

**Міністерство освіти і науки України  
Харківський державний університет харчування та торгівлі**

**М.І. ПОГОЖИХ  
А.О. ПАК  
А.В. ПАК  
М.В. ЖЕРЕБКІН**

**ГІДРОТЕРМІЧНА ОБРОБКА КРУП  
З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИНЦИПІВ СУШІННЯ  
ЗМІШАНИМ ТЕПЛОПІДВОДОМ**

**Монографія**

**Харків  
2014**

УДК 664.8.047:634.1/4

ББК 36.814.4

П43

Рецензенти:

д-р техн. наук, проф., Станкевич Г.М.

д-р техн. наук, проф., Шаніна О.М.

Рекомендовано

Вченою радою Харківського державного університету харчування та торгівлі, протокол №10 від 26 лютого 2014 р.

Погожих, М. І. Гідротермічна обробка круп з використанням принципів сушіння змішаним теплопідводом [Текст] : монографія / М. І. Погожих, А. О. Пак, А. В. Пак, М. В. Жеребкін. – Харків : ХДУХТ, 2014. – 170 с.

Монографія висвітлює актуальну науково-технічну проблему – підвищення енергоефективності процесу гідротермічної обробки круп. В роботі запропоновано спосіб гідротермічної обробки круп із використанням принципів сушіння змішаним теплопідводом, де кінцевою продукцією є швидковідновлювані каші. Розглянуто теоретичні основи тепло- та масообміну під час сушіння змішаним теплопідводом, одного із основних складових запропонованого способу. Шляхом дослідження внутрішніх та зовнішніх чинників процесу проварювання та сушіння круп з використанням способу змішаного теплопідводу та оцінкою якості сушеної продукції доведено доцільність використання даного способу для гідротермічної обробки даної сировини. В роботі описано розроблену структурну технологічну схему та конструкційні особливості установки для гідротермічної обробки круп з використанням принципів сушіння змішаним теплопідводом.

Матеріали монографії будуть цікавими науковим співробітникам і практичним працівникам харчових галузей промисловості.

УДК 664.8.047:634.1/4

ББК 36.814.4

© Погожих М. І., Пак А. О., Пак А. В.,  
Жеребкін М. В., 2014.

© Харківський державний університет  
харчування та торгівлі, 2014

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	6
ВСТУП	7
1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНІКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ГІДРОТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ КРУП	8
1.1. Обґрунтування вибору об'єкту та предмету досліджень	8
1.2. Особливості гідротермічної обробки круп	10
1.3. Аналіз сучасних способів гідротермічної обробки круп	14
1.4. Сушіння як складова процесу гідротермічної обробки круп	26
2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВНУТРІШНІХ ЧИННИКІВ ПРОЦЕСУ ГІДРОТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ КРУП З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИНЦИПІВ ЗТП-СУШІННЯ	34
2.1. Дослідження впливу виду сировини на характеристики процесу гідротермічної обробки з використанням принципів ЗТП-сушіння	34
2.2. Дослідження впливу попередньої підготовки сировини на характеристики процесу її гідротермічної обробки	42
3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗОВНІШНІХ ЧИННИКІВ ПРОЦЕСУ ГІДРОТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ КРУП З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИНЦИПІВ ЗТП-СУШІННЯ	48
3.1. Визначення раціональної товщини частини ФЄ без масообмінних зазорів	51
3.2. Визначення раціональної товщини частини ФЄ з масообмінними зазорами	60
3.3. Дослідження кінетики процесу ЗТП-сушіння сировини за різної температури сушильного агента	63
3.4. Математична модель розвитку потужності дисипативних структур під час ЗТП-сушіння вологої сировини	66
3.4.1. Постановка задачі зі знаходження функції розподілення потужності дисипативних структур з використанням рівняння теплопровідності	66

3.4.2.	Кінетика температури сировини у ФЄ під час ЗТП-сушіння як функція температури сушильного агента	68
3.4.3.	Кінетика температури сировини у ФЄ під час ЗТП-сушіння як функція координат	71
3.4.4.	Кінетика вологовмісту сировини під час ЗТП-сушіння як функція температури сушильного агента та відстані від поверхні ФЄ	75
3.4.5.	Визначення функції розподілення потужності дисипативних структур всередині ФЄ під час ЗТП-сушіння	82
4.	ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ШВИДКОВІДНОВЛЮВАНИХ КАШ, ОТРИМАНИХ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИНЦИПІВ ЗТП-СУШІННЯ	90
4.1.	Дослідження гігроскопічних властивостей швидковідновлюваних каш, отриманих з використанням принципів ЗТП-сушіння	91
4.2.	Дослідження стану вологи швидковідновлюваних каш методом ЕПР-спінових міток	93
4.3.	Дослідження пористості швидковідновлюваних каш, отриманих традиційними способами, та з використанням принципів ЗТП-сушіння	101
4.4.	Дослідження відновлюваності швидковідновлюваних каш	105
4.5.	Дослідження мікробіологічних показників і вмісту токсичних елементів та радіонуклідів отримуваних швидковідновлюваних каш	108
5.	РОЗРОБКА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ШВИДКОВІДНОВЛЮВАНИХ КАШ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИНЦИПІВ ЗТП-СУШІННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ	111
5.1.	Визначення раціональних режимів отримання швидковідновлюваних каш	111

5.2.	Принципова технологічна схема виробництва швидковідновлюваних каш з використанням принципів ЗТП-сушіння	116
5.3.	Розробка обладнання для виробництва швидковідновлюваних каш з використанням принципів ЗТП-сушіння	119
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	128
	ДОДАТКИ	146
А	Приклади розрахунку за допомогою пакету програм MathCad	146
Б	Деклараційний патент України на корисну модель №48230 «Установка для гідротермічної обробки та сушіння крупи»	165

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

ЕПР – електронний парамагнітний резонанс;

ЗТП – змішаний теплоідвод;

ФС – функціональна ємність.

## ВСТУП

Раціональне використання та зменшення втрат сільськогосподарської продукції – одне з основних завдань харчової промисловості України. Найбільш поширеною в Україні сільськогосподарською продукцією є зерно, у зв'язку з цим зернопереробка є однією з провідних галузей агропромислового комплексу. За короткі терміни необхідно переробити великі обсяги зерна, забезпечити його збереження з мінімальними втратами та видатками на зберігання. Важливе місце серед способів переробки зерна займає гідротермічна обробка, але витрати енергії на даний процес вищі, ніж енерговитрати під час виробництва зерна. Великі витрати енергії зумовлені тим, що до гідротермічної обробки входять такі процеси, як варіння, плющення або екструзія та один із найбільш енергоємних процесів – сушіння.

Завдяки вагомому внеску в розвиток теорії тепло- та масообміну таких вчених, як О.В. Ликов, М.О. Гришин, Ю.Ф. Снежкін, Г.М. Станкевич, М.І. Погожих, В.О. Потапов та ін., існує можливість знаходити нові шляхи в напрямі зменшення питомих енерговитрат, інтенсифікації процесу сушіння, удосконалення сушильного обладнання та автоматизації процесу, що сприяє підвищенню якості кінцевої продукції.

Одним із перспективних способів сушіння є сушіння змішаним теплопідводом (ЗТП-сушіння). ЗТП-сушіння має принципові відмінності від широко відомих як у зовнішніх умовах реалізації процесу, так і в характері поводження сировини, що розміщується всередині спеціального тепломасообмінного модуля – функціональної ємності (ФЄ). Наявні відмінності даного способу дозволяють отримувати сушену продукцію високої якості з низькими питомими енерговитратами на процес зневоднення.

Роботу присвячено розробці процесу гідротермічної обробки круп з використанням принципів ЗТП-сушіння з метою зменшення питомих енерговитрат апаратів переробки круп і підвищення якості отримуваної продукції.

# 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНІКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ГІДРОТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ КРУП

## 1.1. Обґрунтування вибору об'єкту та предмету досліджень

Зернові продукти забезпечують біля 60% добової потреби організму в білках та 40% калорійності раціону. При цьому крупа у харчовому раціоні людини складає від 8 до 13% від загального споживання зернових [1-17].

Останнім часом серед населення нашої країни все більшу популярність здобувають «моментальні» каші, які зовсім не вимагають варіння, і каші швидкого розварювання, яким досить для проварювання 3-5 хв [18-23]. Існують каші з однієї крупи або із декількох відразу, з додаванням фруктів, ягід, грибів, прянощів і т. ін. [24-25]. Сировиною для такої продукції є крупи.

На круп'яних підприємствах переробляють різні види круп'яних культур. Рис, пшоно, гречку називають іноді власне круп'яними культурами, оскільки основну масу зерна цих культур використовують для виробництва крупи. Крім того, крупу та круп'яні продукти виробляють із зерна вівсу, ячменя, пшениці, кукурудзи, гороху. Асортимент круп'яної продукції достатньо широкий – це крупа із цілого або дробленого ядра, пластівці і т.д. [26-28].

Зерно круп'яних культур дуже різноманітне за формою, розміром, будовою. Воно складається з трьох частин: ендосперму, зародка та різних плівок, але ендосперм та зародок, зазвичай, розглядають як єдине ціле – ядро. Дуже важливою властивістю зерна є міцність зв'язку зовнішніх плівок та ядра [29-33].

У круп'яних культур: риса, пшона, вівсу та гречки зовнішні плівки оточують ядро, але не зрослись з ним, а у інших: пшениці, ячменя, кукурудзи плівки щільно зрослись з ядром по всій його поверхні. Міцність зв'язку оболонки з ядром визначає у значній мірі способи переробки зерна в різні круп'яні продукти. Міцність та крихкість ядра також дуже важливі властивості



зерна, оскільки вони визначають не тільки методи переробки, але і асортимент продукції [29-33].

На вихід і якість крупи впливає велика кількість показників якості зерна. Насамперед велике значення мають вміст плівок, величина, вологість зерна і кількість домішок в ньому.

Вміст плівок визначають в зерні, очищеному від домішок. Чим вище вміст плівки, тим менше вміст ядра, тим менше крупи отримують із такого зерна.

Як правило, вміст плівок крупного зерна менше, ніж дрібного. Крім того дрібне зерно зазвичай лущить гірше. Особливо суттєвим чином впливає на ефективність переробки присутність самого дрібного зерна.

Вологість зерна чинить суттєвий вплив на його технологічні властивості, на кінцеву вологість крупи. Висока, а часто і низька вологість погіршують його технологічні властивості: за високої вологості ускладнюється очищення від домішок і лущення зерна, за низької – підвищується його подрібненість в процесі переробки [34-37].

Крупа та круп'яні продукти із зерна різних культур мають різний вміст поживних речовин: білків, вуглеводів, жирів, а також біологічно активних речовин [38-47].

В табл.1.1 наведено хімічний склад зерна різних круп'яних культур.

Крім того, що вміст поживних речовин відрізняється кількісно, він також відрізняється і якісно.

Високою збалансованістю амінокислотного складу відрізняється білок рису. Білок пшона містить мало лізину у порівнянні з білками інших видів круп.

Гречану крупу відрізняє високий вміст вітамінів: в ній у два рази більше вітаміну В<sub>1</sub>, ніж в пшеничній та ячмінній. Вітаміну В<sub>2</sub> гречана крупа містить у два рази більше, ніж всі інші крупи. По відношенню до вмісту білка, жиру, вуглеводів, мінеральних речовин, клітковини гречана крупа не має суттєвих переваг перед іншими крупами. За цими показниками всі переваги за вівсяною

крупкою. В ній у 3 рази більше високоцінного природного жиру та заліза, ніж в інших крупах.

Таблиця 1.1

Хімічний склад різних круп'яних культур (середні дані, %)

Культура	Вода	Білок	Жири	Вуглеводи	Клітковина	Зола	Вітаміни, мг		
							B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	PP
Пшенична	14,0	12,0	1,7	68,7	2,0	1,6	0,30	0,10	1,40
Вівсяна	12,8	10,2	5,3	59,7	10,0	2,0	0,49	0,11	1,10
Пшоняна	12,5	10,6	3,9	61,1	8,1	3,8	0,62	0,04	1,55
Гречана	13,3	11,4	2,7	58,8	11,4	2,4	0,53	0,20	4,19
Ячмінна	14,0	10,5	2,1	66,4	4,5	2,5	0,27	0,08	2,74

Таким чином, круп'яні культури, які є предметом досліджень, характеризуються високою кількістю поживних речовин і вони входять до раціону кожної сучасної людини, а виробництво швидковідновлюваних каш із круп'яних культур суттєво розширює асортимент страв із даної сировини [4-5, 29].

## 1.2. Особливості гідротермічної обробки круп

Варіння круп – основний процес підготовки сировини під час виробництва швидковідновлюваних каш, тому що гідротермічна обробка викликає зміни нативних властивостей крохмалю й білків, підвищуючи їх засвоюваність. Крупи, як правило варять гострою парою за наявності води у варильних апаратах [47-51].

Вода поглинається крупкою та за високої температури в сировині відбуваються складні зміни колоїдно-хімічних властивостей крохмалю та білків. Найбільш оптимальна вологість крупи після гідротермічної обробки

становить не більше 50%. Підвищена вологість на цій стадії виробництва харчових концентратів знижує споживчі властивості продукту – готові страви набувають підвищеної в'язкості, зменшується об'ємна маса сушеної крупи.

Основні зміни при гідротермічній обробці зазнають крохмаль і білки круп [52-59].

Крохмаль у набряклому стані за високої температури повністю або частково клейстеризується, відбувається його гідроліз із утворенням ряду проміжних колоїдних речовин, зокрема декстринів [52-53]. Це сприяє збільшенню вмісту в продукті водорозчинних речовин, кількість яких перебуває в прямій залежності від властивостей крохмалю й ступеня гідротермічної обробки.

Під час клейстеризації крохмалю спостерігаються порушення внутрішньої структури крохмальних зерен і приєднання молекул води до їх гідроксильних груп, які звільнилися, що приводить до збільшення сухих речовин круп.

Ступінь клейстеризації крохмалю перебуває в прямій залежності від кількості води, яка приймає участь у гідротермічній обробці, та тривалості теплового впливу. На ступінь клейстеризації впливають властивості крохмалю окремих видів круп, які розрізняються не тільки співвідношенням амілази й амілопектину, але й температурою клейстеризації.

Під час клейстеризації крохмалю амілоза розчиняється, з'являється дуже нестійкий розчин невисокої в'язкості, здатний за зміни умов ретроградувати, а амілопектин утворює досить стійкий густий гель.

За тривалої гідротермічної обробки круп відбувається подальша клейстеризація. Між окремими крохмальними зернами виникають нові зв'язки, що поєднують кілька крохмальних зерен. У результаті утворюється гель високої міцності.

Білкові речовини круп у результаті теплової обробки коагулюють, причому цей процес необоротний [57-58]. Коагуляція білків веде до зменшення

вмісту водорозчинних речовин у крупах, оскільки коагульований білок є гідрофобним.

Коагульовані білки краще засвоюються організмом людини. Однак надмірна гідротермічна обробка може призвести до значних необоротних процесів у білковій молекулі, викликати початкову стадію протеолізу білка й знизити засвоюваність білкового азоту й харчову цінність готової страви [57-58].

Гідротермічна обробка викликає деякий гідроліз клітковини й протопектину [57-59]. За гідротермічної обробки спостерігаються реакції меланоїдиноутворення, у результаті яких утворюються темнозabarвлені речовини – меланоїди, що знижують якість готової продукції. Зі збільшенням часу теплової обробки їхня кількість зростає, тому необхідно дотримувати режиму варіння круп. Тривалість варіння, за умов обробки гострим паром, становить 20...25 хв. для рисової й 40...45 хв. для перлової та пшеничної круп.

У результаті змін колоїдно-хімічних властивостей речовин під час варіння крупа злипається, ускладнюється процес сушіння та погіршуються споживчі властивості готових страв. У різних крупах ступінь злипання у процесі варіння різний й обумовлений наявністю великої кількості слизуватих речовин, що мають високу гідрофільну здатність, до яких відносяться пентозани й азотисті речовини.

Високий ступінь злипання, наприклад, перлової крупы [55] пов'язаний з наявністю в ній слизуватих речовин. Крім того, великі крохмальні зерна в ній розташовані вільно й не оточені білковою оболонкою, тому мають більшу доступність для води й тепла, утворюючи вільний крохмальний клейстер.

У рисовій крупі [55] крохмальні зерна укладені в білкову оболонку, яка рівномірно їх оточує, але оболонки неміцні й легко руйнуються при гідротермічній обробці, звільняючи крохмальні зерна. Оскільки алейроновий шар у процесі виробництва рисової крупы повністю видаляється, слизуватих речовин у рисовій крупі значно менше, ніж в інших крупах. В'язкість рисової

крупни також невелика, тому її ступінь злипання незначний й обумовлений клейстеризацією крохмалю.

Кукурудзяна й гречана крупи [55] в порівнянні з іншими крупами в процесі гідротермічної обробки практично не злипаються, тому що в них слизуваті речовини й крохмальні зерна мають щільну оболонку.

Щоб уникнути злипання під час гідротермічної обробки круп рекомендують застосування рослинних (соєвих або соняшникових) фосфатидів, які мають властивість перешкоджати злипанню й грудкоутворенню, що дозволяє вести гідротермічну обробку крупи до повної клейстеризації й отримувати готові продукти з високими споживчими властивостями. Фосфатиди закладають у варильний апарат попередньо розчиненими в гідрожирі, нагрітому до 40...55°C.

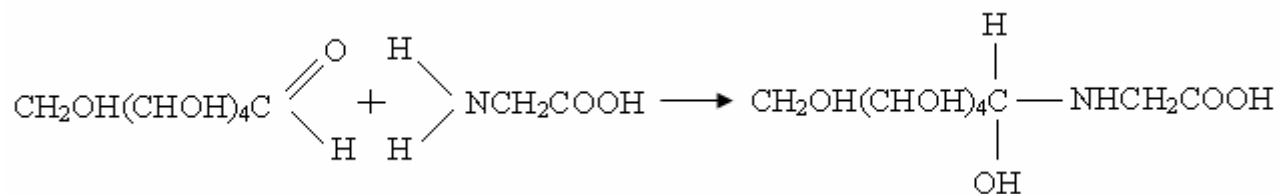
У багатьох випадках, щоб уникнути надмірного набухання крохмалю під час гідротермічної обробки круп у варильний апарат перед початком варіння вводять речовину, що стабілізує стінки крохмальних зерен крупи. Як стабілізатор рекомендується застосовувати розчин кухонної солі [50, 59].

На якість готової продукції істотний вплив чинить температура гідротермічної обробки [50, 55, 59].

Крупи мають різну температуру клейстеризації крохмалю, що перебуває в межах від 60 до 80°C. Коагуляція білкових речовин у варених крупах забезпечується за температури до 70...75°C. Тому для переведення харчових речовин круп у засвоюваний стан достатня температура до 80°C. Але при цій температурі не руйнується структура крупинок, тому що не забезпечується гідроліз клітковини, геміцелюлози, протопектину. У зв'язку із цим необхідна підвищена температура, щоб забезпечити деякий гідроліз цих речовин і послабити міцність міжклітинних перегородок.

Однак занадто підвищена температура призводить до небажаних процесів [59], зокрема гідролізу жиру й утворенню меланоїдинів. Утворення меланоїдинів – це основний процес, що відбувається під час варіння й погіршує якість готового продукту.

Рівняння реакції утворення меланоїдинів наступне:



Підвищена температура й значна вологість збільшують швидкість протікання реакцій. Високий вміст меланоїдинів надає готовим стравам специфічні присмак і запах, погіршує їх зовнішній вигляд.

Гідроліз жиру, наприклад, в пшоні й вівсяній крупі може привести до утворення пероксидів, чому також сприяють висока температура й вологість продукту. Пероксиди, що утворились за таких умов, розпадаються на альдегіди, кетони й інші речовини, які мають характерний присмак і запах жирів, що окислилися.

Побічні продукти утворення не тільки негативно позначаються на споживчих властивостях концентратів, але й скорочують терміни їх зберігання. Для запобігання зазначених процесів необхідне суворе дотримання режимів варіння окремих круп відповідно до технологічної інструкції (вологість, робочий тиск у варильному апараті, температура, тривалість варіння).

### 1.3. Аналіз сучасних способів гідротермічної обробки круп

В даному підрозділі наведені лише ті способи гідротермічної обробки круп, де кінцевим результатом є напівфабрикати високого ступеня готовності, що не потребують варіння.

Найбільш поширеними для виробництва круп або пластівців зі злакових і бобових культур, які не потребують варіння, на підприємствах переробної промисловості є нижчеописані способи [60, 61].

Вихідною сировиною для способу [62-68], першим описаного в підрозділі, є крупа. На першому етапі її доводять до вологості 15,5...17,0%, далі зволожену крупу піддають термообробці протягом 25...48 с інфрачервоним

випромінюванням з довжиною хвилі 0,8...5,0 мкм і густиною потоку 22...24 кВт/м<sup>2</sup> з нагріванням до температури 110...145°C і збільшенням зернівки в об'ємі в 1,1...1,2 рази.

На наступному етапі термооброблену крупу темперують протягом 10...15 хв. в теплоізовьованому бункері, потім її зволожують на 2...4% зі зниженням температури до 70...90°C. Після цього здійснюють плющення крупи до товщини пластівців, що не перевищує 0,4 мм, і примусово охолоджують отримані пластівці до температури 18...25°C і вологості 12...14%.

Суть способу пояснюється рисунком (рис.1.1), де схематично показана лінія для виробництва пластівців зі злакових і бобових культур, що не потребують варіння.

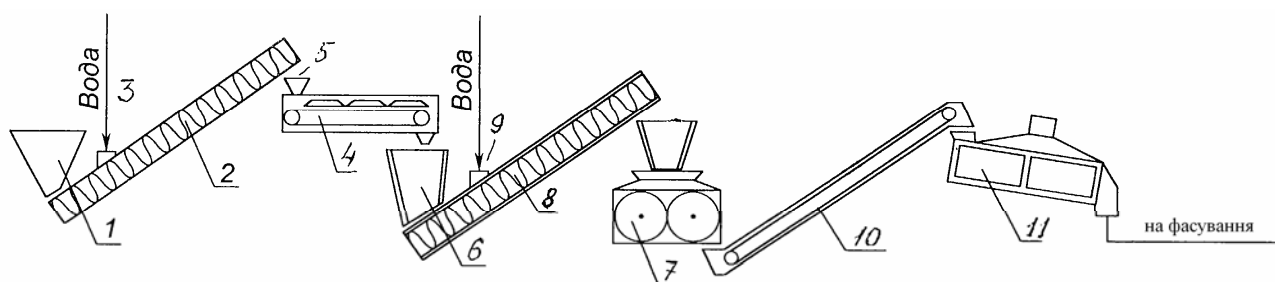


Рис.1.1 – Лінія для виробництва пластівців зі злакових і бобових культур

Лінія складається з бункера-дозатора 1, шнекового транспортера 2 з пристроєм 3 для подачі води, установки 4 для термообробки зерна інфрачервоними випромінювачами, забезпечену бункером-живильником 5, теплоізовьованого темперуючого бункера 6 і плющильного станку 7. У нижній частині темперуючого бункера 6 змонтована вхідна ділянка транспортуючого шнека 8, укладеного в теплоізовьований кожух та забезпеченого пристроєм 9 для подачі води. Вихідний кінець транспортуючого шнека 8 розміщений над плющильним станком 7, після якого встановлені транспортуючий 10 і охолоджувальний 11 пристрої.

Лінія працює наступним чином [68, 69]. Крупа надходить в бункер-дозатор 1 шнекового транспортера. Заслінка (шибер) бункера-дозатора дозволяє

регулювати подачу крупи в шнек. Крупа, що постійно надходить в шнековий транспортер 2 під дією обертового суцільного гвинта, транспортується по шнековому каналу. Пристрій 3, встановлений на вході, подає холодну воду в шнекову камеру. Кількість подаваної води регулюється дозатором води. Вода подається краплинно-струминно на поверхню крупи в необхідній кількості. При русі по шнеку крупа переміщується, відбувається тертя крупинок між собою, вода рівномірно розподіляється по всіх крупинках і за 3-5 хвилин знаходження в шнеку проникає в поверхневий шар крупи. За рахунок відсутності на поверхні вільної вологи крупа на виході з шнека відновлює свою сипучість та не грудкується. Зі шнека крупа надходить у бункер-живильник 5 установки для термообробки ГЧ-випромінювачами. Зволоження поверхні крупи становить 25...28%, у той час як загальна її вологість збільшується на 2...4%. Потім зволожена крупа подається на транспортерну стрічку установки для термообробки ГЧ-випромінювачами.

Під дією потужного теплового потоку волога з поверхні крупи надходить всередину, розподіляється в ній рівномірно і перетворюється на пару, при цьому крупинка збільшується в об'ємі в 1,1...1,3 рази. Нагріта крупа надходить у теплоізолюваний темперуючий бункер 6, який розташований над транспортуєчим шнеком 8, укладений в теплоізолюваний кожух.

Крупа термостатується в темперуючому бункері 6 час необхідний для проходження процесів набухання крохмалю до його декстринізації. В той же час йде часткова клейстеризація крохмалю. За час відлежки в темперуючому бункері в середовищі ненасиченої пари крупа втрачає сирий смак і за технологічними і біохімічними показниками відноситься до готового продукту, але сорбційні властивості крупи такі, що вона при повній тепловій готовності не може бути віднесена до круп, що не потребують варіння, оскільки при заливанні її киплячою водою без варіння вона не встигає набухати за 5...10 хв. в умовах, за яких температура постійно зменшується. Тільки при збільшенні її активної поверхні в 5...10 разів при площенні виходять пластівці, що не потребують варіння.



Для отримання високоякісних однорідних пластівців без великого вмісту в них мучки та кришива необхідно надати крупі пластичні властивості, оскільки крупа після темперування має крихкі та пружні властивості. Тому після процесу темперування під час зниження температури крупа надходить у теплоізолюваний шнек 8, де відбувається її зволоження і зниження температури до кінцевого значення. В умовах насиченої пари протягом 1-2 хвилин частина крохмалю клейстеризується і крупа набуває пластичні властивості, після чого її плющать на валках плющильного станку 7 до пластівців необхідної товщини і діаметру. Змінюючи режими обробки (час, гідромодуль, температуру крупи) і товщину плющення, можна отримати широкий асортимент круп'яних продуктів з різними споживчими і кулінарними перевагами. Отримані пластівці охолоджують до температури 18-25°C для закріплення сформованих властивостей і показників. Під час охолодження пластівці підсушуються до необхідної для безпечного зберігання вологості. Таким чином, лінія виробництва пластівців з вівсяної, гречаної, перлової, рисової крупи і колотого гороху дозволяє отримати продукти – пластівці, що не потребують варіння, з різними властивостями крохмалю в залежності від вимог споживача, тобто одержувати готові каші, супи і гарніри різної консистенції.

Іншим найбільш поширеним способом [70] для виробництва круп'яних продуктів, які не потребують варіння є наступний. В якості сировини для виробництва круп'яного продукту, що не потребує варіння, використовують відходи виробництва вівсяної крупи – колоте ядро вівса. Колоте ядро вівса очищають від домішок, зволожують до вологості 26...28% і відволожують протягом 30 хв. Потім проводять гідротермічну обробку в пропарнику періодичної дії при тиску пари 0,21...0,25 МПа протягом 3-4 хв. Після цього здійснюють сушіння на вальцьовій сушарці за температури 150°C до вологості, що не перевищує 7%, з одночасним плющенням і охолодженням отриманого круп'яного продукту. Цей продукт має приємний, злегка горіховий запах і смак, розсипчасту консистенцію, відновлюється протягом 5...10 хв. у гарячій воді або протягом 1 хв. в мікрохвильовій печі, вживається і в сухому в суміші з

фруктами та ягодами, і у відновленому вигляді. Однією з переваг даного способу є використання відходів вівсяної крупи із цільного ядра.

