником  $P^*$  таким чином, що різниця тисків на кінцях каналів рівна  $P^*$ ; та  $P F_L \sim 1$ . Тоді фактично множник  $F_L$  при градієнті тиску  $\bar{P}$  не є присутнім; і граничний перехід  $F_L \rightarrow 1$  можна виконати без втрати рушійної сили течії. Все наведене є рівноцінним, операції поділу компонентів тензора напруження  $\tau_{zz}$  і  $\tau_{zy}$  на величину зміни тиску в поперечному напрямку на відстані ширини каналу, що дорівнює  $(P_k - P_n)h/L$ . Щоб не вводити нових позначень, нижче замість  $\bar{\tau}_{zz}$  і  $\bar{\tau}_{zy}$  були прийняті безрозмірні компоненти  $\bar{\tau}_{zz} / ((P_k - P_n)h/L)$  та  $\bar{\tau}_{zy} / ((P_k - P_n)h/L)$ .

У безрозмірних координатах похідні від компоненти  $\bar{\tau}_{zy}$  у напрямках мають один порядок:  $\frac{d\bar{\tau}_{zy}}{d\zeta_L} = \frac{d\bar{\tau}_{zy}}{d\xi}$ . З урахуванням цього співвідношення та сказаного вище для величини поздовжньої швидкості  $v_z^\pm(z, y)$  можна записати такі рівняння й граничні умови:

$$\frac{d\bar{P}}{d\zeta_L} \cdot \frac{1}{1 + F_L^2 P^\pm (1 \mp \gamma^\pm)} = \frac{d\bar{\tau}_{zy}}{d\xi} ; \quad \bar{\tau}_{zy} = \mu \left( \frac{\partial v_z^\pm}{\partial y} + \frac{\partial v_y^\pm}{\partial z} \right) ;$$

$$\bar{\tau}_{zy}(\gamma^\pm) = \pm \frac{\frac{\bar{\tau}}{\sqrt{2}}}{\sqrt{1 + F_L^2 (P^\pm)^2 \cdot (1 \mp \gamma^\pm)^2}} ; \quad (6.4)$$

$$v_z^+(h) = w^+ ; \quad v_z^-(-h) = w^- ;$$

$$v_z^+(\Gamma^+) = v_k , \quad v_z^-(\Gamma^-) = v_k .$$

Після проведення інтегрування рівняння (6.4) отримуємо наступне вираження для швидкості  $v_z^\pm$ :

$$v_{\pm}^{\pm}(\zeta_L, \xi) = \frac{h}{2\mu} \frac{d\bar{P}}{d\zeta_L} \frac{\xi^{\pm}}{1 + F_L^{\pm} P^{\pm} (1 \mp \gamma^{\pm})} + c_1 \xi + (F_L^{\pm} \cdot \frac{\partial}{\partial \zeta_L} \int \frac{dv_{\pm}^{\pm}}{d\zeta_L} d) \xi + c_2^{\pm}, \quad (6.5)$$

де  $c_1$  та  $c_2^{\pm}$  – постійні, які потрібно знайти за допомогою граничних умов.

Постановка в рівняння (6.5) значень  $\xi = \pm 1$ , та  $\gamma^{\pm}$  а також умови (6.1) на межах твердого ядра приводить до наступної системи рівнянь для  $c_2^{\pm}$ :

$$\begin{aligned} \frac{h}{2\mu} \frac{d\bar{P}}{d\zeta_L} \frac{1}{1 + F_L^2 P^+ (1 - \gamma^+)} + F_L^2 \frac{\mu}{h} \Delta^+ + c_1 + c_2^- &= w^+; \\ \frac{h}{2\mu} \frac{d\bar{P}}{d\zeta_L} \frac{1}{1 + F_L^2 P^- (1 + \gamma^-)} - F_L^2 \frac{\mu}{h} \Delta^- - c_1 + c_2^- &= w^-; \\ \frac{h}{2\mu} \frac{d\bar{P}}{d\zeta_L} \frac{(\gamma^+)^2}{1 + F_L^2 P^+ (1 + \gamma^+)} + F_L^2 \frac{\mu}{h} \Delta^+ \gamma^+ - c_1 \gamma^+ + c_2^- &= \\ &= \frac{h}{2\mu} \frac{d\bar{P}}{d\zeta_L} \frac{(\gamma^-)^2}{1 + F_L^2 P^- (1 + \gamma^-)} + F_L^2; \\ &\Delta^- \gamma^- + c_1 \gamma^- + c_2^-; \\ \frac{d\bar{P}}{d\zeta_L} \cdot \frac{\gamma^+}{1 + F_L^2 P^+ (1 - \gamma^+)} + c_1 &= \frac{\bar{\tau} \sqrt{2}}{\sqrt{1 + F_L^2 (P^+)^2 (1 - \gamma^+)^2}}; \\ \frac{d\bar{P}}{d\zeta_L} \cdot \frac{\gamma^-}{1 + F_L^2 P^- (1 + \gamma^-)} + c_1 &= \frac{\bar{\tau} \sqrt{2}}{\sqrt{1 + F_L^2 (P^-)^2 (1 + \gamma^-)^2}}; \\ \Delta^{\pm} &\equiv \frac{\partial}{\partial \zeta_L} \int \frac{\partial v_{\pm}^{\pm}}{\partial \zeta_L} d\xi \end{aligned} \quad (6.6)$$

З останніх двох рівнянь вираження для  $c_1$  підставляються в перші два рівняння, після чого ці постійні виключаються. Третє рівняння системи (6.6) і різниця двох останніх рівнянь приводить до двох рівнянь для визначення тиску та меж ядра:

$$\begin{aligned} \frac{(1 - \gamma^+)^2}{1 + F_L^2 P^+ (1 + \gamma^+)} - \frac{(1 + \gamma^-)^2}{1 + F_L^2 P^- (1 + \gamma^-)} &= \frac{2\mu(w^+ - w^-)}{hd\bar{P}/d\zeta_L} + F_L^2 \frac{2\mu}{hd\bar{P}/d\zeta_L} [\Delta^+ (1 - \gamma^+) + \Delta^- (1 + \gamma^-)] \\ \frac{\gamma^+}{1 + F_L^2 P^+ (1 - \gamma^+)} - \frac{\gamma^-}{1 + F_L^2 P^- (1 + \gamma^-)} &= \frac{\bar{\tau} / \sqrt{2}}{d\bar{P}/d\zeta_L} \cdot \left[ \frac{1}{1 + F_L^2 (P^+)^2 (1 - \gamma^+)^2} + \frac{1}{1 + F_L^2 (P^-)^2 (1 + \gamma^-)^2} \right] \\ v_k &= \frac{w^+ + w^-}{2} - \frac{h}{4\mu} \frac{d\bar{P}}{d\zeta_L} \left[ \frac{(1 - \gamma^+)^2}{1 + F_L^2 P^+ (1 - \gamma^+)} + \frac{(1 - \gamma^-)^2}{1 + F_L^2 P^- (1 - \gamma^-)} \right] + F_L^2 \frac{1}{2} [\Delta^+ (1 - \gamma^+) + \Delta^- (1 + \gamma^-)] \end{aligned} \quad (6.7)$$

Як видно, вираження для визначення швидкості руху твердого ядра  $u_k$  є рівнянням першого порядку для тиску  $\bar{P}(\zeta_L)$ , а сам тиск повинен задовольняти граничним умовам на кінцях каналу:  $\bar{P}(\zeta_h=0)=\bar{P}$ ;  $\bar{P}(\zeta_k=1)=\bar{P}$ . Для цього є одна постійна інтегрування, а величина  $u_k$  є другою постійною інтегрування. Перші два рівняння в (6.7) застосовують для знаходження границь ядра  $\gamma^\pm$  для матеріалу, в якому  $\mu$  та  $\tau$  є постійними величинами,  $\frac{d\bar{P}}{d\zeta_L} = const$ . Таким чином отримуємо рівняння для визначення величини  $u_k$  при цьому границі  $\gamma^\pm$  ядра стають постійними.

Виходячи з вищезазначеного модель течії неklasичного бінгамівського матеріалу, яка описується системою рівнянь (6.7) можна поширити на матеріали, які стискаються, і задовольняють умовам баротропності. Баротропний матеріал відрізняється від матеріалу, що не стискається, загальним видом рівняння збереження кількості речовини та видом діагональних компонентів тензора швидкості деформацій [25, 26, 27]. Таким чином, рівняння стану та збереження кількості речовини можна записати так:

$$\sigma_{ik} = -P\sigma_{ik} + \left( \mu + \frac{\tau}{\sqrt{I_2}} \right) \left( \frac{\partial v_i}{\partial F_k} + \frac{\partial v_k}{\partial F_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial v_m}{\partial F_m} \sigma_{ik} \right); \quad (6.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) = 0 \quad ; \quad I_2 = \sum_{i,k} \left( \frac{\partial v_i}{\partial F_k} + \frac{\partial v_k}{\partial F_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial v_m}{\partial F_m} \sigma_{ik}^2 \right), \quad (6.9)$$

де  $\sigma_{ik}$  - компоненти повного тензора напружень в матеріалі.

Звідси виходить, що вираження та рівняння (6.3) - (6.7) зберігають свій загальний вигляд, а уявлення для величин змінюються наступним чином:

$$P^\pm = \frac{1}{3} \cdot \frac{\left[ \frac{\partial v_z^\pm}{\partial \zeta_L} + \frac{2\partial}{\partial \xi} \left( \frac{1}{\rho} \int \frac{\partial \rho v_z^\pm}{\partial \zeta_L} d\xi \right) \right]}{w^\pm - v_k - F_L^2 \frac{\partial}{\partial \zeta_L} \left( \frac{1}{P} \int \frac{\partial \rho v_z^\pm}{\partial \zeta_L} d\xi \right)} \cdot (1 \boxtimes \gamma^\pm);$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dP} \left( \frac{dP}{dP} v_z + \frac{dP}{dy} v_y \right); \quad (6.10)$$

$$\Delta^\pm = \frac{\partial}{\partial \zeta_L} \left( \frac{1}{P} \int \frac{\partial \rho v_z}{\partial \zeta_L} d\xi \right).$$

Таким чином наведені рівняння (6.9) з формулами (6.10) складають модель стискаємого баротропного бінгамівського матеріалу із в'язкістю та порогом зрушення, які залежать від тиску.

Слід зазначити, що отримання рівнянь даної моделі базується на двох принципових елементах. Перший з них, полягає в тому, що якісно оцінювалися

похідні  $\frac{\partial v_z^\pm}{\partial \xi}$ , а сутність другого елемента, полягає в тому, що в безрозмірних змінних поздовжні та поперечні похідні компоненти  $\tau_{zy}$  одного порядку. Приймаючи наведені допущення, модель набуває вид рівнянь (6.9).

Далі можливий розвиток моделі в двох напрямках дослідження. В першому напрямках, для величин робляться апріорні оцінки за допомогою граничних умов на стінках каналу та на його торцях. Тоді, як уже зазначалося, рівняння (6.9) вирішуються відносно тиску  $P(z)$  та границь ядра  $\gamma^\pm(z)$ , причому для останніх рівняння є алгебраїчними. Інший напрямок, величини вважаються функціями координати  $z(\zeta_L)$ . Для їхнього визначення необхідно використовувати вираження (6), як для визначення швидкості  $v_z^\pm$ . При цьому, враховуючи те, що швидкість  $v_z^\pm$  залежить від величин  $\gamma^\pm$ , містять похідні за  $z$ , для визначення границь ядра  $\gamma^\pm(z)$  отримуємо нелінійні диференціальні рівняння другого порядку. Для однозначної можливості розв'язання цих рівнянь необхідно задати на торцях каналу умови виду:  $\gamma^\pm(\zeta_L=0)=\gamma_0^\pm$ ;  $\gamma^\pm(\zeta_L=1)=\gamma_L^\pm$ . Таким чином рівняння (6.9) перетворюються в сукупність трьох диференціальних рівнянь – двох рівнянь другого порядку для  $\gamma^\pm$ , і одного диференціального рівняння першого порядку для тиску, в якому величина постійної швидкості ядра  $u_k$  є відсутньої.

У подальшому було розглянуто деякі розв'язання моделі течії в наближенні  $F_L = 0$ , тобто незалежно від вибору одного із двох описаних напрямків, а також виводяться рівняння першого порядку по малості параметра  $F_L^2$  у рамках вищенаведеного першого напрямку дослідження.

Повертаючись до рівняння (6.7) слід відмітити, що до нього входить малий параметр  $F_L$ , який для каналів, що утворюють робочу камеру черв'ячної машини є досить малим [28]. Тому доцільно розглянути рішення цих рівнянь

саме у наближенні  $F_L = 0$ . У цьому випадку для похідної  $\frac{dP}{d\zeta_L}$  виходить таке диференціальне рівняння першого порядку:

$$\left(-v_k + \frac{w^+ + w^-}{2}\right) \cdot \frac{4\mu}{h} = \frac{d\bar{P}}{d\zeta_L} \left\{ \left[ 1 - \frac{\bar{\tau}}{d\bar{P}} - \frac{\mu \cdot \frac{w^+ + w^-}{2h} \frac{d\bar{P}}{d\zeta_L}}{\frac{\tau}{d\bar{P}} - 1} \right] + \left[ 1 - \frac{\bar{\tau}}{d\bar{P}} + \frac{\mu w^+ + w^-}{2h} \frac{d\bar{P}}{d\zeta_L} \right] \right\} - \frac{2h}{\mu} F_L^2 [\Delta^+ (1 - \gamma^+) + \Delta^- (1 - \gamma^-)] \quad (6.11)$$

При рішенні цього рівняння, спочатку необхідно розглянути течію з нерухожими границями, рушійною силою якою є градієнт тиску. У такій течії  $w^+ = w^- = 0$ . Виходячи з цього для визначення величини градієнту тиску  $\frac{d\bar{P}}{d\zeta_L}$  при нерухомих границях, отримуємо квадратне рівняння наступного вигляду:

$$\frac{d\bar{P}}{d\zeta_L} = \left( \frac{v_k \mu}{\Delta P_h h} - \tau \right) \pm \left( \frac{v_k \mu}{\Delta P_h h} - \bar{\tau} \right)^2 - \tau^2, \quad \mu = \mu(P), \quad \bar{\tau} = \bar{\tau}(P). \quad (6.12)$$

де  $\Delta P_h = P_k - P_n$ .

Треба зазначити, що навіть тоді, коли величини  $\mu$  та  $\tau$  мають досить просту залежність від тиску  $\bar{P}$ , це рівняння не інтегрується у квадратурах. Для кожного конкретного виду залежностей  $\mu(\bar{P})$  і  $\tau(\bar{P})$  потрібне чисельне рішення. Однак є спеціальний випадок, коли, з одного боку, можна одержати явний результат великої спільності, а з другого боку – з суттєвим обмеженням цієї спільності. Це випадок, коли величини  $\mu(\bar{P})$  й  $\tau(\bar{P})$  є пропорційними одна до одної. Якщо коефіцієнт пропорційності між ними позначити через  $\lambda_p$ , то для довільного характеру залежності, наприклад,  $\mu(\bar{P})$ , для тиску  $\bar{P}$  виходить таке співвідношення:

$$\int \frac{\bar{P}}{P_0} \frac{d\bar{P}}{\mu(\bar{P})} = \left[ \left( \lambda - \frac{v_k}{\Delta P_h h} \right) + \sqrt{\frac{v_k}{\Delta P_h h} \left( \frac{v_k}{2h_{\Delta P_h}} - \lambda \right)} \right] \zeta_L. \quad (6.13)$$

Співвідношення (6.13) є продовженням виразу (6.12), де перед квадратним коренем є залишеним знак «плюс». Вибір знака обумовлений тим, що якщо у формулі (6.12), тоді для  $v_k$  отримуємо значення швидкості в'язкої ньютонівської течії на вісі плаского каналу. Тому, саме такій відповідності

задовольняє вибір знака «плюс». Величина  $u_k$  визначається з умови, що  $\bar{P} = \bar{P}_k$  при  $\zeta_L = 1$ . Звідси отримуємо вираження для визначення швидкості ядра  $u_k$ :

$$u_k = \frac{h}{2} \cdot \frac{(F_\mu + \lambda)^2}{F_\mu}, F_\mu \equiv \int_{\bar{P}_0}^{\bar{P}_L} \frac{d\bar{P}}{\mu(\bar{P})}. \quad (6.14)$$

У загальному випадку. Результат рішення співвідношення (6.11) приводить до отримання такого рівняння

$$\left( \frac{\mu}{2h} \frac{(w^+ - w^-)}{\Delta P_h} - \frac{2v_k \cdot \mu}{\Delta P_h h} \right) \left( \frac{d\bar{P}}{d\zeta_L} - \bar{\tau} \right)^2 \frac{dP}{d\zeta_L} = 2 \left\{ \left( \frac{dP}{d\zeta_L} \right)^2 \left( \frac{\mu}{2h} \frac{(w^+ - w^-)}{\Delta P_h} \right)^2 + \left( \frac{d\bar{P}}{d\zeta_L} - \bar{\tau} \right)^4 \right\}. \quad (6.15)$$

Це рівняння допускає тільки чисельне рішення через те, що включає всі ступені  $\frac{d\bar{P}}{d\zeta_L}$ . Шляхом огрублення це рівняння можна звести до попереднього, що належить до випадку  $w^+ = w^- = 0$ . Для цього необхідно повернутися до співвідношення (6.11), з якого випливає, що у правій частині маємо квадрати доданків, з яких складаються вираження у квадратних дужках. Звідси можна побачити, що якщо  $w^+ = w^- = 0$  то отримуємо рівняння (6.12). Тому замість рівняння (6.15) можна записати близьке до нього рівняння такого виду:

$$\frac{d\bar{P}}{d\zeta_L} = \left[ \frac{1}{R} \left( \frac{v_k \cdot \mu}{h\Delta P_h} - \frac{\mu(w^+ + w^-)}{\Delta P_h h} \right) - \tau \right] + \sqrt{\left[ \frac{1}{R} \left( \frac{v_k \cdot \mu}{h\Delta P_h} - \frac{\mu(w^+ + w^-)}{\Delta P_h h} \right) - \tau \right]^2 - \tau^2};$$

$$R = 1 + \left[ \frac{\mu_0 + \mu_L}{4h} \cdot \frac{L}{\bar{P}_L - \bar{P}_0} \cdot (w^+ - w^-) \right]^2 / \left[ 1 - \frac{(\tau_L + \tau_0)L}{2(P_L - P_0)} \right]. \quad (6.16)$$

Обмежувачись випадком, коли  $\tau(P) = \lambda\mu(P)$  для величини  $u_k$  отримуємо наступну формулу для визначення швидкості ядра:

$$u_k = \frac{w^+ + w^-}{2} + \frac{h}{2} \cdot \frac{(F_\mu + \lambda)^2}{F_\mu} R. \quad (6.17)$$

Для того, щоб одержати рівняння першого наближення щодо величини малого параметра  $F_L$  слід повернутися до рівнянь (6.7), це необхідно, для того щоб всі вхідні в них величини представити у вигляді рядів по величині  $F_L^2$  так, як цей параметр представлено у наведених рівняннях тільки в другому ступені. При цьому, слід розкласти в ряд тиск  $\bar{P}$ , в'язкість і поріг зрушення. У першому



рівнянні в (6.7) доданок з величинами  $\Delta^\pm$  слід залишити в нульовому наближенні через наявність множника  $F^2_L$ . У розкладаннях всіх величин нульові наближення відзначаються індексом «нуль», а перші наближення – індексом «два». Опускаючи всі проміжні перетворення через їхню громіздкість, остаточний результат набуває вид такої лінійної системи рівнянь для визначення координат границь ядра  $\gamma_2^\pm$ :

$$\gamma_2^+(1-\gamma^+)+\gamma_2^-(1+\gamma^-)=-\frac{1}{2}P_0^+(1-\gamma_0^+)^3+\frac{1}{2}P_0^-(1+\gamma_0^-)^3+\frac{w^+-w^-}{h}\frac{\mu(\bar{P}^0)}{d\bar{P}^0} \frac{d\bar{P}_2}{d\zeta_L};$$

$$\left(\begin{array}{c} \frac{d\bar{P}_2}{d\zeta_L} \\ \frac{d\zeta_L}{d\bar{P}^0}-\frac{1}{\mu(\bar{P}^0)}\frac{d\mu}{d\bar{P}}\Big|_{\bar{P}^0}\cdot\bar{P}_2 \\ \frac{d\zeta_L}{d\zeta_L} \end{array}\right); \quad (6.18)$$

$$\gamma_2^+-\gamma_2^- = P_0^+\gamma_0^+(1-\gamma_0^+)+P_0^-\gamma_0^-(1+\gamma_0^-)+\frac{\tau(\bar{P}^0)}{d\bar{P}^0}\cdot\left(\begin{array}{c} \frac{d\bar{P}_2}{d\zeta_L} \\ \frac{d\zeta_L}{d\bar{P}^0}-\frac{1}{\tau(\bar{P}^0)}\frac{d\tau}{d\bar{P}}\Big|_{\bar{P}^0}\cdot\bar{P}_2 \\ \frac{d\zeta_L}{d\zeta_L} \end{array}\right),$$

де  $\bar{P}^0$  – нульове наближення для тиску.