Середні енерговитрати на процес в даному способі – 11...14 МДж/кг сушеної продукції.

Відомий спосіб отримання пластівців безпосередньо з зерна [71-75].

Очищене від домішок зерно занурюють на 5...10 хв. у киплячу воду. Занурення очищеного від домішок зерна в киплячу воду протягом 5...10 хвилин необхідно для зволоження ядра і надання йому пластичності, зниження дробимості і розм'якшення оболонок. Кип'ятіння зерна менше 5 хвилин не дає достатньої технологічної ефективності, а під час кип'ятіння більше 10 хвилин відбувається перезволоження зерна, що призводить до зайвих витрат енергії.

Далі сировину відволожують протягом 30...60 хв. (зерно набуває вологості 32...34%) в бункерах. Здійснення відволоження протягом 30...60 хв. необхідне для більш рівномірного розподілу вологи всередині ендосперму. Тривалість відволоження менше 30 хв. не забезпечує рівномірного зволоження ядра, тому волога, яка знаходиться в оболонках, не встигає проникнути всередину ендосперму, а проведення темперування більше 60 хв. недоцільно, оскільки збільшується тривалість процесу, і потрібні великі ємності.

На наступному етапі крупу підсушують в "киплячому" шарі повітрям з температурою 100°C до вологості 23...25%. Підсушування за температури 100°C необхідне для зниження вологості оболонок при збереженні незмінної вологості ендосперму. Оболонки висихають значно швидше ядра, тому низька вологість оболонок при високій вологості ендосперму дозволяє швидко і якісно провести процес луцення. За низької вологості оболонки стають крихкими, легко відділяються від ядра. Проведення процесу сушіння за температури менше 100°C не дозволяє видалити вологу з оболонок в достатній кількості. Здійснення сушіння при температурі понад 100°C приводить до підсушування ядра, збільшення його крихкості і зниження виходу пластівців. Підсушування зерна саме до вологості 23...25% необхідне для запобігання перезволоження зерна в подальших операціях і для збереження пластичності ядра. Проведення

підсушування зерна до вологості менше 23% призводить до крихкості ядра, а до вологості більше 25% – недоцільно, оскільки ядро набуває підвищеної вологості, що ускладнює процес плющення.

Після цього зерно пропарюють при тиску пари 0,1...0,2 МПа протягом 3...5 хв. до вологості 25...27%. Повторно підсушують крупу в "киплячому" шарі повітрям з температурою 100°C до вологості 23...25%, охолоджують повітрям з температурою 15...20°C до температури 20...25°C. Далі лущать сировину до необхідного виходу крупи – 70...90%. Отриману крупу плющать на гладких вальцях в пластівці товщиною 0,45...0,55 мм. Проведення плющення безпосередньо після лущення обумовлено тим, що підготовлене ядро має достатню пластичність для проведення процесу плющення. Отримані пластівці висушують до вологості 13...14% і, таким чином, отримують пластівці, що не потребують варіння. Істотною перевагою даного способу є те, що вихідною сировиною для нього є зерно, а не крупа, для отримання якої, необхідно провести ще ряд технологічних операцій.

Середні енерговитрати на процес в даному способі – 14...16 МДж/кг сушеної продукції.

За останні декілька років достатньо широке розповсюдження на підприємствах з переробки сільськогосподарської сировини набув спосіб отримання напівфабрикатів високого ступеня готовності з круп методом екструдуювання вихідної сировини.

Відомий спосіб [76-82] виготовлення готового до вживання круп'яного продукту, що передбачає обробку вологої суміші зернової сировини, яка має вміст сухих речовин не менше 70% шляхом нагрівання і екструдуювання, що приводить до зниження густини продукту.

При виході з головки екструдера продукт розширюється приблизно в три рази і вміст води в ньому в цей момент становить від 12 до 20%. Екструдований продукт потім розрізають на шматки, частково висушують і подрібнюють на млині з решіткою, яка має круглі отвори діаметром 2...4 мм.

Подрібнений круп'яний продукт потім в сухому стані змішують з інгредієнтами, які мають високу чутливість до температури.

Після цього суху суміш гранулюють будь-яким підходящим способом агломерації, отримуючи вологі гранули, які остаточно висушують до вмісту в них вологи від 4 до 7%. Отриманий продукт готовий до вживання і добре диспергується в молоці.

Продукт, одержуваний вищеописаним способом, зазвичай призначений для використання в якості швидковідновлюваного аналога круп'яної каші для годування дітей. Тому важливо отримувати сухий продукт, який при змішуванні з певною кількістю води буде набувати необхідну в'язкість, аналогічну в'язкості природних круп'яних каш. Однак, при даному способі отримання круп'яного продукту, у нього є тенденція до зниження в'язкості, в результаті чого споживачі, які готують з нього кашу для дітей, прагнуть зменшити кількість молока, яке додається в кашу, що може призвести до дисбалансу поживних речовин в продукті.

Крім того, продукти, одержувані екструзійним способом, характеризуються так званим "екструзійним присмаком" – специфічним присмаком, що з'являється після додавання молока, який імовірно пов'язаний з наявністю в круп'яному продукті сірковмісних речовин та інших специфічних з'єднань, що з'являються в процесі екструзії внаслідок зсувної деформації білків і крохмалів. У роботі [82] в способі приготування готового до вживання круп'яного продукту, що передбачає обробку вологої суміші зернової сировини, яка має вміст сухих речовин не менше 70% шляхом нагрівання і екструдювання, що приводить до зниження густини продукту, додатково передбачена операція введення в суміш стисненого газу. Причому це введення здійснюють безпосередньо перед екструдюванням суміші, в кінцевій частині екструдера біля екструзійної головки.

На рисунку показаний схематичний вигляд пристрою для виробництва круп'яного продукту, який не потребує варіння, описаним способом (Рис.1.2).

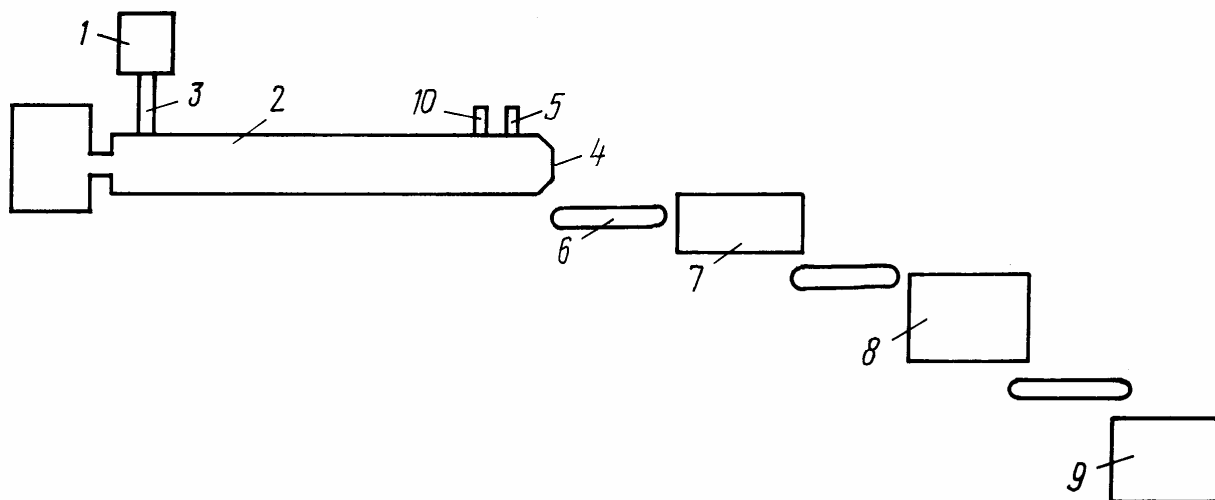


Рис.1.2 – Схематичний вигляд пристрою для виробництва круп'яного продукту

Показаний на рисунку пристрій містить змішувач 1 і екструзійний варильний апарат 2. Змішувач 1 може являти собою двовісний змішувач з лопатями, який зазвичай використовується для отримання однорідної суміші води і зернової сировини. Отриману у змішувачі 1 вологу суміш за допомогою подаючого пристрою 3 направляють у екструзійний варильний апарат 2.

Екструзійний варильний апарат 2 являє собою двошнековий екструдер з малим зусиллям зсуву, який складається з циліндричного корпусу, в якому розміщені два взаємозаходних безперервних шнека, що обертаються в одному напрямку або в протилежних напрямках, і закінчується решіткою 4 екструзійної головки.

Вологу суміш обробляють в екструзійному апараті за температури приблизно 100...180°C і тиску 70...130 бар. На кінці екструзійного варильного апарату 2, де розташована екструзійна головка, передбачено впускний отвір 5, через який в оброблювану суміш подають стиснений газ.

Стиснутим газом може бути повітря, азот, двоокис вуглецю або суміш цих газів. З точки зору вартості переважніше використовувати стиснене повітря, однак азот має ту перевагу, що він здатний створювати в екструзійному апараті більш дрібні бульбашки, завдяки чому він забезпечує краще регулювання густини продукту, який екструдується. Двоокис вуглецю

має перевагу в тому, що забезпечує найкраще видалення неприємного запаху, який викликає "екструзійний присмак". Таким чином, особливо переважним є використання суміші азоту з двоокисом вуглецю, пропорції якої обираються з урахуванням, з одного боку, бажаної густини одержуваного продукту, і, з іншого боку, кількості неприємних запахів, які потрібно витягнути з продукту.

У випадку, коли введення необхідної кількості газу для видалення неприємного запаху може призвести до отримання продукту із занадто низькою густиною, суміш піддають попередній дегазації. Це досягається за допомогою створення вакууму в кінці стадії температурної обробки (варіння) перед введенням в суміш стисненого газу.

В кінці робочої зони екструзійного апарату перед отвором 5 для впуску стисненого газу може бути виконаний випускний отвір 10 для дегазації суміші, з'єднаний з вакуумним насосом.

Нарізані шматки екструдованого і спученого продукту за допомогою конвеєра 6 направляють у тумблер 7, в якому на шматки продукту при необхідності розпилюють рідкий цукор, після чого продукт направляють в сушильну піч 8, за якою слідує подрібнювач 9. Далі подрібнений продукт можна упаковувати і відправляти на зберігання.

Середні енерговитрати на процес в даному способі – 11...12 МДж/кг сушеної продукції.

Наступний спосіб, як правило, відносять до екструзійних способів отримання круп'яного продукту, який не потребує варіння. В даному способі виробництва пластівців із крупи замість екструдера використовують пристрій описаний нижче [83-85].

Вихідною сировиною при даному способі є крупа. Перед спученням його на пристрої крупу миють і відволожують. Далі волога крупа надходить на спучування. Пристрій призначений для формування зерна під тиском і нагріванням, призначений для його спучування, містить дві нерухомі плити, пов'язані одна з одною направляючими, на яких встановлені рухливі плити (Рис.1.3). На верхній нерухомій плиті (1) встановлена верхня нагрівальна

головка (2), а на нижній рухомій плиті (4) – нижня (3). Кільце (5), яке визначає об'єм камери, що створюється між ним і нижньою нагрівальною головкою, встановлено на верхній рухомій плиті. В якості приводу нижньої нагрівальної головки використаний шарнірно-важільний механізм (6). Нижня плита встановлена з можливістю фіксації, а привід – з можливістю переміщення відносно нижньої плити. Волога крупа засипається в робочу камеру, де стискається між нагрітими поверхнями. При цьому відбувається випаровування води, яка міститься в крупі. При скиданні тиску, тобто при розведенні робочих поверхонь, відбувається спучування продукту. Далі спучені пластини подрібнюють і отриманий таким чином продукт змішують, за необхідності, з іншими інгредієнтами та фасують.

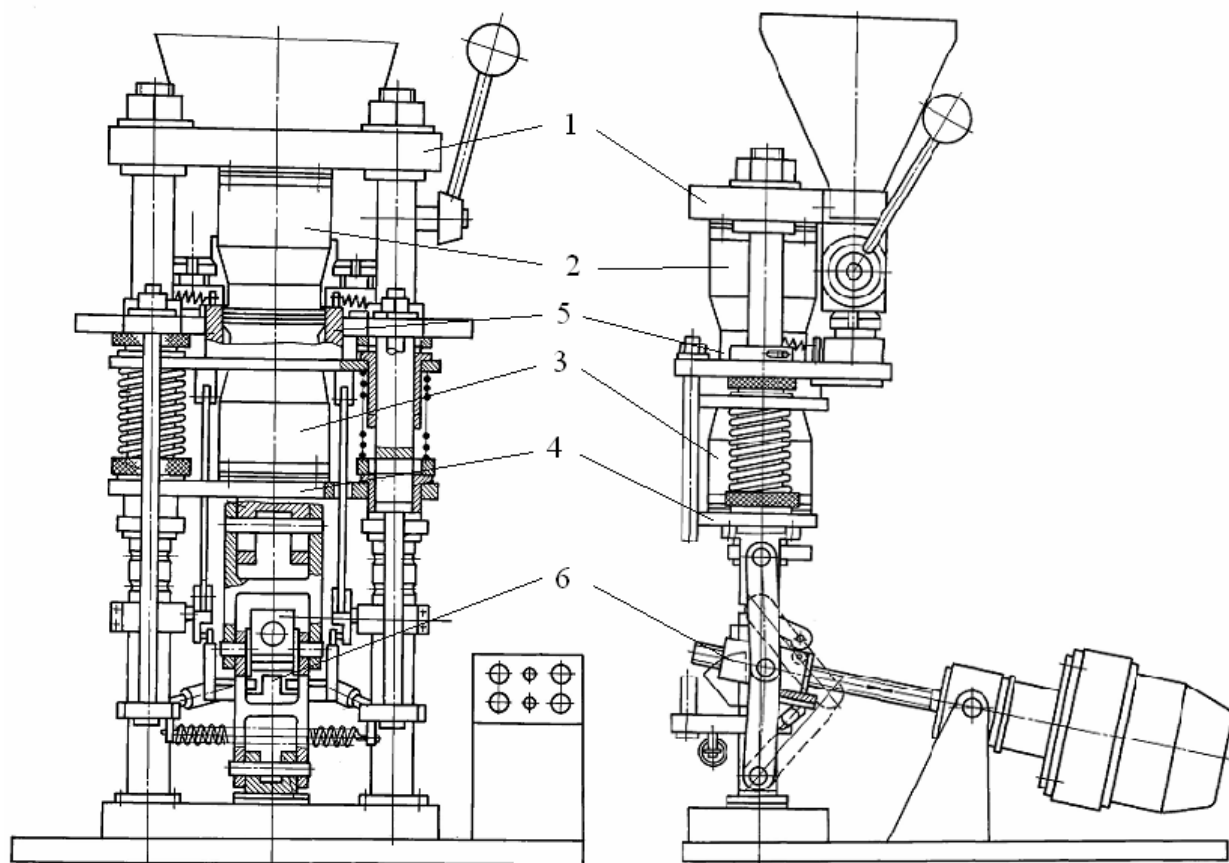


Рис.1.3 – Пристрій для переробки зерна

Кінцевим продуктом вищеописаних способів є пластівці, порошки або спучені зерна. Одним із недоліків такої продукції є те, що після відновлення

такі каші далекі за консистенцією від каш, приготованих традиційним способом, тобто зварених у воді.

Наступний спосіб [86], розроблений для рисової каші, необхідно виділити, оскільки кінцевий продукт після відновлення, на відміну від вищеописаних має вигляд і структуру, відповідні каші, звареній традиційним способом.

Спосіб отримання сушеного рису швидкого приготування за допомогою вакуумного сушіння, включає наступні операції.

По перше, відібраний рис-сирець промивають у мийній машині для повного видалення забруднень, що прилипли до оболонки рису-сирцю. Крім рису-сирцю можна використовувати всі види рису, включаючи рис без клейковини і рис з клейковиною.

Далі промитий рис замочують у воді протягом 3-120 хвилин для рівномірного усмоктування води з подальшим зневодненням на повітрі протягом 3-30 хв. Час замочування відповідним чином регулюють в залежності від різних факторів, таких як температура води і пори року. Якщо замочування не проводять зовсім або проводять протягом менше 3 хв., то під час обробки гарячою водою утворюються тріщини. Оскільки крохмаль і харчові інгредієнти рису просочуються через тріщини, зовнішній вигляд зерен вареного рису змінюється і варений рис стає занадто м'яким. У м'якому вареному рисі зерна погано відокремлюються одне від одного, а структура порушується. У зворотному випадку, якщо час замочування перевищує 120 хвилин, у вареному рисі з'являється запах рисових висівок, викликаючи неприємний запах вареного рису, крім того, зерна вареного рису ламаються, погіршуючи структуру і смак рису.

На наступному етапі проводиться закладка зневодненого рису в рисоварочну машину безперервної дії з витриманням температури води 80...98°C, з наступною обробкою гарячою водою протягом 8...20 хвилин для отримання вареного рису. Якщо температура води під час обробки гарячою водою підтримується в межах 80...98°C, зовнішній вигляд зерен вареного рису



залишається незмінним. Крім того, оскільки крохмаль повністю перетворюється в альфа-крохмаль, структура не погіршується і харчові втрати мінімізовані. Більш того, зерна готового альфа-рису, який можна приготувати після вакуумного сушіння, описаного нижче, легко відокремлюються одне від одного, і виходить гарна структура готового альфа-рису. З іншого боку, якщо температура води перевищує  $98^{\circ}\text{C}$ , крохмаль легко витягається, проте зовнішній вигляд зерен вареного рису легко змінюється через високу температуру гарячої води. Відповідно це небажано з точки зору структури та дієтології.

Далі проводиться швидке охолодження вареного рису шляхом зрошення його водою з наступним промиванням у охолоджувальному баку.

На наступному етапі промитий варений рис закладають у вакуумну сушильну камеру, що має внутрішню температуру  $60\text{...}98^{\circ}\text{C}$ .

Вакуумне сушіння проводиться при внутрішньому тиску не більше  $130\text{ Па}$  до досягнення сировиною кінцевого вологовмісту  $1\text{...}5\%$ . Внутрішня температура в камері вакуумного сушіння може підтримуватися в межах  $60\text{...}98^{\circ}\text{C}$  в залежності від того, які властивості сушеного альфа-рису потрібно отримати. При сушінні при порівняно низькій температурі  $60^{\circ}\text{C}$  пригнічуються термічна денатурація білків і окислення ліпідів, що містяться в сушеному альфа-рисі і таким чином можна отримати гарний колір, аромат і смак сушеного альфа-рису. На противагу цьому при сушінні при порівняно високій температурі  $98^{\circ}\text{C}$  можна отримати альфа-рис з тонким, вишуканим смаком завдяки ефекту обсмажування.

Приготований таким чином сушений альфа-рис має вміст альфа-крохмалю  $92\%$  або вище і зберігає первинний вигляд.

Середні енерговитрати на процес в даному способі –  $13\text{...}16\text{ МДж/кг}$  сушеної продукції.

#### 1.4. Сушіння як складова процесу гідротермічної обробки круп

Практично всі способи гідротермічної обробки круп, де кінцевим результатом є напівфабрикати високого ступеня готовності, що не потребують варіння, включають в себе процес сушіння [60-86].

Сушіння – один із найбільш енергоємних процесів [87-90], що входять до процесу гідротермічної обробки круп. Від раціональності параметрів процесу сушіння залежить енергоефективність всього процесу гідротермічної обробки. Також необхідно відмітити, що сушіння, як технологічна операція, суттєво впливає на якість швидковідновлюваних каш, отримуваних гідротермічною обробкою круп [91-94].

При сушінні варених круп вода, утримувана крохмалем, видаляється, що приводить до розпаду амілози й переходу в гель амілопектину [95-97]. Частки крохмалю зближаються й ущільнюються, структура висушеного крохмалю стає більш міцною, знижується розварюваність крохмалю. Крупинок деформуються, оскільки капіляри, що утворилися під час варіння, стискаються й зменшуються в об'ємі. На поверхні крупинок утворюється висохла скоринка крохмалю, тому відбувається зниження властивості крупинок набухати.

Крохмаль у готових стравах має підвищену доступність до ферментів травних соків, тому засвоюваність крохмалю готових страв (каш) досить висока. Під час сушіння, особливо в початковий період, відбувається подальший частковий гідроліз клітковини, геміцелюлози, протопектину.

Технологічний процес сушіння повинен забезпечувати здатність круп швидко набухати й добре розварюватися, тому необхідно дотримання встановлених режимів [98-100].

Під час сушіння традиційними способами [101] (конвективне, у киплячому шарі і т.п.) процес зневоднення включає два основних етапи:

I етап – постійна швидкість сушіння;

II етап – падаюча швидкість сушіння.

Період постійної швидкості сушіння характеризується тим, що температура крупи, що висушується, дорівнює температурі мокрого термометра, тобто випар вологи відбувається тільки з поверхні продукту, а волога із внутрішніх його шарів дифундує на поверхню крупинки в рідкому виді.

I етап сушіння триває доти, поки вологість поверхні крупи, що зневоднюється, не зрівняється з гігроскопічною вологістю. У цей період на поверхні крупинки може утворитися скоринка клейстеризованого висохлого крохмалю, яка потім, в II періоді сушіння, у зв'язку із втратою вологи сильно ущільнюється. Таке утворення скоринки ускладнює виділення пари, що утворюється в глибині продукту в II періоді сушіння, та приводить до збільшення тривалості сушіння. Це ускладнює отримання швидковідновлюваних каш.

Вважається, що для одержання швидковідновлюваних каш, які не вимагають варки, найбільш перспективними є два способи [91, 102]:

1) сушіння в замороженому стані в глибокому вакуумі – сублімаційне сушіння. Даний спосіб дозволяє максимально зберегти форму крупинок і органолептичні показники якості готового продукту [91, 102];

2) сушіння шляхом вибуху. При цьому способі, як було описано в попередньому підрозділі, в закритому циліндрі (екструдері) створюється високий тиск, що забезпечує умови для вибуху й випару вологи із крупинки. У результаті цього продукт здобуває пористу структуру [91-102].

Перший із способів не знаходить практичного застосування через дорожнечу технології, а другий достатньо енергоємний. Таким чином, пошук нових та модернізація існуючих способів сушіння та використання їх під час гідротермічної обробки круп'яних культур є достатньо актуальними.

Необхідно відмітити, як один з перспективних, спосіб сушіння розроблений групою науковців Харківського державного університету харчування та торгівлі. Даний спосіб дозволяє отримати швидковідновлювані сушені продукти із застосуванням апарату зі змішаним теплопідводом [103].

Продукція отримана сушінням змішаним теплопідводом (ЗТП-сушінням) характеризується високою якістю та низькими енерговитратами на її отримання. ЗТП-сушіння не використовувалось під час гідротермічної обробки круп через обмежену кількість експериментальних даних про використання даного способу для такої сировини.

ЗТП-сушіння, як спосіб зневоднення харчової сировини, було запатентовано в 1994 році. З того часу і дотепер в Харківському державному університеті харчування та торгівлі ведеться робота по розробці обладнання для використання даного способу під час переробки різних видів харчової сировини.

В результаті роботи групи науковців під керівництвом М.І. Погожих було виконано ряд робіт з дослідження процесів, що відбуваються під час ЗТП-сушіння харчової сировини [104-107]. Розроблена фізична модель [104] процесу сушіння в масообмінних модулях, яка формулює принципи його реалізації, деякі з них викладені нижче.

ЗТП-сушіння (як окремий випадок сушіння в масообмінних модулях) засноване на створенні умов для активної гідродинамічної [108-111] та теплової [112-118] взаємодії агента сушіння з об'єктом сушіння. При цьому на відміну від традиційного конвективного сушіння, теплоносій (джерело теплоти) не має безпосереднього контакту із поверхнею, що віддає вологу, і передає теплоту об'єкту через тверду газонепроникну стінку функціональної ємності (ФЄ), всередині якої знаходиться сировина, будь-яким способом (конвекційним, кондуктивним, радіаційним).

Роль масообмінної поверхні виконують наявні на поверхні ФЄ зазори (щілини), розміри й розташування яких на поверхні ФЄ визначаються режимами й видом матеріалу, що зневоднюється. Така організація процесу сушіння аналогічна процесам тепломасообміну з фазовим перетворенням, що спостерігаються у слабовідкритих системах: площа масообмінної поверхні під час сушіння у ФЄ принаймні, на порядок менша, ніж теплообмінної, що різко відрізняє даний спосіб від всіх інших відомих способів. При цьому слід

відзначити, що як теплообмінна так і масообмінна поверхні визначені формою та розмірами ФЄ і у процесі сушіння не змінюються (на відміну від конвективного сушіння, де через об'ємну усадку матеріалу, поверхня об'єкта сушіння є складною функцією вологовмісту). ФЄ виступає як об'єкт сушіння, а матеріал, що зневоднюється, визначає внутрішній тепловологоперенос цього об'єкту. Таким чином, об'єкт сушіння являє собою окрему квазіізолювану систему, на відміну від конвективного, де об'єкт сушіння не ізолюваний від агента сушіння [119-121].

З точки зору термодинаміки, сушіння, у загальному випадку, є нестационарним нерівноважним процесом у відкритій системі. Під час конвективного сушіння вологий матеріал, що перебуває в середовищі сушильного агента, має один рівноважний стан, що характеризується рівністю парціальних тисків пари води в поверхні матеріалу і у сушильному агенті.

Як показали дослідження, у випадку сушіння у ФЄ таких станів не менше двох:

1. вологий матеріал, що перебуває у ФЄ, нагрівається до температури сушильного агента, практично не втрачаючи маси;
2. матеріал нагрівається до температури сушильного агента та має рівноважний вологовміст значно менше початкового.

При цьому під рівновагою розуміють такий стан матеріалу, що зневоднюється, за якого фізичні характеристики (у першу чергу, вологовміст) практично не змінюються за проміжок "технічного" часу в будь-якому місці об'єкта сушіння. "Технічний" проміжок часу – величина, порівнянна із загальною тривалістю сушіння при помірних режимах, порядку  $10^2$  хв.

Перший стан – майже рівноважний (за вологовмістом) і відповідає звичайному нагріванню закритої системи без обміну речовиною; другий – нагріванню відкритої системи з обміном речовиною шляхом фазових перетворень. Як відомо, рівновага в системі може мати два крайніх випадки: коли вільна енергія системи має максимальне або мінімальне значення. У першому випадку рівновага нестійка, у другому – стійка. Слід зазначити, що

обидва стани рівноваги, спостережувані під час ЗТП-сушіння, не є критичними стосовно температури сушильного агента (за температури  $0^{\circ}\text{C} < t_{c.a.} < 100^{\circ}\text{C}$ ) і вологості сушильного агента  $\varphi$  (за вологості  $\varphi < 100\%$ ), що суперечить уявленням про конвективне теплове сушіння, для якого умова  $\varphi < 100\%$  є необхідною і достатньою для протікання масообміну за межами гігроскопічного вологовмісту матеріалу із середовищем з нескінченною теплоємністю.

Дослідженнями встановлено, що для сушіння в масообмінних модулях перехід системи від нестійкого до стійкого стану рівноваги відбувається у випадку, якщо швидкість сушильного агента вище деякої критичної, а матеріал, що зневоднюється, є колоїдним капілярно-пористим або капілярно-пористим тілом [122-124].

Відповідно до термодинаміки необоротних процесів, збільшення ентропії  $\beta = dS/d\tau$  в закритій системі в одиницю часу може згодом тільки зменшуватись, тобто  $d\beta/d\tau < 0$ . Для відкритих систем, зміна ентропії з часом може бути розділена на дві частини – внутрішню, котра завжди підкоряється нерівності  $d\beta_i/d\tau < 0$  та зовнішню,  $d\beta_e/d\tau$ , знак якої залежить від інтенсивності зовнішніх тепло-масообмінних потоків [125-127]. Таким чином, якщо система замкнута, то  $d\beta_i/d\tau < 0$ , і мимовільно вийти із цього стану шляхом необоротних змін вона не може. Якщо ж у результаті яких-небудь флуктуацій система хоча б незначно вийде зі стану з мінімумом виробництва  $d\beta_i/d\tau$ , то відбудуться внутрішні необоротні зміни, які будуть генерувати процеси руху системи до нового стійкого стану. Положення цього нового стійкого стану визначається видом флуктуацій: якщо ці флуктуації мають винятково внутрішні причини, то система просто повернеться в початковий стан (принцип Ле-Шательє); якщо до цього додадуться зовнішні фактори, то прагнення системи до стійкого стану буде визначатися амплітудами зовнішніх і внутрішніх флуктуацій. Такий

процес приведе до еволюції системи, що буде супроводжуватися обмінами енергією й масою системи з навколишнім середовищем.

Тривалість еволюції системи буде визначатися інтенсивністю процесів обміну з навколишнім середовищем і внутрішніми процесами, спрямованість яких визначена завжди однозначно –  $d\beta_i/d\tau < 0$ . Наприклад, якщо в нестационарних умовах інтенсивність зовнішнього обміну субстанцією (на межі розділу) менше, ніж інтенсивність внутрішнього виробництва цієї субстанції, то через нерівність  $d\beta_i/d\tau < 0$ , усередині системи будуть "встигати" протікати процеси, які приведуть до зменшення внутрішнього виробництва субстанції. Внаслідок чого, встановиться квазірівновага з параметрами системи, відмінними від тих, які б характеризували повну рівновагу у випадку відкритої системи. Такий стан, звичайно нестійкий і може бути порушений як зовнішніми, так і внутрішніми флуктуаціями.

Під час сушіння в масообмінних модулях ФЄ з матеріалом, що зневоднюється, розміщена в зовнішньому середовищі (повітрі). При цьому температура середовища  $t_e$  більше температури матеріалу  $t_m$ , а його теплоємність досить велика, щоб  $t_e$  практично не змінювалася за будь-яких взаємодій з ФЄ. Площа теплообміну не менш, ніж на порядок більше площі масообмінного зазору ФЄ. На етапі нагрівання матеріалу (нестационарне поле температур) виникає потік пароповітряної суміші  $J_{mi}$  який з інтенсивністю  $J_{me}$  видаляється в зовнішнє середовище. Оскільки теплообмінна поверхня більша, цей потік (теплота, що виноситься ним  $j_{me} \cdot r$ ) досить швидко компенсується тепловим потоком від зовнішнього середовища й матеріал у ФЄ нагрівається. Однак якщо вважати, що обмін масою на зазорі ФЄ відбувається тільки шляхом дифузії, тобто  $J_{me} = J_{dif}$ , то через швидкий ріст температури (низька концентрація дисипативних структур) і підвищення парціального тиску парів усередині ФЄ наступить стаціонарний квазірівноважний нестійкий стан з мінімумом виробництва ентропії та максимумом вільної енергії. Тривалість

такого процесу набагато перевершує "технічний" проміжок часу. В результаті ЗТП-процес блокується.

Вивести систему із цього стану можна тільки флуктуаціями: зовнішніми – температурою, рухом сушильного агента; внутрішніми – перемішуванням матеріалу, утворенням штучної пористості.

Таким чином, ЗТП-сушіння має принципові відмінності, як у зовнішніх умовах протікання процесу, так і поведженням матеріалу, що зневоднюється, усередині спеціального тепло-масообмінного модуля – ФЄ.

З наведених принципів реалізації ЗТП-процесу видно, що за виконання відповідних умов волога сировина зневоднюється з достатньо високою інтенсивністю, а за невиконання – або вариться, або сохне як під час конвективного сушіння. Як відмічено вище, зупинити ЗТП-процес можливо декількома способами: зменшити швидкість відносно відповідного значення; завантажити ФЄ таким чином, щоб об'єм сировини був більше ніж на 10% менший за об'єм ФЄ; закрити масообмінні зазори.

В роботі пропонується використовувати особливості ЗТП-сушіння для гідротермічної обробки круп, результатом якої є швидковідновлювані каші, що не потребують подальшого варіння.

Схема гідротермічної обробки наступна. Спочатку «зупиняють» ЗТП-процес шляхом перекивання масообмінних зазорів: «зупинка» процесу зневоднення потрібна для того, щоб проварити сировину до готовності. Після цього ЗТП-процес «запускають», відкриваючи масообмінні зазори, та висушують проварену крупу.

Для того, щоб зробити процес гідротермічної обробки безперервним, тобто уникнути операції з закриття та відкриття масообмінних зазорів, пропонується ФЄ виконати у вигляді труби, одна частина якої має на поверхні масообмінні зазори, а інша – без масообмінних зазорів.

В основу практичних досліджень покладено ідею розвитку універсальності обладнання для ЗТП-сушіння, шляхом розробки



конструкційних особливостей ФЄ для гідротермічної обробки круп та сушильної камери існуючих ЗТП-сушарок.

В основу наукових досліджень – розвиток існуючої теорії тепло та масообміну під час ЗТП-сушіння для пояснення особливостей даного процесу та виявлення чинників, за допомогою яких можна ним керувати.

## **2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВНУТРІШНІХ ЧИННИКІВ ПРОЦЕСУ ГІДРОТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ КРУПІ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИНЦИПІВ ЗТП-СУШІННЯ**

Як показали дослідження, виконані авторами [104-107], ЗТП-сушіння є складним технологічним і фізичним процесом. «Запуск» ЗТП-сушіння можливий за виконання визначених необхідних умов, а керувати характером процесу зневоднення можливо умовно виділеними зовнішніми та внутрішніми чинниками ЗТП-сушіння. Причому варіюванням зовнішніми та внутрішніми чинниками можна або трансформувати ЗТП-сушіння в конвективне, або зупинити процес сушіння та проварити сировину [128-132].

В даному розділі розглянуті внутрішні чинники ЗТП-процесу. До внутрішніх чинників віднесено вид сировини, тривалість замочування та проварювання сировини, температура проварювання.

### **2.1. Дослідження впливу виду сировини на характеристики процесу гідротермічної обробки з використанням принципів ЗТП-сушіння**

Сировина під час гідротермічної обробки з використанням принципів ЗТП-сушіння знаходиться всередині ФЄ, виконаної із паронепроникного матеріалу з високою теплопровідністю. Основними вимогами до сировини під час її обробки є те, що вона не повинна змінювати свій об'єм більше ніж на 5...10 % та величина частинок сировини не повинна бути менша за ширину масообмінного зазору (1 мм).

Вихідною сировиною, яку використовували в роботі для виробництва швидковідновлюваних каш, були крупи: гречана, пшоняна, ячмінна та пшенична. Оскільки обрана сировина має велику кількість сухих речовин (понад 90%), то зміни об'єму під час гідротермічної обробки з використанням принципів ЗТП-сушіння не спостерігалось. Величина частинок сировини була більша за 1 мм.

Таким чином, обрана сировина відповідає всім вимогам, що висувуються до сировини для реалізації ЗТП-процесу.

Для дослідження процесу ЗТП-сушіння використовувались сушильні установки, конструкція яких розроблена на кафедрі енергетики та фізики Харківського державного університету харчування та торгівлі.

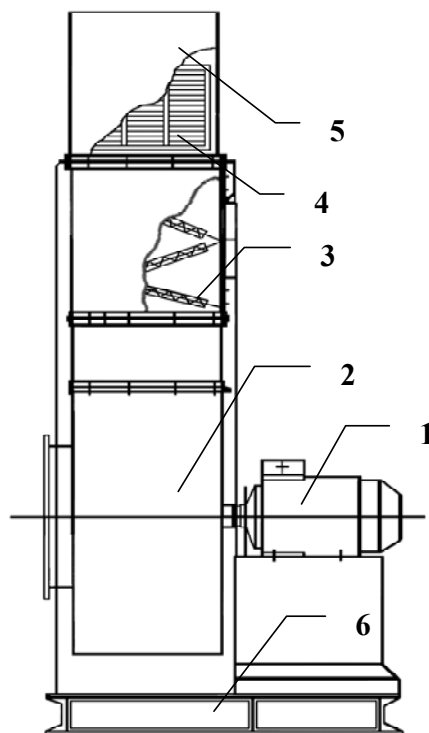


Рис. 2.1. Експериментальна сушильна установка ХДУХТ: 1 – електродвигун; 2 – вентилятор; 3 – електрокалорифер; 4 – ФЄ; 5 – сушильна камера; 6 – основа

Принцип роботи установки (рис. 2.1) полягає в наступному. Сушильний агент (повітря) подається відцентровим вентилятором 2 у блок калориферів 3, де нагрівається до заданої температури. Після чого сушильний агент надходить у сушильну камеру 5. Усередині камери встановлюється ФЄ 4 з матеріалом, що зневоднюється. Тривалість сушіння визначається за допомогою електронного секундоміра.

Вентилятор забезпечує швидкість сушильного агента в робочому об'ємі сушильної камери до 15 м/с, а блок калориферів – температуру сушильного агента від кімнатної до 150°C.

Дослідження сушіння та проварювання сировини та вибір раціональних параметрів даних процесів проводили на ФЄ, виготовлених із паронепроникного матеріалу. Схеми досліджуваних ФЄ наведено під час вибору раціональної форми ФЄ. Всі ФЄ складаються з теплообмінної поверхні з масообмінними зазорами. Необхідно відзначити, що теплообмінна поверхня ФЄ не менш, ніж на порядок більше масообмінної, що є необхідною умовою ЗТП-процесу.

Під час визначення раціональної товщини частини ФЄ з масообмінними зазорами використовувалась ФЄ з плаваючою кришкою, представлена на рис.2.2. Дана ФЄ виконана таким чином, що верхня кришка не закріплюється на основній частині ФЄ, а розміщується і утримується на поверхні сировини. Орієнтація ФЄ з плаваючою кришкою в сушильній камері горизонтальна.

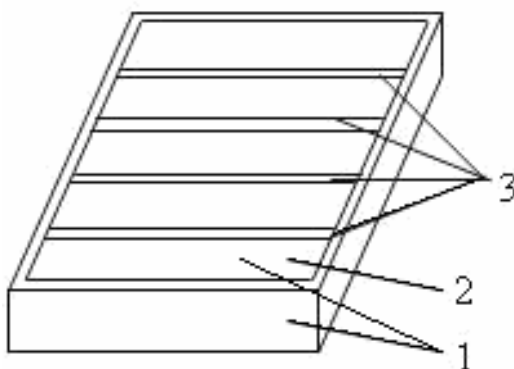


Рис.2.2 – ФЄ з плаваючою кришкою: 1 – теплообмінні поверхні; 2 – плаваюча кришка; 3 – масообмінні зазори

Кінетику сушіння, тобто залежність вологовмісту зразка від тривалості зневоднювання, вивчали наступним чином. Періодично зважуючи зразок в процесі сушіння, визначали кінцевий вологовміст зразків і розраховували (за масою сухих речовин) поточний вологовміст за формулою:

$$w = \frac{m_e}{m_c} \cdot 100\% = \left( \frac{m_0}{m_c} - 1 \right) \cdot 100\%, \quad (2.1)$$

де  $m_0, m_c, m_g$  – поточне значення маси зразка, маси сухих речовин, маси води в зразку відповідно, кг.

На рис.2.3 наведено кінетику сушіння обраної сировини в універсальній ФЄ за температури сушильного агента  $100^{\circ}\text{C}$ . Сировина перед сушінням витримувалась у воді протягом трьох годин та проварювалась до готовності. Кінетика сушіння визначалась шляхом періодичного зважування ФЄ з сировиною під час зневоднення. Особливість даного результату – кінетики мають практично однакову тривалість (відрізняються не більше ніж на 10%), але різний початковий вологовміст.

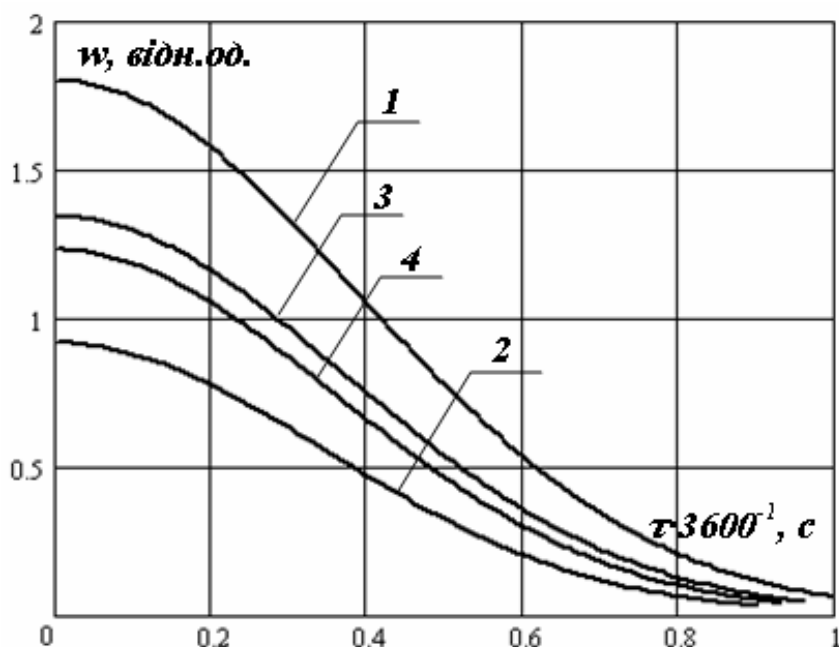


Рис.2.3 – Кінетика сушіння круп: 1 – гречана; 2 – пшоняна; 3 – ячмінна; 4 – пшенична

Попередніми дослідженнями ЗТП-сушіння [104-107] встановлено, що в якості об'єкту сушіння під час ЗТП-процесу виступає ФЄ, а сировина, яка знаходиться всередині ФЄ, визначає внутрішній тепловологоперенос цього об'єкту. Таким чином, об'єкт сушіння представляє собою окрему квазіізовольовану систему, на відміну від конвективного сушіння, де об'єкт сушіння не ізовольований від агента сушіння. Виходячи з цього характер процесу

зневоднення такої сировини визначається у більшому ступені не видом крупи, а тим наскільки повно реалізуються умови для протікання ЗТП-процесу.

Для з'ясування причин того, чому сировина має різну здатність поглинати або віддавати вологу були проведені дослідження розподілу пор сировини за радіусами [133, 134].

Визначення диференціальної функції розподілу пор за радіусами проводилось за допомогою ізотерм сорбції досліджуваної сировини наступним чином [135, 136]. Тензометричним методом отримувались ізотерми сорбції для круп: гречаної, пшоняної, ячмінної та пшеничної. Зразки поміщались в ексікатори з визначеною відносною вологістю повітря та витримувались в них до досягнення постійної маси за постійної температури (20...23°C). Ізотерми сорбції досліджуваних зразків наведено на рис.2.4.

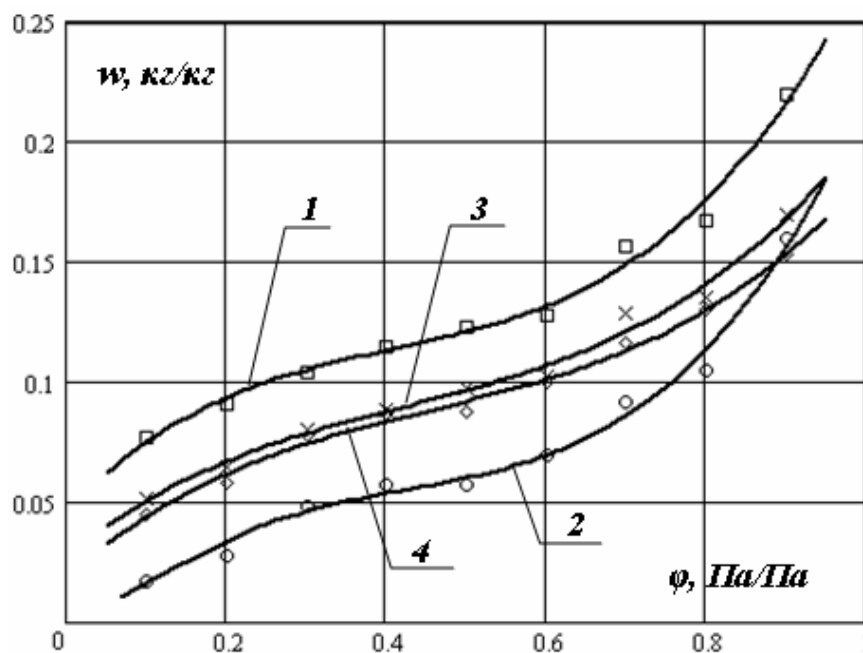


Рис.2.4 – Ізотерми сорбції круп: 1 – гречана; 2 – пшоняна; 3 – ячмінна; 4 – пшенична

Апроксимація експериментальних даних проводилась функцією виду [133]:

$$\varphi = \frac{w^{A_3}}{A_1 + A_2 w^{A_3}}, \quad (2.2)$$

де  $A_1, A_2, A_3$  – апроксимаційні коефіцієнти;

$w$  – вологовміст.

Використання даної апроксимаційної функції дає можливість отримувати таку важливу структурно-фізичну характеристику як диференціальна функція розподілу пор за радіусами  $f_n(R^*)$ .

Диференціальна функція розподілу пор за радіусами визначається наступним чином:

$$f_n(R^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_R R^*} \exp\left(-\frac{(\ln(R^*) - m_R)^2}{2\sigma_R^2}\right), \quad (2.3)$$

де  $m_R$  та  $\sigma_R$  – параметри логарифмічно нормального розподілу;

$R^*$  – безрозмірний радіус пори  $R^* = (R - d_0) / d_0$ ;

$R$  – радіус пори, м;

$d_0 = 0,3 \cdot 10^{-9}$  м – радіус молекули води.

Параметри логарифмічно нормального розподілу розраховуються [133] за формулами:

$$m_R = \left(\frac{A_2}{0,433}\right)^{1,247}, \quad (2.4)$$

$$\sigma_R = -\frac{\ln(6,12A_1)}{0,625} \left(\frac{A_3 - 0,957}{0,223}\right)^{-0,6}. \quad (2.5)$$

Функції розподілу пор за радіусами для гречаної, пшоняної, ячмінної та пшеничної круп, розраховані за ізотермами сорбції даної сировини з використанням формул (2.2)-(2.5), представлені на рис.2.5.

За визначеним аналітичним видом функцій розподілу пор за радіусами були визначені середній:

$$\bar{R} = d_0 \left[ 1 + \exp\left(m_R + \sigma_R^2 / 2\right) \right] \quad (2.6)$$

та найбільш ймовірний радіус пор (центр розподілу)

$$R_m = d_0 \left[ 1 + \exp\left(m_R - \sigma_R^2\right) \right]. \quad (2.7)$$

Середній та найбільш ймовірний радіус пор розраховані за формулами (2.6) та (2.7) наведені в табл.2.1.

Таблиця 2.1

Середній та найбільш ймовірний радіус пор

Зразок крупи:	$\bar{R} \cdot 10^7$ , м ( $\delta = 10\%$ )	$R_m \cdot 10^7$ , м ( $\delta = 10\%$ )
гречана	12,0	3,08
пшоняна	3,1	3,01
ячмінна	8,4	3,04
пшенична	7,7	3,06

Отримані функції розподілу мають схожий характер та близькі положення максимумів відносно осі, на якій відкладено безрозмірний радіус пор, що підтверджують і найбільш ймовірні радіуси наведені в таблиці: розкид їх значень знаходиться в межах похибки. Щодо ширини лінії, то найбільша ширина у функції розподілу пор за радіусами для гречаної крупи, а найменша – для пшоняної. Внаслідок цього найбільший середній радіус у гречаної крупи, а найменший – у пшоняної.



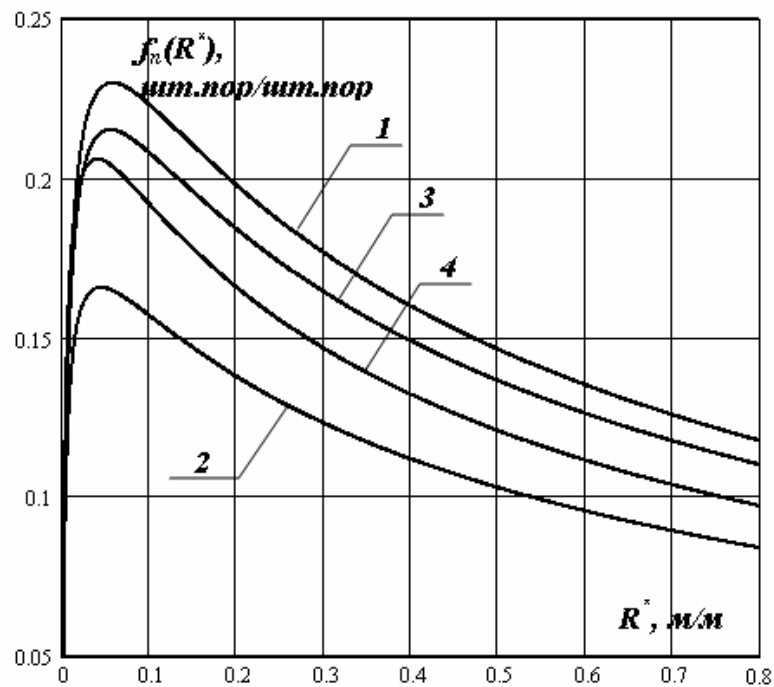


Рис.2.5 – Функції розподілу пор за радіусами для круп: 1 – гречана; 2 – пшоняна; 3 – ячмінна; 4 – пшенична

Чим більше відношення середнього радіусу пор до найбільш імовірного має матеріал, тим більше вологи він може поглинути. Значення даних відношень для досліджуваної сировини (гречана – 3,89; пшоняна – 1,03; ячмінна – 2,76; пшенична – 2,52) пояснюють характер поведінки ізотерм сорбції, представлених на рис.2.4, – ізотерма сорбції для гречаної крупи, яка має найбільше значення відношення середнього радіусу пор до найбільш імовірного, знаходиться вище за інші зразки, а ізотерма для пшоняної – найнижча, оскільки для даного зразка дане відношення найменше. Наслідком такого перерозподілу є різний початковий вологовміст на графіку вологовмісту з часом в процесі сушіння (Рис.2.3). Отримане також підтверджується дослідженнями кінетики набухання досліджуваних круп.

Таким чином, досліджувані види сировини мають різні функції розподілу пор за радіусами і, як наслідок, по різному та в різній кількості поглинають вологу, але завдяки особливостям реалізації та протікання ЗТП-процесу

тривалість зневоднення сировини, такої як крупи, відрізняється не більше ніж на 10%.

## **2.2. Дослідження впливу попередньої підготовки сировини на характеристики процесу її гідротермічної обробки**

Гідротермічну обробку сировини за розробленим способом можна розділити на два етапи [130-132]: проварювання всередині ФЄ за відсутності масообмінних зазорів на її поверхні та зневоднення всередині ФЄ з масообмінними зазорами за принципами ЗТП-сушіння.

Під попередньою підготовкою сировини до проварювання мається на увазі замочування. Замочування сировини проводили у воді з температурою 20...23°C до досягнення нею постійної маси [137].

З метою визначення раціональної тривалості замочування [131] була отримана кінетика набухання об'ємним методом на пристрої Догадкіна.

Схема приладу показана на рис.2.6. На штативі (1) закріплені скляні посудини (4, 5), які з'єднані гумовою трубкою (3). Сполучення між посудинами перекривається затискачем (2). У верхній частині посудини (4) розташована вимірювальна трубка (7). Досліджуваний зразок розміщується в ємності (6), виконаній з металевої сітки. Широка частина посудини (4) служить як розширювач, звідки змочуюча досліджуваний продукт рідина перетікає під дією надлишкового тиску до зразка. Вимірювальна трубка (7) попередньо тарується й поруч із нею на штативі закріплюється вимірювальна шкала приладу. Для відліку тривалості змочування досліджуваного продукту використовувався електронний секундомір.

Кінетика набухання або відновлюваності досліджуваних зразків полягає в наступному. Зразок визначеної маси (10г) розміщують у вимірювальну ємність 6. Обводнюють ємність з матеріалом у посудині 5 приладу за рахунок подачі повітря під надлишковим тиском крізь вимірювальну трубку 7. Коли рівень

води в посудині 5 буде вище висоти ємності перекривають з'єднувальну трубку 3 затискачем 2.

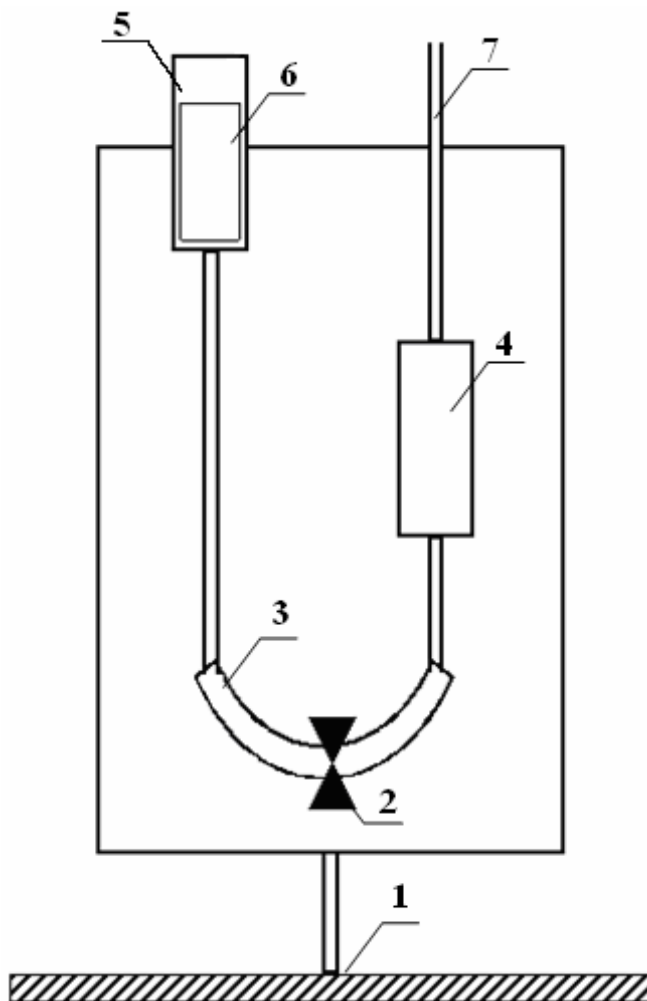


Рис.2.6 – Прилад Догадкіна: 1 – штатив; 2 – затискач; 3 – гумова трубка; 4, 5 – скляні посудини; 6 – вимірювальна ємність; 7 – вимірювальна трубка

Через визначений інтервал часу (1...5 хв.) знімають затискач і, після того як рівень водяного стовпчика у вимірювальній трубці установиться, записують значення його висоти. Повторюють дані операції доки висота водяного стовпчика у вимірювальній трубці не стане постійною. Далі розраховують відношення маси поглинутої води до маси сухих речовин зразка для кожної точки виміру і будують зміну розрахованого вологовмісту з часом, тобто кінетику набухання для сировини перед проварюванням або кінетику відновлюваності для сушеної продукції.