Дане позначення введено в (6.18) для того, щоб не можливо було переплутати з позначенням  $\bar{P}^0$  з граничних умов для тиску  $\bar{P}(\zeta_L)=P_0$ .

Система рівнянь (6.18) не пов'язана обмеженнями і має універсальний вигляд. Якщо ж зв'язок між  $\tau$  та  $\mu$  у вигляді пропорційності має місце, то в якості  $\gamma_0^\pm(\zeta_L)\gamma_0^\pm(\zeta_L)\gamma_0^\pm(\zeta_L)$  та  $\underline{P}(\zeta_L)\bar{P}_0(\zeta_L)$  слід підставити (6.17) і (6.16) як функції у систему рівнянь (6.7), яка взята з нульовим наближенням. Розкладання вираження для швидкості ядра  $v_k$  дає для другого наближення наступне вираження, яке можна вважати рівнянням для уточненої величини тиску  $\bar{P}_2$ :

$$\frac{v_{k2}-\left(\frac{1}{2}\right)\left[\Delta_0^+\cdot(1-\gamma_0^+)+\Delta_0^-\cdot(1+\gamma_0^-)\right]}{\frac{h}{2\mu(\bar{P}^0)}\frac{d\bar{P}^0}{d\zeta_L}\left[(1-\gamma_0^+)^3-(1+\gamma_0^-)^3\right]-(w^+-w^-)}\cdot\frac{d\bar{P}^0}{d\zeta_L}=\frac{d\bar{P}_2}{d\zeta_L}-\frac{d\ln\mu(P^0)}{d\zeta_L}\cdot\bar{P}_2 \quad (6.19)$$

Це лінійне рівняння першого порядку по  $\bar{P}_2$  інтегрується у квадратурах на підставі нульового наближення, якщо таке є відомим. Коли усі величини є відомими; а  $P^{(0)}(\zeta_L)$  – за рівнянням (6.13), тоді величини  $\gamma_0^\pm$  мають такий вигляд:

$$\gamma_0^\pm = \frac{\tau}{d\bar{P}^0} \pm \frac{\mu(\bar{P}^0)(w^+ - w^-)}{2hd\bar{P}^0} / \left( \frac{\tau(\bar{P}^0)}{d\bar{P}^0} - 1 \right) \frac{d\zeta_L}{d\zeta_L} \quad (6.20)$$

Таким чином, у рамках запропонованої моделі отримані рівняння нульового та другого наближення для визначення характеристик бінгамівської течії в пласкому каналі. При цьому використовувалось припущення про малість параметра  $F_L$ , який є не обмежувачим, з огляду можливих додатків до течій рідин у гвинтових каналах. Рівняння (6.7), (6.18) та (6.19) є загальними та не залежать від гіпотези. Різні види залежності  $\mu(P)$  і  $\tau(P)$  можуть бути вивчені тільки чисельно. Гіпотеза про пропорційність в'язкості й порога зрушення в реальній ситуації, коли  $\mu$  та  $\tau$  є довільними величинами, характеризує за допомогою параметра  $\lambda$  ступінь їх відмінності один від одного на інтервалі вісі тисків ( $P_0, P_L$ ). Результат, що виражається формулою (6.14), фактично означає, що швидкість руху квазитвердого ядра визначається мірою відхилення величин  $\mu$  і  $\tau$ , і середнім значенням величини зворотної в'язкості на такому ж інтервалі тисків. Як видно з формули (6.15), швидкість твердого ядра залежить як від суми, так і від різниці швидкостей на границях каналу. Стискаємість бінгамівського матеріалу показана у величинах, можна констатувати, що для довгих каналів у нульовім наближенні стискаємість не виявляє впливу на течію, а у тільки другому наближенні впливає. Пояснення цього факту полягає в тому, що вважається, що при  $F_L = 0$  середній градієнт тиску залишається кінцевою величиною, тобто різниця тисків на кінцях каналу стає нескінченною величиною. Для баротропного стискаемого матеріалу це означає, що якщо на одному кінці каналу величина тиску стає нескінченною, то густина матеріалу на цьому кінці теж повинна стати нескінченною. Тобто густина повинна зростати, принаймні, як величина  $1/F_L^2$ . Але тоді величини, в які входить густина  $\rho(P)$  також стають нескінченно великими так, що їх добуток на малий параметр  $F_L^2$  стає кінцевим; і розкладання за малим параметром в рівняннях (6.7) проводити не можна. Але оскільки все ж такі розкладання були виконані, то це свідчить про те, що залежність густини матеріалу від тиску є обмеженою величиною. Таким чином при прагненні величини тиску до нескінченності, величина густини залишається кінцевою величиною. Тому, при конструюванні величин  $\rho(\bar{P}^0)$ , слід використовувати залежності, що задовольняють умові  $\lim_{(\bar{P}^0) \rightarrow \rho^\infty} \rho(\bar{P}^0) \rightarrow \rho^\infty$ , якщо  $(\bar{P}^0) \rightarrow \infty$ .

## 6.2 Метод обчислення енергії дисипації при течії узагальнено-зрушеної рідини у каналах технологічного обладнання

В даній роботі розглянуто проблему визначення енергії дисипації під час течії узагальнено-зрушеної рідини у каналах технологічного обладнання. Відомо, що під час течії високов'язких неньютонівських рідин виникає проблема нагріву даної речовини. Це пов'язано в першу чергу з тим, що під час транспортування матеріалу включається механізм дисипації, що призводить до перегріву матеріалу. У свою чергу це впливає на зміни фізико-хімічних властивостей матеріалу та на техніко-економічні показники відповідного обладнання. Нами пропонується метод обчислення енергії дисипації при течії узагальнено-зрушеної рідини в каналах шнекових машин. Для розв'язання даної задачі нами застосовано метод суперпозиції для побудови полів більшої розмірності з полів меншої розмірності з різними граничними умовами. Розглядається канал пласкої та прямокутної форми. Рух рідини здійснюється у поздовжньо та поздовжньо-поперечних напрямках каналу. Для обчислення величини енергії дисипації узагальнено-зрушеної рідини попередньо необхідно провести розбивку перетинів каналів на ділянки з різними виразами для швидкості течії. При цьому кожна з підобластей складається із двох криволінійних трикутників і одного прямокутника. Розбивка прямокутника перетину прямого каналу та обчислення інтегралів від похідних швидкості є обов'язковими етапами розрахунків. Запропонований метод дозволяє обчислити енергію дисипативного тепловиділення при розрахунку оптимальних параметрів технологічного обладнання.

Обмеженість природних енергоресурсів у світі викликає гостру потребу у створенні нових енерго- та ресурсозберігаючих технологій та розробці екологічно безпечного устаткування. До теперішнього часу виготовлення значної частини продукції на виробництвах супроводжується підвищеними витратами енергоресурсів, вартість яких останнім часом має стійку тенденцію до зростання. У цих умовах розробка та оптимізація технологічного обладнання з підвищеним енергозбереженням є одним із пріоритетних напрямків у світовій економіці.

Більшість виробничих процесів пов'язані з рухом складних дисперсних систем, більшість з яких є неньютонівськими рідинами. Течії рідин із малими значеннями в'язкості знаходять застосування, як проміжні теплоносії, в оболонках теплових апаратів. Як правило, рух рідини з великою в'язкістю відбувається у каналах робочих камер різноманітних технологічних машин і залежить від багатьох параметрів, а саме: тиску, витрати, швидкості зрушення, температури, ступеня перемішування, дисперсності та ін. Таким чином, знання структури та режимів течії відіграє важливу роль в організації технологічних процесів і дозволяє впливати на їх енергоефективність шляхом встановлення раціональних значень гідродинамічних, теплових, масообмінних та інших показників.

В більшості виробничих технологіях відома велика кількість феноменологічних реологічних моделей, які описують особливості нелінійних матеріалів за допомогою різноманітних рівнянь стану. Більшість з них базуються на експериментальних дослідженнях і мають наявність різних залежностей між напруженням зрушення, швидкістю зрушення, температурою (рідше тиском) і використовуються для опису окремих матеріалів. Крім цього, складна залежність реологічних моделей, не завжди враховує всі функціональні зв'язки між основними параметрами процесу, чим суттєво ускладнює розробку нових енергоефективних технологій і потребує значних фінансових і часових витрат.

Теплові процеси є найпоширенішими процесами в хімічних та харчових технологіях [1-3]. Сьогодні багато наукових робіт описують теплопередачу ньютонівських рідин [4-5]. Але є досить багато хімічних сполук (полімери, пластмаси, будівельні суміші) та харчових продуктів (шоколад, борошняні, кондитерські вироби), які відносяться до багатокомпонентних систем, що мають відносно велику в'язкість і нелінійний характер течії, це так звані неньютонівські рідини [6-7].

Для оцінки структурно-механічних властивостей необхідно знати тип структури, залежність напруження від швидкості зрушення, а також величину дисипації [8].

Відомо, що під час свого руху неньютонівська рідина втрачає частину енергії, яка переходить у дисипативне тепло [9]. Знання величини дисипації дозволяє підібрати технологічне обладнання з найкращим запасом потужності, тим самим знизивши витрати на виробництво продукції [10].

Клас неньютонівських рідин дуже широкий. До нього входять різні середовища, які мають деякий ступінь пружності, їхня внутрішня енергія може залежати від деформацій; а рівняння стану містить незалежні кінематичні параметри [11].

Важливим прикладом неньютонівської реології є матеріали, поведження яких моделюється неньютонівською рідиною, в'язкість якої залежить від швидкості зрушення, наприклад: полімери з наповнювачами, гелі, золі, макромолекулярні розчини [12].

З проведеного аналізу технічної літератури можна зробити висновок, що з усього різноманіття неньютонівських рідин найбільш поширеними є представники трьох класів – це бінгамівські, узагальнено-зрушені та степеневі рідини [13]. Під терміном «узагальнено-зрушені рідини» маємо на увазі рідини, в'язкість яких залежить від швидкості зрушення довільним способом [14]. На практиці врахування реологічних особливостей матеріалу часто зводиться до рівняння, яке зв'язує в'язкість з градієнтами швидкостей [15].

У роботах авторів [16-17] показано що при використанні різноманітних матеріалів близьких за своїми фізичними властивостями до неньютонівських рідин, стикаються з проблемою, пов'язаною з дисипацією механічної енергії. Висока динамічна в'язкість викликає дисипацію механічної енергії, яка в свою

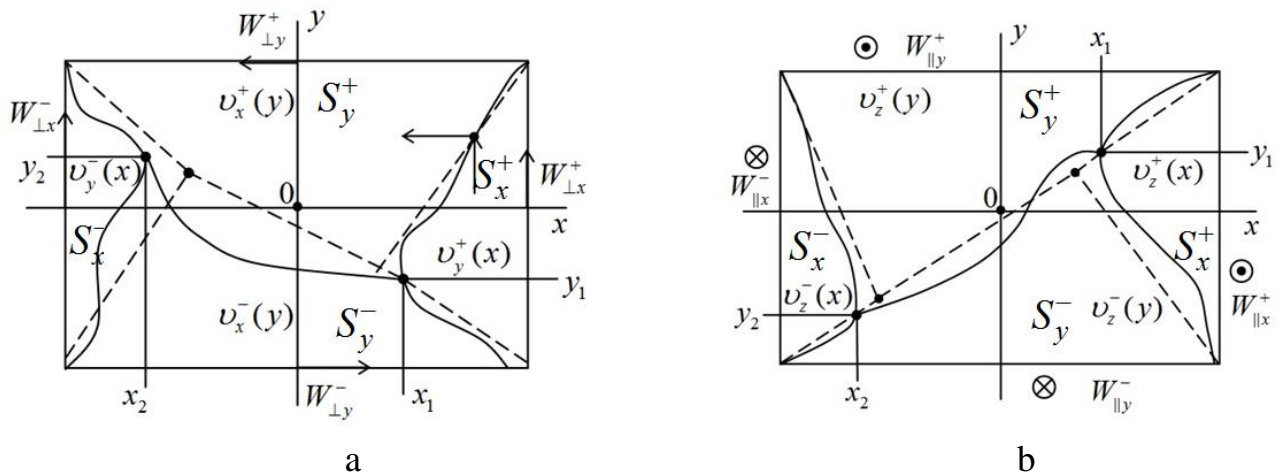
чергу призводить до перегріву матеріалу навіть за порівняно невеликих швидкостей подачі [18-20].

Відомо, що при течії неньютонівських рідин з великою в'язкістю в прямому каналі, частина енергії перетворюється в дисипативне тепло [21-22]. В роботі [23] показано в рівняння теплообміну окремим доданком входить джерело дисипативного тепловиділення. В роботі [24-26] запропоновано метод визначення величини дисипації при течії в'язкопластичної рідини.

Виходячи з проведеного аналізу та на підставі отриманих аналітичних рішень моделей течії неньютонівських рідин нами пропонується метод визначення обчислення енергії дисипації при течії узагальнено-зрушеної рідини у каналах базової геометрії технологічного обладнання. Отримані результати дозволять в подальшому визначати необхідні раціональні параметри різноманітного технологічного устаткування з метою підвищення його енергоефективності.

У даній роботі нами розглядається течія узагальнено-зрушеної рідини. Рух рідини здійснюється у поздовжньо та поздовжньо-поперечних напрямках каналу пласкої та прямокутної форми. Для обчислення величини енергії дисипації узагальнено-зрушеної рідини попередньо необхідно провести розбивку перетинів каналів на відповідні ділянки з різними виразами для швидкості течії, це докладно було розглянуто в у роботах [27-28].

Розбивка плаского та прямокутного каналів представлена на рисунку, елементи розбивки позначені через величини  $S_y^\pm$ ,  $S_x^\pm$ . З метою скорочення записів [29] різні види течії, які співвіднесені з відповідними їм підобластями розбивок, можуть бути записані у вигляді рівнянь, що будуть наведені нижче.



**Рисунок 6.2 - Split of the rectangular channel and linearization of the split:** а – for cross-sectional flow; б – for longitudinal flow

Розбивка прямокутника перетину прямого каналу та обчислення інтегралів від похідних швидкості є обов'язковими етапами розрахунків. Але, якщо для в'язкопластичної рідини внесок у дисипацію вносить тільки частина поперечного перерізу каналу [24], що лежить поза твердим ядром, то узагальнено-зрушена рідина має текучість за всім перетином каналу [10]. Якщо

при виконанні інтегрувань від похідних швидкості течії для в'язкопластичної рідини виникають кубічні поліноми, а саме інтегрування виконується без труднощів, то при інтегруванні похідних швидкості узагальнено-зрушеної рідини потрібно виконати певні перетворення, які наведено в даній роботі.

Нижче послідовно розглядаються ці перетворення. У випадку пласкої поздовжньої течії величина дисипації, що доводиться на поперечний перетин каналу, має такий вигляд:

$$\dot{E} = \iint ds^+ \left( \frac{\partial v^+}{\partial y} \right)_\mu^2 + \iint ds^- \left( \frac{\partial v^-}{\partial y} \right)_\mu^2; \quad \mu = \alpha + \beta \left| \frac{\partial v^\pm}{\partial y} \right|, \quad (6.21)$$

$$\frac{\partial v^\pm}{\partial y} = \frac{\alpha}{2\beta} + \left( \frac{\alpha^2}{4\beta^2} \pm \frac{y - y^*}{\beta} \frac{dP}{dz} \right)^{1/2}. \quad (6.22)$$

де  $\dot{E}$  – dissipation on the intersection of flat channel, J/m<sup>3</sup>;  
 $\alpha$  і  $\beta$  – постійні, значення яких визначаються або дослідним шляхом, або в результаті кусково-лінійної апроксимації графіка функції  $\mu = \mu(I_2)$ , нами це докладно було розглянуто в роботах [10, 27].

Якщо підставити другий вираз в перший, з урахуванням виразу для в'язкості  $\mu$ , то виявиться, що величина  $\dot{E}$  приймає наступний вид:

$$\dot{E} = \int_{-h}^{y^*} dy \left\{ \alpha \left( \frac{\partial v^-}{\partial y} \right)^2 + \beta \left| \frac{\partial v^-}{\partial y} \right| \left( \frac{\partial v^-}{\partial y} \right)^2 \right\} + \int_{y^*}^h dy \left\{ \alpha \left( \frac{\partial v^+}{\partial y} \right)^2 + \beta \left| \frac{\partial v^+}{\partial y} \right| \left( \frac{\partial v^+}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (6.23)$$

З останнього виразу випливає, що необхідно вміти обчислювати інтеграли такого типу:

$$\int \left( \frac{\partial v^\pm}{\partial y} \right)^m dy = \int dy \left\{ \pm \left[ \frac{\alpha^2}{4\beta^2} \pm \frac{y - y^*}{\beta} \frac{dP}{dz} \right]^{1/2} \frac{\alpha}{2\beta} \right\}^m, \quad (6.24)$$

де  $m = 2, 3$ .

Основа ступеня має бути завжди позитивною тому, що якщо  $y^* \leq y \leq h$ , то сума величин у квадратних дужках більше нуля скрізь, крім  $y = y^*$  де вона дорівнює нулю. Якщо ж  $h \leq y \leq y^*$ , то виконуються ті ж самі умови. Для обчислення ступеневого виразу треба зробити таку заміну змінної:

$$\boxtimes \frac{\alpha}{2\beta} \pm \left[ \frac{\alpha^2}{4\beta^2} \pm \frac{y - y^*}{\beta} \frac{dP}{dz} \right]^{1/2} = \boxtimes \frac{\alpha}{2\beta} + \omega^\pm ; \quad (6.25)$$

$$\pm \frac{1}{\beta} \frac{dP}{dz} = 2\omega^\pm d\omega^\pm \quad (6.26)$$

За допомогою такої заміни змінних, інтеграли від ступенів похідних можуть бути чисельно обчислені до кінця. Спочатку розглядається інтеграл від нижньої гілки в проміжку від  $-h$  до  $y^*$  при цьому має місто наступний результат:

$$\begin{aligned} \int_{-h}^{y^*} d\omega^- \frac{2\beta}{dP/dz} \omega^- \left( \frac{\alpha}{2\beta} - \omega^- \right)^m &= \frac{2\beta}{dP/dz} \cdot \int_{-h}^{y^*} \left( \frac{\alpha}{2\beta} - \omega^- \right)^{m+1} d\omega^- - \frac{2\beta}{dP/dz} \int_{-h}^{y^*} \left( \frac{\alpha}{2\beta} - \omega^- \right)^m d\omega^- \times \frac{\alpha}{2\beta} = \\ &= \left\{ \frac{2\beta}{dP/dz} \left( \frac{\alpha}{2\beta} - \omega^- \right)^{m+2} \frac{2}{m+2} - \frac{2\beta}{dP/dz} \cdot \frac{\alpha}{2\beta} \left( \frac{\alpha}{2\beta} - \omega^- \right)^{m+1} \cdot \frac{1}{m+1} \right\} \Big|_{-h}^{y^*}. \end{aligned} \quad (6.27)$$

Після підстановки меж інтегрування та виконання деяких простих перетворень має місто наступний заключний результат:

$$\begin{aligned} \int_{-h}^{y^*} dy \left( \frac{\partial v^-}{\partial y} \right)^m &= \frac{1}{m+1} \cdot \frac{\alpha}{dP/dz} \cdot \left[ \frac{\alpha}{2\beta} - \left( \frac{\alpha^2}{4\beta^2} + \frac{h + y^*}{\beta} \frac{dP}{dz} \right)^{1/2} \right]^{m+2} - \\ &- \frac{1}{m+2} \cdot \frac{2\beta}{dP/dz} \cdot \left[ \frac{\alpha}{2\beta} - \left( \frac{\alpha^2}{4\beta^2} + \frac{h + y^*}{\beta} \frac{dP}{dz} \right)^{1/2} \right]^{m+1}. \end{aligned} \quad (6.28)$$

Подібне обчислення інтеграла від похідної швидкості в проміжку від  $y^*$  до  $+h$  приводить до наступного результату:

$$\begin{aligned} \int_{y^*}^h d\omega^+ \frac{2\beta}{dP/dz} \omega^+ \left( -\frac{\alpha}{2\beta} + \omega^+ \right)^m &= \frac{2\beta}{dP/dz} \int_{y^*}^h \left( -\frac{\alpha}{2\beta} + \omega^+ \right)^{m+1} d\omega^+ + \frac{2\beta}{dP/dz} \cdot \frac{\alpha}{2\beta} \int_{y^*}^h \left( -\frac{\alpha}{2\beta} + \omega^+ \right)^m d\omega^+ = \\ &= \left\{ \frac{2\beta}{dP/dz} \cdot \frac{1}{m+2} \cdot \left( \omega^+ - \frac{\alpha}{2\beta} \right)^{m+2} + \frac{2\beta}{dP/dz} \cdot \frac{\alpha}{2\beta} \cdot \frac{1}{m+1} \cdot \left( \omega^+ - \frac{\alpha}{2\beta} \right)^{m+1} \right\} \Big|_{y^*}^h. \end{aligned} \quad (6.29)$$

Після підстановки меж інтегрування та виконання простих перетворень, має місто наступний заключний результат:

$$\begin{aligned} \int_{y^*}^h dy \left( \frac{\partial v^+}{\partial y} \right)^m &= \frac{1}{m+2} \cdot \frac{2\beta}{dP/dz} \left[ \left( \frac{\alpha^2}{4\beta^2} + \frac{h - y^*}{\beta} \frac{dP}{dz} \right)^{1/2} - \frac{\alpha}{2\beta} \right]^{m+2} + \\ &+ \frac{1}{m+1} \cdot \frac{\alpha}{dP/dz} \cdot \left[ \left( \frac{\alpha^2}{4\beta^2} + \frac{h - y^*}{\beta} \frac{dP}{dz} \right)^{1/2} - \frac{\alpha}{2\beta} \right]^{m+1}. \end{aligned} \quad (6.30)$$

Тепер необхідно (6.8) і (6.30) підставити в (6.3), поклавши при цьому  $m=2$  та  $m=3$ . В результаті цього для відповідних інтегралів отримуємо:

$$\int_{-h}^{y^*} dy \left( \frac{\partial v^-}{\partial y} \right)^2 = \frac{1}{3} \cdot \frac{\alpha}{dP/dz} \cdot \left[ \frac{\alpha}{2\beta} - \left( \frac{\alpha^2}{4\beta^2} + \frac{h+y^*}{\beta} \frac{dP}{dz} \right)^{1/2} \right]^3 - \frac{1}{4} \frac{2\beta}{dP/dz} \cdot \left[ \frac{\alpha}{2\beta} - \left( \frac{\alpha^2}{4\beta^2} + \frac{h+y^*}{\beta} \frac{dP}{dz} \right)^{1/2} \right]^4; \quad (6.31)$$

$$\int_{y^*}^h dy \left( \frac{\partial v^-}{\partial y} \right)^2 = \frac{1}{3} \cdot \frac{\alpha}{dP/dz} \cdot \left[ \left( \frac{\alpha^2}{4\beta^2} + \frac{h-y^*}{\beta} \frac{dP}{dz} \right)^{1/2} - \frac{\alpha}{2\beta} \right]^3 + \frac{1}{4} \frac{2\beta}{dP/dz} \cdot \left[ \left( \frac{\alpha^2}{4\beta^2} + \frac{h-y^*}{\beta} \frac{dP}{dz} \right)^{1/2} - \frac{\alpha}{2\beta} \right]^4; \quad (6.32)$$

$$\int_{-h}^{y^*} dy \left( \frac{\partial v^-}{\partial y} \right)^3 = \frac{1}{4} \cdot \frac{\alpha}{dP/dz} \cdot \left[ \frac{\alpha}{2\beta} - \left( \frac{\alpha^2}{4\beta^2} + \frac{h+y^*}{\beta} \frac{dP}{dz} \right)^{1/2} \right]^4 - \frac{1}{5} \frac{2\beta}{dP/dz} \times \left[ \frac{\alpha}{2\beta} - \left( \frac{\alpha^2}{4\beta^2} + \frac{h+y^*}{\beta} \frac{dP}{dz} \right)^{1/2} \right]^5; \quad (6.33)$$

$$\int_{y^*}^h dy \left( \frac{\partial v^-}{\partial y} \right)^3 = \frac{1}{4} \cdot \frac{\alpha}{dP/dz} \cdot \left[ -\frac{\alpha}{2\beta} + \left( \frac{\alpha^2}{4\beta^2} + \frac{h+y^*}{\beta} \frac{dP}{dz} \right)^{1/2} \right]^4 + \frac{1}{5} \frac{2\beta}{dP/dz} \times \left[ \left( \frac{\alpha^2}{4\beta^2} + \frac{h+y^*}{\beta} \frac{dP}{dz} \right)^{1/2} - \frac{\alpha}{2\beta} \right]^5 \quad (6.34)$$

Підстановка (6.31)...(6.34) в (6.3) дає вираз для визначення дисипації енергії узагальнено-зрушеної течії. Компактний запис цього виразу являє собою наступну ступеневу форму:

$$E = \frac{1}{3} \frac{\alpha^2}{dP/dz} (W_{\parallel y}^{+3} + W_{\parallel y}^{-3}) + \frac{3}{4} \frac{\alpha\beta}{dP/dz} (W_{\parallel y}^{+4} + W_{\parallel y}^{-4}) - \frac{2}{5} \frac{\beta^2}{dP/dz} (W_{\parallel y}^{-5} - W_{\parallel y}^{+5}), \quad (6.35)$$

$$W_{\parallel y}^{\pm} = \frac{\alpha}{2\beta} \pm \left( \frac{\alpha^2}{4\beta^2} + \frac{h \mp y^*}{\beta} \frac{dP}{dz} \right)^{1/2}. \quad (6.36)$$

Далі розглядається випадок плоскої поздовжньо-поперечної течії. При обчисленні енергії дисипації такого виду течії необхідно обчислити такий інтеграл:

$$E_{\parallel} = \int_{-h}^{+h} dy \left\{ \alpha \left[ \left( \frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^2 \right] + \beta \left[ \left( \frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^2 \right]^{3/2} \right\}. \quad (6.37)$$



Перший інтеграл від доданків із множником  $\alpha$  зводиться до суми інтегралів, які обчислювалися для пласкої поздовжньої течії.

Другий інтеграл явно обчислити неможливо. Крім того, різні похідні обчислюються в різних проміжках за  $y$  через те, що величини  $y_z^*$  та  $y_x^*$  не рівні один одному.

Якщо розглядається інтеграл із множником  $\beta$  слід врахувати, що вираження для швидкостей  $v_z(y)$  і  $v_x(y)$  фактично залежать не від  $\alpha$  та  $\beta$ , а від  $\alpha_z$ ,  $\beta_z$  та  $\alpha_x$ ,  $\beta_x$  відповідно. Вираження цих величин через  $\alpha$  і  $\beta$  наведено у роботі [10].

Щоб виконати інтегрування другого інтеграла слід спочатку визначити, яка з величин  $y_z^*$  та  $y_x^*$  більше. Для подальшої побудови не має значення їх конкретне співвідношення; тому далі приймається, що  $y_x^* < y_z^*$ . В загальному розгляді для зазначеної нерівності, так само як і для протилежної, мають місце наступні уявлення:

$$\begin{aligned} \int_{-h}^{+h} dy \left[ \left( \frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^2 \right]^{3/2} &= \int_{-h}^{y_x^*} dy \left[ \left( \frac{\partial v_z^-}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_x^-}{\partial y} \right)^2 \right]^{3/2} + \\ &+ \int_{y_x^*}^{y_z^*} dy \left[ \left( \frac{\partial v_z^-}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_x^-}{\partial y} \right)^2 \right]^{3/2} + \int_{y_z^*}^{+h} dy \left[ \left( \frac{\partial v_z^+}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_x^+}{\partial y} \right)^2 \right]^{3/2}. \end{aligned} \quad (6.38)$$

$$\begin{aligned} \int_{y_x^*}^{+h} dy \left[ \left( \frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^2 \right]^{3/2} &= \int_{-h}^{y_z^*} dy \left[ \left( \frac{\partial v_z^-}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_x^-}{\partial y} \right)^2 \right]^{3/2} + \\ &+ \int_{y_z^*}^{y_x^*} dy \left[ \left( \frac{\partial v_z^+}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_x^+}{\partial y} \right)^2 \right]^{3/2} + \int_{y_x^*}^{+h} dy \left[ \left( \frac{\partial v_z^+}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_x^+}{\partial y} \right)^2 \right]^{3/2}. \end{aligned} \quad (6.39)$$

Далі таким же чином, як це зроблено для чисто поздовжньої пласкої течії, слід ввести змінні  $W_{\parallel y}^{\pm}$  та  $W_{\perp x}^{\pm}$  за наступними правилами:

$$W_{\parallel y}^{\pm} = \left( \frac{\alpha_z^2}{4\beta_z^2} \pm \frac{y - y_z^*}{\beta_z} \frac{\partial P}{\partial z} \right)^{1/2}; \quad W_{\perp x}^{\pm} = \left( \frac{\alpha_x^2}{4\beta_x^2} \pm \frac{y - y_x^*}{\beta_x} \frac{\partial P}{\partial x} \right)^{1/2}. \quad (6.40)$$

В обох випадках необхідно вміти обчислювати інтеграли такого виду в зазначених проміжках:

$$\int dy \left\{ \left[ \frac{\alpha_z}{2\beta_z} + W_{\parallel y}^{\pm} \right]^2 + \left[ \frac{\alpha_x}{2\beta_x} + W_{\perp x}^{\pm} \right]^2 \right\}^{3/2}. \quad (6.41)$$

Якщо зневажити точністю, підінтегральний вираз можливо представити у вигляді лінійної комбінації ступенів виражень у квадратних дужках. При цьому, спираючись на результати обчислень для пласкої поздовжньої течії, можливо зазначити, що в цій лінійній комбінації обов'язково повинні бути присутні кубічні вирази. Далі, маючи на увазі, що коефіцієнти лінійної комбінації легко визначити за допомогою значення повного підінтегрального вираження (6.41) у точках  $y = \pm h$ ,  $y = y_z^*$ ,  $y = y_x^*$ , підінтегральний вираз представляється в вигляді:

$$\left[ \left( \frac{\partial v_z^\pm}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_x^\pm}{\partial y} \right)^2 \right]^{3/2} \approx c_1 \left( \frac{\partial v_z^\pm}{\partial y} \right)^3 + c_2 \left( \frac{\partial v_x^\pm}{\partial y} \right)^3 + c_3 \left( \frac{\partial v_z^\pm}{\partial y} \right)^2 + c_4 \left( \frac{\partial v_x^\pm}{\partial y} \right)^2, \quad (6.42)$$

$$\left[ \left( \frac{\partial v_z^\pm}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_x^\pm}{\partial y} \right)^2 \right]^{3/2} \approx c'_1 \left( \frac{\partial v_z^\pm}{\partial y} \right)^3 + c'_2 \left( \frac{\partial v_x^\pm}{\partial y} \right)^3 + c'_3 \left( \frac{\partial v_z^\pm}{\partial y} \right)^2 + c'_4 \left( \frac{\partial v_x^\pm}{\partial y} \right)^2. \quad (6.43)$$

де постійні  $c_i$  та  $c'_i$ ,  $i=1 \div 4$  декілька відрізняються друг від друга.

Більш точне та коректне уявлення для лівої частини (6.42) та (6.43) повинно включати шість постійних і містити крім кубічних, другі та перші ступені похідних швидкостей. Але в цьому випадку, для визначення цих постійних, потрібна система лінійних рівнянь шостого порядку, для якої конкретні вираження для постійних  $c_i (i=1 \div 6)$  є надзвичайно громіздкими. Маючи на увазі, що загальний випадок завжди можна розв'язати чисельно, далі розглядається випадок із чотирма постійними. Для конкретності обрано випадок розкладання виразу (6.42), при цьому слід зазначити, що випадок (6.43) нічим не відрізняється від нього. Для підвищення точності можна окремо двічі розв'язати системи рівнянь (6.42) і (6.43) і для  $c_i$  та  $c'_i$ , після чого, взяти їхню середньоарифметичну суму  $(c_i + c'_i)/2$ .

Уявлення (6.42) та (6.43) зводять завдання інтегрування (6.38) і (6.39) до вже вирішеної задачі при розгляді пласкої поздовжньої течії.

Знаходження коефіцієнтів  $c_1 \dots c_4$   $c'_1 \dots c'_4$  приводить до наступних рівнянь у точках  $y = \pm h$ :

$$\left\{ \left[ -\frac{\alpha_z}{2\beta_z} + W_{\parallel y}^+(h) \right]^2 + \left[ -\frac{\alpha_x}{2\beta_x} + W_{\perp x}^{\pm}(h) \right]^2 \right\}^{3/2} = c_1 \left[ -\frac{\alpha_z}{2\beta_z} + W_{\parallel y}^+(h) \right]^3 + c_2 \left[ -\frac{\alpha_x}{2\beta_x} + W_{\perp x}^{\pm}(h) \right]^3 + c_3 \left[ -\frac{\alpha_z}{2\beta_z} + W_{\parallel y}^+(h) \right]^2 + c_4 \left[ -\frac{\alpha_x}{2\beta_x} + W_{\perp x}^{\pm}(h) \right]^2. \quad (6.44)$$

$$\left\{ \left[ -\frac{\alpha_z}{2\beta_z} + W_{\parallel y}^+(-h) \right]^2 + \left[ -\frac{\alpha_x}{2\beta_x} + W_{\perp x}^+(-h) \right]^2 \right\}^{3/2} = c_1 \left[ -\frac{\alpha_z}{2\beta_z} + W_{\parallel y}^+(-h) \right]^3 + c_2 \left[ -\frac{\alpha_x}{2\beta_x} + W_{\perp x}^+(-h) \right]^3 + c_3 \left[ -\frac{\alpha_z}{2\beta_z} + W_{\parallel y}^+(-h) \right]^2 + c_4 \left[ -\frac{\alpha_x}{2\beta_x} + W_{\perp x}^+(-h) \right]^2. \quad (6.45)$$

У точках  $y = y_z^*$  та  $y = y_x^*$  виходять наступні рівняння:

$$\left[ \frac{\alpha_x}{2\beta_x} + W_{\perp x}^+(y_z^*) \right]^3 = c_2 \left[ \frac{\alpha_x}{2\beta_x} + W_{\perp x}^+(y_z^*) \right]^3 + c_4 \left[ \frac{\alpha_x}{2\beta_x} + W_{\perp x}^+(y_z^*) \right]^2; \quad (6.46)$$

$$\left[ \frac{\alpha_z}{2\beta_z} + W_{\parallel y}^-(y_x^*) \right]^3 = c_1 \left[ \frac{\alpha_z}{2\beta_z} + W_{\parallel y}^-(y_x^*) \right]^3 + c_4 \left[ \frac{\alpha_z}{2\beta_z} + W_{\parallel y}^-(y_x^*) \right]^2. \quad (6.47)$$

З останніх рівнянь легко виключається яка-небудь пара постійних так, що вся система рівнянь зводиться до системи рівнянь другого порядку. Для скорочення запису, корисно ввести наступні скорочення:

$$\begin{aligned} [h]_z &\equiv \tilde{a}; & [-h] &\equiv \tilde{d}; \\ [-h]_z &\equiv \tilde{b}; & [y_x^*] &\equiv \tilde{e}; \\ [h]_x &\equiv \tilde{c}; & [y_z^*] &\equiv \tilde{f}. \end{aligned} \quad (6.48)$$

У формулах (6.44) - (6.47) позначення відповідних величин наводиться у квадратних дужках.