На рис.2.7 наведено кінетику набухання круп: гречаної, пшоняної, ячмінної, пшеничної. Кінетика набухання представляє собою зміну вологовмісту сировини ( $w$ ), яка замочується у воді, від тривалості замочування ( $\tau$ ).

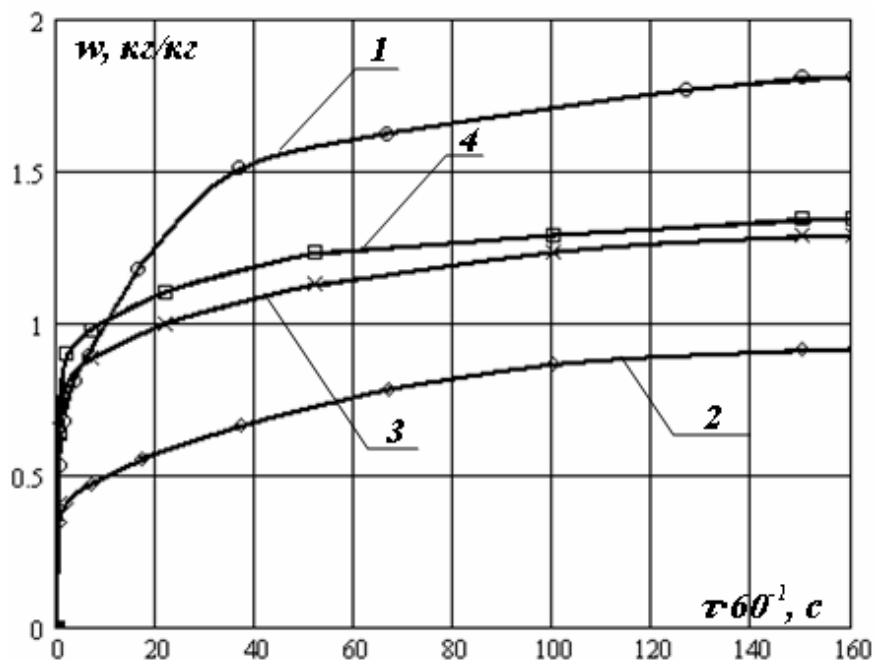


Рис.2.7 – Кінетика набухання круп: 1 – гречана; 2 – пшоняна; 3 – ячмінна; 4 – пшенична

Із наведених залежностей видно, що основна частина процесу набухання всіх досліджуваних зразків проходить у перші 40 хв. Досягнення кінцевого вологовмісту також для всіх зразків практично одночасне, при цьому криві виходять на горизонтальну ділянку паралельну осі, на якій відкладено тривалість замочування. При подальшому замочуванні сировини збільшення вологовмісту не відбувається. Тривалість процесу замочування, за якої досягається зразками кінцевий вологовміст, вважається раціональною тривалістю замочування. Вона дорівнює для всіх зразків 120 хв.

Необхідно відмітити, що кінцевий вологовміст для досліджуваних зразків різний: для гречаної крупы він дорівнює 1,81 відн.од.; для пшоняної – 0,92 відн.од.; для ячмінної – 1,29 відн.од.; для пшеничної – 1,34 відн.од. Різний кінцевий вологовміст, як було відмічено в попередньому пункті, є наслідком різної пористості досліджуваних зразків.

Під попередньою підготовкою сировини до сушіння розуміється тривалість проварювання.

Сировина для проварювання завантажується у ФЄ без масообмінних зазорів, виконану із паронепроникного матеріалу. Середовищем, яке оточує частинки сировини у ФЄ під час проварювання є повітря. Ззовні ФЄ омивається повітрям, яке є джерелом теплоти для сировини під час проварювання. Температура сировини, менше якої проварювання не можливе, –  $80^{\circ}\text{C}$ , оскільки температура клейстеризації крохмалю  $60\dots 80$ , а коагуляції білків  $70\dots 75^{\circ}\text{C}$  [52, 53, 58].

Оскільки середовищем, яке оточує сировину, є повітря, то вологою для її проварювання є лише та, яку сировина поглинула під час замочування. Ця кількість є достатньою для проварювання, але важливо, щоб дана кількість не зменшувалась. Одним із чинників, через який кількість вологи може зменшуватись, є температура. За збільшення температури сировини відносно певного значення відбувається інтенсивне пароутворення і, як наслідок, викид вологи у виді пари крізь завантажувальний бункер. В результаті цього, кількості вологи, що залишилась у сировині, буде не достатньо для її проварювання. Очевидно, що такою температурою є температура  $100^{\circ}\text{C}$ .

Таким чином, для того, щоб сировина проварилась, її температура повинна не меншою  $80$  та не більшою  $100^{\circ}\text{C}$ .

Регулювати температуру сировини в запропонованій схемі гідротермічної обробки круп можна лише температурою повітря, яке омиває ФЄ. Оскільки температура сировини через випаровування вологи з її поверхні та хімічні процеси, які протікають під дією температури в сировині, може відрізнятись від температури повітря, то існувала необхідність дослідити її в процесі проварювання.

З метою дослідження температури сировини в частині ФЄ без масообмінних зазорів під час проварювання, у відповідну частину ФЄ розміщали термопари та фіксували значення температури. Отримані експериментальні дані наведені на рис.2.8.

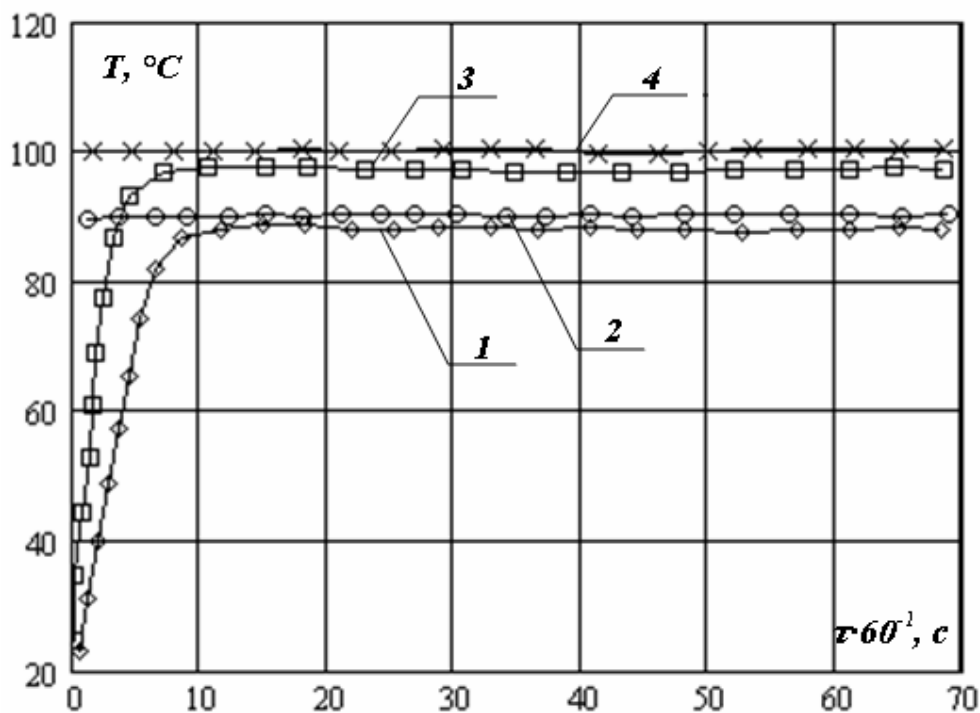


Рис.2.8 – Термограми сировини (1, 3) та повітря (2, 4), що омиває ФЄ без масообмінних зазорів, під час проварювання за різної температури повітря: 1, 2 – 90°C; 3, 4 – 100°C

З наведених термограм видно, що температура сировини під час проварювання відрізняється від температури повітря, яке омиває ФЄ з сировиною, в перші 5...10 хв., коли відбувається прогрів сировини. Далі ця різниця складає не більше ніж 2...3°C, тобто – 3...4%.

Пояснюється така поведінка температури сировини тим, що сировина знаходиться всередині ФЄ, стінки якої виконані із паронепроникного матеріалу з високою теплопровідністю. Стінки перешкоджають випаровуванню вологи, оскільки дана частина ФЄ не має масообмінних зазорів.

Таким чином, під час проварювання різницю температур між сировиною та повітрям, що омиває частину ФЄ без масообмінних зазорів, можна вважати нехтовно малою та не враховувати.

Виходячи з вищевикладеного, для того щоб сировина проварилась, при цьому вологи, поглинутої під час замочування, було достатньо, а крохмаль, який утримується в сировині, клейстеризувався, температура повітря, яке

омиває частину ФЄ без масообмінних зазорів та передає крупі теплоту для проварювання, повинна бути обрана із діапазону від 90 до 100°C.

Раціональна тривалість проварювання визначалась шляхом періодичної органолептичної та мікроскопічної оцінки досліджуваної сировини під час даного процесу у ФЄ без масообмінних зазорів за температури 90 та 100°C [131] протягом 70 хв.

Мікроскопічна оцінка ступеня готовності сировини проводилась з періодичністю 5 хвилин. Вибірку із 10...20 ядер кожні 5 хв. витягали із ФЄ без масообмінних зазорів під час проварювання. Далі ядра вибірки розрізали та досліджували під мікроскопом. Сировина вважалась провареною, якщо зріз мав склоподібний вид.

В табл. 2.2. наведено тривалості проварювання за температури 90 та 100°C круп: гречаної, пшоняної, ячмінної, пшеничної.

Таблиця 2.2

## Тривалість проварювання круп

Зразок крупы:	Тривалість проварювання, хв. ( $\delta = 10\%$ )	
	90°C	100°C
гречана	50	45
пшоняна	45	40
ячмінна	60	55
пшенична	65	60

З отриманих результатів витікає, що тривалість проварювання досліджуваних круп не перевищує 65 хв. за температури 90°C та 60 хв. за температури 100°C. Необхідно відмітити, що в сировині, яка знаходилась у частині ФЄ без масообмінних зазорів, впродовж всього дослідження, тобто 70 хв., переварених ядер знайдено не було.

Таким чином, оскільки метою є розробка універсальної установки для гідротермічної обробки круп різних видів, то раціональною тривалістю проварювання слід вважати 65 хв. за температури обробки 90°C та 60 хв. за температури 100°C.

### 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗОВНІШНІХ ЧИННИКІВ ПРОЦЕСУ ГІДРОТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ КРУП З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИНЦИПІВ ЗТП-СУШІННЯ

Для гідротермічної обробки круп та отримання із них швидковідновлюваних каш організовано рух сировини крізь ФЄ, виконану із паронепроникного матеріалу, з визначеною швидкістю. У першій частині ФЄ, в якій відсутні масообмінні зазори, проводиться гідротермічна обробка крупи до готовності, в другій – сушіння.

На рис.3.1 представлена принципова схема установки для гідротермічної обробки крупи [130, 132] з використанням принципів ЗТП-сушіння, яка складається з вентилятора 1, нагрівачів 2, сушильної камери 3, в якій міститься ФЄ з двох частин 4 та 5, завантажувального бункера 6 та дозуючих шнеків 7, 8.

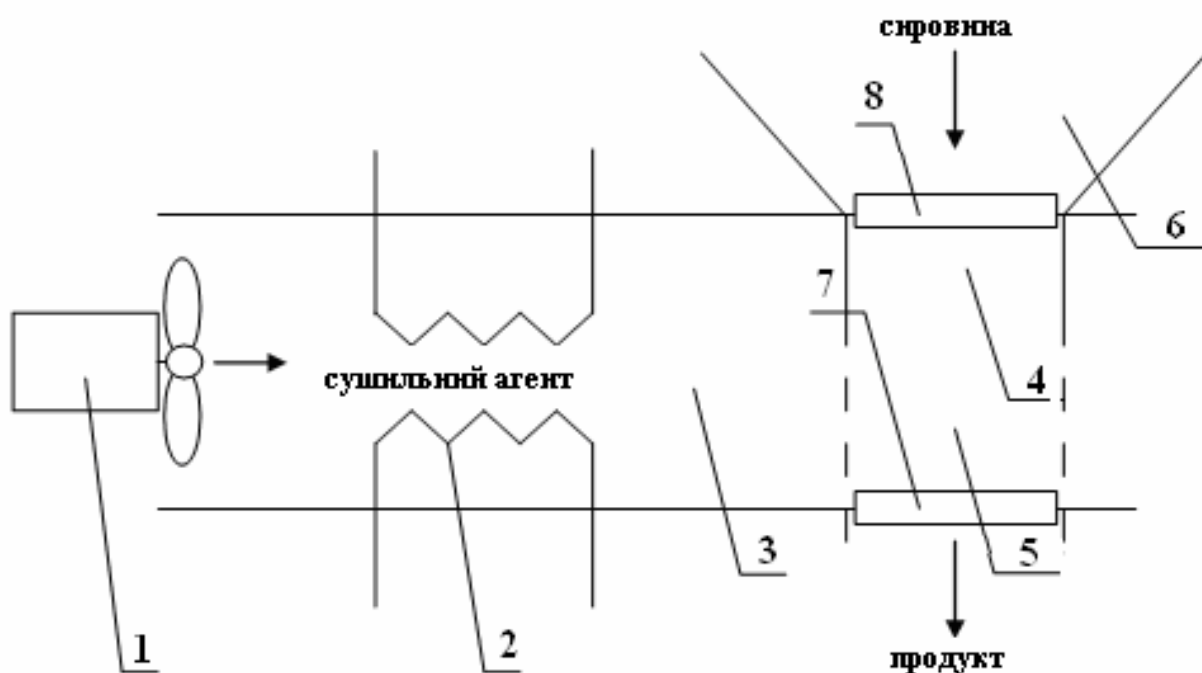


Рис.3.1 – Принципова схема установки для гідротермічної обробки крупи з використанням принципів ЗТП-сушіння: 1 – вентилятор; 2 – нагрівачі; 3 – сушильна камера; 4, 5 – частини ФЄ; 6 – завантажувальний бункер; 7,8 – дозуючі шнеки

Принцип її роботи полягає в наступному. Волога сировина із завантажувального бункера (6) дозуючими шнеками (7) та (8) переміщується



крізь ФЄ, виконану із паронепроникного матеріалу, з визначеною швидкістю. У першій частині ФЄ (4) проводиться проварювання крупи до готовності, в другій (5) – сушіння. Оскільки друга частина ФЄ (5) виконана таким чином, що площа масообмінних зазорів принаймні на порядок менша, ніж площа теплообмінних поверхонь, то зневоднення сировини проводиться згідно умов для ЗТП-сушіння [104].

Тривалість знаходження сировини в першій та другій частині ФЄ, а, відповідно, і тривалість проварювання та зневоднення, регулюються довжиною відповідних частин ФЄ та швидкістю протягування сировини крізь неї.

Зазвичай під час ЗТП-сушіння використовують ФЄ трьох видів [104-107]: ромбовидні (1), циліндричні (2) та ФЄ (3), що мають форму паралелепіпеда (Рис.3.2).

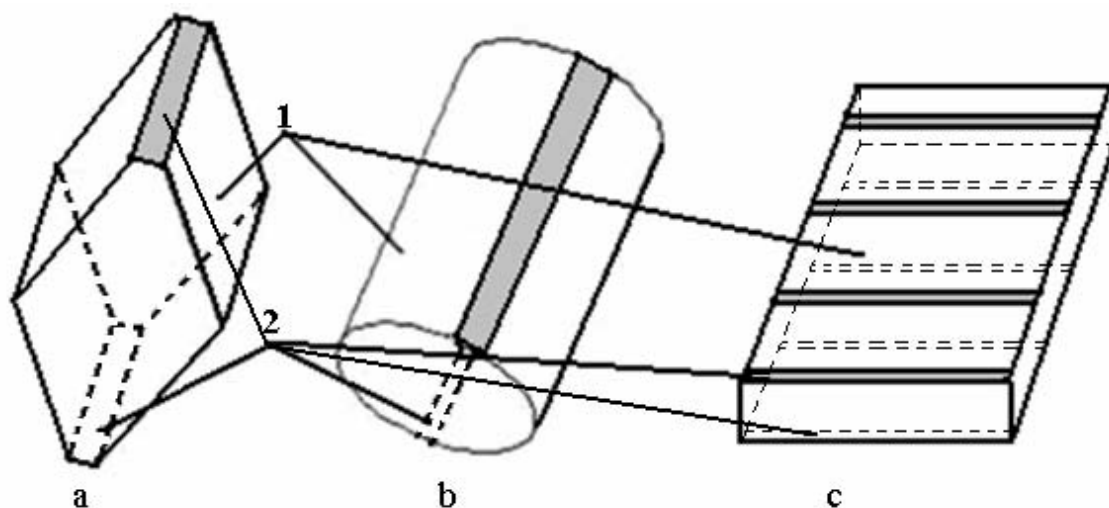


Рис.3.2 – Види ФЄ для ЗТП-сушарок: 1 – теплообмінні поверхні; 2 – масообмінні зазори

Під час ЗТП-сушіння різних видів сировини після проварювання встановлено, що кінетика сушіння має типовий для ЗТП-процесу S-подібний характер, причому тривалість зневоднення зразків за однієї і тієї ж температури сушильного агента відрізняється неістотно. В табл. 3.1 наведені види сировини, яка досліджувалась, та тривалість її сушіння за температури 100°C після проварювання.

Таблиця 3.1

Тривалість ЗТП-сушіння за температури 100°C різних видів сировини після проварювання в різних ФЄ

Сировина	Тривалість сушіння $(\tau \pm 5) \cdot 60^{-1}$ , с		
	ФЄ:		
	ромбовидна	циліндрична	паралелепіпедна
Гречана крупа	60	62	60
Пшоняна крупа	60	60	55
Пшенична крупа	65	65	60

З табл. 3.1 видно, що тривалість сушіння даних видів сировини в різних ФЄ відрізняється не більше ніж на 8%, тобто в межах похибки. Таким чином, для ЗТП-сушіння різних видів сировини після проварювання можна обирати будь-яку із запропонованих ФЄ, але використання ромбовидної або циліндричної ФЄ в установці, зображеній на рис.3.1, має ускладнення, пов'язані з конструкційними особливостями.

Виходячи з цього далі дослідження проводились лише із ФЄ, що має форму паралелепіпеда (Рис.3.3).

Характерними розмірами обраної ФЄ є  $l_1, l_2, l_3$ , причому, по-перше,  $l_1$  та  $l_2$  принаймні на порядок більші ніж  $l_3$ , а, по друге, ФЄ розміщується площиною  $l_1 \times l_2$  паралельно руху сушильного агента. Оскільки варіювання характерними розмірами  $l_1$  та  $l_2$  обмежене розмірами сушильної камери типових ЗТП-сушарок, то обирати раціональну форму ФЄ можливо за рахунок зміни її товщини  $l_3$ .

Розміри  $l_1$  та  $l_2$ , які визначались у відповідності до розмірів сушильної камери обраної сушарки, дорівнювали:  $l_1 = l_2 = 500$  мм. Ширина масообмінного зазору  $l_4$  дорівнювала 1 мм, а теплообмінного  $l_5 = 20$  мм.

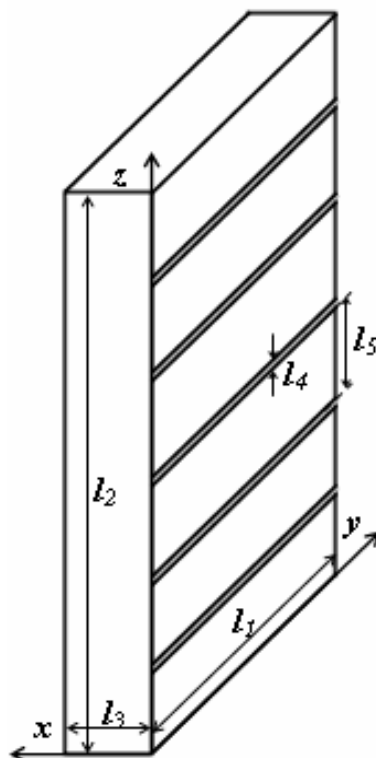


Рис.3.3 – ФЄ, що має форму паралелепіпеду з характерними розмірами  $l_1, l_2, l_3$

Таким чином, під час гідротермічної обробки крупи з використанням принципів ЗТП-сушіння об'єктом, що приймає участь в тепломасообміні, є ФЄ з розміщеною в ній вологою сировиною. За цих умов одними з основних зовнішніх чинників, що обумовлюють зовнішні масообмінні характеристики, є товщина ФЄ та температура сушильного агента [104].

### 3.1. Визначення раціональної товщини частини ФЄ без масообмінних зазорів

В першій частині ФЄ без масообмінних зазорів, як було описано раніше, проводиться проварювання сировини до готовності. Ефективність даної операції визначається тим, наскільки швидко температура сировини досягне потрібного значення та наскільки однорідним буде розподілення температури всередині ФЄ.

Швидкість прогрівання сировини у першій частині ФЄ, в якій проводиться проварювання сировини, а випаровування вологи можна вважати не суттєвим, визначається в основному опором тепловому потоку ФЄ з сировиною. Чим менший опір тепловому потоку, тим швидше прогріваються внутрішні шари сировини. Опір тепловому потоку частини ФЄ для гідротермічної обробки сировини складається з опору стінки ФЄ та опору вологої сировини. Оскільки стінка та волога сировина розміщені послідовно, то сумарний опір дорівнює:

$$R_{\Sigma} = R_{ст.} + R_{сиров.}, \quad (3.1)$$

де  $R_{\Sigma}$ ,  $R_{ст.}$ ,  $R_{сиров.}$  – сумарний опір тепловому потоку та опори стінки ФЄ та сировини, відповідно.

Опір тепловому потоку прямо пропорційний товщині та обернено пропорційний теплопровідності матеріалу, тобто:

$$R_{ст.} = \frac{\delta_{ст.}}{\lambda_{ст.}}, \quad (3.2)$$

$$R_{сиров.} = \frac{\delta_{сиров.}}{\lambda_{сиров.}}. \quad (3.3)$$

де  $\delta_{ст.}$  та  $\delta_{сиров.}$  – товщина стінки ФЄ та сировини;

$\lambda_{ст.}$  та  $\lambda_{сиров.}$  – теплопровідність матеріалу стінки ФЄ та еквівалентний коефіцієнт теплопровідності сировини.

Еквівалентний коефіцієнт теплопровідності сировини  $\lambda_{сиров.}$  характеризує властивість вологого матеріалу проводити теплоту, а, саме, визначається: теплопровідністю твердого скелету матеріалу; теплопровідністю рідини та пароповітряної суміші, що знаходяться в стаціонарному стані в порах матеріалу; конвекцією повітря всередині матеріалу; переносом теплоти за

рахунок переносу маси вологи всередині матеріалу; променевою теплопровідністю. Визначення точного значення даної величини досить складне завдання, для вирішення якого в класичних роботах А.С. Гінзбурга [101] та О.В.Ликова [112] існує достатньо велика кількість моделей з рядом різних припущень. Але, оскільки, знаходження точного значення величини  $\lambda_{сиров.}$  в роботі не ставилось, то виходячи із результатів досліджень, наведених у роботах [101, 112], вважалось, що теплопровідність вологої сировини складається із теплопровідностей сухого скелету ( $\lambda_{с.с.}$ ) сировини, вологи ( $\lambda_{вол.}$ ), яку вона утримує, частини повітря, що оточує частинки сировини, та частини повітря, яке знаходиться в її порах ( $\lambda_{пов.}$ ).

Структура сировини являється складною з розташуванням пор в різних напрямках. На рис.3.4 показаний один із можливих варіантів розміщення пор, використаний в роботі для розрахунку еквівалентного коефіцієнту теплопровідності сировини [101].

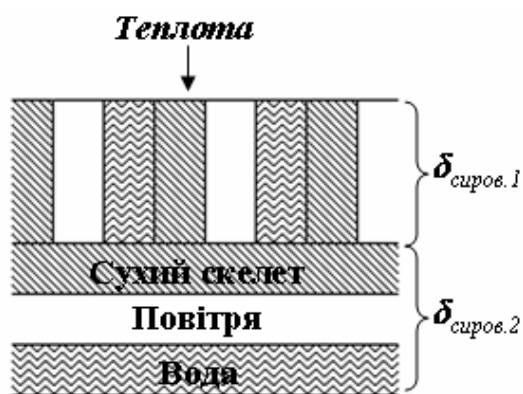


Рис.3.4 – Модель розташування пор в сировині

Для даної моделі розташування пор еквівалентний коефіцієнт теплопровідності буде розраховуватися за формулою:

$$\lambda_{сиров.} = \frac{1}{\frac{\delta_{сиров.1}}{\lambda_{сиров.1}} + \frac{\delta_{сиров.2}}{\lambda_{сиров.2}}}, \quad (3.4)$$

де  $\lambda_{сиров.1}$  та  $\lambda_{сиров.2}$  – еквівалентні коефіцієнти теплопровідності, відповідно, частини сировини, в якій складові розташовані паралельно, та частини, в якій складові розташовані послідовно;

$\delta_{сиров.1}$  та  $\delta_{сиров.2}$  – значення товщини відповідних частин сировини.

Дані коефіцієнти розраховуються за формулами:

$$\lambda_{сиров.1} = n_{с.с.} \cdot \lambda_{с.с.} + n_{вол.} \cdot \lambda_{вол.} + n_{нов.} \cdot \lambda_{нов.}, \quad (3.5)$$

$$\lambda_{сиров.2} = \frac{1}{\frac{n_{с.с.}}{\lambda_{с.с.}} + \frac{n_{вол.}}{\lambda_{вол.}} + \frac{n_{нов.}}{\lambda_{нов.}}}, \quad (3.6)$$

де  $n_{с.с.}$ ,  $n_{вол.}$  та  $n_{нов.}$  – об'ємна частка сухого скелета сировини, води та повітря в загальному об'ємі вологої сировини, відповідно,  $\frac{м^3}{м^3}$ ;

$\lambda_{с.с.}$ ,  $\lambda_{вол.}$  та  $\lambda_{нов.}$  – коефіцієнти теплопровідності сухого скелета сировини, води та повітря,  $\frac{Вт}{м \cdot К}$ .

Значення об'ємної частки складових у загальному об'ємі вологої сировини дорівнюють,  $\frac{м^3}{м^3}$ :  $n_{с.с.}=0,63$ ;  $n_{в.}=0,32$ ;  $n_{нов.}=0,05$ .

Значення опорів тепловому потоку стінки ФЄ та сировини, розраховані за формулами (3.2) та (3.3) з урахуванням формул (3.5)-(3.6), наступні: для стінки

$R_{ст.} \approx 5 \cdot 10^{-6} \frac{м^2 \cdot К}{Вт}$ ; для різних видів сировини (гречаної, пшоняної, пшеничної, ячмінної) у вологому (з вологовмістом від 0,9 до 1,8 кг/кг) та сухому (з вологовмістом від 0,09 до 0,12 кг/кг) стані коливається від  $5 \cdot 10^{-3}$  до  $0,2 \frac{м^2 \cdot К}{Вт}$ .

З проведених розрахунків видно, що опір тепловому потоку сировини значно більший опору стінки – не менше ніж на три порядки. Таким чином,

очевидно, існує необхідність перемішування сировини в процесі проварювання з метою досягнення однорідності розподілення температури сировини всередині ФЄ і, як наслідок, однорідності протікання саме процесу проварювання.

Для того, щоб примусити сировину перемішуватись, існує два способи: перший полягає у збільшенні швидкості руху сировини; другий – у збільшенні площі поперечного перерізу ФЄ за рахунок збільшення її товщини  $l_3$  (Рис.3.3). Перший спосіб не використовувався через те, що сировина повинна знаходитись всередині ФЄ визначений технологічний час (наприклад, для проварювання сировини не менше 60 хв.), а збільшення швидкості приведе до збільшення довжини ФЄ –  $l_2$  (Рис.3.3), величина якої обмежена розмірами сушильної камери. Таким чином, було обрано другий спосіб.

Плин сировини всередині ФЄ здійснюється під дією сили тяжіння, рівномірність руху та швидкість 4 мм/хв. забезпечується завантажувальним та вивантажувальним шнеками. Теоретичне моделювання плину сировини ускладнене наступним. По-перше, окрім того, що частинки різних видів сировини відрізняються за розмірами, то й частинки однієї і тієї ж сировини в залежності від перерізу мають різний розмір (так для гречаної крупи він лежить в діапазоні від 2 до 5 мм, а, наприклад, для ячмінної – від 2 до 8 мм). По-друге, оскільки сировина волога, то між її частинками та частинками і стінкою ФЄ окрім гравітаційних сил виникають сили обумовлені поверхневим натягом води, яка знаходиться на її поверхні. Таким чином, дослідження плину проводились експериментально шляхом візуального його спостереження.

Необхідно відзначити, що сировина на вході та виході частини ФЄ без масообмінних зазорів, тобто частини призначеної для проварювання сировини, якісно різні: на вході – це замочена в воді протягом 120 хв. крупа, а на виході – проварена до готовності каша. Але, оскільки, прогрів сировини в основному відбувається на початку її руху в ФЄ (як показано в попередньому розділі – в перші 5...10 хв.), коли вона ще не проварилась, то далі досліджувався плин круп замочених у воді протягом 120 хв.

Для візуального дослідження плину сировини [138] в частині ФЄ, призначеній для її проварювання, використовувалась установка представлена на рис.3.5. Передня стінка труби для візуалізації плину виконана із скла. Стінки перпендикулярні стінці із скла можуть переміщуватись вздовж напрямної, таким чином змінюється товщина ФЄ.

Методика експерименту полягає в наступному. Волога сировина завантажується всередину труби крізь завантажувальний бункер. Один із шарів вологої сировини фарбують та завантажують так, щоб він знаходився поміж шарами нефарбованої сировини. Далі обертають шнек, що знаходиться внизу труби, з визначеною швидкістю. Сировину за скляною стінкою при цьому фотографують в процесі руху з періодичністю 60 с.

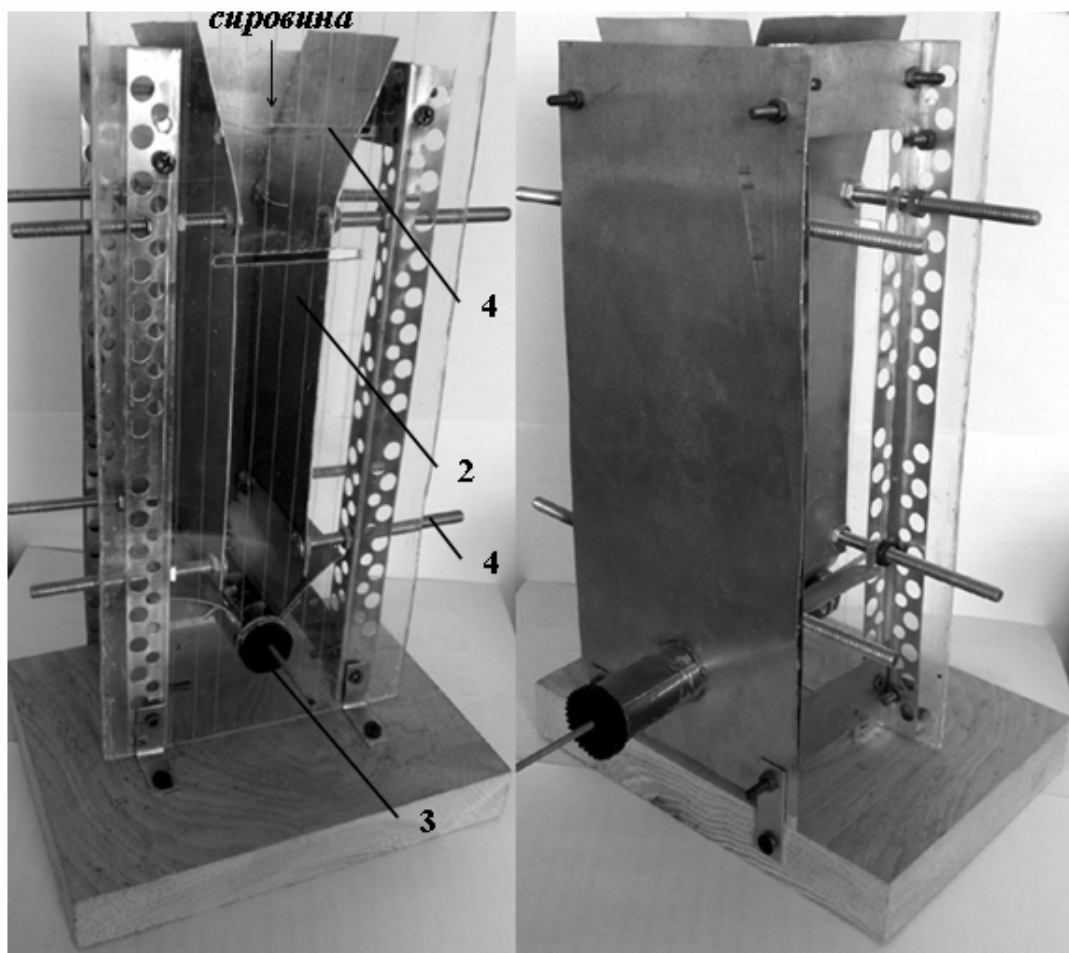


Рис.3.5 – Установка для дослідження плину вологої сировини у трубі прямокутного перерізу: 1 – завантажувальний бункер; 2 – ФЄ; 3 – шнек; 4 – напрямні



В якості вологої сировини використовувались крупи, які замочувались у воді протягом 2 годин за кімнатної температури: гречана (Рис.3.6), пшоняна (Рис.3.7), ячмінна (Рис.3.8). Для візуалізації течії в ФЄ засипався шар пофарбованої сировини. Стінки, площини яких паралельні руху сушильного агенту, зроблені таким чином, що існує можливість змінювати відстань між ними.

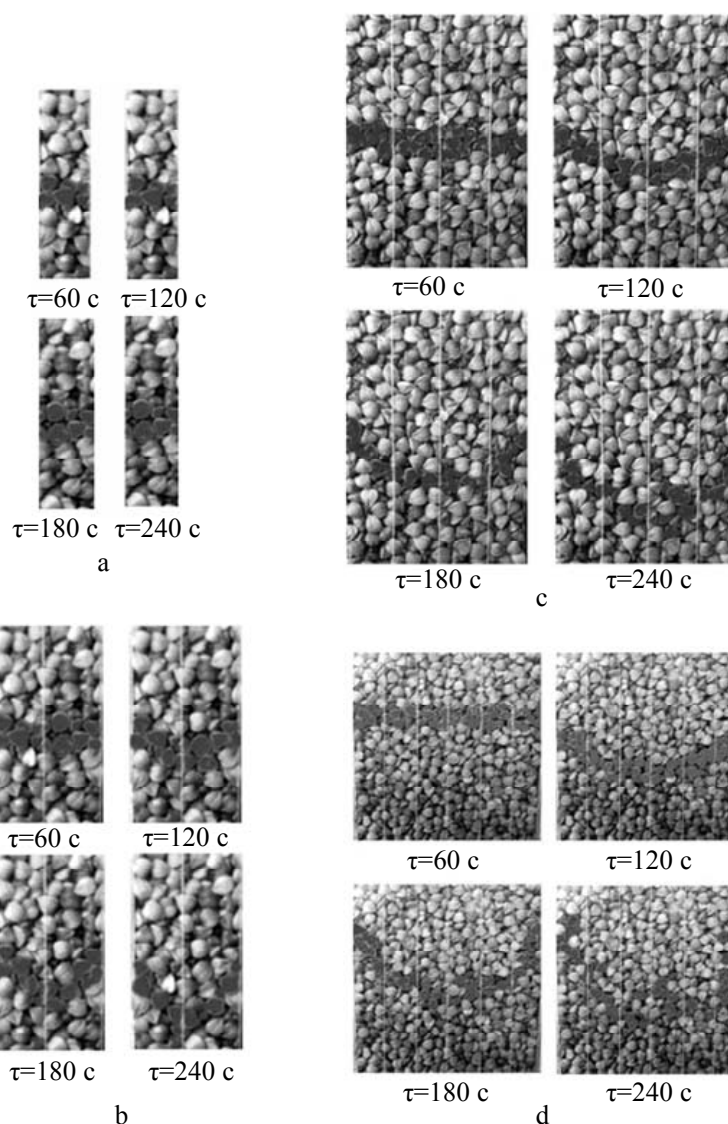


Рис.3.6 – Фотографії плинущої вологої гречаної крупи за різної товщини ФЄ, мм: a – 10; b – 20; c – 40; d – 60.

На рис. 3.6, 3.7, 3.8 представлені фотографії плинущої вологої сировини за різної товщини ФЄ через проміжки часу рівні 60 с.

З рисунків видно, що при переміщенні всіх трьох зразків круп в ФЄ з товщиною 10 мм (Рис. 3.6 а, 3.7 а, 3.8 а) перемішування не спостерігається.

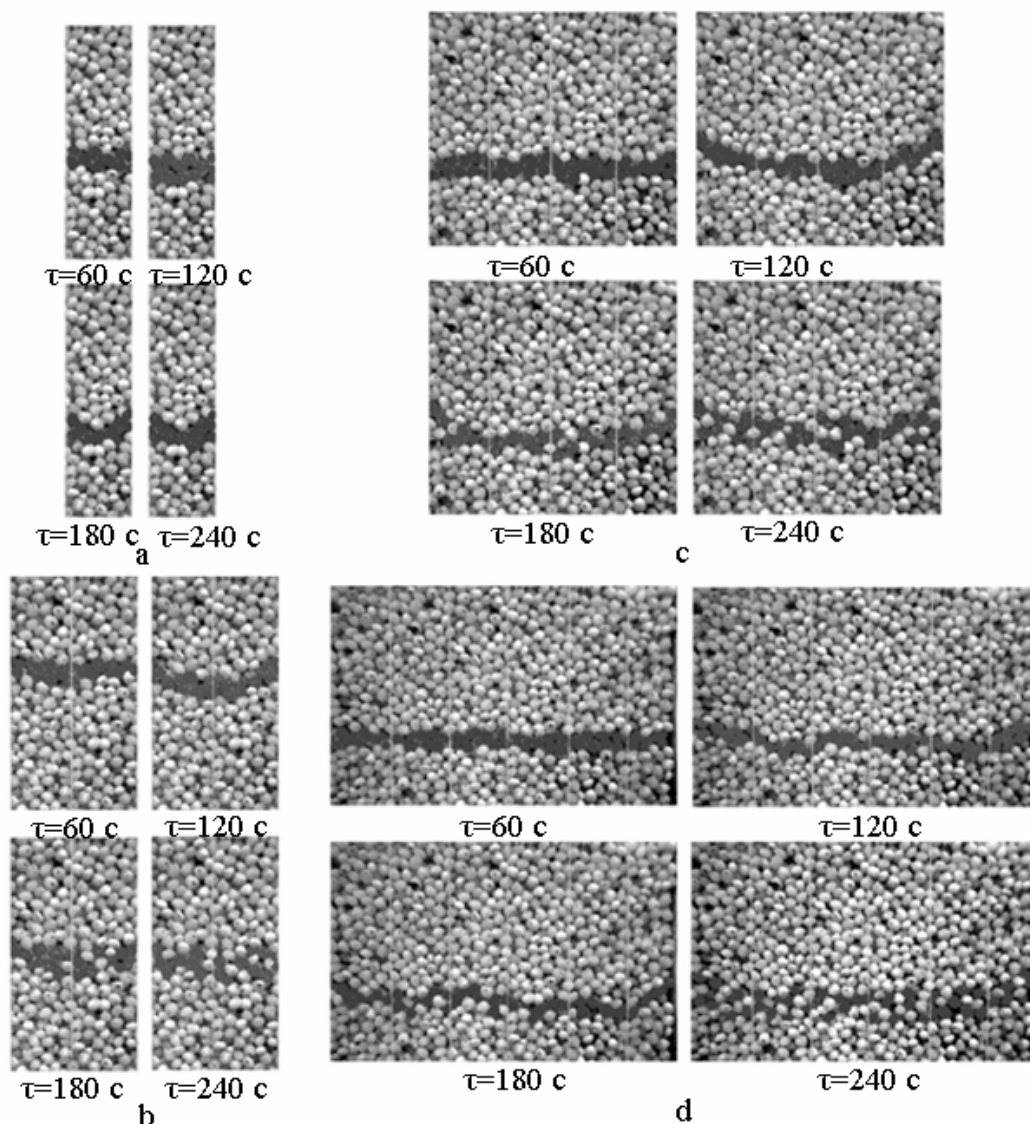


Рис.3.7 – Фотографії плину вологої пшонаної круп за різної товщини ФЄ, мм: а – 10; б – 20; с – 40; д – 60.

За збільшення товщини ФЄ до 20 мм (Рис. 3.6 б, 3.7 б, 3.8 б) – швидкість змінюється від мінімальної біля стінок до максимальної в центрі шару сировини. Профіль швидкості за такої товщини труби має параболічний характер. Для даної товщини ФЄ при  $\tau=240$  с спостерігається перемішування частинок різних видів сировини.

Зі збільшенням товщини ФЄ до 40 мм (Рис. 3.6 с, 3.7 с, 3.8 с) в центрі шару сировини з'являється ділянка, на якій швидкість плину постійна. Причому

при подальшому збільшенні товщини ФЄ (Рис. 3.6 d, 3.7 d, 3.8 d) ширина такої ділянки збільшується. Профіль швидкості при товщині ФЄ 40 (c) та 60 мм (d) наближається за характером до характеру турбулентного плину рідини: спостерігається перемішування шарів.

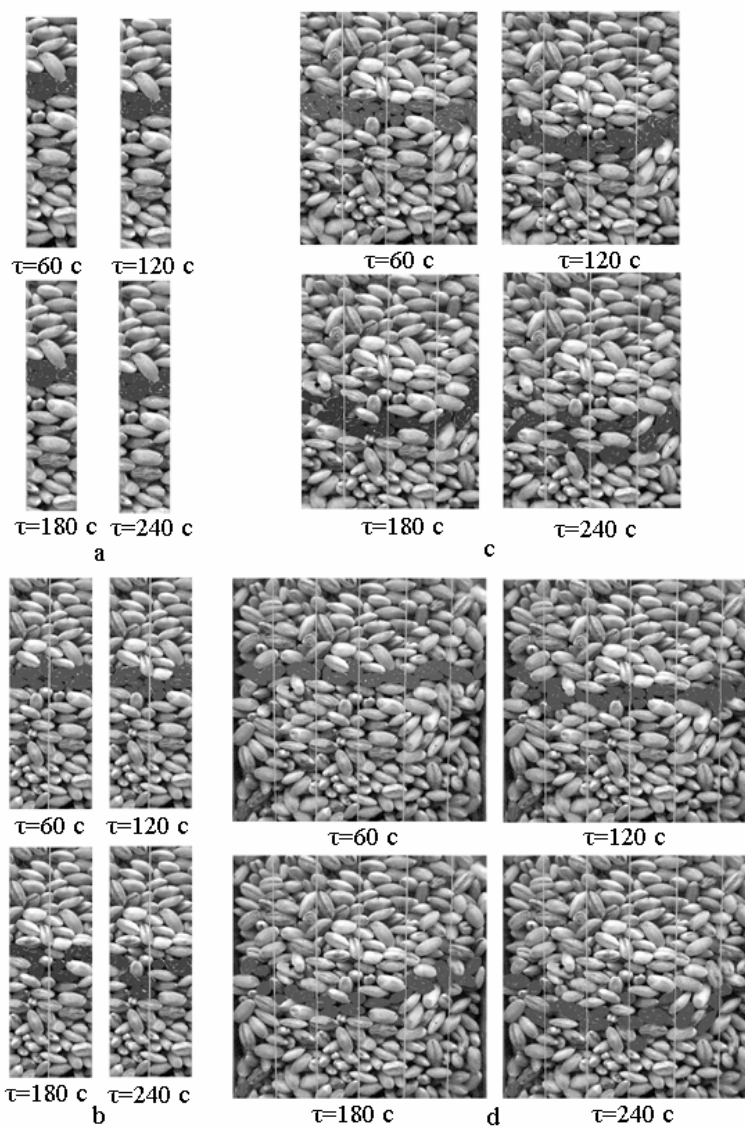


Рис.3.8 – Фотографії плину вологої ячмінної крупи за різної товщини ФЄ, мм: a – 10; b – 20; c – 40; d – 60.

З наведених фотографій видно, що при наближенні характеру плину сировини до турбулентного режиму плину рідини, тобто за збільшення товщини шару, перемішування частинок сировини відбувається більш інтенсивно. Як і при турбулентному плинні рідини частинки сировини

набувають складові швидкості, перпендикулярні плину, тому вони можуть переходити з одного шару в інший.

Таким чином, ефективність перемішування сировини в першій частині ФЄ, яка не має масообмінних зазорів, збільшується по мірі збільшення товщини ФЄ, причому граничним значенням товщини, за якої перемішування сировини стає помітним, є товщина 20 мм. Виходячи з цього, раціональною товщиною ФЄ без масообмінних зазорів, з точки зору інтенсивності перемішування, є товщина не менша за 20 мм.

Необхідно відмітити, що за товщини ФЄ 10 мм, очевидно, сировина буде прогріватися з достатньою рівномірністю, але використання ФЄ з такою товщиною не раціональне з точки зору низького питомого навантаження і, як наслідок, підвищеної металоємності конструкції сушарки.

### **3.2. Визначення раціональної товщини частини ФЄ з масообмінними зазорами**

Під раціональною товщиною частини ФЄ з масообмінними зазорами, тобто частиною ФЄ для ЗТП-сушіння, мається на увазі така товщина, за якої тривалість процесу зневоднення мінімальна за однакових вихідних умов, а характер кінетичних кривих сушіння максимально наближений до характеру кривих, що описують ЗТП-сушіння [139].

Визначення раціональної товщини проводилось непрямым способом шляхом визначення кінетики вологовмісту та отримання за експериментальними даними залежностей швидкості сушіння від вологовмісту.

Об'єктом дослідження були крупи після проварювання: гречана, пшоняна та пшенична.

Кінетика вологовмісту визначалась шляхом періодичного зважування ФЄ з сировиною та знаходження апроксимаційної функції для отриманих експериментальних даних. Для отримання залежності швидкості зневоднення

від вологовмісту знаходили першу похідну від апроксимаційної функції кінетики сушіння та будували в залежності від відповідного аргументу.

На рис.3.9 та 3.10 представлені кінетики сушіння та залежності відносної швидкості сушіння від вологовмісту для досліджуваної сировини за різної товщини ФЄ.

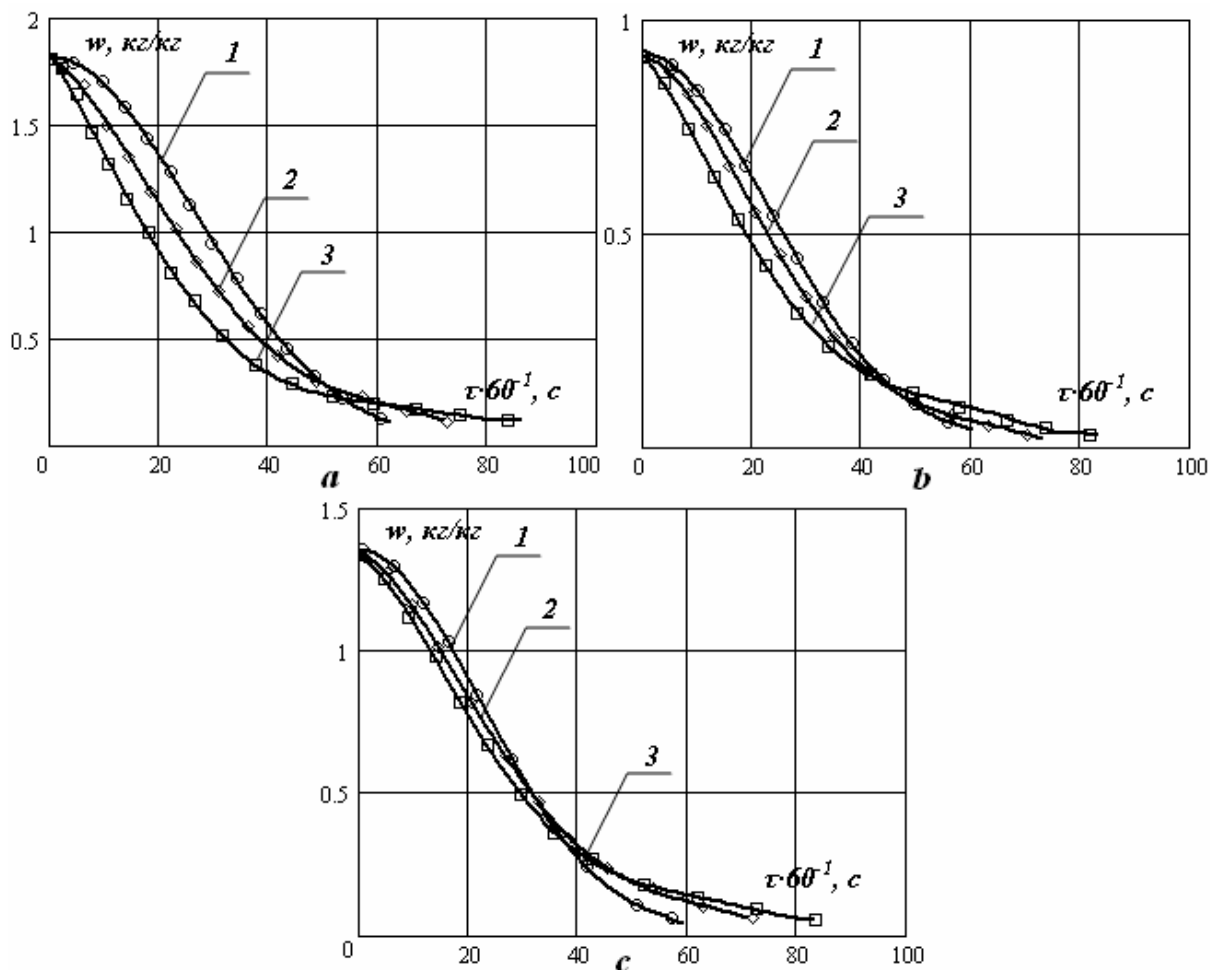


Рис.3.9 – Кінетики сушіння круп після проварювання (а – гречана; б – пшоняна; с – пшенична) за різної товщини ФЄ, мм: 1 – 20; 2 – 40; 3 – 60

Кінетика сушіння сировини в ФЄ товщиною 20 мм має типовий для ЗТП-сушіння характер. За збільшення товщини ФЄ характер кривої віддаляється від типової кінетики ЗТП-сушіння та наближається за характером до конвективного.

Із залежності відносної швидкості від вологовмісту видно, що швидкість сушіння для досліджуваних зразків має три характерні для ЗТП-сушіння

ділянки: період зростаючої, період максимальної та період спадаючої швидкості сушіння. По мірі збільшення товщини ФЄ перший період, тобто період зростаючої швидкості сушіння, зменшується – характер залежності відносної швидкості від вологовмісту наближається до конвективного, де даний період взагалі відсутній. Необхідно також відмітити, по мірі зменшення товщини ФЄ збільшується ширина піку, а значення максимуму відносної швидкості зміщується відносно осі вологовмісту в сторону менших значень.

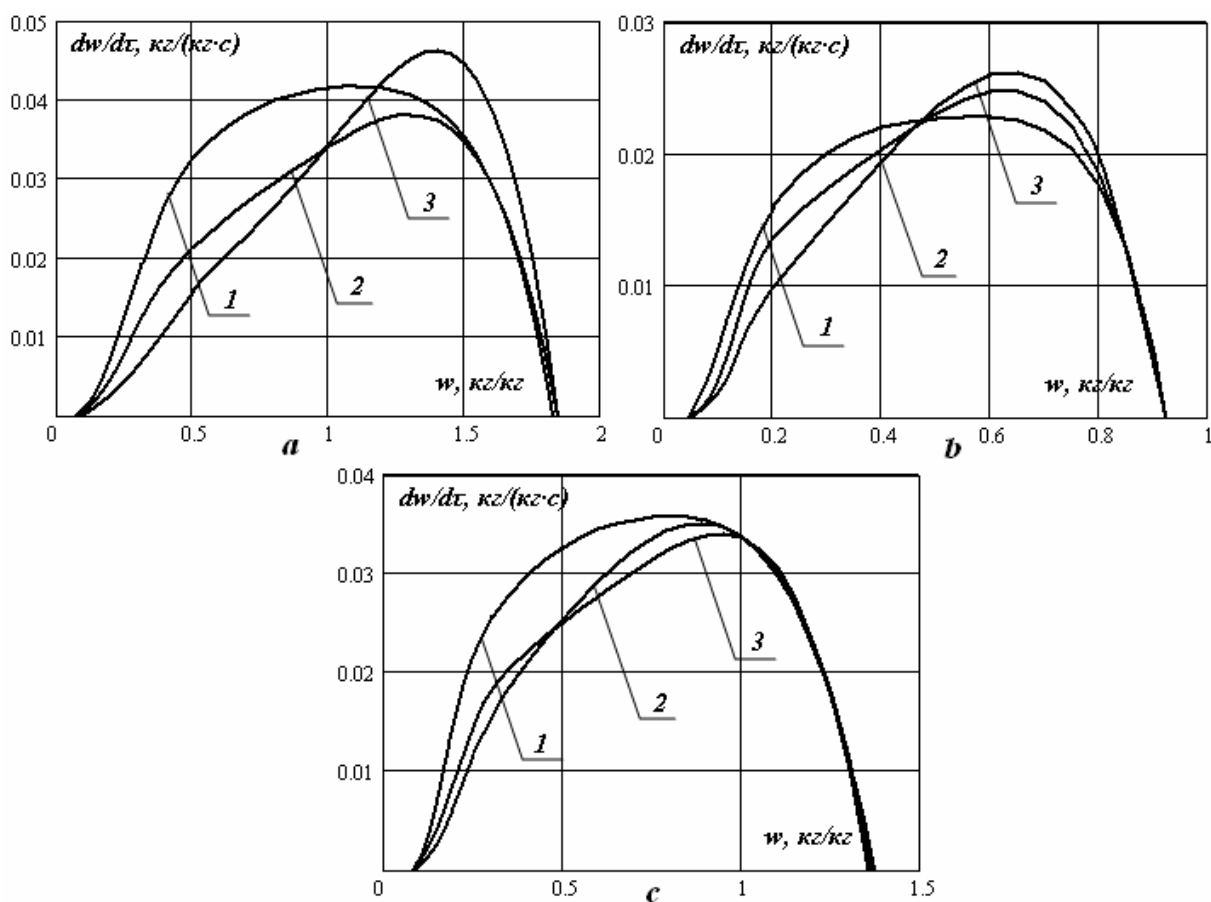


Рис.3.10 – Залежність відносної швидкості сушіння круп після проварювання (а – гречана; б – пшоняна; с – пшенична) від вологовмісту сировини за різної товщини ФЄ, мм: 1 – 20; 2 – 40; 3 –

В результаті того, що процес зневоднення сировини для товщини ФЄ 20 мм найближчий за характером до ЗТП-сушіння, тривалість сушіння зразка в такій ФЄ за однакового вологовмісту досліджуваних зразків менший по відношенню до одного (товщина ФЄ 40 мм) на 16...17%, а до другого (товщина ФЄ 60 мм) – на 30...33%. Таким чином, раціональною товщиною частини ФЄ з

масообмінними зазорами з точки зору реалізації ЗТП-процесу нами вважалась товщина 20 мм.