Слід підкреслити, що ці позначення діють тільки при розв'язанні системи рівнянь (6.44) - (6.47). Система рівнянь може бути переписана за допомогою (6.48) в такому короткому вигляді:

$$\begin{aligned} (a^2 + \tilde{c}^2)^{3/2} &= \tilde{c}_1 \tilde{a}^3 + \tilde{c}_2 \tilde{c}^3 + \tilde{c}_3 \tilde{a}^2 + \tilde{c}_4 \tilde{c}^2; \\ (b^2 + \tilde{d}^2)^{3/2} &= \tilde{c}_1 \tilde{b}^3 + \tilde{c}_2 \tilde{d}^3 + \tilde{c}_3 \tilde{b}^2 + \tilde{c}_4 \tilde{d}^2; \\ \tilde{f}^3 &= 0 + \tilde{c}_2 \tilde{f}^3 + 0 + \tilde{c}_4 \tilde{f}^2; \end{aligned} \quad (6.49)$$

$$\dot{e}^3 = \tilde{c}_1 \tilde{e}^3 + 0 + \tilde{c}_3 \tilde{e}^2 + 0.$$

Крім постійних  $\dot{c}_3$  і  $\dot{c}_4$  для  $\dot{c}_1$  й  $\dot{c}_2$  виходить наступна система рівнянь:

$$\begin{aligned} (a^2 + \tilde{c}^2)^{3/2} - \tilde{a}^z e - \tilde{c}^2 f &= \tilde{c}_1 a^2 (a - \tilde{c}) + \tilde{c}_2 c^2 (c - f) \\ (b^2 + \tilde{d}^2)^{3/2} - \tilde{b}^z e - \tilde{d}^2 f &= \tilde{c}_1 b^2 (b - e) + \tilde{c}_2 d^2 (d - f). \end{aligned} \quad (6.50)$$

Якщо опустити проміжні громіздкі обчислення, для  $\dot{c}_1$  та  $\dot{c}_2$ , то мають місце наступні розв'язання:

$$\dot{c}_1 = \frac{\left[ (a^2 + \tilde{c}^2)^{3/2} - \tilde{a}^z e - \tilde{c}^2 f \right] d^2 (d - f) - \left[ (b^2 + \tilde{d}^2)^{3/2} - \tilde{b}^z e - \tilde{d}^2 f \right] c^2 (c - f)}{\tilde{a}^2 d^2 (a - \tilde{e}) (d - f) - \tilde{b}^2 c^2 (b - e) (c - f)}; \quad (6.51)$$

$$\dot{c}_2 = \frac{\left[ (b^2 + \tilde{d}^2)^{3/2} - \tilde{b}^z e - \tilde{d}^2 f \right] a^2 (a - \tilde{e}) - \left[ (a^2 + \tilde{c}^2)^{3/2} - \tilde{a}^z e - \tilde{c}^2 f \right] b^2 (b - e)}{\tilde{a}^2 d^2 (a - \tilde{e}) (d - f) - \tilde{b}^2 c^2 (b - e) (c - f)}. \quad (6.52)$$

Постійні  $\dot{c}_3$  й  $\dot{c}_4$  знаходяться зі співвідношень такого виду:

$$\dot{c}_3 = \tilde{e} (1 - \tilde{c}_1), \quad \dot{c}_4 = \tilde{f} (1 - \tilde{c}_2). \quad (6.53)$$

Далі треба визначити значення  $\dot{c}'_1 \dots \dot{c}'_4$  для розкладання (6.44) та (6.45). Наведена система рівнянь є аналогічною (6.49) і отримує в позначеннях (6.48) наступний вид:

$$\begin{aligned} (a^2 + \tilde{c}^2)^{3/2} &= \tilde{c}'_1 a^3 + \tilde{c}'_2 c^3 + \tilde{c}'_3 a + \tilde{c}'_4 c; \\ (b^2 + \tilde{d}^2)^{3/2} &= \tilde{c}'_1 b^3 + \tilde{c}'_2 d^3 + \tilde{c}'_3 b + \tilde{c}'_4 d; \end{aligned} \quad (6.54)$$

$$\tilde{f}^3 = 0 + \tilde{c}'_2 \tilde{f}^3 + 0 + \tilde{c}'_4 \tilde{f};$$

$$\dot{e}^3 = \tilde{c}'_1 \tilde{e}^3 + 0 + \tilde{c}'_3 \tilde{e} + 0.$$

Далі треба провести таку саму процедуру, як і при розв'язанні системи рівнянь (6.49), тобто виключити  $\dot{c}'_3$  й  $\dot{c}'_4$ . Опускаючи всі проміжні обчислення, готовий результат має наступний вигляд:

$$\dot{c}'_1 = \frac{\left[ (a^2 + \tilde{c}^2)^{3/2} - \tilde{a}\tilde{e}^2 - \tilde{c}\tilde{f}^2 \right] d(d^2 - \tilde{f}^2) - \left[ (b^2 + \tilde{d}^2)^{3/2} - \tilde{b}\tilde{e}^2 - \tilde{d}\tilde{f}^2 \right] c(c^2 - \tilde{f}^2)}{\tilde{a}d(a^2 - \tilde{e}^2)(d^2 - \tilde{f}^2) - \tilde{b}c(b^2 - \tilde{e}^2)(c^2 - \tilde{f}^2)}; \quad (6.55)$$

$$\dot{c}'_2 = \frac{\left[ (b^2 + \tilde{d}^2)^{3/2} - \tilde{b}\tilde{e}^2 - \tilde{d}\tilde{f}^2 \right] a(a^2 - \tilde{e}^2) - \left[ (a^2 + \tilde{c}^2)^{3/2} - \tilde{a}\tilde{e}^2 - \tilde{c}\tilde{f}^2 \right] b(b^2 - \tilde{e}^2)}{\tilde{a}d(a^2 - \tilde{e}^2)(d^2 - \tilde{f}^2) - \tilde{b}c(b^2 - \tilde{e}^2)(c^2 - \tilde{f}^2)}; \quad (6.56)$$

$$\dot{c}'_3 = \tilde{e}^2(1 - \tilde{c}_1); \quad \dot{c}'_4 = \tilde{f}^2(1 - \tilde{c}_2). \quad (6.57)$$

Величини  $\tilde{a}, \tilde{c}, \tilde{e}, \tilde{b}, \tilde{d}, \tilde{f}$  в (6.51), (6.52), (6.53), (6.55), (6.56) мають вирази через похідні компонентів швидкості за такими правилами:

$$\begin{aligned} \tilde{a} &= \frac{\partial v_z^+}{\partial y}(h); & \tilde{c} &= \frac{\partial v_x^+}{\partial y}(h); & \tilde{e} &= \frac{\partial v_z^-}{\partial y}(y_x^*); \\ \tilde{b} &= \frac{\partial v_z^-}{\partial y}(-h); & \tilde{d} &= \frac{\partial v_x^-}{\partial y}(-h); & \tilde{f} &= \frac{\partial v_x^+}{\partial y}(y_z^*) \end{aligned} \quad \text{умова } y_x^* \leq y_z^*, \quad (6.58)$$

Якщо ж виконана протилежна нерівність, то під  $\tilde{e}$  і  $\tilde{f}$  слід розуміти наступне:

$$\tilde{e} = \frac{\partial v_z^+}{\partial y}(y_x^*); \quad \tilde{f} = \frac{\partial v_x^-}{\partial y}(y_z^*); \quad \text{умова } y_z^* \leq y_x^*. \quad (6.59)$$

де  $\tilde{a}, \tilde{c}, \tilde{b}, \tilde{d}$  - мають такий же вигляд, що й в (6.58).

В подальшому, враховуючи вище отримані рівняння, треба прийняти до уваги що алгоритм обчислення енергії дисипації для пласкої поздовжньо-поперечної течії базується на використанні алгоритму обчислення енергії дисипації для пласкої поздовжньої течії.

Далі розглядається поздовжня-поперечна течія у прямокутному каналі. Звернемося до схеми розбиття перетину каналу для поздовжньо-поперечної течії, що детально вже було розглянуто в роботах [10, 24, 29].

Як видно з рисунка поздовжня та поперечна течії побудована таким чином, що в кожному елементі розбиття прямокутника є поздовжня течія з компонентою похідної, яка включає множину компонентів  $\partial v_{zi} / \partial x_k$ , де  $i, k = x, y$  та поперечну течію з компонентою похідної з множиною компонентів  $\partial v_i^{\pm} / \partial x_k$ , де  $i, k = x, y$ . Тобто всі елементи розбивки можна розділити на дві підмножини. В

однієї підмножині кожному елементу розбивки відповідає пара похідних швидкості за однією координатою, а в іншій підмножині кожному елементу розбивки відповідає пара похідних за різними координатами.

З огляду на сказане, для першої підмножини виникають наступні пари похідних:

$$\frac{\partial v_z^+}{\partial y} \text{ та } \frac{\partial v_x^+}{\partial y}; \frac{\partial v_z^-}{\partial y} \text{ та } \frac{\partial v_x^-}{\partial y}; \frac{\partial v_z^+}{\partial x} \text{ та } \frac{\partial v_y^+}{\partial x}; \frac{\partial v_z^-}{\partial x} \text{ та } \frac{\partial v_y^-}{\partial x}.$$

Для другої підмножини пари похідних будуть включати похідні за різними координатами такими парами:

$$\frac{\partial v_z^+}{\partial y} \text{ та } \frac{\partial v_y^+}{\partial x}; \quad \frac{\partial v_z^-}{\partial y} \text{ та } \frac{\partial v_y^-}{\partial x} \text{ і т.д.}$$

Для всіх цих комбінацій похідних необхідно обчислити інтеграли наступного виду:

$$\iint dydx \left\{ \left[ \alpha + \beta \sqrt{\left( \frac{\partial v_i^\pm}{\partial x_k} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_j^\pm}{\partial x_k} \right)^2} \right] \cdot \left[ \left( \frac{\partial v_i^\pm}{\partial x_k} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_j^\pm}{\partial x_k} \right)^2 \right] \right\}; \quad (6.60)$$

$$\iint dydx \left\{ \left[ \alpha + \beta \sqrt{\left( \frac{\partial v_i^\pm}{\partial x_k} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_j^\pm}{\partial x_l} \right)^2} \right] \cdot \left[ \left( \frac{\partial v_i^\pm}{\partial x_k} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_j^\pm}{\partial x_l} \right)^2 \right] \right\}. \quad k \neq l \quad (6.61)$$

Для інтеграла (6.60) обчислення можливо провести у такий же спосіб, як і для пласкої поздовжньо-поперечної течії, тобто шляхом подання дробового ступеня суми квадратів похідних через суми цілих ступенів. У цьому випадку, в якості точок локації слід вибрати наступні значення  $y = \pm h, y_z^*, x = \pm a, y_z^*, y = \pm h, y_x^*, x = \pm a, x_y^*$ .

На відміну від випадків поздовжньої та поздовжньо-поперечної течій у випадку, що розглядається, інтегрування проводиться за однією з координат до границі відповідного контуру розбивки прямокутника перетину каналу на елементи, а за іншою координатою в визначених межах. Ці межі визначаються

координатами точки перетинання контурів границь розбивки та величин  $\pm a, \pm h$

Як приклад, нижче нами розглядається обчислення інтеграла для ступеня похідної  $\partial v_z / \partial y$  такого виду:

$$\int_{x_0}^{-a} dx \int_{-h}^{y^-(x)} \left( \frac{\partial v_z^-}{\partial y} \right)^m dy, \quad (6.62)$$

де  $m = 2, 3$ .

Результат першого інтегрування має такий вигляд:

$$\begin{aligned}
\int_{-h}^{y^-(x)} dy \left( \frac{\partial v_z^-}{\partial y} \right)^m &= \left\{ \frac{2\beta}{dP/dz} \cdot \left[ \frac{\alpha}{2\beta} - \left( \frac{\alpha^2}{4\beta^2} - \frac{y^-(x) - y^*}{\beta} \frac{dP}{dz} \right)^{1/2} \right]^{m+2} \right. \\
&\times \frac{1}{m+2} - \frac{\alpha}{dP/dz} \left[ \frac{\alpha}{2\beta} - \left( \frac{\alpha^2}{4\beta^2} - \frac{y^-(x) - y^*}{\beta} \frac{dP}{dz} \right)^{1/2} \right] - \\
&\left. - \left[ \frac{2\beta}{dP/dz} \left[ \frac{\alpha}{2\beta} - \left( \frac{\alpha^2}{4\beta^2} + \frac{h + y^*}{\beta} \frac{dP}{dz} \right)^{1/2} \right]^{m+2} \right. \right. \\
&\left. \left. - \frac{1}{m+2} - \frac{\alpha}{dP/dz} \left[ \frac{\alpha}{2\beta} - \left( \frac{\alpha^2}{4\beta^2} + \frac{h + y^*}{\beta} \frac{dP}{dz} \right)^{1/2} \right]^{m+1} \right] \cdot \frac{1}{m+1} \right\}. \quad (6.63)
\end{aligned}$$

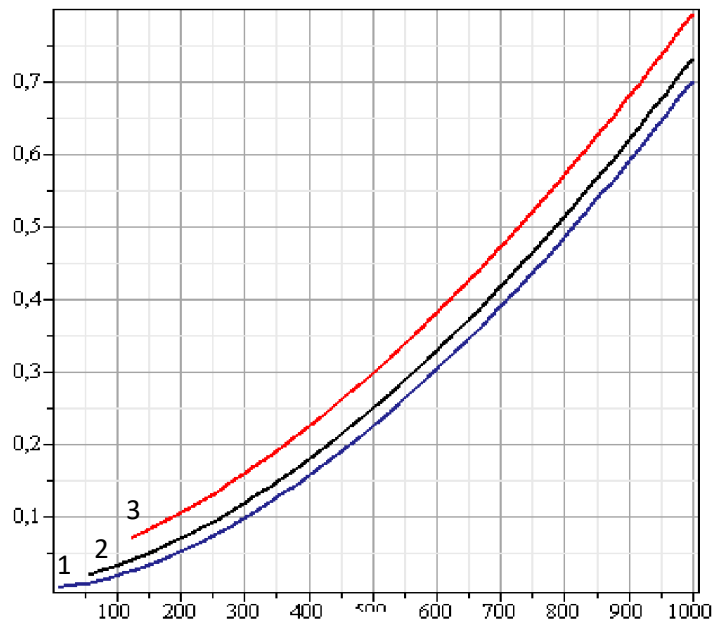
де  $y^-(x)$  – задана функція від  $x$ .

Якщо використовувати підстановку (6.40), то доданки останнього виразу, у які входить функція  $y^-(x)$  здобувають простий вид для інтегрування за координатою  $x$  тільки, якщо  $y^-(x)$  є лінійною функцією. Якщо лінії границь розбивки сильно відхиляються від прямих ліній, то відповідні інтеграли можна обчислити тільки чисельно.

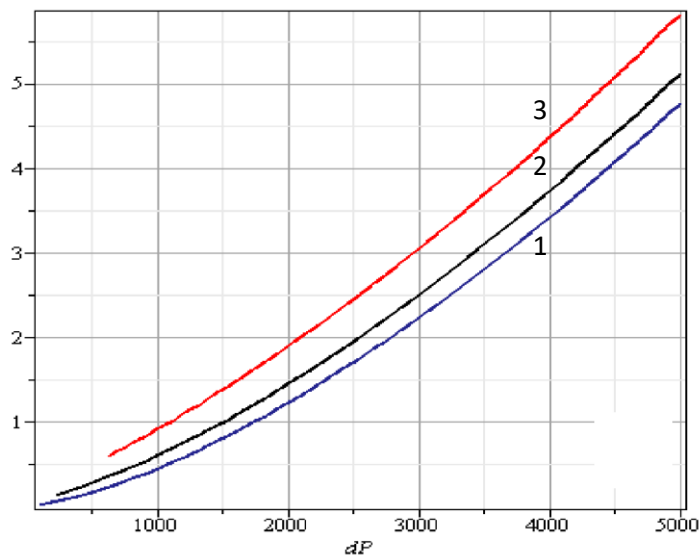
На підставі наведеної методики нами було проведено визначення енергії дисипації течії ступеневої рідини, яка в загальному вигляді визначається за формулою:

$$e = \frac{n+1}{2n+3} \cdot \left( \frac{1}{\beta} \frac{dP}{dz} \right)^{\frac{n+2}{n+1}} \cdot \left[ \left( h - y^* \right)^{\frac{2n+3}{n+1}} + \left( h + y^* \right)^{\frac{2n+3}{n+1}} \right]. \quad (6.64)$$

На рис. 6.3 – 6.4 наведені графіки залежностей величини енергії дисипації для ступених рідин від градієнту тиску для різних параметрів течії.

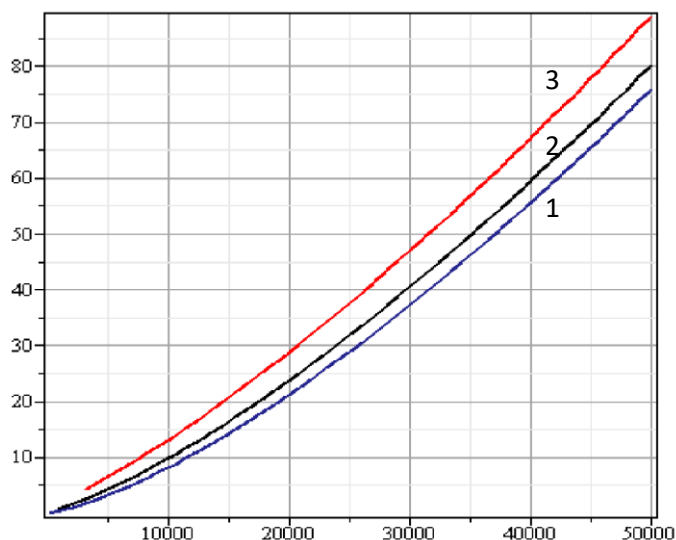


**Рисунок 6.3 - Залежність величини енергії дисипації  $e$  від градієнту тиску для  $h = 10^{-2}$  м:** 1 –  $n = 0,5$ ;  $W_{\text{ay}}^+ = 0,1$ ;  $W_{\text{ay}}^- = 0$ ; 2 –  $n = 0,5$ ;  $W_{\text{ay}}^+ = 0,3$ ;  $W_{\text{ay}}^- = 0$ ; 3 –  $n = 0,5$ ;  $W_{\text{ay}}^+ = 0,5$ ;  $W_{\text{ay}}^- = 0$



**Рисунок 6.4 - Залежність величини енергії дисипації  $e$  від градієнту тиску для  $h = 10^{-2}$  м:** 1 –  $n = 1,0$ ;  $W_{\text{ay}}^+ = 0,1$ ;  $W_{\text{ay}}^- = 0$ ; 2 –  $n = 1,0$ ;  $W_{\text{ay}}^+ = 0,3$ ;  $W_{\text{ay}}^- = 0$ ; 3 –  $n = 1,0$ ;  $W_{\text{ay}}^+ = 0,5$ ;  $W_{\text{ay}}^- = 0$





**Рисунок 6.5 - Залежність величини енергії дисипації  $e$  від градієнту тиску для  $h = 10^{-2}$  м: 1 –  $n = 1,5$ ;  $W_{\text{y}}^+ = 0,1$ ;  $W_{\text{y}}^- = 0$ ; 2 –  $n = 1,5$ ;  $W_{\text{y}}^+ = 0,3$ ;  $W_{\text{y}}^- = 0$ ; 3 –  $n = 1,5$ ;  $W_{\text{y}}^+ = 0,5$ ;  $W_{\text{y}}^- = 0$**

Наведені графіки наочно демонструють визначення величини енергії дисипації від градієнту тиску для різних параметрів течії відповідно до запропонованої методики. Треба зазначити, що при отриманні точних значень для завдань течії в плоскому каналі, наприклад, для течії степеневої рідини, перевагу слід віддавати чисельному рішенню. Але таких задач дуже мало, і у переважній більшості завдань, в яких є залежність в'язкості від швидкості зрушення, є дуже складною, тому слід використовувати кусково-лінійну апроксимацію. Межі зміни другого інваріанта тензора швидкості деформацій або, як в нашому випадку, величини  $dv_z / dy$  слід встановлювати з апріорних міркувань або експериментальних даних.

В подальшому на підставі отриманого методу пропонується розробка блок-схеми яка за допомогою спеціального програмного забезпечення дозволить автоматизувати визначення величини дисипації.

**Висновки.** Запропонована методика дозволяє проводити обчислення енергії дисипації при поздовжньому та поздовжньо-поперечному напрямках течії узагальнено-зрушеної рідини в плоскому та прямокутному каналах технологічного обладнання. Для обчислення величини енергії дисипації узагальнено-зрушеної рідини попередньо необхідно провести розбивку перетинів каналів на відповідні ділянки з різними виразами для швидкості течії. Розбивка прямокутника перетину прямого каналу та обчислення інтегралів від похідних швидкості є обов'язковими етапами розрахунків. Узагальнено-зрушена рідина має текучість за всім перетином каналу, тому й дисипація відбувається за всім перетином каналу. При інтегруванні похідних швидкості узагальнено-зрушеної рідини потрібно виконати певні перетворення, які

наведено в даній роботі. У випадку пласкої поздовжньої течії величина дисипації, що доводиться на поперечний перетин каналу, має вигляд (1) та (2), в яких  $\alpha$  і  $\beta$  – постійні, значення яких визначаються або дослідним шляхом, або в результаті кусково-лінійної апроксимації графіка функції  $\mu = \mu(I_2)$ .