### **3.3. Дослідження кінетики процесу ЗТП-сушіння сировини за різної температури сушильного агента**

Одним із основних чинників, що визначає тривалість процесу сушіння, є температура сушильного агента [139, 140]. Кінетика сушіння та залежність відносної швидкості сушіння від вологовмісту сировини визначались способом описаним в попередньому пункті.

Як було відмічено раніше, авторами [104-107] встановлено, що в якості об'єкту сушіння під час ЗТП-процесу виступає ФЄ, а сировина, яка знаходиться всередині ФЄ визначає внутрішній тепловологоперенос цього об'єкту. Таким чином, характер процесу зневоднення визначається у більшому ступені не видом сировини, а тим наскільки повно реалізуються умови для протікання ЗТП-процесу. Також попередніми дослідженнями кінетики сушіння досліджуваних круп після проварювання, тобто гречаної, пшоняної, пшеничної та ячмінної, було встановлено, що процес сушіння триває практично однаковий час за різної температури сушильного агента, тому подальші дослідження в даному розділі проводились в основному з одним об'єктом – гречаною крупною після проварювання. Дослідження проводились у паралелепіпедній ФЄ з масообмінними зазорами. Товщина ФЄ дорівнювала 20 мм.

Температура сушильного агента змінювалась дискретно від 40 до 140°C з інтервалом 5°C. На рис.3.11 представлена кінетика сушіння вологої сировини за різних температур сушильного агента.

Кінетики сушіння наведені на рисунку мають типовий для ЗТП-сушіння S-подібний характер. Очевидним є те, що за збільшення температури сушильного агента тривалість процесу зневоднення зменшується.

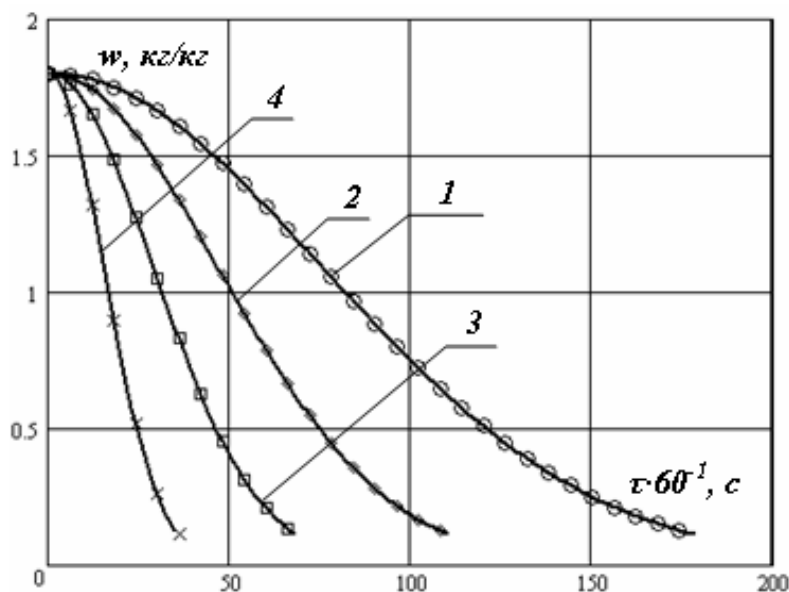


Рис.3.11 – Кінетика сушіння вологої сировини за різних температур сушильного агента, °C: 1 – 40; 2 – 70; 3 – 100; 4 – 140

За отриманими експериментальними даними для ФЄ з товщиною 20 мм була отримана емпірична функція залежності тривалості сушіння від температури сушильного агента. Функція представлена на рис.3.12 та має вид:

$$f_{T_{d.a.}}(T_{d.a.}) = a_0 \cdot \exp(a_1 \cdot T_{d.a.}), \quad (3.7)$$

де  $T_{d.a.}$  – температура сушильного агента;

$a_0 = 337.857$  та  $a_1 = -0.016$  – апроксимаційні коефіцієнти.

Дана функція описує залежність тривалості сушіння у ФЄ з товщиною 20 мм круп після проварювання (гречаної, пшеничної, пшоняної, ячмінної) від температури сушильного агента в діапазоні температур від 40 до 140°C з коефіцієнтом кореляції 0,99.

Таким чином, отримана функція дає можливість спрогнозувати тривалість сушіння досліджуваної сировини за будь-якої температури сушильного агента із даного діапазону з високим ступенем точності.

Залежність відносної швидкості сушіння від вологовмісту досліджуваної сировини, отримана із кінетики сушіння, представлена на рис 3.13.



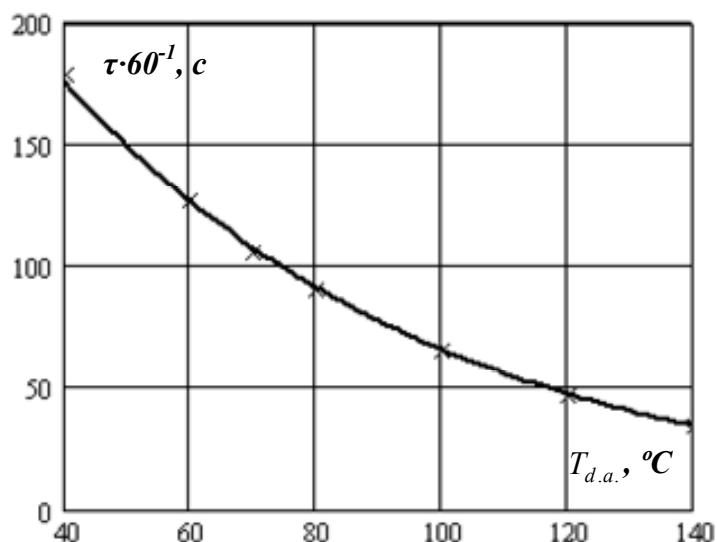


Рис.3.12 – Залежність тривалості сушіння від температури сушильного агента

Наведені залежності мають типовий для ЗТП-процесу характер, тобто для них мають місце описані вище періоди зміни швидкості сушіння. Необхідно відмітити, що за лінійного збільшення температури сушильного агента величина максимуму залежності відносної швидкості сушіння від вологовмісту сировини збільшується нелінійно, що є причиною експоненціальної залежності тривалості зневоднення від температури сушильного агента.

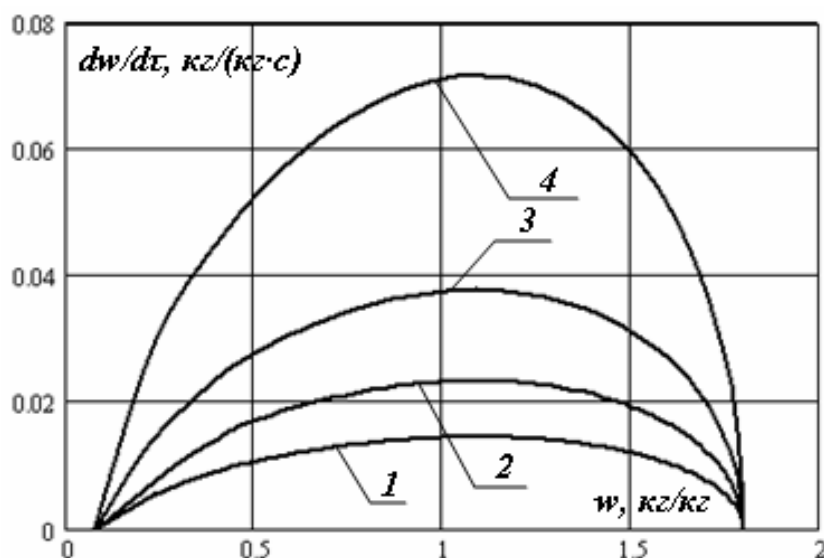


Рис.3.13 – Залежність відносної швидкості сушіння від вологовмісту за різних температур сушильного агента, °C: 1 – 40; 2 – 70; 3 – 100; 4 – 140

В роботах [104-107] показано, що із рівняння теплового балансу для процесу ЗТП-сушіння можна отримати співвідношення:

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}, \quad (3.8)$$

де  $\tau_i$  – тривалість сушіння за температури  $t_i$ ;

$\Delta t_i$  – перепад температур сушильного агента на вході та виході сушильної камери.

Вважаючи, що за різної температури сушіння видаляється однакова кількість вологи, авторами [104-107] зроблено висновок, що ступінь використання теплоти сушильного агента більша в тому випадку, де тривалість сушіння менша. Таким чином, з точки зору енерговитрат, доцільно обирати температуру сушильного агента максимальною, але необхідно враховувати умови висунуті до її величини на етапі підготовки сировини до сушіння, тобто під час її проварювання.

### **3.4. Математична модель розвитку потужності дисипативних структур під час ЗТП-сушіння вологої сировини**

#### **3.4.1. Постановка задачі зі знаходження функції розподілення потужності дисипативних структур з використанням рівняння теплопровідності**

Для пояснення особливостей характеру процесу зневоднювання під час ЗТП-сушіння проф. Погожих М.І. [104] використовується теорія, розроблена І. Пригожиним, який для систем віддалених від рівноваги ввів поняття дисипативних структур. Такі структури можуть виникати й існувати тільки в системах, що обмінюються енергією й масою із зовнішнім середовищем за межами стійкості. Якщо ж структура в результаті флуктуацій виникне в ізольованій системі, то ентропія в системі в цілому зростає, що приведе до

деградації самої системи й зникненню структури або нового її стану з мінімумом виробництва ентропії. Утворення дисипативних структур супроводжується зміною механічної енергії структури або системи в цілому: виникає видимий макроскопічний рух або впорядкування цього руху.

Теорія І. Пригожина дозволяє припустити існування потенційних механізмів самоорганізації таких дисипативних структур. Умовами для таких механізмів є: віддалення від рівноваги; нестійкість системи поблизу стаціонарного стану; флуктуації; відкритість системи по потоках енергії й маси.

Дисипативні структури дозволяють максимально розсіяти «високоякісну» енергію сушильного агента, що в першому наближенні визначається зниженням температури відпрацьованого сушильного агента. Під час ЗТП-сушіння під утворенням дисипативних структур розуміється розвиток поверхні випару за рахунок збільшення пористості матеріалу, який зневоднюється [104].

В роботі [104] було знайдено аналітичний вигляд функції розвинення площі випаровування, завдання яке було поставлено в даній роботі – знайти розподілення потужності таких дисипативних структур всередині ФЄ в процесі сушіння та в залежності від температури сушильного агента [141].

Рівняння теплопровідності для матеріалу, що зневоднюється, з урахуванням утворення дисипативних структур буде мати вигляд [142-144]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \Delta T + \frac{1}{c\rho} f_i + \frac{1}{c\rho} f_d, \quad (3.9)$$

де  $T$  – температура, °С;

$\tau$  – час, с;

$\lambda$ ,  $c$  і  $\rho$  – коефіцієнт теплопровідності, теплоємність і густина матеріалу,

$$\frac{Вт}{м \cdot ^\circ С}, \frac{Дж}{кг \cdot ^\circ С}, \frac{кг}{м^3};$$

$f_i$  – функція розподілення потужності внутрішніх джерел теплоти всередині ФЄ,  $\frac{Дж}{м^3 \cdot с}$ ;

$f_d$  – функція розподілення потужності дисипативних структур,  $\frac{Дж}{м^3 \cdot с}$ .

У даному рівнянні температура, коефіцієнт теплопровідності, теплоємність і густина матеріалу, функції розподілення потужності внутрішніх джерел теплоти та дисипативних структур є функціями координат і часу.

Рівняння (3.9) можна перетворити наступним чином:

$$f_d = c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} - \lambda \Delta T - f_i. \quad (3.10)$$

Вирішуючи рівняння (4.10) відносно шуканої  $f_d$  існує можливість знайти її як функцію координат та часу. Для вирішення даного завдання необхідно знайти аналітичний вигляд кінетик температури та вологовмісту як функцій координат, часу та температури сушильного агента, а також зміну густини, теплопровідності та теплоємності з часом. Аналітичний вигляд перерахованих функцій можна отримати шляхом знаходження апроксимаційних функцій для численних експериментальних даних, отриманих для досліджуваної сировини.

#### 3.4.2. Кінетика температури сировини у ФЄ під час ЗТП-сушіння як функція температури сушильного агента

Для отримання кінетики температури сировини під час ЗТП-сушіння в залежності від температури сушильного агента в центрі ФЄ розміщувалась термопара [140]. Температура сушильного агента змінювалась дискретно від 40 до 140°C з інтервалом 5°C. Використовувалась паралелепіпедна ФЄ з масообмінними зазорами; товщина ФЄ – 20 мм; досліджувана сировина – гречана крупа після проварювання. Кінетика температури сировини під час

ЗТП-сушіння за різної температури сушильного агента представлена на рис.3.14.

Оскільки розвиток дисипативних структур відбувається безпосередньо під час сушіння, то кінетика температури в даному розділі досліджувалась лише під час даного процесу – початкова температура сировини дорівнювала кімнатній. Якщо сушіння проводити відразу після проварювання, то відрізняться кінетики температури будуть на початковому етапі, як це показано пунктирною лінією на рис.3.14 та на подальших ілюстраціях кінетики температури під час сушіння.

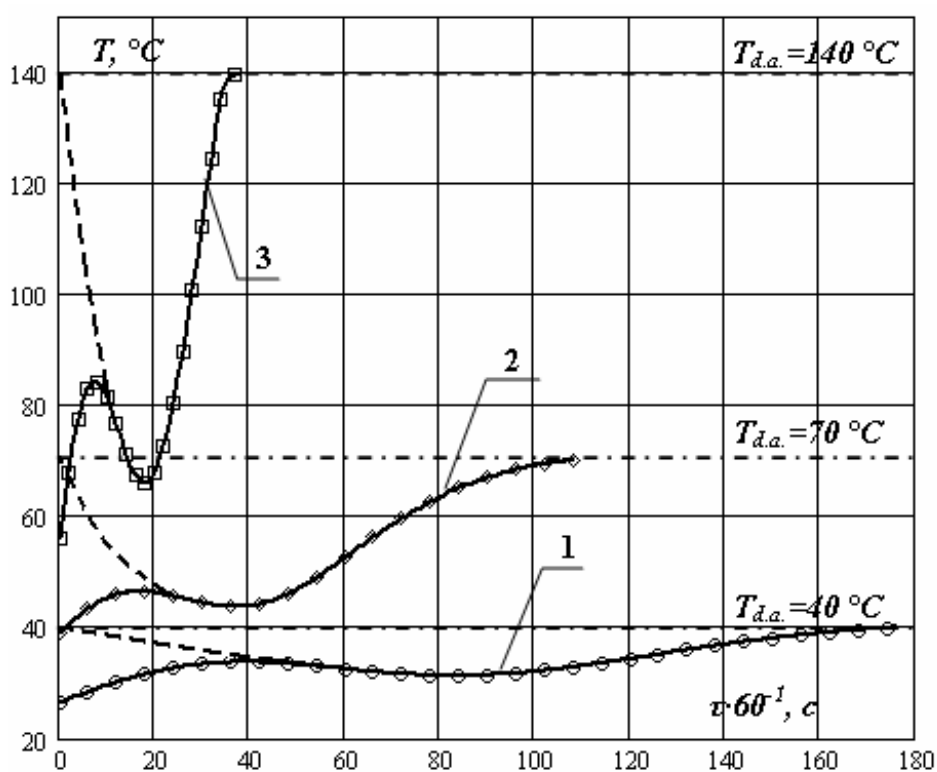


Рис.3.14 – Кінетика температури сировини під час ЗТП-сушіння за різної температури сушильного агента, °C: 1 – 40; 2 – 70; 3 – 140

Апроксимаційні функції для отриманих залежностей мають вид:

$$f_{T_{d.a.}}(\tau) = \left( a0_{T_{d.a.}} \cdot \exp\left(-\frac{(\tau - a1_{T_{d.a.}})^2}{a2_{T_{d.a.}}}\right) - \exp(-\tau^2 \cdot a3_{T_{d.a.}}) + 1 \right) \cdot a4_{T_{d.a.}}, \quad (3.11)$$

де  $a0_{T_{d.a.}}$  ( $^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$ ),  $a1_{T_{d.a.}}$  (с),  $a2_{T_{d.a.}}$  ( $\text{с}^2$ ),  $a3_{T_{d.a.}}$  ( $\text{с}^2$ ) та  $a4_{T_{d.a.}}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) – апроксимаційні коефіцієнти.

Апроксимаційні функції для кінетики температури за різної температури сушильного агента мають однаковий вид, але різні значення апроксимаційних коефіцієнтів.

Для розрахованих за різної температури сушильного агента  $T_{d.a.}$  апроксимаційних коефіцієнтів також були отримані апроксимаційні функції, які представляють собою лінійні та експоненційні залежності:

$$\begin{aligned}
 a0_{T_{d.a.}}(T_{d.a.}) &= a00_{T_{d.a.}} + a01_{T_{d.a.}} \cdot T_{d.a.}, \\
 a1_{T_{d.a.}} &= a10_{T_{d.a.}} \cdot \exp(a11_{T_{d.a.}} \cdot T_{d.a.}), \\
 a2_{T_{d.a.}} &= a20_{T_{d.a.}} \cdot \exp(a21_{T_{d.a.}} \cdot T_{d.a.}), \\
 a3_{T_{d.a.}}(T_{d.a.}) &= a30_{T_{d.a.}} + a31_{T_{d.a.}} \cdot T_{d.a.}, \\
 a4_{T_{d.a.}} &= a40_{T_{d.a.}} \cdot \exp(a41_{T_{d.a.}} \cdot T_{d.a.}),
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

де  $a00_{T_{d.a.}} = 0.952$  ( $^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$ ),  $a01_{T_{d.a.}} = -5.267 \cdot 10^{-3}$  ( $1/^{\circ}\text{C}$ );

$a10_{T_{d.a.}} = 26.855$  (с),  $a11_{T_{d.a.}} = -0.011$  ( $1/^{\circ}\text{C}$ );

$a20_{T_{d.a.}} = 1.074 \cdot 10^4$  ( $\text{с}^2$ ),  $a21_{T_{d.a.}} = -0.033$  ( $1/^{\circ}\text{C}$ );

$a30_{T_{d.a.}} = 7.044 \cdot 10^{-5}$  ( $\text{с}^2$ ),  $a31_{T_{d.a.}} = 7.044 \cdot 10^{-5}$  ( $\text{с}^2/^{\circ}\text{C}$ );

$a40_{T_{d.a.}} = 16.21$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $a41_{T_{d.a.}} = 0.022$  ( $1/^{\circ}\text{C}$ ).

Таким чином, якщо враховувати (3.12) – апроксимаційна функція (3.11) є функцією двох аргументів: часу та температури сушильного агента.

### 3.4.3. Кінетика температури сировини у ФЄ під час ЗТП-сушіння як функція координат

Під час досліджень зі знаходження аналітичного виду кінетики температури як функції координат використовували ФЄ, що має форму паралелепіпеду з характерними розмірами  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$  (Рис.3.3) [140]. Характерні розміри  $l_1$  та  $l_2$  були принаймні на порядок більші ніж  $l_3$ . Масообмінні зазори розміщені на гранях  $l_1 \times l_2$ , а грань  $l_3 \times l_2$  перпендикулярна до руху сушильного агента. Характерний розмір  $l_3$ , тобто товщина ФЄ, дорівнював 20 мм.

Направимо осі координат вздовж ребер ФЄ як показано на рис.3.3. Для отримання кінетики температури сировини під час ЗТП-сушіння вздовж кожної осі всередину ФЄ розміщали термопари на відстані 5 мм одна від одної. Сировиною, яку використовували впродовж даних досліджень, була гречана крупа після проварювання.

В ході експериментальних досліджень встановлено, що перепад температур вздовж осі  $Oy$  за постійних значень координат  $z$  та  $x$  не суттєвий. Найбільша різниця температур спостерігається на початковому етапі сушіння під час прогріву ФЄ, при цьому вона не перебільшує 10% від загальної тривалості сушіння.

Той же самий результат отриманий і під час дослідження різниці температур вздовж осі  $Oz$ . Пояснюється отримане тим, що, оскільки, масообмінні зазори розміщені на гранях  $l_1 \times l_2$ , тобто в площині  $Oy \times Oz$ , то поглиблення зони випару, завдяки якому мають місце суттєві перепади температур під час ЗТП-сушіння, відбувається в напрямку осі перпендикулярної даній площині, тобто вздовж осі  $Ox$ . Перепади ж температур вздовж осей  $Oy$  та  $Oz$  обумовлені теплопровідністю сировини у ФЄ і виникають лише під час її підігріву.

Таким чином, далі було зроблено припущення, що вздовж осей  $Oy$  та  $Oz$  перепад температур не суттєвий і залежність кінетики температури сировини від координат досліджувалась лише вздовж осі  $Ox$ .

На рис.3.15 наведено кінетику температури сировини всередині ФЄ під час ЗТП-сушіння на різній відстані від поверхні. Нуль відліку координатної осі  $Ox$  знаходиться під поверхнею ФЄ. Крива кінетики температури (1) показує температуру під поверхнею, тобто на відстані 0 мм, друга (2) на відстані 5 мм, а третя – 10 мм від поверхні. По іншу сторону від середини товщини ФЄ, тобто на відстані 15 та 20 мм від початку осі  $Ox$ , кінетики температур мають той же характер та ті ж значення, що й на відстані, відповідно, 5 та 0 мм.

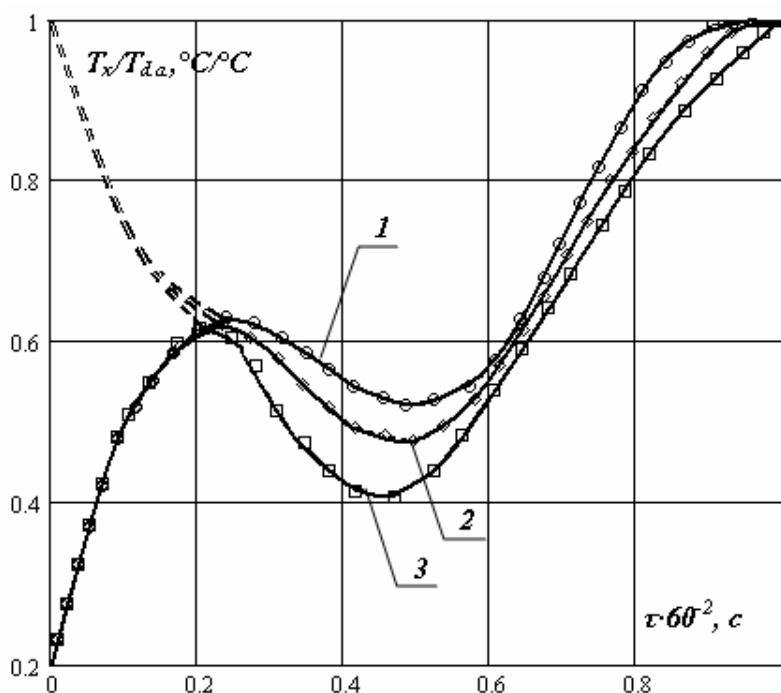


Рис.3.15 – Кінетика температури сировини всередині ФЄ під час ЗТП-сушіння на різній відстані від поверхні, мм: 1 – 0; 2 – 5; 3 – 10

Температура на рис.3.15 пронормована на значення температури сушильного агента, оскільки попередніми дослідженнями встановлено, що кінетика температури всередині ФЄ за різної відстані від поверхні для різних температур сушильного агента має однаковий характер. Для знаходження абсолютних значень температури сировини під час сушіння необхідно помножити наведені значення на температуру сушильного агента.

З наведених результатів видно, що за наближення до центру ФЄ мінімум температури зміщується відносно вісі, на якій відкладено час, в сторону



менших його значень, при цьому величина мінімуму зменшується, тобто збільшується різниця температур сировина-сушильний агент.

Апроксимація експериментальних даних проводилась функцією виду:

$$f_x(\tau) = \left( a0_x \cdot \exp\left(-\frac{(\tau - a1_x)^2}{a2_x}\right) - \exp(-\tau^2 \cdot a3_x) + 1 \right) \cdot a4_x, \quad (3.13)$$

де  $a0_x$  ( $^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$ ),  $a1_x$  (м),  $a2_x$  ( $\text{м}^2$ ),  $a3_x$  ( $\text{м}^{-2}$ ) та  $a4_x$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) – апроксимаційні коефіцієнти.

Апроксимаційні функції для кінетики температури на різній відстані від поверхні мають однаковий вид, але різні значення апроксимаційних коефіцієнтів.

Для розрахованих за різної відстані від поверхні апроксимаційних коефіцієнтів також були отримані апроксимаційні функції, які мають вид:

$$ai_x(x) = ci_0 \cdot \exp\left(-\frac{(x - ci_1)^2}{ci_2}\right) + ci_3, \quad (3.14)$$

де  $x$  – відстань від поверхні ФЄ вздовж осі  $Ox$ ;

$i=0, 1, 2, 3, 4$  – номер апроксимаційного коефіцієнта  $ai$  із формули (3.13);

$ci_0, ci_1, ci_2$  та  $ci_3$  – апроксимаційні коефіцієнти, які відповідно дорівнюють:

для  $a0_x$ :  $c0_0 = 0,02$  ( $^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$ ),  $c0_1 = 10 \cdot 10^{-3}$  (м),  $c0_2 = 30 \cdot 10^{-6}$  ( $\text{м}^2$ ),  
 $c0_3 = 0,73$  ( $^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$ );

для  $a1_x$ :  $c1_0 = -0,007 \cdot 10^{-3}$  (м),  $c1_1 = 10 \cdot 10^{-3}$  (м),  $c1_2 = 32 \cdot 10^{-6}$  ( $\text{м}^2$ ),  
 $c1_3 = 0,117 \cdot 10^{-3}$  (м);

для  $a2_x$ :  $c2_0 = -0,043 \cdot 10^{-6}$  ( $\text{м}^2$ ),  $c2_1 = 10 \cdot 10^{-3}$  (м),  $c2_2 = 30 \cdot 10^{-6}$  ( $\text{м}^2$ ),  
 $c2_3 = 0,133 \cdot 10^{-6}$  ( $\text{м}^2$ );

для  $a3_x$ :  $c3_0 = 0,8 \cdot 10^{-6}$  (м<sup>-2</sup>),  $c3_1 = 10 \cdot 10^{-3}$  (м),  $c3_2 = 25 \cdot 10^{-6}$  (м<sup>2</sup>),  
 $c3_3 = 3 \cdot 10^{-6}$  (м<sup>-2</sup>);

для  $a4_x$ :  $c4_0 = -0,027$  (°C),  $c4_1 = 10 \cdot 10^{-3}$  (м),  $c4_2 = 30 \cdot 10^{-6}$  (м<sup>2</sup>),  
 $c4_3 = 1,05$  (°C).