При обчисленні енергії дисипації пласкої поздовжньо-поперечної течії необхідно обчислити інтеграл (6.37). Перший інтеграл від доданків із множителем  $\alpha$  зводиться до суми інтегралів, які обчислювалися для пласкої поздовжньої течії. Другий інтеграл явно обчислити неможливо. Крім того, різні похідні обчислюються в різних проміжках за  $\mathcal{Y}$  через те, що величини  $\mathcal{Y}_z^*$  та  $\mathcal{Y}_x^*$  не рівні один одному. Якщо розглядається інтеграл із множителем  $\beta$  слід врахувати, що вираження для швидкостей  $v_z(y)$  і  $v_x(y)$  фактично залежать не від  $\alpha$  та  $\beta$ , а від  $\alpha_z$ ,  $\beta_z$  та  $\alpha_x$ ,  $\beta_x$  відповідно. Алгоритм обчислення енергії дисипації для пласкої поздовжньо-поперечної течії базується на використанні алгоритму обчислення енергії дисипації для пласкої поздовжньої течії. Якщо використовувати підстановку (6.40), то доданки (6.63), у які входить функція  $y^-(x)$  здобувають простий вид для інтегрування за координатою  $x$  тільки, якщо  $y^-(x)$  є лінійною функцією. Якщо лінії границь розбивки сильно відхиляються від прямих ліній, то відповідні інтеграли можна обчислити тільки чисельно.

### 6.3 Рівняння теплообміну при течії неньютонівських рідин у каналах технологічного обладнання

Розглянуто процеси теплообміну у каналах технологічного обладнання з навколишнім середовищем у випадках, які є найбільш розповсюдженими в машинах та апаратах хімічної та харчової промисловості. У першому випадку зовнішнє середовище вважається нескінченним тепловим резервуаром із заданою температурою. У другому випадку роль зовнішнього середовища виконує канал, у якому рухається теплоносій, при цьому температура теплоносія не вважається заданою і змінюється уздовж довжини каналу. У рівняння теплообміну входять конвективні доданки та доданки з теплопровідністю.

Сформульовано рівняння теплообміну при течії неньютонівських (в'язкопластичної та узагальнено-зрушеної) рідин. Визначено, що при течії узагальнено-зрушеної рідини в пласкому каналі із заданими температурами стінок необхідно визначати – два коефіцієнти тепловіддачі; в пласкому каналі, який занурено в тепловий резервуар – чотири коефіцієнти тепловіддачі; в пласкому каналі, який оточений обвідним каналом – вісім коефіцієнтів тепловіддачі. При опису теплопередачі з прямокутним каналом, для всіх перерахованих випадків, необхідно визначати відповідно: чотири, вісім і шістнадцять коефіцієнтів тепловіддачі. При течії в'язкопластичної рідини необхідно визначати в пласкому каналі із заданими температурами стінок -

чотири коефіцієнти тепловіддачі; в каналі, який занурено в тепловий резервуар - шість коефіцієнтів тепловіддачі; в каналі, який оточений обвідним каналом - десять коефіцієнтів тепловіддачі. При опису теплопередачі течії в прямокутному каналі для таких же випадків, необхідно задавати відповідно: вісім, дванадцять і двадцять коефіцієнтів тепловіддачі.

Наведені рівняння теплообміну, являють собою систему диференціальних рівнянь першого порядку в кінцевих різницях для температури рідини в каналі. І в цьому полягає їх головна відмінність від розрахунків для випадків фіксованих температури на стінках прямого каналу та занурення прямого каналу в тепловий резервуар з фіксованою температурою. Показано, що температура рідини залежить від поздовжньої координати вздовж каналу. В цьому випадку залежність температури від геометричних характеристик каналу визначається площею поперечного перетину каналу та його периметром, а також відношенням геометричних розмірів (ширини, висоти та довжини) каналу.

Основні процеси хімічної та харчової промисловості пов'язані з рухом складних дисперсних систем, більшість з яких є неньютонівськими рідинами. Знання структури та режимів течії відіграє важливу роль в організації процесів і дозволяє впливати на їх енергоефективність шляхом встановлення раціональних значень гідродинамічних, теплових, масообмінних та інших показників. Як правило, рух рідини з великою в'язкістю відбувається у каналах робочих камер різноманітних технологічних машин і залежить від багатьох параметрів, а саме: тиску, витрати, швидкості зрушення, температури, ступеня перемішування, дисперсності та ін. Рідини з малими значеннями в'язкості знаходять застосування як проміжні теплоносії в оболонках теплових апаратів. У всіх випадках матеріали, в'язкість яких визначається швидкістю зрушення, відрізняються великою різноманітністю своїх реологічних властивостей.

З проведеного аналізу технічної літератури можна зробити висновок, що з усього різноманіття неньютонівських рідин найбільш поширеними є представники трьох класів – це бінгамівські (в'язкопластичні), узагальнено-зрушені та степеневі рідини. Під терміном «узагальнено-зрушені рідини» маємо наувазі рідини, в'язкість яких залежить від швидкості зрушення довільним способом. Окремим випадком такої рідини є степенева рідина [7]. На сьогодні відомо багато способів підведення та відведення теплових потоків до або від теплопередаючої поверхні машин та апаратів, у тому числі і за принципом: труба в трубі або з проміжною оболонкою. Величина потоку тепла через деяку тверду поверхню визначається її тепловим опором і коефіцієнтами тепловіддачі зі сторін середовищ, які обмінюються теплом [5]. Такі ділянки течії, як труби і канали, обрані нами тому, що труба є основним елементом теплообмінних апаратів, а канал – основним елементом робочої камери черв'ячного екструдера [8]. Зміст цієї роботи спирається на ряд результатів про течію згаданих вище рідин у трубах і каналах [9, 10, 11, 12, 13, 14]. Зокрема, у роботах [14, 15] була розглянута течія в каналах плоскої і прямокутної форм, границі яких рухаються вздовж самих себе, а також в поздовжньому і поперечному напрямках. У роботах

[14, 15, 16] були побудовані тривимірні поля течії неньютонівських рідин при різних граничних умовах, які складають необхідні умови обчислення коефіцієнтів тепловіддачі.

Теплообмін відіграє важливу роль у процесах хімічної та харчової промисловості. Детальне вивчення структури теплового потоку дозволяє на високому рівні організувати проведення технологічних процесів. Відомо, що більшість рідин, що використовуються при виробництві хімічних та харчових продуктів, мають аномальний характер течії, тому вивчення процесу теплообміну неньютонівських рідин є дуже актуальним. Останнім часом межі досліджень теплообміну суттєво розширились. У монографії було розглянуто моделювання гідродинаміки та теплопереносу неньютонівських рідин у кільцевих каналах. Була запропонована методика моделювання процесу теплопереносу при екструзії середовищ різного реологічного стану. Зокрема, особлива увага приділялась напорній течії степеневих рідин у кільцевих каналах поперечного перерізу. Були отримані результати розподілу температури по перерізу каналу при екструзії різноманітних матеріалів. Розроблена та запропонована математична модель дозволяє здійснювати оптимізацію технологічних параметрів виготовлення кільцевих профілів.

У роботі розглядався теплообмін та тертя неньютонівської рідини при ламінарній конвекції з урахуванням зміни в'язкості. Було досліджено вплив локального теплообміну при примусовій та вільній конвекції в ізотермічній поверхні, охолодженої чи нагрітої по відношенню до циркуляційного середовища. Реологічна модель приведена в достатньо добре описує криву течії псевдо-пластичних рідин. Авторами було встановлено, що зі зміною температури у межах пограничного шару у в'язких рідинах сильно зменшується в'язкість. У роботі наведено числове моделювання неізотермічної течії неньютонівської рідини між двома паралельними пластинами та проаналізовано вплив різноманітних дій на розвиток термічного пограничного шару. У роботі проводилося теоретичне дослідження гідродинаміки та теплообміну неньютонівських рідин біля охолоджувальної ізотермічної поверхні при вільній ламінарній конвекції з урахуванням зміни в'язкості рідини від температури. При дослідженні використовувалась степенева реологічна модель рідини. Деякі роботи присвячені вивченню структурно-механічних характеристик при зрушенні неньютонівських матеріалів у радіальних каналах шнекових машин. Так, у роботі розглядалась неізотермічна течія неньютонівської рідини в шнековій машині з урахуванням радіальних зазорів між шнеком і корпусом машини. У ході дослідження було визначено поведінку матеріалу в процесі руху в каналах. Отримані формули дозволяють визначити температуру рідини, витрати, перепад тиску, а також визначити необхідну потужність машини. Але наведені формули потребують уточнення, в залежності від наведеного реологічного стану рідини.

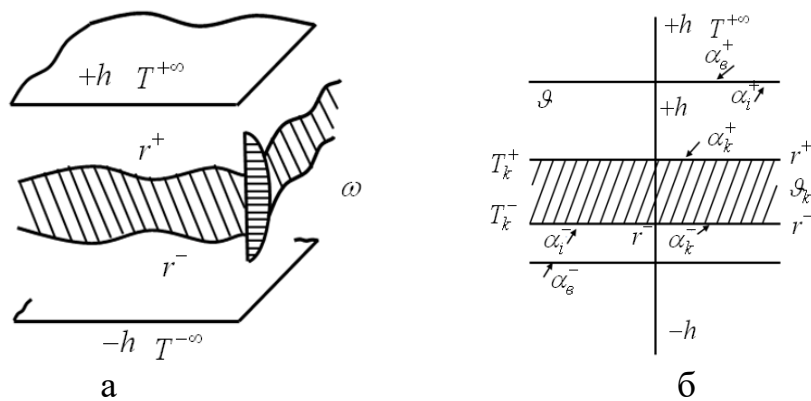
Автори у роботі розглянули реологічну модель Пауелла-Ейрінга при течії в криволінійному каналі, були досліджені фізичні явища, які виникають при локальній зміні температури та проведені числові розрахунки залежності

в'язкості від температури. Проведений аналіз робіт з вивчення процесів теплообміну неньютонівських матеріалів дозволяє зробити такі висновки. Відсутній чіткий алгоритм, який би дозволив проводити розрахунки, які підтверджувались експериментальним шляхом. Детальному дослідженню та вивченню підлягають основні макродинамічні та макрокінетичні характеристики течії: профіль течії та розподіл швидкості, їх градієнти, залежність в'язкості від напруження зрушення, вид геометрії каналу або труби, величина дисипації, зміни реологічних властивостей від тиску, температури. Відсутність обґрунтованих інженерно-розрахункових методик визначення реодинамічних та теплообмінних параметрів течії неньютонівських рідин у каналах складної геометрії для різних випадків теплообміну з навколишнім середовищем, що суттєво стримує їх подальше широке використання, як теплоносіїв, на підприємствах хімічної та харчової галузей. Отримані дані дозволяють більш якісно організувати технологічний процес з метою підвищення ефективності теплообміну та управляти його параметрами, використовувати при проектуванні машин і апаратів хімічної та харчової промисловості, впливати на енергоефективність та матеріалоємність обладнання.

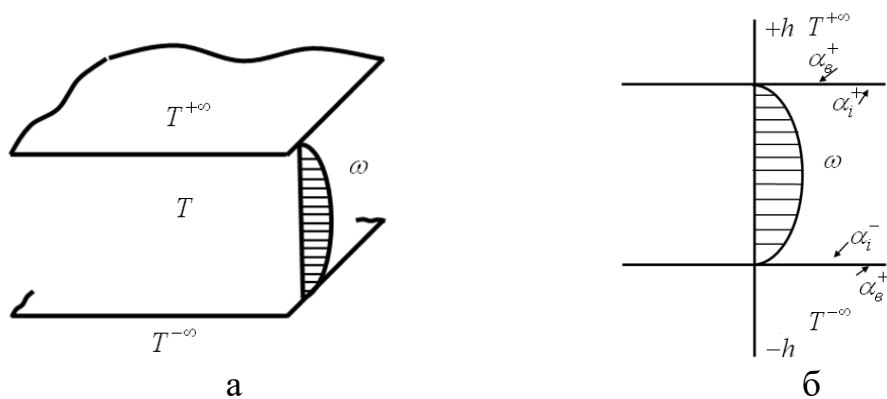
У даній роботі нами розглядаються процеси теплообміну у каналах технологічного обладнання з навколишнім середовищем у випадках, які є найбільш розповсюдженими в машинах та апаратах хімічної та харчової промисловості. У першому випадку зовнішнє середовище вважається нескінченним тепловим резервуаром із заданою температурою. У другому випадку роль зовнішнього середовища виконує канал, у якому рухається теплоносій, при цьому температура теплоносія не вважається заданою і змінюється уздовж довжини каналу. У рівняння теплообміну входять конвективні доданки та доданки з теплопровідністю при цьому теплообмін у каналі з неньютонівською рідиною відбувається при великих значеннях числа Пекле [20], незважаючи на те, що й в'язкопластична й узагальнено-зрушена рідини мають велику в'язкість. Рух теплоносія в каналі вважається інерційним і теж відповідає великим значенням числа Пекле. Таким чином, у гідродинамічному аспекті неньютонівські рідини та теплоносій рухаються в різних режимах, а в тепловому аспекті – в одному.

Об'ємний та схематичний вигляд теплообміну течії в'язкопластичної рідини в каналі, який занурено в тепловий резервуар зображено на рис. 6.6.

Графічна інтерпретація теплообміна узагальнено-зрушеної рідини в каналі, який занурено в тепловий резервуар, зображено на рис. 6.7

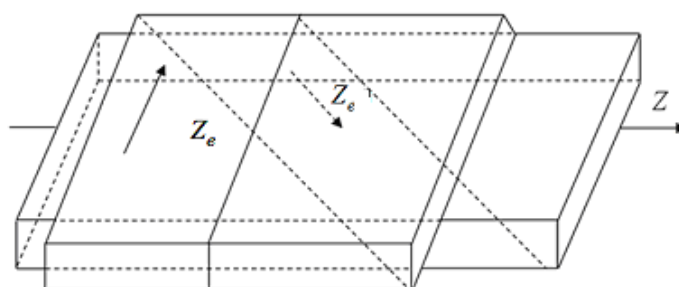


**Рисунок 6.6 - Графічна інтерпретація теплообміна течії в'язкопластичної рідини в каналі, який занурено в тепловий резервуар: а – об'ємний вигляд; б – схема течії та характеристик теплообміну з тепловим резервуаром**



**Рисунок 6.7 - Графічна інтерпретація теплообміну узагальнено-зрушеної рідини в каналі, який занурено в тепловий резервуар: а – об'ємний вигляд; б – схема течії та характеристик теплообміну з тепловим резервуаром**

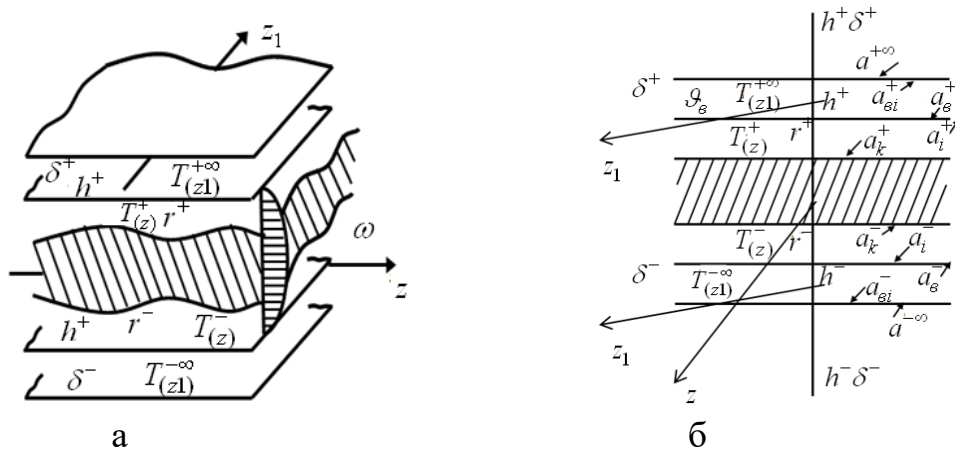
Графічна інтерпретація для випадку теплообміну між ньютонівською рідиною в каналі технологічного обладнання і теплоносієм в іншому каналі даного обладнання представлено на рис. 6.8 – 6.10.



**Рисунок 6.8 - Схематичне зображення взаємного розташування прямого каналу та обвідного каналу**

Нами розглядається загальний випадок, в якому канал, де рухаться теплоносії, знаходиться під відповідним кутом відносно до каналу з неньютонівською рідиною (див. рис. 6.8). Враховуючи цю обставину, при описі вводяться дві різні поздовжні координати  $Zz$  та  $Zze$ , які є взаємозалежними. В якості поздовжньої координати  $ZzZ$  використовується координата, яка є відлічуваною уздовж осі каналу з неньютонівською рідиною, а координата  $ZzeZ_1$  буде віднесена до обвідного каналу, з теплоносієм. Якщо кут підйому каналу, що обгортає дорівнює нулю, то це означає що обидва канали взаємодіють у теплообміні за способом прямиотечії або протитечії. Якщо ж кут підйому каналу, що обгортає дорівнює  $\frac{\pi}{2}$ , то обидва канали взаємодіють за способом перехресної течії.

Розподіл коефіцієнтів тепловіддачі та теплопередачі при течії в'язкопластичної рідини в прямому та обвідному каналах зображено на рис. 6.9.



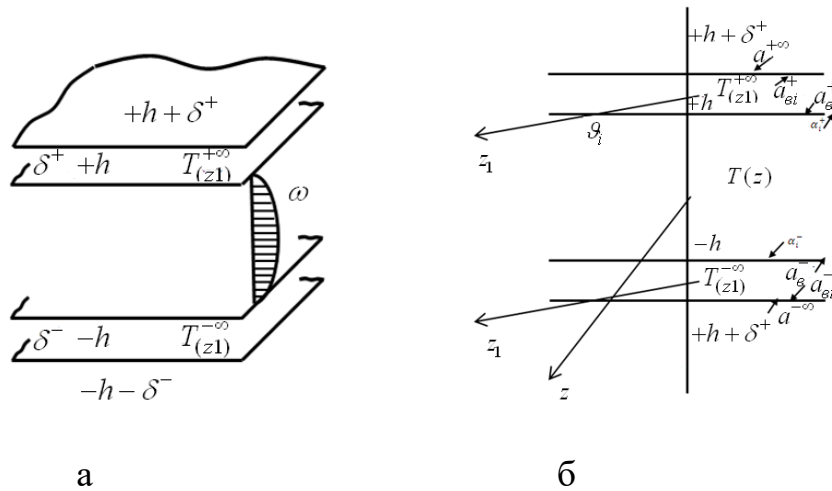
**Рисунок 6.9 - Розподіл коефіцієнтів тепловіддачі та теплопередачі при течії в'язкопластичної рідини: а – об'ємний вигляд прямого та обвідного каналів; б – схема течії та характеристик теплообміну з обвідним каналом**

Розподіл коефіцієнтів тепловіддачі та теплопередачі при течії узагальнено-зрушеної рідини в прямому та обвідному каналах зображено на рис. 6.10

Розглядаючи випадки теплообміну з в'язкопластичною рідиною слід використовувати шість коефіцієнтів тепловіддачі для теплового резервуара та десять коефіцієнтів тепловіддачі для обвідного каналу з теплоносієм (рис. 6.6б та 6.9б). Необхідно враховувати, що при теплообміні в ядрі в'язкопластичної рідини тепло переноситься за механізмом теплопровідності.