Функції (3.11) та (3.13) мають однаковий вид, але відрізняються вони набором аргументів: аргументами функції (3.11) є час та температура сушильного агента, а функції (3.13), враховуючи те, що апроксимаційні коефіцієнти (3.14) залежать від відстані від поверхні, – час та відстань від поверхні. Якщо навести відповідну кореляцію між коефіцієнтами (3.12) та (3.14), то для коефіцієнтів (3.14) можна отримати наступні залежності від координати та температури сушильного агента:

$$a0(x, T_{d.a.}) = \frac{0.73}{0.75} \cdot a0_{T_{d.a.}}(T_{d.a.}) + \\ + \left( -3.669 \cdot 10^{-4} + 0.028 \cdot a0_{T_{d.a.}}(T_{d.a.}) \right) \cdot \exp\left( -\frac{(x-10)^2}{30} \right),$$

$$a1(x, T_{d.a.}) = \frac{0.117}{0.11} \cdot a1_{T_{d.a.}}(T_{d.a.}) + \\ + \left( 0.03 - 0.068 \cdot a1_{T_{d.a.}}(T_{d.a.}) \right) \cdot \exp\left( -\frac{(x-10)^2}{32} \right),$$

$$a2(x, T_{d.a.}) = \frac{0.133}{0.09} \cdot a2_{T_{d.a.}}(T_{d.a.}) + \\ + \left( 0.449 - 0.482 \cdot a2_{T_{d.a.}}(T_{d.a.}) \right) \cdot \exp\left( -\frac{(x-10)^2}{30} \right),$$

$$a3(x, T_{d.a.}) = \frac{3}{3.8} \cdot a3_{T_{d.a.}}(T_{d.a.}) + \\ + \left( 8.823 \cdot 10^{-7} + 0.205 \cdot a3_{T_{d.a.}}(T_{d.a.}) \right) \cdot \exp\left( -\frac{(x-10)^2}{25} \right),$$

$$a4(x, T_{d.a.}) = \frac{1.05}{1.023} \cdot a4_{T_{d.a.}}(T_{d.a.}) + \left(0.019 - 0.027 \cdot a4_{T_{d.a.}}(T_{d.a.})\right) \cdot \exp\left(-\frac{(x-10)^2}{30}\right). \quad (3.15)$$

Далі підставимо отримані коефіцієнти в функцію (3.11) та отримаємо апроксимаційну функцію для кінетики температури аргументами якої є час, температура сушильного агента та координата:

$$T(\tau, x, T_{d.a.}) = \left( a0(x, T_{d.a.}) \cdot \exp\left(-\frac{(\tau - a1(x, T_{d.a.}))^2}{a2(x, T_{d.a.})}\right) - \exp(-\tau^2 \cdot a3(x, T_{d.a.})) + 1 \right) \times a4(x, T_{d.a.}). \quad (3.16)$$

Отриману функцію можна використовувати для вирішення рівняння (3.10).

#### 3.4.4. Кінетика вологовмісту сировини під час ЗТП-сушіння як функція температури сушильного агента та відстані від поверхні ФЄ

Під час знаходження аналітичного виду функції, що описує кінетику вологовмісту в залежності від температури сушильного агента та відстані від поверхні ФЄ [145], необхідно дотримуватись тієї ж схеми як і під час знаходження функції для кінетики температури. Тобто спочатку необхідно знайти аналітичну функцію для кінетики вологовмісту за різної температури сушильного агента, далі – за різної відстані від поверхні, а після цього встановити зв'язок між даними функціями.

Необхідно відмітити, що для кінетики вологовмісту додається ще один аргумент – початковий вологовміст.

В п.3.3 було наведено кінетику вологовмісту за різної температури сушильного агента (Рис.3.11). Експериментальні дані апроксимувались функцією виду:

$$w_{T_{d.a.}}(\tau) = w_0 \cdot \exp(-b_{T_{d.a.}} \cdot \tau^2), \quad (3.17)$$

де  $w_0$  – початковий вологовміст, кг/кг;

$b_{T_{d.a.}}$  – апроксимаційний коефіцієнт,  $c^{-2}$ .

Оскільки під час досліджень використовувалась одна і та ж сировина, то початковий вологовміст для всіх зразків однаковий, і функції кінетики вологовмісту (3.17) за різної температури сушильного агента відрізняються лише значеннями апроксимаційного коефіцієнту  $b_{T_{d.a.}}$ . Для отриманих апроксимаційних коефіцієнтів було отримано апроксимаційну функцію, яка представлена на рис.3.16 та має вид:

$$b_{T_{d.a.}}(T_{d.a.}) = b0_{T_{d.a.}} \cdot \exp(b1_{T_{d.a.}} \cdot T_{d.a.}), \quad (3.18)$$

де  $b0_{T_{d.a.}} = 2,447 \cdot 10^{-5} (c^{-2})$ ,  $b1_{T_{d.a.}} = 0,032 (°C)$  – апроксимаційні коефіцієнти.

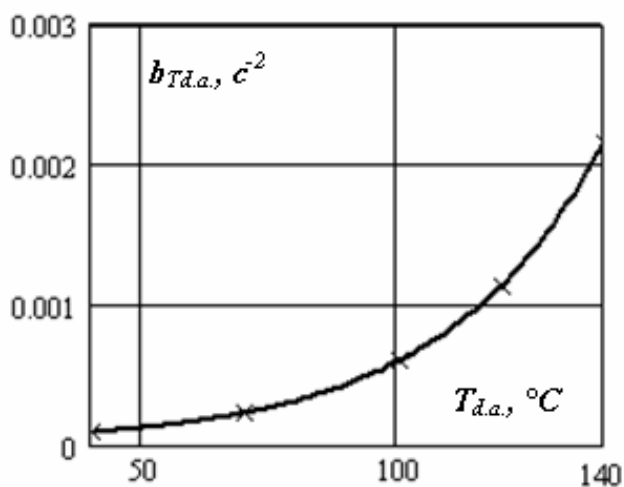


Рис.3.16 – Залежність коефіцієнтів  $b_{T_{d.a.}}$  від температури сушильного агента

Оскільки коефіцієнти (3.18) є функціями температури сушильного агента, то функція (3.17) є функцією часу та температури сушильного агента.

Під час визначення аналітичного виду функції, що описує кінетику вологовмісту в залежності від відстані від поверхні ФЄ, виникають труднощі з визначенням вологовмісту у визначених об'ємах всередині ФЄ. Тому для даних досліджень була використана наступна методика. Як було вказано вище, роботами з дослідження ЗТП-процесу показано [104-107], що температура матеріалу в цьому процесі має кілька характерних ділянок, що істотно відрізняють даний спосіб сушіння від інших теплових способів. Типовість таких термограм дає можливість проведення якісного аналізу, тобто може бути використана для реєстрації та опису характеру ЗТП-процесу.

Для визначення аналітичного виду функції, яка описує кінетику вологовмісту в залежності від відстані від поверхні ФЄ, вважається, що внутрішні елементарні об'єми сировини у ФЄ досягають кінцевого вологовмісту пізніше, ніж ті, які знаходяться під поверхнею. Тривалість досягнення відповідним об'ємом сировини кінцевого вологовмісту визначається за кінетикою температури відповідного шару. Тривалість, за якої температура сировини досягає значення температури сушильного агента, нами вважалась тривалістю зневоднення даного об'єму сировини, в якому розміщена термопара.

Необхідно відмітити, що оскільки масообмінні зазори ФЄ знаходяться лише на гранях з характерними розмірами  $l_1 \times l_2$  (п.3.4.3), тобто в площині  $Oy \times Oz$ , то зміну вологовмісту за координатами слід очікувати лише вздовж осі  $Ox$ . Таким чином, далі досліджується вологовміст шарів сировини всередині ФЄ елементарна товщина яких змінюється вздовж даної осі  $Ox$  (Рис.3.3).

За кінетиками температури (п.3.4.3, Рис.3.15) шарів сировини всередині ФЄ встановлено, що тривалість досягнення кінцевого вологовмісту шару, який знаходиться під поверхнею ФЄ, тобто на відстані 0 мм від поверхні ФЄ, складає 0,9 відн.од. від загальної тривалості сушіння; на відстані 5 мм – 0,96 відн.од.;

посередині характерного розміру  $l_3$  ( $l_3=20$  мм), тобто на відстані 10 мм від поверхні ФЄ, – дорівнює тривалості сушіння.

Далі, виходячи із тривалості зневоднення відповідного шару, будується за функцією

$$w_x(\tau) = w_0 \cdot \exp(-b_x \cdot \tau^2), \quad (3.19)$$

кінетика вологовмісту в залежності від відстані від поверхні ФЄ, представлена на рис.3.17, де  $b_x$  – апроксимаційний коефіцієнт ( $c^{-2}$ ). Кінетика вологовмісту пронормована на максимальний вологовміст.

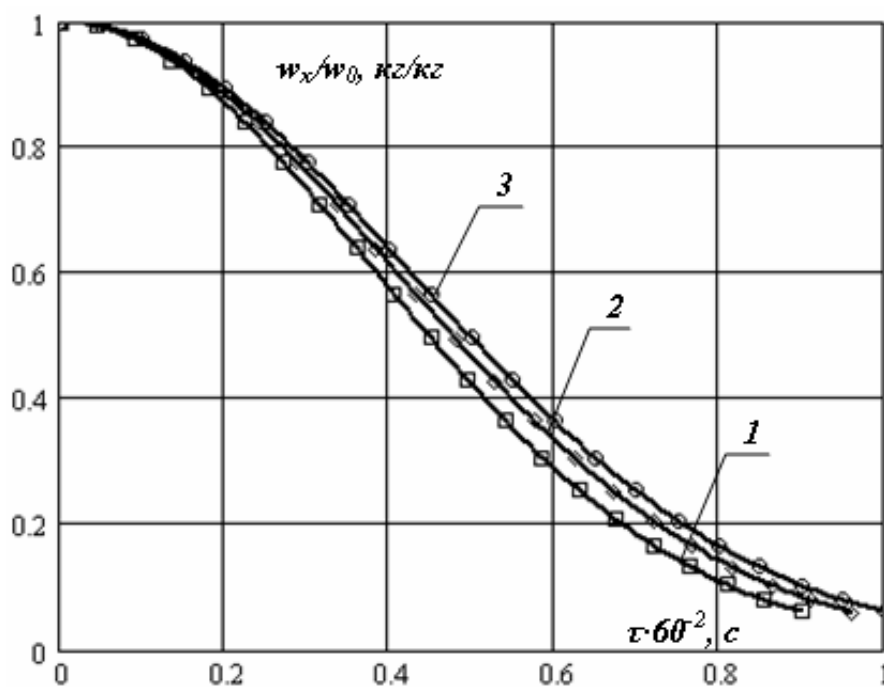


Рис.3.17 – Кінетика вологовмісту за різної відстані від поверхні ФЄ, мм: 1 – 0; 2 – 5; 3 – 10

Кінетика вологовмісту по іншу сторону від середини характерного розміру  $l_3$ , тобто на відстані від поверхні, що знаходиться в інтервалі від 10 до 20 мм, має такий же характер як в інтервалі від 10 до 0 мм, оскільки масообмінні зазори зроблені з обох сторін ФЄ (як на поверхні з координатою вздовж осі  $Ox$  рівною 0 мм, так і на поверхні з координатою 20 мм вздовж тієї ж осі).

Функції кінетики вологовмісту (3.19) за різної відстані від поверхні ФЄ відрізняються лише значеннями апроксимаційного коефіцієнту  $b_x$ . Для отриманих апроксимаційних коефіцієнтів було отримано апроксимаційну функцію, яка представлена на рис.3.18 та має вид:

$$b_x(x) = b0_x + b1_x \cdot \exp\left(-\frac{(x + b2_x)^2}{b3_x}\right). \quad (3.20)$$

де  $b0_x = -2,8$  ( $c^{-2}$ );  $b1_x = -0,67$  ( $c^{-2}$ );  $b2_x = -10 \cdot 10^{-3}$  (м);  $b3_x = 30 \cdot 10^{-6}$  ( $m^2$ ).

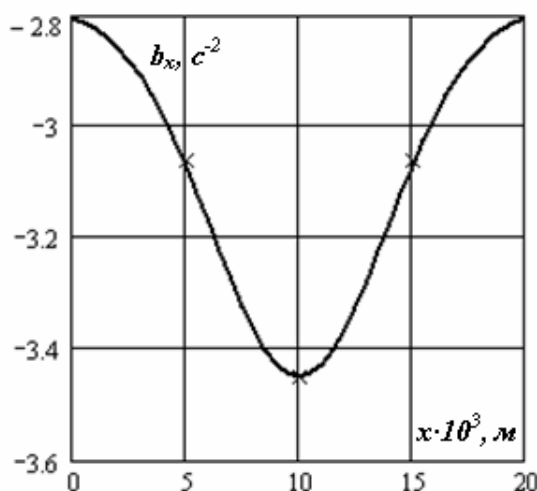


Рис.3.18 – Залежність коефіцієнтів  $b_x$  від відстані від поверхні ФЄ

Таким чином, враховуючи залежність коефіцієнта (3.20) від координати  $x$ , тобто від відстані від поверхні ФЄ вздовж осі  $Ox$ , – функція (3.19) є функцією координат та часу.

Функції (3.17) та (3.19) мають однаковий вид, але відрізняються вони набором аргументів: аргументами функції (3.17) є час та температура сушильного агента, а функції (3.19) – час та відстань від поверхні. Якщо навести відповідну кореляцію між коефіцієнтами (3.18) та (3.20), то для коефіцієнту (3.20) можна отримати наступну залежність від координати та температури сушильного агента:

$$b(x, T_{d.a.}) = \frac{2.8}{3.45} \cdot b_{T_{d.a.}}(T_{d.a.}) + \left( -4.762 \cdot 10^{-7} + 0.19 \cdot b_{T_{d.a.}}(T_{d.a.}) \cdot \exp\left(-\frac{(x-10)^2}{30}\right) \right) \quad (3.21)$$

Далі підставимо отримані коефіцієнти в функцію (3.19) та отримаємо апроксимаційну функцію для кінетики вологовмісту аргументами якої є час, температура сушильного агента та координата:

$$w(\tau, x, T_{d.a.}) = w_0 \cdot \exp(-b(x, T_{d.a.}) \cdot \tau^2) \quad (3.22)$$

Отримана функція необхідна для знаходження аналітичного вигляду таких величин, як коефіцієнт теплопровідності, теплоємність і густина сировини, та функції розподілення потужності внутрішніх джерел теплоти всередині ФЄ, оскільки вони визначаються вологовмістом сировини і, як наслідок, є функціями часу, координат та температури сушильного агента.

Теплоємність  $c$  сировини складається з суми теплоємностей її складових – сухих речовин сировини ( $c_{s.s.}$ ), повітря в її порах та між частинками сировини ФЄ ( $c_a$ ) і води ( $c_w$ ):

$$c = c_{s.s.} + c_a + c_w. \quad (3.23)$$

Оскільки теплоємність води значно більша за теплоємність сухих речовин та повітря, то далі вважалось, що теплоємність сировини визначається теплоємністю води яку вона утримує, тобто пропорційна вологовмісту сировини:

$$c \approx c_w = c_{wat} \cdot w(\tau, x, T_{d.a.}), \quad (3.24)$$



де  $c_{wat}$  – теплоємність води ( $\frac{Дж}{кг \cdot ^\circ C}$ ).

Густина сировини також є сумою густини сухих речовин, вологи та повітря:

$$\rho = \frac{m_{s.s.}}{V_{FC}} + \frac{m_a}{V_{FC}} + \frac{m_w}{V_{FC}}. \quad (3.25)$$

Оскільки густина води та сухих речовин значно більші за густину повітря, та враховуючи, що  $m_w = m_{s.s.} \cdot w(\tau, x, T_{d.a.})$ , далі вважалось, що густина сировини визначається за формулою:

$$\rho \approx \frac{m_{s.s.}}{V_{FC}} \cdot (1 + w(\tau, x, T_{d.a.})) = \rho_{s.s.} \cdot (1 + w(\tau, x, T_{d.a.})), \quad (3.26)$$

де  $\rho_{s.s.}$  – густина сухих речовин ( $\frac{кг}{м^3}$ ).

Теплопровідність сировини визначалась за формулою (3.4), причому необхідно враховувати, що еквівалентний коефіцієнт теплопровідності сировини змінюється в процесі сушіння через зменшення кількості вологи та заміщення її повітрям.

Коефіцієнт теплопровідності вологи пропорційний добутку коефіцієнта теплопровідності води ( $\lambda_w$ ) на вологовміст сировини:

$$\lambda_{вол.} \sim \lambda_w \cdot w(\tau, x, T_{d.a.}), \quad (3.27)$$

а теплопровідність повітря – добутку коефіцієнту теплопровідності повітря ( $\lambda_a$ ) на масову частку повітря у ФЄ  $w_a$ :

$$\lambda_{нов.} \sim \lambda_a \cdot w_a(\tau, x, T_{d.a.}), \quad (3.28)$$

Таким чином, кінетика масової частки повітря визначається кінетикою вологовмісту:

$$w_a(\tau, x, T_{d.a.}) = w_{0a} + w_0 - w(\tau, x, T_{d.a.}), \quad (3.29)$$

де  $w_{0a}$  – початковий вміст повітря у ФЄ, тобто до сушіння.

Функція розподілення внутрішніх джерел теплоти всередині ФЄ під час сушіння дорівнює нулю, оскільки внутрішні джерела теплоти під час ЗТП-сушіння відсутні.

Таким чином, встановлено аналітичний вид всіх функцій, що входять до рівняння (3.10). Програми розрахунку деяких із функцій наведені в додатках (Додаток А1).

#### 3.4.5. Визначення функції розподілення потужності дисипативних структур всередині ФЄ під час ЗТП-сушіння

Далі після підстановки у рівняння (3.10) виразів (3.16), (3.22), (3.24), (3.26) та (3.4) з урахуванням (3.27-3.29) було отримано аналітичний вид функції розподілення потужності дисипативних структур всередині ФЄ під час ЗТП-сушіння  $f_d(\tau, x, T_{d.a.})$ .

Функція  $f_d(\tau, x, T_{d.a.})$  занадто громіздка для наведення її в тексті, тому наведено графіки функції розподілення потужності дисипативних структур досліджуваної сировини в залежності від температури сушильного агенту (Рис.3.19) та відстані від поверхні ФЄ (Рис.3.21), отримані за розрахованим аналітичним виразом даної функції. Сировиною, для якої отримані дані розподілення, є гречана крупа після проварювання. Для отримання аналогічних графіків розподілень для іншої сировини, необхідно в рівнянні (3.10)

використовувати відповідні початковий вологовміст, теплоємність, густину та теплопровідність сировини.

На рис.3.19 представлені кінетика температури сировини та розвиток потужності дисипативних структур на глибині 10 мм за температури сушильного агента 40, 100 та 140°C.

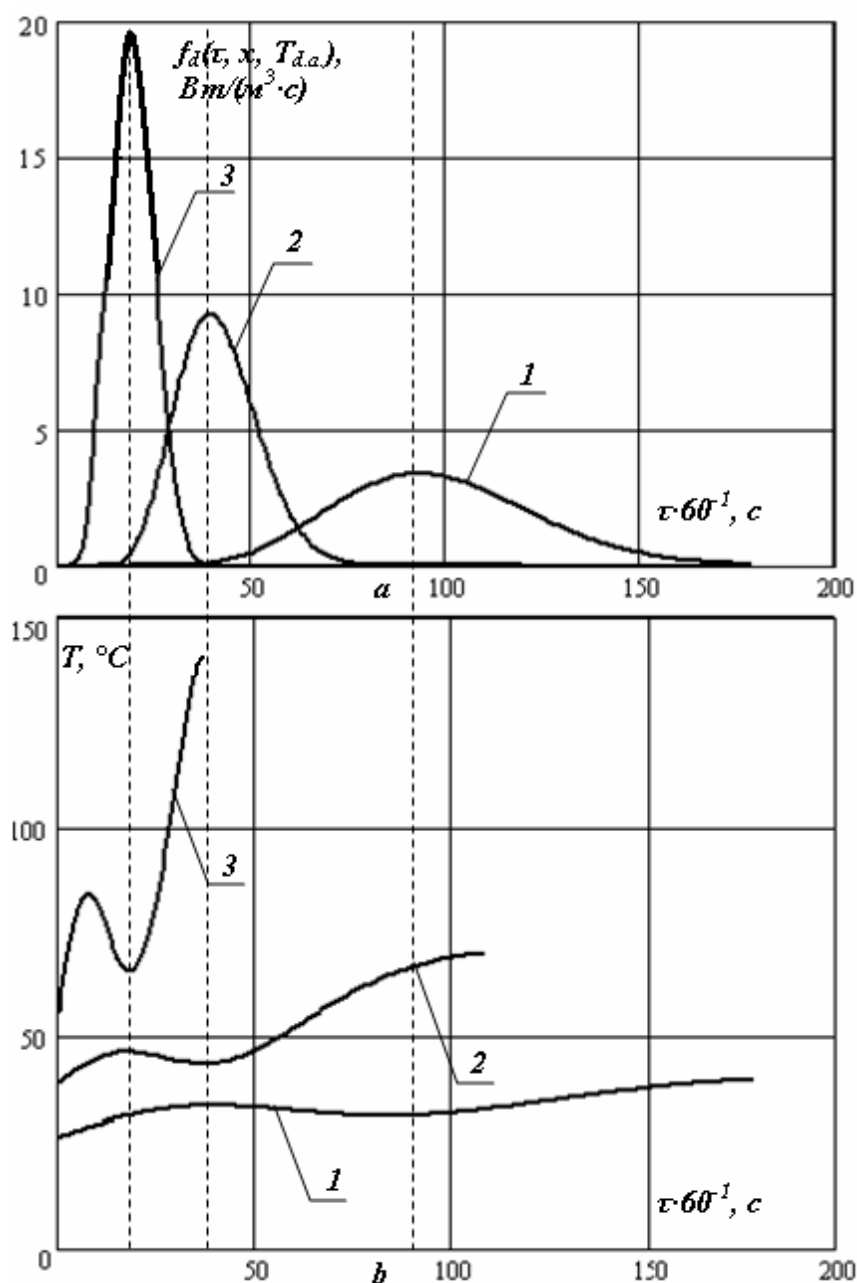


Рис.3.19 – Кінетика температури сировини (b) та функція розподілення потужності дисипативних структур (a) на відстані 10 мм ( $x=10\text{мм}$ ) від поверхні ФС за різної температури сушильного агента, °C: 1 – 40; 2 – 70; 3 – 140

З наведених кривих видно, що максимум функції розподілення дисипативних структур припадає на мінімум температури. Розвиток дисипативних структур супроводжується збільшенням площі випаровування, що сприяє збільшенню інтенсивності випаровування вологи, в результаті чого зменшується температура сировини.

Необхідно відмітити: за збільшення температури також збільшується максимум розподілення, тобто збільшується максимум функції  $f_d(\tau, x, T_{d.a.})$  (Рис.3.20), що відображається на тривалості зневоднення – тривалість зневоднення за температури 140°C менша за тривалість сушіння за температури сушильного агента 40°C.

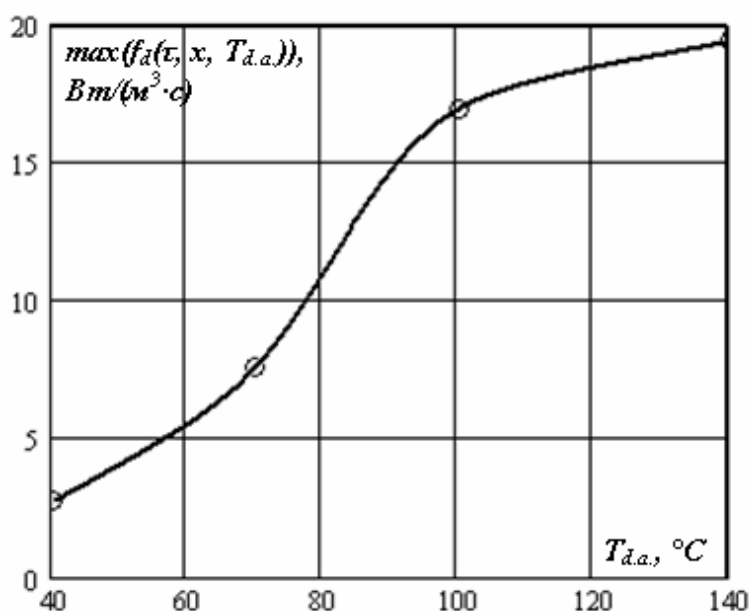


Рис.3.20 – Залежність максимуму функції розподілення дисипативних структур від температури сушильного агента

З рис.3.21, на якому наведено кінетику температури сировини та розвиток потужності дисипативних структур на різній відстані від поверхні ФЄ, видно, що інтенсивність випаровування тим більша, чим ближче координата до середини ФЄ, при цьому значення мінімуму температури найменше для координати 10 мм.