При описі процесів теплообміну з узагальнено-зрушеною рідиною слід використовувати чотири коефіцієнти тепловіддачі (рис. 6.7б) для теплового

резервуара та вісім коефіцієнтів тепловіддачі для обвідного каналу з теплоносієм, (рис. 6.10б).



**Рисунок 6.10 - Розподіл коефіцієнтів тепловіддачі та теплопередачі при течії узагальнено-зрушеної рідини: а – об'ємний вигляд прямого та обвідного каналів; б – схема течії та характеристик теплообміну з обвідним каналом**

Для теплообміну в'язкопластичної рідини в каналі зі стінкою із заданою температурою виконуються такі рівняння:

$$\begin{aligned} \dot{V}^+ \rho c_p \frac{dT^+}{dz} &= \dot{V}^+ S^+ H_k \alpha_i^+ (T_k^+ - T^+) + \alpha^+ (T_k^+ - T^+) + e^+; \\ \dot{V}^- \rho c_p \frac{dT^-}{dz} &= \dot{V}^- S^- H_k \alpha_i^- (T_k^- - T^-) + \alpha^- (T_k^- - T^-) + e^-; \\ \frac{\partial^2 T_k^\pm}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_k^\pm}{\partial z^2} &= 0; \quad -\lambda_k \frac{\partial T_k^\pm}{\partial y} \Big|_{\Gamma^\pm} = \alpha_k^\pm (T_\Gamma - T_k^\pm) \Big|_{\Gamma^\pm}, \end{aligned} \quad (6.65)$$

де  $\dot{V}^\pm$  – витрати течії текучої частини вище та нижче ядра течії, м<sup>3</sup>/с;  
 $T^\pm$  – температури текучої частини вище та нижче ядра течії, °С;  
 $e^\pm$  – питомі дисипації енергії текучої частини вище й нижче ядра течії Дж/м<sup>3</sup>;  $S^\pm$  – площі поперечних перерізів текучої частини вище й нижче ядра течії, м<sup>2</sup>;  $T_k^\pm$  – температури ядра, які примикають до верхньої та нижньої ділянок текучої частини, °С;  
 $T_\Gamma^\pm$  – температури верхній та нижніх стінок каналу, °С,  
де " $\Gamma$ " =  $hy$ ,  $ax$ ;  $\alpha_i^\pm$  – коефіцієнти тепловіддачі на стінках на лініях  $y = \pm h$ , Дж/м<sup>2</sup> °С;



$\alpha_k^\pm$  – коефіцієнти тепловіддачі на границях ядра течії на лініях  $y = \Gamma^\pm$ , Дж/м<sup>2</sup> °С;

$\Pi^\pm$  – довжини периметрів стінок перетину каналу, м;

$\Pi_k^\pm$  – довжини периметрів границь перетину ядра течії, м;

$\lambda, \lambda_k$  – коефіцієнти теплопровідності текучої частини і ядра в'язкопластичної рідини, Дж/м °С.

Якщо температури стінок каналу відомі (що буває найчастіше), то рівняння теплообміну приймають наступний вид:

$$\begin{aligned} \rho c_p \frac{dT^+}{dz} &= E^+ S \Pi + K^+ (T^{+\infty} - T^+) + \alpha_k^+ (\Gamma^+ - T^+) \Big|_{\Gamma^+}, \\ \rho c_p \frac{dT^-}{dz} &= E^- S \Pi + K^- (T^{-\infty} - T^-) + \alpha_k^- (\Gamma^- - T^-) \Big|_{\Gamma^-}, \\ \frac{\partial^2 T_k^\pm}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_k^\pm}{\partial z^2} &= 0; \quad -\lambda_k \frac{\partial T_k^\pm}{\partial y} \Big|_{\Gamma^\pm} = \alpha_k^\pm (T_\Gamma - T^\pm) \Big|_{\Gamma^\pm}, \end{aligned} \quad (6.66)$$

де  $T^{\pm\infty}$  – температури теплового резервуара вище й нижче каналу, °С;

$K^\pm$  – коефіцієнти теплопередачі між частинами теплового резервуара та текучою частиною в'язкопластичної рідини вище та нижче ядра течії, Дж/м<sup>2</sup> °С;

$K_k^\pm$  – коефіцієнти теплопередачі між текучою частиною і ядром в'язкопластичної рідини, Дж/м<sup>2</sup> °С.

Коефіцієнти теплопередачі визначаються з коефіцієнтів тепловіддачі за звичайними правилами, які є відомими із літератури. Рівняння теплообміну в каналі узагальнено-зрушеної рідини із заданими температурами стінок має такий вид:

$$\rho c_p \frac{dT}{dz} = E S \Pi + K (T^{+\infty} - T) + \alpha_h^+ (\Gamma^+ - T) + \alpha_h^- (\Gamma^- - T), \quad (6.67)$$

у якому, зміст усіх позначень такий же, що й в (6.65) і (6.66), тільки відсутнє розходження між верхньою і нижньою течіями щодо ядра течії.

Рівняння теплообміну в каналі з тепловим резервуаром можна представити в такий спосіб:

$$\rho c_p \frac{dT}{dz} = E S \Pi + K (T^{+\infty} - T) + \alpha_h^+ (\Gamma^+ - T) + \alpha_h^- (\Gamma^- - T), \quad (6.68)$$

Запис рівнянь теплообміну із заданими температурами стінок для течії в'язкопластичної рідини в прямокутному каналі повинен враховувати розбиття

поперечного перетину каналу. При цьому число коефіцієнтів тепловіддачі збільшується вдвічі.

Відповідне розбиття течії узагальнено-зрушеної рідини була розглянута в роботі. При поздовжньо-поперечній течії розбиття поздовжньої частини течії та розбиття поперечної частини течії може не збігатися.

Рівняння теплообміну течії в'язкопластичної рідини в прямокутному каналі із заданими температурами стінок мають такий вид:

$$\begin{aligned}
 \dot{W}_y^+ \rho c_p \frac{dT_y^+}{dz} &= \dot{E}_y^+ S \Pi + \alpha_{ly}^+ (T_{ly}^+ - T_y^+) \quad \dot{W}_y^+ + \alpha_{ky}^+ (T_y^+ - T_{ky}^+) \quad \dot{W}_y^+, \\
 \dot{W}_y^- \rho c_p \frac{dT_y^-}{dz} &= \dot{E}_y^- S \Pi + \alpha_{ly}^- (T_{ly}^- - T_y^-) \quad \dot{W}_y^- + \alpha_{ky}^- (T_y^- - T_{ky}^-) \quad \dot{W}_y^-, \\
 \dot{W}_x^+ \rho c_p \frac{dT_x^+}{dz} &= \dot{E}_x^+ S \Pi + \alpha_{lx}^+ (T_{lx}^+ - T_x^+) \quad \dot{W}_x^+ + \alpha_{kx}^+ (T_x^+ - T_{kx}^+) \quad \dot{W}_x^+, \\
 \dot{W}_x^- \rho c_p \frac{dT_x^-}{dz} &= \dot{E}_x^- S \Pi + \alpha_{lx}^- (T_{lx}^- - T_x^-) \quad \dot{W}_x^- + \alpha_{kx}^- (T_x^- - T_{kx}^-) \quad \dot{W}_x^-, \\
 \frac{\partial^2 T_k^\pm}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_k^\pm}{\partial z^2} &= 0; \quad -\lambda_k \frac{\partial T_k^\pm}{\partial y} \Big|_{\Gamma_y^\pm} = \alpha_{ky}^\pm (T_{ky}^\pm - T_y^\pm) \Big|_{\Gamma_y^\pm}, \\
 \frac{\partial^2 T_k^\pm}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_k^\pm}{\partial z^2} &= 0; \quad -\lambda_k \frac{\partial T_k^\pm}{\partial x} \Big|_{\Gamma_x^\pm} = \alpha_{kx}^\pm (T_{kx}^\pm - T_x^\pm) \Big|_{\Gamma_x^\pm}.
 \end{aligned} \tag{6.69}$$

Рівняння теплообміну течії в'язкопластичної рідини в тепловому резервуарі із заданими температурами має такий вигляд:

$$\begin{aligned}
 \dot{W}_y^+ \rho K_p \frac{dT_y^+}{dz} &= \dot{E}_y^+ S \Pi + K_y^+ (T_y^{+\infty} - T_y^+) \quad \dot{W}_y^+ + \alpha_{ky}^+ (T_y^+ - T_{ky}^+) \quad \dot{W}_y^+, \\
 \dot{W}_y^- \rho K_p \frac{dT_y^-}{dz} &= \dot{E}_y^- S \Pi + K_y^- (T_y^{-\infty} - T_y^-) \quad \dot{W}_y^- + \alpha_{ky}^- (T_y^- - T_{ky}^-) \quad \dot{W}_y^-, \\
 \dot{W}_x^+ \rho K_p \frac{dT_x^+}{dz} &= \dot{E}_x^+ S \Pi + K_x^+ (T_x^{+\infty} - T_x^+) \quad \dot{W}_x^+ + \alpha_{kx}^+ (T_x^+ - T_{kx}^+) \quad \dot{W}_x^+, \\
 \dot{W}_x^- \rho K_p \frac{dT_x^-}{dz} &= \dot{E}_x^- S \Pi + K_x^- (T_x^{-\infty} - T_x^-) \quad \dot{W}_x^- + \alpha_{kx}^- (T_x^- - T_{kx}^-) \quad \dot{W}_x^-, \\
 \frac{\partial^2 T_k^\pm}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_k^\pm}{\partial z^2} &= 0; \quad -\lambda_k \frac{\partial T_k^\pm}{\partial y} \Big|_{\Gamma_y^\pm} = \alpha_{ky}^\pm (T_{ky}^\pm - T_y^\pm) \Big|_{\Gamma_y^\pm}, \\
 \frac{\partial^2 T_k^\pm}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_k^\pm}{\partial z^2} &= 0; \quad -\lambda_k \frac{\partial T_k^\pm}{\partial x} \Big|_{\Gamma_x^\pm} = \alpha_{kx}^\pm (T_{kx}^\pm - T_x^\pm) \Big|_{\Gamma_x^\pm}.
 \end{aligned} \tag{6.70}$$

Теплообмін узагальнено-зрушеної рідини в прямокутному каналі із заданими температурами стінок можливо представити наступними рівняннями:

$$\dot{W}_y^+ \rho c_p \frac{dT_y^+}{dz} = \dot{E}_y^+ S \Pi + \alpha_{ly}^+ (T_{ly}^+ - T_y^+) \quad \dot{W}_y^+,$$

$$\begin{aligned}
\dot{W}_y^- \rho c_p \frac{dT_y^-}{dz} &= e_y^- S_y^- + \alpha_{iy}^- (T_h^- - T_y^-) \quad y^-, \\
\dot{W}_x^+ \rho c_p \frac{dT_x^+}{dz} &= e_x^+ S_x^+ + \alpha_{ix}^+ (T_a^+ - T_x^+) \quad x^+, \\
\dot{W}_x^- \rho c_p \frac{dT_x^-}{dz} &= e_x^- S_x^- + \alpha_{ix}^- (T_a^- - T_x^-) \quad x^-.
\end{aligned}
\tag{6.71}$$

Рівняння теплообміну (6.71) узагальнено-зрушеної рідини у випадку течії в тепловому резервуарі приймають наступний вид:

$$\begin{aligned}
\dot{W}_y^+ \rho c_p \frac{dT_y^+}{dz} &= e_y^+ S_y^+ + K_y^+ (T_y^{+\infty} - T_y^+) \quad y^+, \\
\dot{W}_y^- \rho c_p \frac{dT_y^-}{dz} &= e_y^- S_y^- + K_y^- (T_y^{-\infty} - T_y^-) \quad y^-, \\
\dot{W}_x^+ \rho c_p \frac{dT_x^+}{dz} &= e_x^+ S_x^+ + K_x^+ (T_x^{+\infty} - T_x^+) \quad x^+, \\
\dot{W}_x^- \rho c_p \frac{dT_x^-}{dz} &= e_x^- S_x^- + K_x^- (T_x^{-\infty} - T_x^-) \quad x^-.
\end{aligned}
\tag{6.72}$$

Рівняння (6.66), (6.88), (6.70), (6.72) у випадку, коли плаский або прямокутний канали покриті обвідним каналом в якому тече рідина-теплоносій, слід доповнити рівняннями, що описують зміни температури теплового резервуара. З метою скорочення, розглянуто тільки рівняння переносу тепла для теплового резервуара. Ці рівняння мають такий вигляд:

$$\begin{aligned}
\dot{W}_e^+ \rho_e c_{pe} \frac{dT_e^+}{dz_e} &= K_e^+ (T_e^+ - T^+) \quad e^+ (e^+ - ee^+) \quad e^+, \\
\dot{W}_e^- \rho_e c_{pe} \frac{dT_e^-}{dz_e} &= K_e^- (T_e^- - T^-) \quad e^- (e^- - ee^-) \quad e^-.
\end{aligned}
\tag{6.73}$$

де  $T_e^\pm$  – температура каналу з теплоносієм, °С;

$c_{pe}$  – теплоємність теплоносія, Дж/кг °С;

« $ee$ » – індекс, який означає зовнішнє середовище відповідно до каналу з теплоносієм.

Температури  $T_e^\pm$  у разі течії в тепловому резервуарі з фіксованими температурами приймають значення  $T_e^{\pm\infty}$ . Для прямокутного каналу число рівнянь типу (6.73) збільшується вдвічі; внаслідок чого всім величинам надаються індекси  $x$  та  $y$ . Для течії узагальнено-зрушеної рідини необхідно зробити теж саме, а зв'язок між змінними  $z$  і  $z_e$  буде розглянуто нижче.

Якщо канал із дуже в'язкою рідиною оточено обвідним каналом, то як для в'язкопластичної так і для узагальнено-зрушеної рідин замість окремих

температур  $T_e^\pm$  буде застосована одна єдина температура  $T_e(z_e)$ , але яка взята в різних точках за координатою  $z_e$ .

Вид рівнянь (6.65) - (6.73) показує, що поздовжнє поле температур можна визначити, якщо обчислити величини питомих дисипацій. Для цього слід побудувати лінії-границі розбиття прямокутника в перетині каналу на відповідні ділянки та обчислити їх площі; обчислити інтеграли від питомої дисипації за ділянками; обчислити коефіцієнти тепловіддачі на твердих стінках і границях (для в'язкопластичної рідини), обчислити коефіцієнти тепловіддачі; вирішити задачу теплопровідності в ядрі в'язкопластичної рідини. Але напочатку, необхідно отримати рівняння теплообміну для довільно орієнтованого напрямку теплообміну щодо основного каналу. Такі умови реалізуються при теплообміні в прямому та обвідному каналах, з довільним кутом підйому гвинтової лінії його вісі.

У обвідному каналі та основному каналі не збігаються поздовжні координати  $z$  і  $z_e$ . Зв'язок між поздовжніми координатами  $z$  і  $z_e$  встановлюється через кут підйому  $\varphi$  і має такий вид:

$$z_e = z\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}. \quad (6.74)$$

Якщо в прямому каналі обрати визначиний перетин каналу, то різним сторонам цього перетину будуть відповідати різні поперечні перерізи обвідного каналу, які розташовуються послідовно один за одним і заповнюють деякий проміжок за координатою  $z_e$ . Для кожної сукупності перетинів обвідного каналу, можливо вказати середній за розташуванням перетин, якому відповідає деяка певна координата  $z_e$ . Повторюючи цю процедуру для всіх сторін поперечного перетину основного каналу, можна прийти до висновку, що прямокутний перетин прямого каналу оточено перетином каналу з температурою  $T_e$ , яку необхідно взяти в чотирьох різних точках за координатою  $z_e$ .

Значення аргументів  $z_{ei}$  для температури  $T_e$  приймають наступні значення:

$$\begin{aligned} z_{e1} &= \xi_\varphi z; & z_{e2} &= \xi_\varphi z + \left(\frac{a+h}{2} + \delta\right) \sqrt{1 - \xi_\varphi^2}; \\ z_{e3} &= \xi_\varphi z + \left(\frac{2a+2h}{2} + 2\delta\right) \sqrt{1 - \xi_\varphi^2}; \\ z_{e4} &= \xi_\varphi z + \left(\frac{3a+3h}{2} + 3\delta\right) \sqrt{1 - \xi_\varphi^2}; & \xi_\varphi &\equiv 1 + \operatorname{tg}^2 \varphi \end{aligned} \quad (6.75)$$

де  $a$ ,  $h$ ,  $\delta$  – розміри прямокутника перетину прямого каналу та товщина обгортаючого каналу, м.

Як приклад запису рівнянь теплообміну, можна розглянути випадок теплообміну між узагальнено-зрушеною рідиною та теплоносієм у пласкому каналі. Цей найпростіший для запису випадок демонструє всі основні

особливості перехресного теплообміну. У цьому випадку рівняння мають досить складний вигляд:

- для внутрішнього каналу:

$$\dot{V} \rho c_p \frac{dT}{dz} = eS + K_1(T_1^\infty - T)a + K_2(T_2^\infty - T)h + K_3(T_3^\infty - T)a + K_4(T_4^\infty - T)h$$

- для каналу з теплоносієм:

$$\begin{aligned} \dot{V}_e \rho_e c_{pe} \frac{dT_y^+}{dz} = & -K_1(T_1^\infty - T)a - K_2(T_2^\infty - T)h - K_3(T_3^\infty - T)a - K_4(T_4^\infty - T)h - K_{e1}(T_1^\infty - T_{iee})(a + 2\delta_e) - \\ & -K_{e2}(T_2^\infty - T_{iee})(h + 2\delta_e) - K_{e3}(T_3^\infty - T_{iee})(a + 2\delta_e) - K_{e4}(T_4^\infty - T_{iee})(h + 2\delta_e) \end{aligned} \quad (6.76)$$

$$K_i \equiv K_i(z_{ei}), \quad K_{ie} = K_{ie}(z_{ei}), \quad T_i^\infty = T_i^\infty(z_{ei}),$$

де  $T_{iee}$  – значення температур середовища, яке оточує обвідний канал, °С.

Друге рівняння в (6.76) зберігає свій вид для опису течій, як узагальнено-зрушеної, так і в'язкопластичної рідин у прямому каналі. Якщо додати до нього рівняння, що відносяться до прямого каналу з заміною доданків з коефіцієнтами теплопередачі на суми відповідних доданків, які взято в різних точках за координатою  $z_{ei}$ . то отримаємо рівняння, які є аналогами рівнянь (6.65) - (6.76).

## Висновки за розділом 6

Виходячи з вищенаведеного представлена модель течії баротропної рідини в пласкому каналі дозволяє з максимальною узагальненістю параметрів встановити залежність в'язкості і граничного значення напруження зрушення від тиску. Наведена модель допускає ряд уточнень і ускладнень, які можуть бути пов'язані з більш точним визначенням, а також проведення різноманітних чисельних досліджень впливу залежностей  $\mu(P)$  та  $\tau(P)$  на характеристики в'язкопластичної течії.

Отримані рівняння дозволяють визначати температури робочого матеріалу в каналі та теплоносія вздовж довжини плаского та прямокутного каналів для різних випадків теплообміну, коефіцієнти тепловіддачі течії узагальнено-зрушеної рідини із довільним розподілом швидкості на границях каналу. Даний алгоритм обчислення можна використовувати для розрахунку енергії дисипації ступеневої рідини. Знання чисельних показників енергії дисипативного тепловиділення необхідно враховувати при розрахунку оптимальних параметрів технологічного обладнання. Це веде до нового рівня якості при проектуванні відповідного технологічного обладнання, що дозволяє знизити енерговитрати-та матеріалоемність.

Запропонована розрахункова методика дозволяє проводити обчислення теплообмінних параметрів у складних тривимірних течіях у каналах з

довільним розподілом швидкостей для основних випадків теплообміну: канал, який занурено в тепловий резервуар із заданою температурою; канал, який оточений обвідним каналом з теплоносієм. Наведені рівняння теплообміну, являють собою систему диференціальних рівнянь першого порядку в кінцевих різницях для температури рідини в каналі. І в цьому полягає їх головна відмінність від розрахунків для випадків фіксованих температури на стінках прямого каналу та занурення прямого каналу в тепловий резервуар з фіксованою температурою. Крім цього, показано, що температура рідини залежить від поздовжньої координати вздовж каналу. В цьому випадку залежність температури від геометричних характеристик каналу визначається площею поперечного перетину каналу та його периметром, а також відношенням геометричних розмірів каналу (ширини, висоти та довжини).

В подальшому сформульовані рівняння дозволяють проводити обчислення теплових та гідродинамічних характеристик (коефіцієнтів теплопередачі та тепловіддачі, чисел Нусельта, дисепативного тепловиділення, температур твердого ядра, швидкості течії) при течії в'язкопластичної, узагальнено-зрушеної рідин у каналах різної геометрії технологічного обладнання хімічної та харчової промислості.

#### Список використаних джерел за розділом 6

1. Харламов С. Гидродинамика и теплообмен : Новые тенденции и перспективы моделирования внутренних течений / С. Харламов – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013 – 116 с.
2. *Gale M. Mixing in Single Screw Extrusion / M. Gale – Smithers Rapra Press, 2009. – 300 p.*
3. Ульєв Л.М. Ламінарне течення в соосних конічних каналах / Л.М. Ульєв – Харків: НТУ «ХПІ», 2006 – 660 с.
4. M. Anandha Rao. Rheology of Fluid, Semisolid, and Solid Foods: Principles and Applications / Rao M. Anandha - New York: Imprint: Springer, 2014. - 461 p.
5. Cantelli A. Uniform Flow of Modified Bingham Fluids in Narrow Cross Sections / A. Cantelli // Journal of Hydraulic Engineering, 2009. - 135(8). - P. 640-50.
6. Baptista A. Heat transfer in fully developed laminar flow of power law fluids / A. Baptista, M.A. Alves, P.M. Coelho // Journal of Heat Transfer, 2014. - 136(4). - P. 1-8.
7. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л. Моделювання течій неньютонівських рідин у каналах базової геометрії / Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, Е.В. Білецький, Ю.А.Толчинський – Харків: НТУ «ХПІ», 2013 – 319 с.
8. Голованчиков А.Б. Моделирование течения вязкопластической реакционной массы в шнековом реакторе с маловязким пристенным слоем /

Голованчиков А.Б., Шагарова А.А. // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2015. - Т. 58, № 12. - С. 69-72.

9. Пономарева М.А. Циркуляционное течение высоковязкой неньютоновской жидкости в канале одношнекового экструдера / М.А. Пономарева, М.П. Филина, В.А. Якутенок // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2016. - № 2 (40). - С. 97-107.

10. Колгрюбер К. Двухшнековые сонаправленные экструдеры. Основы, технология, применение / К. Колгрюбер – СПб. Профессия, 2016. – 352 с.

11. Рябинин М.В. Методика определения потерь на трение в гидравлически гладкой круглой трубе для псевдопластичных жидкостей [Электронный ресурс] / М.В. Рябинин, К.А. Труханов // Современные проблемы науки и образования. 2015. – № 1-1. - Режим доступа: <http://www.science-education.ru>

12. Перминов А.В. Устойчивость стационарного плоскопараллельного течения псевдопластической жидкости в плоском вертикальном слое / А.В. Перминов, Т.П. Любимова // Вычислительная механика сплошных сред. – 2014. – Т. 7, № 3. – С. 270 – 278.

13. Mitsoulis E. Numerical simulations of complex yield-stress fluid flows / E. Mitsoulis, J. Tsamopoulos // Rheologica Acta 56. – 2017. P. 231 - 258.

14. Frigaard I. A. Bingham's model in the oil and gas industry / I. A. Frigaard, K. Paso, P. de Souza Mendes // Rheologica Acta 56. – 2017. P. 259 - 282.

15. Biletsky E. Theoretical aspects of non-newtonian fluids flow simulation in food technologies / E. Biletsky, E. Petrenko, D. Semeniuk // Ukrainian Food Journal, - 2014. -3(2). - P. 271-280.

16. Biletsky E. Three-dimensional model of non-Newtonian fluid flow in the rectangular channel / E. Biletsky, E. Petrenko, D. Semeniuk // Ukrainian Food Journal. - 2016. - 5(3). - P. 550-560.

17. Petrenko E. Modeling of the viscoplastic flow of a bingham fluid with transverse circulation in a rectangular channel of a worm machine / E. Petrenko E. Biletsky, D. Semeniuk // Journal of Chemistry and Technologies. - 2019. - 27(2). - P. 550-560.

18. Кирсанов Е.А. Неньютоновское течение дисперсных, полимерных и жидкокристаллических систем: структурный подход / Е.А. Кирсанов, В.Н. Матвеевко – Москва: Техносфера, 2016. - 383с.

19. Borzenko E. Nonisothermal filling of a planar channel with a power-law fluid / E. Borzenko, I. Ryltsev, O. Frolov, G. Shrager. // Journal of Physics: Conf. Series. - 2017. - 899. P. 1–6.

20. Saramito P. Progress in numerical simulation of yield stress fluid flows / P. Saramito, A. Wachs // Rheologica Acta 56. – 2017. P. 211 – 230.

21. Frank-Kamenetskii D.A. Diffusion and Heat Exchange in Chemical Kinetics / D.A. Frank-Kamenetskii - Princeton: Princeton University Press, 2015 – 384 p.
22. Колодяжнов В.Н. Моделирование гидродинамики и теплопереноса для неньютоновских жидкостей в каналах кольцевого поперечного сечения / В.Н. Колодяжнов, С.И. Амзин. – Воронеж : ВГТА, 2005. – 192 с.
23. Boyadjer Chr. Non liner mass transfer and hydrodynamic stability / Chr. Boyadjer // Физические основы экспериментального и математического моделирования процессов гидродинамики и тепломассобмена в энергетических установках : Труды 13 Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика А. М. Леонтовича. – М. : МЭИ, 2001. – Т. 1. – С. 203–212.
24. Димитриенко Ю.И. Конечно-элементное моделирование неизотермического стационарного течения неньютоновской жидкости в сложных областях / Ю.И. Димитриенко, Шугуан Ли // Математическое моделирование и численные методы, 2018, № 2, С. 70–95.
25. Toth G., Bata A., Belina K. Determination of polymer melts flow-activation energy a function of wide range shear rate / G. Toth, A. Bata, K. Belina // IOP Conf. Series: Journal of Physics, 2018. P. 1045.
26. Субботин Е.В. Численное исследование течений полимерных жидкостей в канале шнекового экструдера на основе одно- и двухмерных моделей/ Е.В. Субботин, Н.М. Труфанова, А.Г. Щербинин // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2012. – Т. 5, № 4. – С. 452-460.
27. Вахрушев А.А. Численное исследование течения жидкости с переменными вязкими свойствами в изогнутых каналах / А.А. Вахрушев, А.М. Липанов, А.В. Вахрушев // Химическая физика и мезоскопия. – 2005. – Т. 7, № 3. – С. 286-30.
28. *Petrenko E.* Determination of heat transfer coefficients during the flow of non-Newtonian fluids in pipes and channels of chemical process equipment / E. *Petrenko E.* Biletsky, D. Semeniuk // Journal of Chemistry and Technologies. - Dnipro: DNU, 2020. – Vol. 28(1). – P.88-99.



## РОЗДІЛ 7.

### СУЧАСНІ ШЛЯХИ ТРАНСФОРМАЦІЇ ХОЛОДИЛЬНИХ СИСТЕМ ПІДПРИЄМСТВ РЕТЕЙЛА УКРАЇНИ

Системи охолодження та кондиціонування забезпечують стратегічний рівень щодо безпеки функціонування безперервного холодильного ланцюга та підтримують критично важливий рівень температур, а також ще дають значний внесок у викиди парникових газів (GHG). Викиди GHG від систем охолодження та кондиціонування пов'язані зі споживанням ними енергії, одержаної з викопного палива, а також витоками холодоагентів, які мають високий потенціал глобального потепління (GWP). На сьогодні HFC домінують на ринку холодильних агентів. Вони мають нульовий озоноруйнівний потенціал (ODP), проте значно впливають на зміну клімату, ніж вуглекислий газ (CO<sub>2</sub>). В даний час викиди HFC складають невеликий відсоток парникових газів, але через зростання потреб у кондиціонуванні повітря та охолодженні в розвинених країнах, очікується, що їх викиди виростуть більш ніж у 20 разів. До альтернатив HFC, що мають низький потенціал глобального потепління (GWP), можна віднести холодоагенти природного походження, такі як вуглеводні (HC), аміак (NH<sub>3</sub>) та діоксид вуглецю (CO<sub>2</sub>), а також гідрофторолефіни (HFO). Проведено критичний аналіз альтернативних холодильних агентів згідно вимог Монреальського протоколу з Кігалійською поправкою, що мають низький вплив на клімат і характеризуються низьким GWP. На основі аналізу розглянуто сучасні шляхи трансформації сектора холодильної та кліматичної індустрії з акцентуванням на системах охолодження та кондиціонування вітчизняних підприємств ритейлу. Проведено огляд конструктивних рішень холодильних систем на CO<sub>2</sub> для вітчизняних підприємств ритейлу. Показано що CO<sub>2</sub> може використовуватися як холодоагент у холодильних системах вітчизняних підприємств ритейлу різних типів, які працюють як у докритичних (субкритичних), так і надкритичних (транскритичних) циклах. Проведений аналіз холодильних систем на CO<sub>2</sub> показав перспективність їхнього застосування для систем холодозабезпечення вітчизняних підприємств ритейлу. Виникаючі при цьому складності, вирішуються різноманітними схемними рішеннями, розробленими та апробованими фахівцями провідних холодильних компаній світу.

Відомо що, системи охолодження та кондиціонування забезпечують стратегічний рівень щодо безпеки функціонування безперервного холодильного ланцюга та підтримують критично важливий рівень температур, а також ще дають значний внесок у викиди парникових газів (GHG). Викиди GHG від систем охолодження та кондиціонування пов'язані зі споживанням ними енергії, одержаної з викопного палива, а також витоками холодоагентів, які мають високий потенціал глобального потепління (GWP).

Міжнародні політичні угоди, такі як Паризька угода і Монреальський протокол з Кігалійською поправкою до нього, визначають шляхи трансформації сектора холодильної та кліматичної індустрії у напрямку використання

холодоагентів, що мають низький вплив на клімат і характеризуються низьким GWP.

Відповідно до вимог щодо імплементації Монреальського протоколу більшість країн вирішували проблеми щодо припиненням виробництва та обігу хлорфторвуглеців (CFC) як озоноруйнівних речовин та впроваджували в холодильні та кліматичні системи гідрофторвуглеці (HFC) [1]. Однак Кігалійська поправка націлює міжнародне співтовариство щодо скорочення споживання гідрофторвуглеців (HFC). На сьогодні HFC домінують на ринку холодильних агентів. Вони мають нульовий озоноруйнівний потенціал (ODP), проте значно впливають на зміну клімату, ніж вуглекислий газ (CO<sub>2</sub>). В даний час викиди HFC складають невеликий відсоток парникових газів, але через зростання потреб у кондиціонуванні повітря та охолодженні в розвинених країнах, очікується, що їх викиди виростуть більш ніж у 20 разів.

Альтернативними холодоагентами, що мають низький вплив на клімат, можуть бути речовини природного походження (вуглеводні, аміак і діоксид вуглецю). Де які з них вже багато десятиліть застосовуються в холодильних та кліматичних системах (наприклад аміак), характеризуються низьким впливом на зміну клімату, мають нижчу вартість ніж синтетичні холодильні агенти, кращі термодинамічні властивості, але мають і суттєві недоліки такі як легкозаймистість, токсичність і високі значення робочого тиску, що обмежують їхнє застосування і потребують спеціальних підходів або навиків роботи. З цієї причини холодильні та кліматичні системи, які працюють з використанням таких холодоагентів, потребують іншого підходу у частині проектування, монтажу, сервісного обслуговування та експлуатації, та потребують приділенню значної уваги щодо безпеки. На сьогодні єдиного вибору на користь то чи іншого холодильного агента для холодильної та кліматичної систем не існує, як не існує універсального конструктивного рішення даних систем.

В галузі холодильної та кліматичної індустрії найбільшими споживачами холоду є харчова та переробна промисловість, а також підприємства ритейлу. Відомо що більшість холодильних систем переробної та харчової галузі, особливо великої потужності, працюють на аміаку й тому проблема використання альтернативних агентів по суті є вже вирішеною. З холодильними та кліматичними системами підприємств ритейлу все набагато складніше, тому що як раз вони і є найбільшими споживачами синтетичних холодильних агентів. Даний сектор ще до кінця не оголтувся від заборони використання CFC, як від нього вимагають переходу від HFC до природних холодильних агентів. На сьогодні розробники холодильних та кліматичних систем зіткнулися з жорсткістю вимог до вибору холодоагенту, з вимогами забезпечити ефективне використання обладнання і вимогами використовувати тільки відповідним чином підготовлений персонал. Тому проблема пошуку екологічних та енергоефективних рішень особливо для підприємств ритейлу є вельми актуальною. За останні роки важливість CO<sub>2</sub> як холодоагенту в секторі холодильного обладнання для продовольчої торгівлі помітно виросла, але є й

висвітлюються проблеми, які в першу чергу пов'язані з високим робочим тиском й невеликою ефективністю за температур навколишнього середовища > 31 °С. Тому в даній роботі нами проведено критичний аналіз альтернативних холодильних агентів та його основні висвітлено де які можливі конструктивні рішення систем охолодження та кондиціонування для вітчизняних підприємств ритейлу.

Як об'єкт дослідження нами обрано холодильні агенти з низьким GWP та холодильні системи підприємств ритейлу. Проаналізовано їх недоліки та переваги, обмеження для застосування. Зроблено висновки, що на сьогодні CO<sub>2</sub> є перспективним холодоагентом для застосування у холодильних системах вітчизняних підприємств ритейлу. Розглянуто можливості конструктивних рішень холодильних систем на CO<sub>2</sub> для вітчизняних підприємств ритейлу. В якості джерел інформації виступали дані електронних джерел, джерела фірм-лідерів холодильної індустрії та дані попередніх досліджень. Методи досліджень аналітичні.

Як було вказано раніше на сьогодні HFC домінують на ринку холодильних агентів, особливо в системах охолодження та кондиціонування підприємств ритейлу. До альтернатив HFC, що мають низький потенціал глобального потепління (GWP), можна віднести холодоагенти природного походження, такі як вуглеводні (HC), аміак (NH<sub>3</sub>) та діоксид вуглецю (CO<sub>2</sub>), а також гідрофторолефіни (HFO). В таблиці 7.1 за даними [1] наведено порівняльну характеристику щодо безпечності поширених на сьогодні холодоагентів.

Таблиця 7.1

**Порівняльна характеристика безпечності холодоагентів**

Походження холодоагенту	Штучні - HFC			Природні		
	Номер холодоагенту	R-32	R-410a	R-134a	R-290	R-717
Назва холодоагенту	Діфторметан	Пентафторетан	Тетрафторетан	Пропан	Аміак	Діоксид вуглецю
GWP	677	1725	1300	3	0	1
Клас за безпечністю згідно ISO 817:2014	A2L – низька токсичність і низька займистість	A1 - низька токсичність і займистість	A1 - низька токсичність і займистість	A3 - низька токсичність і займистість	B2L з високою токсичністю та низькою займистістю	A1 - низька токсичність і займистість

Як видно з таблиці штучним холодоагентам притаманні високі показники GWP, проте вони є більш безпечні в порівнянні з природними. Природним навпаки притаманні низькі або нульові показники GWP, проте вони характеризуються поганими показниками за безпечністю.

Розглянемо основні переваги та недоліки альтернативних холодоагентів за даними [1].

Аміак (R-717) – холодоагент природного походження, вже більше ста років застосовується в холодильних системах харчової та переробної промисловості.

До його беззаперечних переваг можна віднести:  $GWP = 0$ , нульовий ODP, невисоку вартість, широку доступність, високу енергоефективність, високу охолоджувальну здатність, [1].

Водночас йому притаманні недоліки: за ISO 817:2014 - R-717 характеризується як речовина B2L з високою токсичністю та низькою займистістю [2].

На сьогодні аміак традиційно використовується для холодильних та кліматичних систем великої потужності, промислових холодильних систем та низькотемпературних установках. Також доречно його використання в каскадних системах (наприклад, з використанням  $CO_2$ ) в тому числі й для підприємств ритейлу та холодильних системах охолодження та кондиціонування з проміжним холодоносієм на базі чилерів .

Вуглеводні (пропан: R-290, ізобутан: R-600a, пропілен: R-1270), холодоагенти природного походження. Основні переваги вуглеводнів [1]:

- Нижча ціна у порівнянні з синтетичними холодоагентами;
- $GWP < 3$  і нульовий ODP;
- Нетоксичні;
- Відповідність більшості вимог, які висуваються до холодоагентів;
- Порівняно висока енергоефективність та висока охолоджувальна здатність.

Разом з тим, вони класифікуються як легкозаймисті холодоагенти класу A3. Відповідно, під час проектування обладнання, в якому знаходяться газоподібні вуглеводні (НС), особливо за великих значень заповнення системи, потрібно дотримуватися особливих заходів щодо безпеки. Якщо порівнювати, необхідні величини заповнення холодильної системи, яка працює з використанням НС, набагато нижчі, ніж у тих з них, які працюють з використанням HFC.

На сьогоднішній день вуглеводні вже досить широко застосовуються у побутових та окремо встановлених промислових холодильниках у країнах Європи та Азії. Сучасні холодильні агрегати, що живляться від електромережі, з заповненням менше ніж 150 г можуть забезпечувати холодопродуктивність приблизно до 1000 Вт. Незважаючи на усі переваги застосування вуглеводнів у холодильних системах підприємств ритейлу є дуже обмеженим, перш за все це пов'язано з їх небезпечністю [1].

Гідрофторолефіни (R-1234yf, R-1234ze) до основних переваг можна віднести:  $GWP < 10$ , нульовий ODP. За рівнем енергоефективності та охолоджувальної здатності вони майже такі самі, як у HFC. До недоліків можна віднести наступне: синтетичні хімічні речовини, висока вартість, утворення побічних продуктів, шкідливих для довкілля і здоров'я, важкозаймисті речовини [2]. Гідрофторолефіни можуть використовуватися в холодильних системах підприємств рітейлу, але їх висока вартість та суперечливі висловлювання фахівців щодо безпечності, на сьогодні обмежують їх застосування. До речі, дослідження щодо їхньої сумісності з найпоширенішими матеріалами холодильних систем, розробка та випробування компонентів холодильних систем ще тривають.

Діоксид вуглецю  $CO_2$  (R-744), нейтральний холодоагент є адекватною заміною HFC для систем охолодження та кондиціонування харчової та переробної індустрії та підприємств рітейлу.

$CO_2$  має ряд сприятливих властивостей, у тому числі такі:

- Безбарвний, нетоксичний, важчий за повітря;
- Невисока вартість, широка доступність;
- Незаймистий;
- Набагато вища об'ємна холодопродуктивність, ніж у традиційних холодоагентів, що дає змогу проектувати холодильні системи та їх компоненти з меншим об'ємом;
- Висока енергоефективність (низькі втрати тиску забезпечують набагато менші тепловтрати).

Незважаючи на усі переваги йому притаманний високий робочий тиск, що потребує передбачення спеціальних конструкцій і міцніших матеріалів, та знижена ефективність за температур навколишнього середовища  $> 31$  °C.

Враховуючі наведенні вище переваги та недоліки альтернативних холодоагентів, що мають сприятливі еколого-економічні показники, можна зробити висновок, що на сьогодні  $CO_2$  є перспективним холодоагентом для застосування у холодильних системах вітчизняних підприємств рітейлу.

Як холодоагент  $CO_2$  має відмінні теплофізичні властивості, забезпечуючи системі високу продуктивність і низьке енергоспоживання [2]. Діаметр трубопроводів систем на  $CO_2$  значно менший у порівнянні з фреоновими установками, що знижує ризики втрат при роботі, а також дозволяє зменшити типорозмір арматури [2]. Первинні капітальні витрати при використанні  $CO_2$  можуть бути вищими за стандартні, але в довгостроковій перспективі вони виправдані, оскільки знижують термін окупності проектів [3].

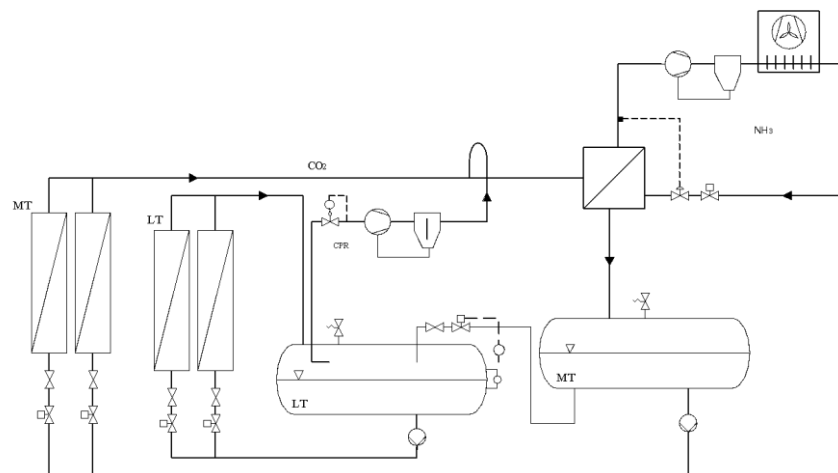
Розглянемо можливості конструктивних рішень холодильних систем на  $CO_2$  для вітчизняних підприємств рітейлу.  $CO_2$  може використовуватися як холодоагент у холодильних системах вітчизняних підприємств рітейлу різних типів, що працюють як у докритичних (субкритичних), так і надкритичних (транскритичних) циклах.

Найчастіше субкритичний цикл застосовують при каскадній схемі холодопостачання. Як правило, у верхній гілці каскаду як холодоагент

використовують R717 або R134a, а в нижній гілці – R744 ( $\text{CO}_2$ ) у діапазоні температур від мінус 35 °С (температура кипіння) до 10 °С (температура конденсації), що відповідає тискам від 12 до 26,5 бар. Існують різні види субкритичних каскадних холодильних систем на  $\text{CO}_2$ : системи з безпосереднім кипінням, системи з насосною циркуляцією, системи на  $\text{CO}_2$  із вторинним проміжним контуром або комбінації цих систем [4]. Ряд компаній розробили та пропонують каскадні холодильні центральні на  $\text{CO}_2$ , які використовуються для холодильних систем супермаркетів.

Ефективність субкритичних каскадних холодильних систем на  $\text{CO}_2$  досить висока навіть в умовах жаркого клімату. Ці системи мають досить вагомі переваги: для високотемпературної ступені потрібно дуже невелику кількість холодоагенту; різниця температур біля каскадного теплообмінника відносно низька; на високій стороні різних холодильних установок можна використовувати фреон або аміак; аміачно-вуглекислотні каскадні системи мають найвищий коефіцієнт корисної дії [5].

На рис. 7.1 показана спрощена схема холодильної установки, у якій  $\text{CO}_2$  скраплюється у випарнику первинного холодильного контуру (з холодоагентами  $\text{NH}_3$ , HC (пропан) і транспортується циркуляційним насосом у випарники системи середньотемпературного охолодження. У сучасних каскадних  $\text{CO}_2$ -ступенях передбачений додатковий LT-ресивер низького тиску, що підтримується на рівні тиску кипіння  $\text{CO}_2$  за рахунок відкачки пар одним або декількома одноступінчастими компресорами [5]. Компресор нагнітає пари  $\text{CO}_2$  у каскадний охолоджувач (конденсатор) разом з газом зі середньотемпературного випарника. В охолоджувачі сумарний газовий потік конденсується й потім надходить у відповідний MT-ресивер. З нього відбувається перепуск рідини в ресивер низького тиску за допомогою поплавкового клапана.



**Рисунок 7.1 - Спрощена схема субкритичної каскадної холодильної системи**

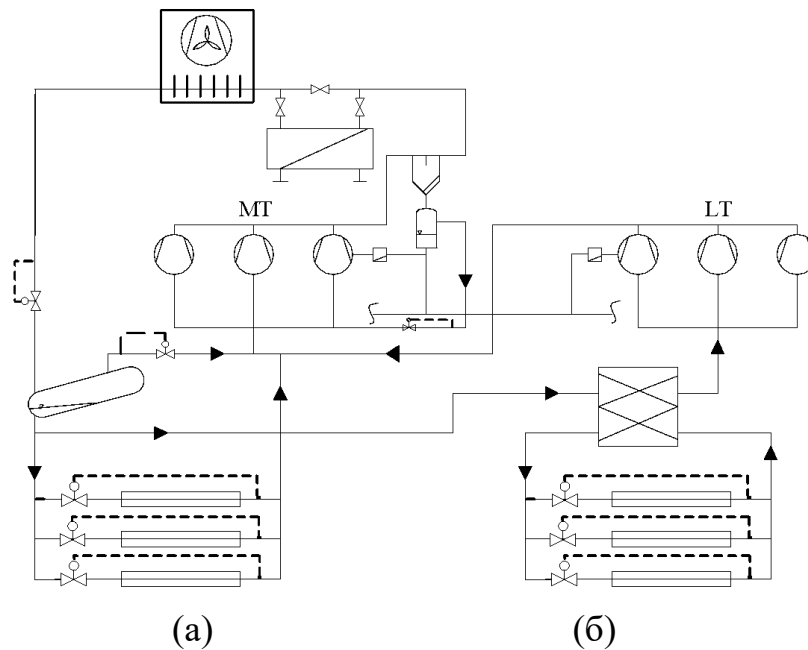
Проміжна температура в каскадних системах обирається виходячи з необхідної температури в об'єктах охолодження, які зазвичай експлуатуються в умовах високої температури навколишнього середовища, а це значить, що дані об'єкти можуть охолоджуватися безпосередньо діоксидом вуглецю. Крім того, середньотемпературну частину можна оптимізувати для одержання максимальної енергетичної ефективності, якщо використовувати систему тільки для низькотемпературного застосування.

Зазвичай каскадна система складається із двох різних холодильних систем, які сполучені, але ізольовані на каскадному теплообміннику, розрахунковий робочий тиск у кожній з них може бути різним [5]. Розрахунковий тиск CO<sub>2</sub> звичайно обирають орієнтуючись на доступність компонентів і дорівнює 40–45 бар (що відповідає температурі +5...+10 °C). В даних каскадних системах важливо, щоб на високотемпературній стороні працював, принаймні, один компресор для забезпечення можливості запуску першого компресора на низькотемпературній стороні. У протилежному випадку компресор на низькотемпературній стороні буде вимикатися через високий тиск. Точно така послідовність необхідна при заповненні системи. Насамперед, необхідно заповнити холодильним агентом високотемпературний контур і запустити його в роботу. Коли це буде зроблено, можна почати заправлення низькотемпературної системи діоксидом вуглецю. Далі, при підвищенні тиску CO<sub>2</sub> в усмоктувальній лінії запускаються низькотемпературні компресори.

Транскритичні холодильні системи на CO<sub>2</sub> на сьогодні використовуються в холодильних системах з бустер-компресором на CO<sub>2</sub> у діапазоні температур від мінус 35 ° (температура кипіння) до +40 °C (температура конденсації), що відповідає тискам від 12 до 90 бар [4]. Як відомо, особливість транскритичної холодильної системи в тому, що при її роботі не відбувається конденсації холодоагенту, завдяки чому досягається мінімальна різниця між температурою навколишнього середовища та температурою холодильного агента, що можна використати для переносу тепла в системі рекуперації [4]. Дана властивість дає можливість збільшити кількість тепла, що рекуперується при збільшенні температури навколишнього середовища.

Найчастіше у транскритичній бустерній системі CO<sub>2</sub> є холодильним агентом для низькотемпературних, середньотемпературних та високотемпературних об'єктів, а високопотенційне тепло з магістралі нагнітання використовується для рекуперації тепла. Таким чином, ми отримуємо в одній холодильній системі інтеграцію систем охолодження та обігріву [6].

На рис. 7.2 представлена спрощена схема транскритичної бустерної холодильної системи підприємства рітейлу.



**Рисунок 7.2 - Спрощена схема транскритичної бустерної холодильної системи: а – середньотемпературна МТ гілка, б – низькотемпературна ЛТ гілка**

Розглянемо деякі особливості схемних рішень транскритичної холодильної системи на  $\text{CO}_2$ . Транскритична бустерна система на  $\text{CO}_2$  поділяється за тиском на три секції: низького, середнього та високого тиску [7].

Секція високого тиску починається з компресора високого тиску ЛТ. Гаряча пара проходить через рекуперативні теплообмінники та нагріває воду, а потім надходить у загальний газоохолоджувач. Закінчується секція високого тиску електронним розширювальним клапаном, наприклад ССМТ виробництва Danfoss. Розрахунковий тиск у цій секції, як правило, становить від 90 до 120 бар.

Секція середнього тиску починається від розширювального клапана високого тиску, де потік розділяється на пару та рідину в ресивері. Пароподібна фаза відводиться в усмоктувальну лінію компресора високого тиску МТ через байпасний клапан. Рідка фаза подається до розширювальних клапанів, де відбувається її розширення перед подачею в низькотемпературний і середньотемпературний випарники. Газ із низькотемпературного випарника стискується в низькотемпературному компресорі та змішується з газами, що надходять зі середньотемпературного випарника та байпасної лінії. Звідси газ подається в усмоктувальну лінію компресора високого тиску та заповнює контур.

Розрахунковий тиск у середньотемпературній секції звичайно становить 40...45 бар, а в низькотемпературній секції 20...35 бар. При цьому спостерігається тенденція проектувати середньотемпературну та низькотемпературну секції на однаковий тиск.

Робочий тиск на лінії всмоктування низькотемпературної секції становить близько 15 бар, лінії середньотемпературного всмоктування 28 бар.



Робочий тиск на лінії нагнітання середньотемпературних та паралельних компресорів становить 87 бар. Робочий тиск у ресивері – 33 бари. Робочий тиск у ресивері – 33 бари. Необхідно відмітити, що тиск у ресивері має бути більшим за величину, при якій відбувається випаровування в середньотемпературних випарниках, для забезпечення різниці тисків на розширювальних клапанах.

Для підтримки тиску в ресиверах під час простою системи необхідно передбачити невелику за холодопродуктивністю холодильну машину. Таке конструктивне рішення не дозволяє тиску в ресивері збільшуватися більш допустимого при знеструмленні або простої обладнання, та запобігає розгерметизації холодильної системи та викиду CO<sub>2</sub> в атмосферу.

Управління всіма трьома температурними контурами може відбуватися за допомогою одного контролера, наприклад виробництва Danfoss з додатковими модулями розширення. Для низькотемпературної гілки необхідно передбачити встановлення компресора з частотним приводом, а на середніх і паралельних компресорах встановити два частотних приводи на кожен температурний контур. Таке рішення дозволить підвищити продуктивність системи без переходу на наступний типорозмір компресора, знизити споживання електроенергії та плавніше регулювати холодопродуктивність. Також необхідно передбачити щоб вентилятори газоохолоджувачів також мали частотні приводи для плавного регулювання в умовах низької продуктивності, що дозволить їм максимально ефективно включитися в роботу і знизити споживання електроенергії.

При транскритичних умовах тиск є функцією температури на виході з газоохолоджувача. Метою регулювання є одержання максимального холодильного коефіцієнта COP при даній температурі. Робота вентиляторів газоохолоджувача регулюється по температурі CO<sub>2</sub> на виході з газоохолоджувача. Якщо фактична температура нижче заданого значення, то швидкість обертання вентиляторів зменшується. Якщо всі компресори зупинені, то вентилятори не обертаються. У традиційних системах тиск часто служить регулюючим параметром (зі зменшенням тиску конденсації росте продуктивність системи), але для транскритичних систем у холодний період це може сприяти збільшенню переохолодження та привести до сильного зниження тиску в ресивері. У результаті цього перепад тиску може бути недостатній для нормальної роботи розширювального клапана.

Немаловажну роль при виборі системи холодопостачання та холодильного агента для підприємства рітейлу, що проектується грають первісні витрати та експлуатаційні витрати. Відомо, що більшу частину експлуатаційних витрат становить споживання електроенергії. Як відомо, для виробництва холоду в харчовій промисловості споживається значна кількість електроенергії. Сьогодні близько 10...15% електроенергії, що використовується в усьому світі доводиться на виробіток холоду. При цьому супермаркети є, найбільшими споживачами електроенергії. Половина енергії, що витрачається супермаркетом, іде на холодильну обробку продуктів (компресори, вітрини й т.п.). При цьому компресори споживають близько 30% електроенергії. Річні

витрати на електроенергію в великих супермаркетах можуть становити близько 1% від загального доходу. Причому скорочення енергоспоживання на 50% приводить до 15%-го збільшення прибутку для середнього обсягу товарообігу мережі супермаркетів. Необхідно врахувати ще один істотний фактор, безперервний ріст цін на енергоресурси. Щорічний ріст цін на електроенергію становить 2... 11%.

Фахівці компанії «Dorin SpA» провели порівняльний аналіз деяких схем холодопостачання для торговельних підприємств із урахуванням клімату регіону (Київ і Київська область) і технічних умов (агрегат холодопродуктивністю  $Q_0 = 150$  кВт для температури кипіння  $t_0 =$  мінус  $10$  °C і агрегат –  $Q_0 = 50$  кВт для  $t_0 =$  мінус  $35$  °C).

Були розглянуті три схеми холодопостачання: А – стандартна на R404A; В – з бустер-компресором (транскритичний цикл CO<sub>2</sub>) і С – каскадна з R134a у верхній гілці, R744 – у нижній. Розрахунки показали, що найбільш енергозбережливою є схема холодопостачання з бустер-компресором (транскритичний цикл R744). При її експлуатації заощаджується 17 % енергії в порівнянні зі стандартною схемою холодопостачання на R404A.

Проведений аналіз холодильних систем на CO<sub>2</sub> показав перспективність їхнього застосування для систем холодозабезпечення вітчизняних підприємств рітейлу. Виникаючі при цьому складності, вирішуються різноманітними схемними рішеннями, розробленими та апробованими фахівцями провідних холодильних компаній світу.

Система із CO<sub>2</sub> по ефективності перевершує обладнання із синтетичними холодоагентами, якщо воно працює в області субкритичних температур (температури < 31,2 °C). Споживана потужність систем CO<sub>2</sub> у порівнянні з R404a. У закритичному режимі експлуатації (температури > 31,2 °C) системи із CO<sub>2</sub>, загалом, є менш ефективними, чим обладнання із синтетичними холодоагентами. Але якщо виходити з розрахунку за рік, то в широтах з помірним кліматом холодильні установки, що використовують CO<sub>2</sub>, на 10...30% енергоефективніші установок із синтетичними холодоагентами, тому що більшу частину року працюють в області докритичних температур. Проведені дослідження показали, що енергоефективність систем на CO<sub>2</sub> прямо залежить від місця експлуатації холодильного обладнання, від географічного фактора, а якщо бути точним від середньорічної температури.

Треба відзначити ще один істотний фактор – можливість у транскритичних системах на CO<sub>2</sub> ефективно використовувати рекуперацію тепла для одержання гарячої води для технологічних потреб і підігрів теплоносія для опалення. На відміну від фреонових машин, де є проблеми, пов'язані з одержанням високопотенційного тепла, на холодильних машинах працюючих у транскритичному циклі на CO<sub>2</sub> таких проблем немає. Все тепло високопотенціальне й фактично можна використовувати весь перегрів, відключаючи, при необхідності, газкулер.

## Висновки за розділом 7

Загальною проблемою, як для субкритичних систем, так і для транскритичних є ріст тиску під час простою системи. Для рішення цієї проблеми, існує кілька способів: для підтримки тиску в холодильній системі на прийнятному рівні можна використовувати додаткову невелику холодильну машину; установити в системі розширювальний сосуд, достатній для компенсації росту тиску в системі при простої; проектувати систему таким чином, щоб вона могла витримувати тиск простою (тиск насичених пар при кімнатній температурі) близько 80 бар. Як показує практика, оптимальним рішенням для даних холодильних систем є використання невеликої холодильної установки для охолодження рідкого CO<sub>2</sub>.

## Список використаних джерел за розділом 7

1. Citation 1. – Вимоги безпеки і стандарти для виробників та операторів обладнання для штучного охолодження, кондиціонування повітря і теплових насосів (RACHP) в Україні. Методичні рекомендації / Julia Haack, Edgar Timm, Dietram Oppelt // HEAT GmbH, 2021 р. – 36 с.
2. Citation 2 ASHRAE Position Document on Refrigerants and their Responsible Use”, available at: <https://www.ashrae.org>.
3. Citation 3 Refrigerant options now and in the future <https://assets.danfoss.com/documents/211728/AD224586434178en-001001.pdf>
4. Системи охолодження на CO<sub>2</sub> для продовольчих магазинів роздрібною торгівлі [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [www.danfoss.com/CO2](http://www.danfoss.com/CO2)
5. Выбор схемы централизованного холодоснабжения [Электронный ресурс] / Режим доступа : <<http://kriofor.com.ua/stati/26-vybor-skhemy-tsentralizovannogo-kholodosnabzheniya.html>>
6. CO<sub>2</sub> переживает второе открытие / [Электронный ресурс] Режим доступа : < <http://www.guentner.ru/nou-khau/innovacii-i-tekhnologii/khladagent-co2-nastupaet>>
7. Петренко О.В. Використання CO<sub>2</sub> у системах холодопостачання торговельних підприємств / О.В. Петренко, Д.П. Семенюк, І.Р. Діц // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі. - 2017. - Вип. 1. - С. 184-195.