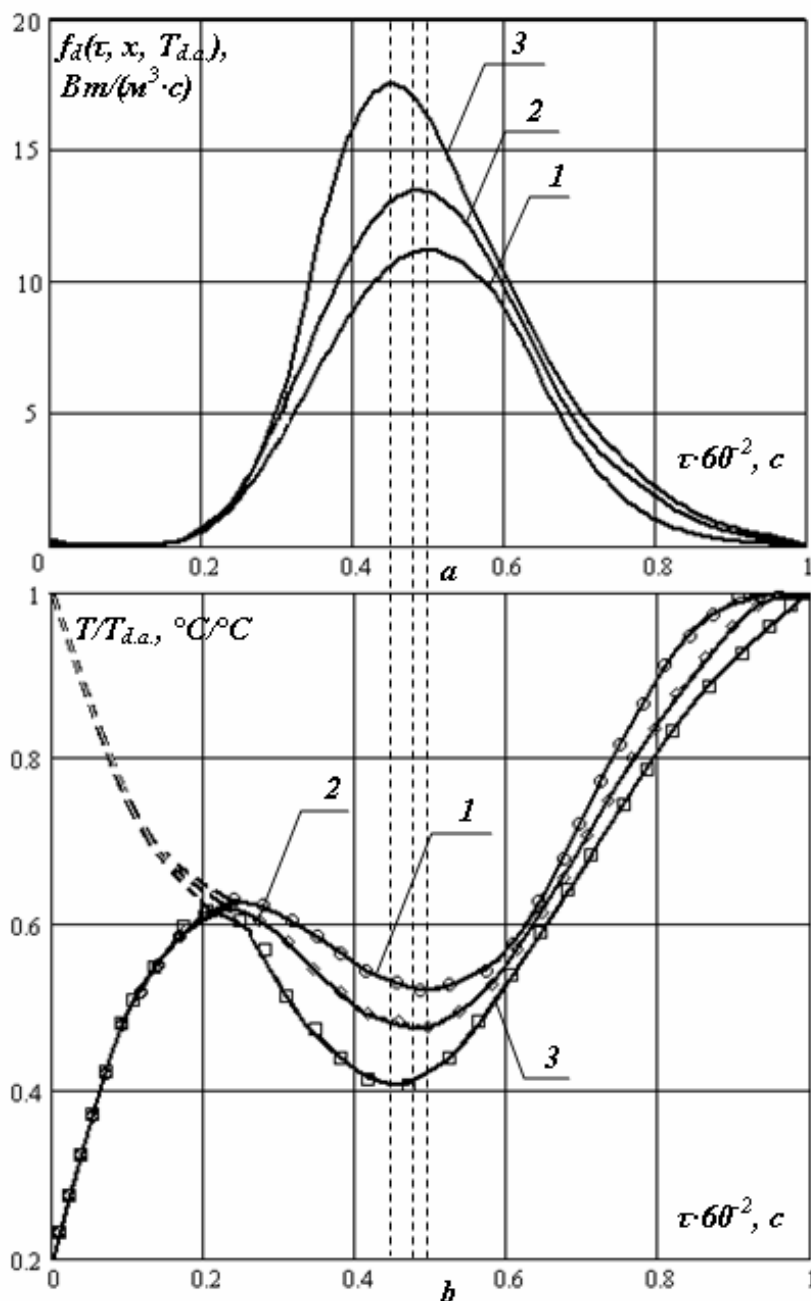


Рис.3.21 – Кінетика температури сировини (b) та функція розподілення потужності дисипативних структур (a) за температури сушильного агента  $100^{\circ}C$  на різній відстані від поверхні ФЄ, мм: 1 – 0; 2 – 5; 3 – 10

З характеру функції розвитку потужності дисипативних структур витікає той же результат: максимум для координати 10 мм має найбільшу величину і, як наслідок інтенсивність випаровування по центру ФЄ повинна бути максимальною, знижуючись за наближення до поверхні (Рис.3.22).

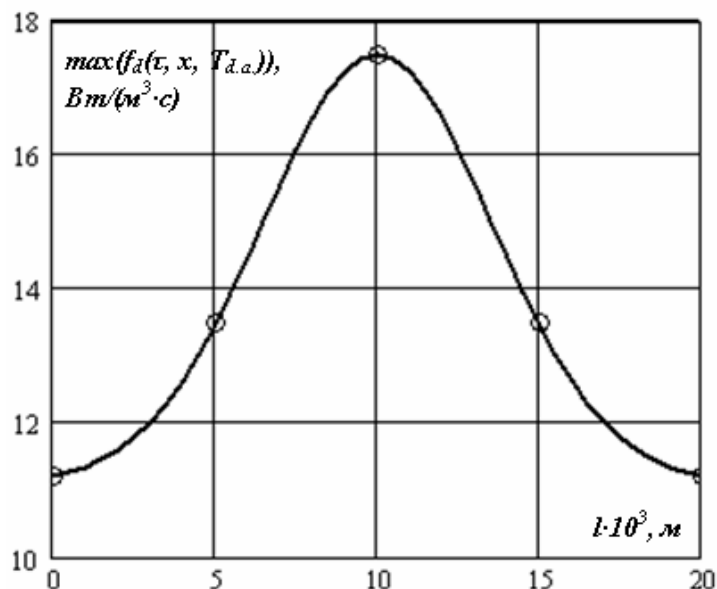


Рис.3.22 – Залежність максимуму функції розподілення дисипативних структур від товщини ФЄ

Утворення та розвиток таких дисипативних структур супроводжується розвитком пористості оброблюваної сировини.

Отримані теоретичні результати співпадають та пояснюють результати експериментальних досліджень. Таким чином, розроблену математичну модель для розвитку потужності дисипативних структур можна вважати допустимою для описання таких особливостей ЗТП-сушіння як характерний мінімум кінетики температури та розвинення пористості в процесі зневоднення.

Практичну значимість використання розробленої математичної моделі можна показати на прикладі. Отримаємо функції розподілення потужності дисипативних структур під час ЗТП-сушіння для різної товщини ФЄ. Проведемо розрахунок для товщини (координати  $x$ ), яка дорівнює 20, 40 та 60 мм. Температура сушильного агента дорівнює  $100^\circ\text{C}$ , теплофізичні характеристики сировини аналогічні характеристикам гречаної крупи після проварювання.

На рис.3.23 наведено отримані результати у вигляді залежності значення максимуму функції розподілення потужності дисипативних структур від товщини ФЄ за різної її величини (20, 40 та 60 мм). Координата  $x$  на графіку

пронормована на значення товщини ФЄ, причому кожна залежність на свою товщину. Нормування проводилось для більш наочного порівняння характеристик наведених залежностей.

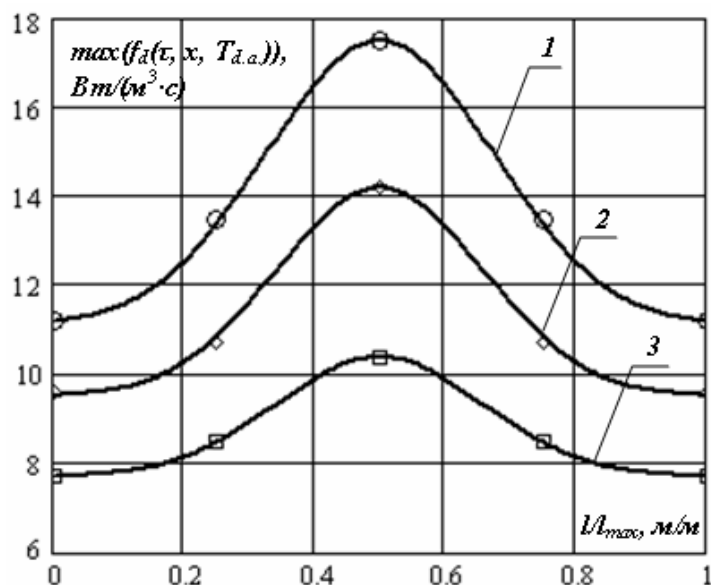


Рис.3.23 – Залежність максимуму функції розподілення дисипативних структур від товщини ФЄ для значень товщини, мм: 1 – 20; 2 – 40; 3 – 60

З наведених результатів видно: залежності по мірі збільшення товщини ФЄ зміщуються відносно осі, на якій відкладено максимуми функції розподілення потужності дисипативних структур, в сторону менших значень, що свідчить про зменшення розвитку поверхні випару і, як наслідок, приводить до зменшення інтенсивності зневоднення сировини. В результаті цього тривалість сушіння зростає. Даний висновок підтверджують кінетики сушіння сировини за різної товщини ФЄ (Рис.3.9). Також необхідно відмітити, що по мірі збільшення товщини ФЄ зменшується різниця між максимумами функції розподілення для сировини під поверхнею та в центрі ФЄ, що свідчить про віддалення характеру процесу зневоднення від ЗТП-сушіння та наближення до конвективного. Зменшення значення максимуму функції розподілення потужності дисипативних структур свідчить про зменшення розвитку пористої структури отриманого продукту, таким чином, варіюючи товщиною ФЄ можна розрахувати таке її значення, при якому кінцевий продукт буде мати

необхідну пористість. Тобто існує можливість керувати пористістю за допомогою даної функції.

Із проведених розрахунків також можна знайти тривалість сушіння сировини у ФЄ з різною товщиною. На рис.3.24 наведено зміну функції розподілення потужності дисипативних структур з часом для центрального шару сировини у ФЄ. Координата  $x$  центрального шару сировини для ФЄ з товщиною 20 мм дорівнює 10 мм, з товщиною 40 мм – 20 мм, з товщиною 60 мм – 30 мм. Оскільки останнім шаром сировини, який досягає кінцевого вологовмісту під час зневоднення у ФЄ, є центральний, то тривалістю процесу сушіння вважався час, за якого функція розподілення потужності дисипативних структур досягає нуля.

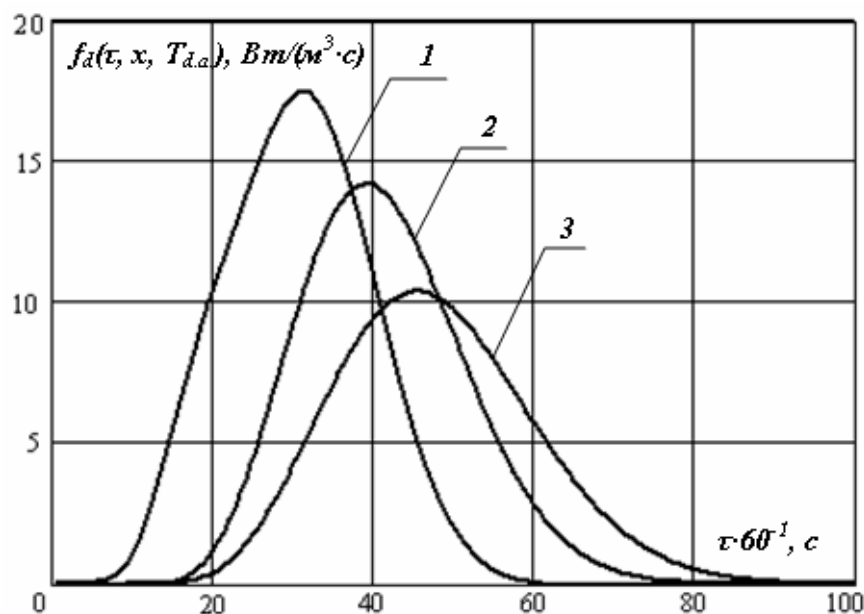


Рис.3.24 – Функція розподілення потужності дисипативних структур в центральному шарі сировини за різної товщини ФЄ, мм: 1 – 20; 2 – 40; 3 – 60

Так для сушіння сировини, теплофізичні характеристики якої аналогічні характеристикам гречаної крупи після проварювання, за температури сушильного агента 100°C розрахована тривалість процесу дорівнює: для 20 мм – 60 хв., для 40 мм – 75 хв., для 60 мм – 85 хв. Отримане співпадає з експериментальними результатами, отриманими із кінетики сушіння (Рис.3.9) гречаної крупи після проварювання.



Таким чином, практична значимість розробленої математичної моделі полягає у можливості її використання під час модернізації розробленого в даній роботі апарату або розробки нового шляхом моделювання процесу сушіння круп після проварювання з варіюванням як внутрішніми чинниками процесу ЗТП-сушіння (теплофізичні характеристики сировини), так і зовнішніми (товщина ФЄ, температура сушильного агента).

#### **4. ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ШВИДКОВІДНОВЛЮВАНИХ КАШ, ОТРИМАНИХ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИНЦИПІВ ЗТП-СУШІННЯ**

Внаслідок того, що сушіння є необоротним термодинамічним процесом, необоротні зміни відбуваються не тільки на рівні системи сушильний агент – фазовий перехід рідини, але й у сировині, що зневоднюється. В процесі зневоднювання змінюються фізико-хімічні характеристики вихідної сировини такі як густина, теплоємність, пружність, пористість, хімічний склад та ін. При цьому головним завданням під час визначення раціональних режимів проведення процесу сушіння є вибір таких режимів і умов, які забезпечили б максимальне збереження властивостей вихідної сировини або відповідного натурального напівфабрикату із цієї сировини.

Основними характеристиками, що досить об'єктивно дають оцінку якості сушеної продукції рослинного походження та правильність вибору раціональних режимів зневоднювання є органолептичні та фізико-хімічні показники.

Продукція, отримана за розробленим способом, після відновлення представляє собою густу в міру однорідну кашу, яка може використовуватись як гарнір для других блюд. Органолептичні показники для отриманої продукції визначались відповідно до ДСТУ 1055:2006 «Крупи, що швидко розварюються». Органолептичні показники, а саме: зовнішній вигляд, колір, смак, запах, задовольняють нормам.

Основними фізико-хімічними показниками для розроблених швидковідновлюваних каш є: гігроскопічні властивості, пористість, відновлюваність, мікробіологічні показники та вміст токсичних елементів і радіонуклідів [29, 146].

#### 4.1. Дослідження гігроскопічних властивостей швидковідновлюваних каш, отриманих з використанням принципів ЗТП-сушіння

Здатність сушених харчових продуктів тривалий час не змінювати свої властивості багато в чому визначається їхніми гігроскопічними властивостями, тобто здатністю віддавати або поглинати пару води з навколишнього середовища. Перебуваючи в атмосфері вологого повітря, сушений продукт може обмінюватися масою із зовнішнім середовищем. Якщо парціальний тиск пари води біля поверхні продукту більше парціального тиску пари в повітрі, то відбувається випар (десорбція), а маса й вологовміст продукту зменшуються, якщо ж співвідношення парціальних тисків зворотне – то відбувається зволоження продукту (сорбція) – маса й вологовміст продукту збільшуються. При цьому продукт характеризується рівноважним вологовмістом – тиск пари води над поверхнею та в атмосфері вирівнюється. Ці процеси відіграють важливу роль під час зберігання сушеної продукції і ними визначаються умови та терміни зберігання.

Об'єктами дослідження [147, 148] були швидковідновлювані каші отримані гідротермічною обробкою гречаної, пшоняної, ячмінної та пшеничної круп з використанням принципів ЗТП-сушіння.

Для вивчення сорбції та визначення рівноважного вологовмісту швидковідновлюваних каш використовували тензометричний метод. Досліджуваний зразок поміщали в ексикатори з фіксованим значенням відносної вологості повітря  $\varphi$ . Всі ексикатори витримувались за постійної температури навколишнього середовища протягом вимірів (23°C). Тривалість перебування продукту в ексикаторі визначалася досягненням зразком постійної маси. Ізотерми сорбції швидковідновлюваних каш (гречаної, пшоняної, ячмінної, пшеничної) представлені на рис.4.1.

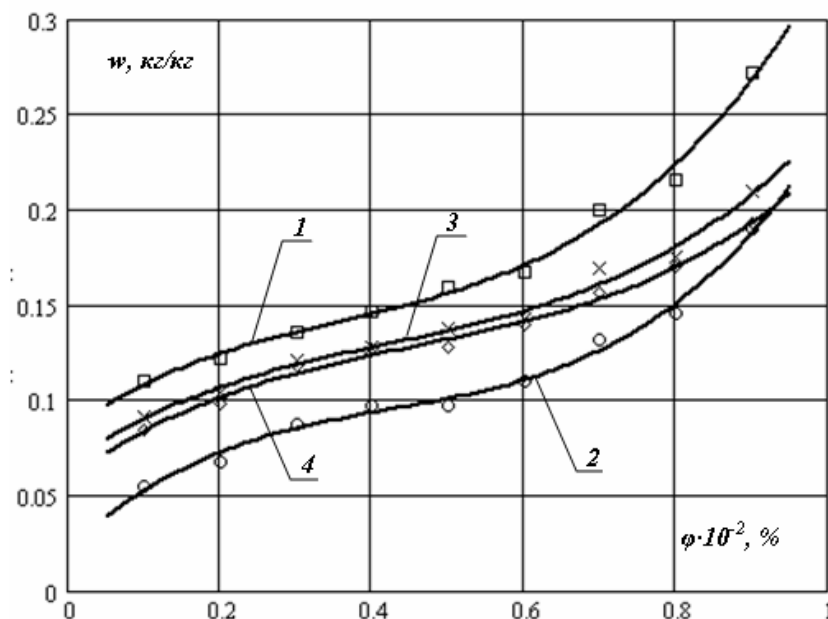


Рис.4.1 – Ізотерми сорбції швидковідновлюваних каш, отриманих гідротермічною обробкою з використанням принципів ЗТП-сушіння круп: 1 – гречана; 2 – пшоняна; 3 – ячмінна; 4 – пшенична

В діапазоні відносної вологості від 10 до 80 % зразки перебувають в області мономолекулярної та полімолекулярної сорбції. При подальшому збільшенні вологості відбувається поглинання води мікрокапілярами та набухання зразків. Для зразків швидковідновлюваних каш характер ізотерм не має яскраво вираженої асимптоти паралельної осі вологовмісту. Подальше зволоження таких зразків можливо при безпосередньому зіткненні з рідиною. Отриманий результат вказує на можливість їх тривалого зберігання в полімерній упаковці за відносної вологості не більше 75%, а при відносній вологості більше 75% зберігання можливе лише у паронепроникній тарі. Отриману продукцію рекомендується зберігати за температури від 0°C до 25°C за відносної вологості повітря не більше 75%. Строк зберігання за вказаних умов 12 місяців від дати виготовлення.

Ізотерма сорбції для швидковідновлюваної каші із гречаної крупи знаходиться вище ізотерм двох інших досліджуваних зразків, а найнижчою є ізотерма для пшоняної швидковідновлюваної каші. Пояснюється отриманий результат різною пористістю каш, яка досліджується нижче.

## 4.2. Дослідження стану вологи швидковідновлюваних каш методом ЕПР-спінових міток

Поведінка ізотерм сорбції наведених на рис.4.1 має складну функціональну залежність, тому для з'ясування причин такого характеру, а також для наведення кореляції між термодинамічними та молекулярно-кінетичними методами дослідження вологи харчової сировини та продуктів, були проведені дослідження вологи швидко відновлюваних каш методом ЕПР-спінових міток.

Як досліджуваний об'єкт використовувалась швидковідновлювана каша, отримана гідротермічною обробкою гречаної крупи за допомогою сушіння змішаним теплопідводом. Зразки каші витримувались за різної відносної вологості, яка змінювалась в діапазоні від 10 до 90%, до досягнення ними рівноважного вологовмісту. Як спінова мітка використовувався іон  $Mn^{+2}$  солі  $MnSO_4$  [149]. Спектри отримували на спектрометрі PE-1301.

Спектрометр ЕПР являє собою пристрій для виявлення магнітних переходів. Монохроматичне електромагнітне випромінювання подають на зразок і спостерігають за змінами інтенсивності випромінювання, що пройшло через зразок за допомогою відповідного детектора. Поглинання буде відбуватися тільки в тому випадку, коли енергія кванта падаючого випромінювання дорівнює відстані між рівнями енергії.

Блок-схема спектрометра наведена на рис.4.2, де показане також призначення окремих груп пристроїв, що його складають. Група, названа «Блок джерела НВЧ-випромінювання», включає пристрої, що управляють частотою й інтенсивністю мікрохвильового пучка або вимірюють ці параметри. «Система резонатора» складається із пристроїв, призначених для розміщення зразка, а також для напрямку й контролю мікрохвильового пучка, що падає на зразок, і виходить із резонатора. «Системи детектування й модуляції» приймають, підсилюють і реєструють сигнал. Нарешті, «Система магніту» забезпечує

стабільне однорідне магнітне поле довільної інтенсивності, що лінійно змінюється.

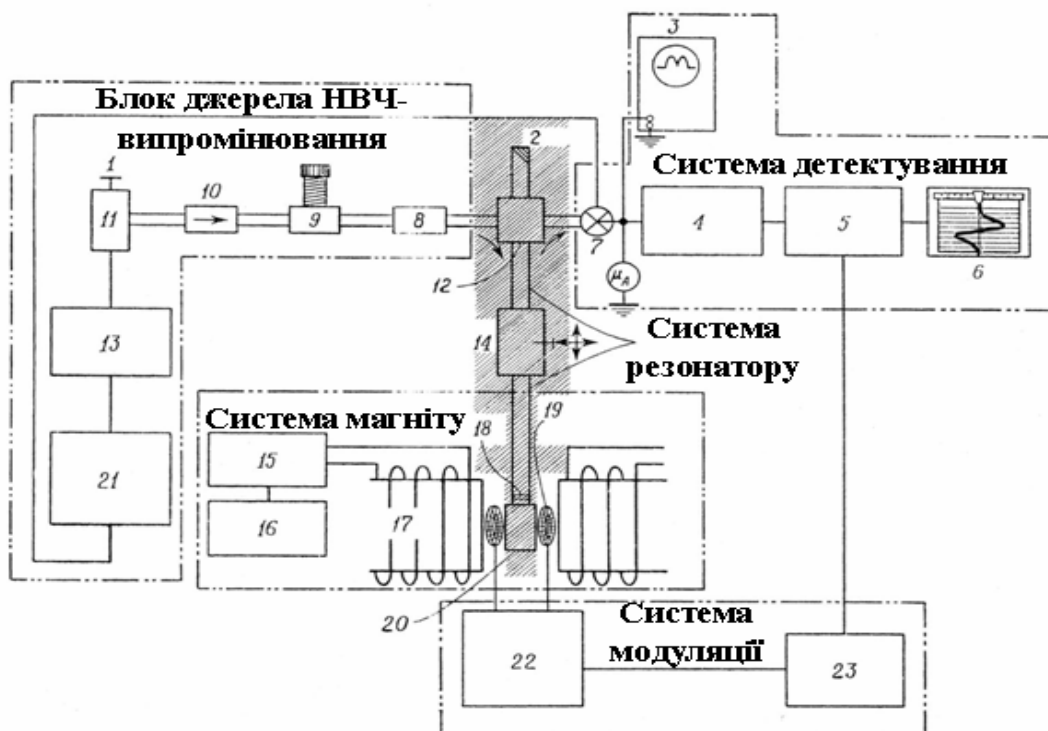


Рис.4.2 – Блок-схема ЕПР-спектрометра: 1 – регулювання клістрону; 2 – кінцеве навантаження; 3 – осцилограф; 4 – підсилювач сигналу; 5 – детектор сигналу; 6 – самопис; 7 – кристалічний детектор; 8 – атенюатор; 9 – хвилемір; 10 – вентиль; 11 – клістрон; 12 – циркулятор; 13 – блок живлення клістрона; 14 – узгоджувач; 15 – джерело живлення магніту; 16 – блок сканування поля; 17 – електромагніт; 18 – отвір зв'язку; 19 – котушка модуляції; 20 – резонатор; 21 – автоматичне підстроювання частоти; 22 – підсилювач; 23 – ВЧ-генератор.

Спектр ЕПР спінміченого матеріалу складається з двох [150, 151]: спектра, який представляє собою 6 піків однакової ширини, та спектра, який складається із однієї широкої лінії. 6-піковий спектр – це спектр, який дає перехідний іон  $Mn^{2+}$  солі  $MnSO_4$ , коли він знаходиться в розчині; 1-піковий – відповідає кристалічному стану солі  $MnSO_4$ . Виходячи із цього можна вважати, що площа під 6-піковим сигналом ( $S_{6p}$ ) пропорційна кількості спінів електронів

$Mn^{2+}$ , які знаходяться в розчині, а площа під 1-піковим ( $S_{1p}$ ) – кількості спінів електронів  $Mn^{2+}$ , які випали в осад через недостатню кількість розчинника. Таким чином, розраховуючи площі під сигналами, можна дослідити кількість вологи досліджуваного об'єкта, яка виконує роль розчинника, та кількість вологи, яка не розчинює сіль.

На рис.4.3 наведено енергію зв'язку вологи для різних вологовмісту зразка та площі під 6-піковим сигналом ЕПР. Енергія зв'язку розрахована за формулою [152]:

$$E_b = -RT \ln\left(\frac{p_s}{p_m}\right), \quad (4.1)$$

де  $R$  – універсальна газова стала,  $\frac{Дж}{моль \cdot К}$ ;

$p_s$  – тиск насиченої пари об'ємної вологи,  $Па$ ;

$p_m$  – парціальний тиск пари над поверхнею матеріалу,  $Па$ ;

$T$  – температура системи,  $К$ .

Вологовміст та площа під ЕПР-сигналом пронормовані на максимальну величину для наочності порівняння отриманих результатів.

З рисунку видно, що характер кривих в діапазоні енергій від  $6 \cdot 10^3$  до  $3 \cdot 10^3$  Дж/моль, який відповідає моно- та полімолекулярній сорбції, – однаковий, але за збільшення кількості води в зразках (волога мікрокапілярів), відповідно за зменшення її енергії зв'язку з матеріалом, характер – різний. Відмінність в поведінці кривих пояснюється високою чутливістю ЕПР-мітки до найближчого її оточення: кількість вологи стає такою, що сигнал в основному визначається розчинністю солі, яка використовується для отримання ЕПР-сигналу.

Необхідно відмітити, що хімічний склад традиційних зернових культур наступний: так вміст жирів коливається від 1,9 до 3,3%, вміст вуглеводів – 66,5 до 67,8%, вміст білків – від 11,5 до 12,6%. При цьому вміст крохмалю складає приблизно 60% від загальної маси сировини. Таким чином, можна припустити,

що поведінка вологи досліджуваних об'єктів модулюється саме властивістю крохмалю її утримувати.

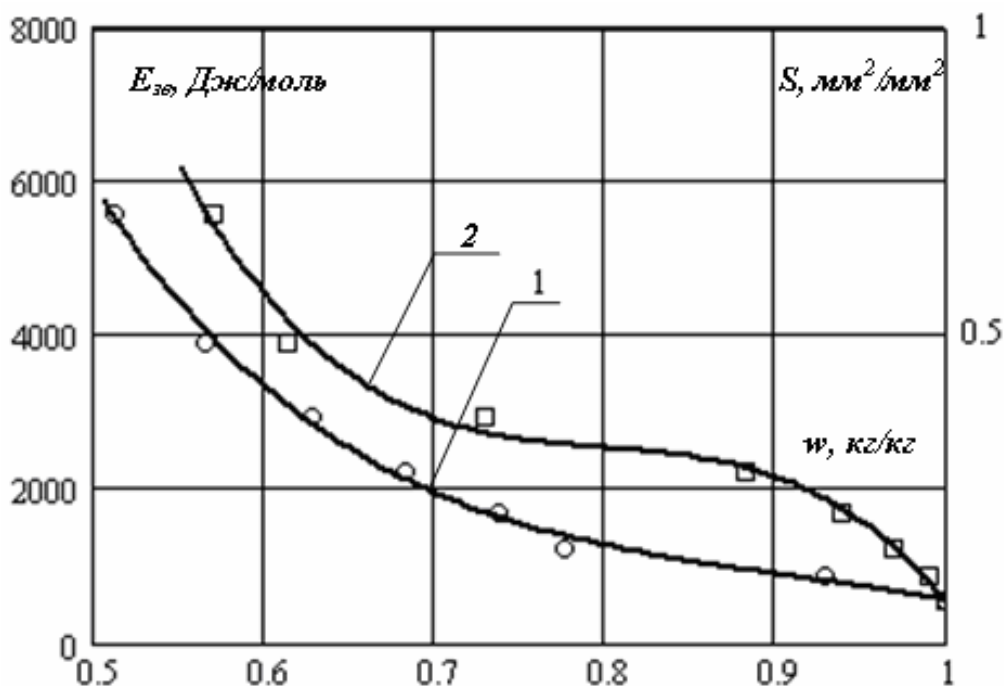


Рис.4.3 – Енергія зв'язку вологи за рівноважного вологовмісту зразків (1) та площі під 6-піковим ЕПР-сигналом (2)

Таким чином, були проведені дослідження властивостей саме крохмалю утримувати вологу.

Зразки готувались наступним чином: заварювали крохмальний клейстер визначеної концентрації, далі ємність з клейстером поміщали в калориметричну камеру з температурою нижче  $-10^{\circ}\text{C}$ . В таких умовах зразки витримувались впродовж 24 годин. Після цього їх розморожували і отримували крохмальну губку. Як рідина для заварювання клейстеру використовувався розчин солі  $\text{MnSO}_4$ . В дослідженнях використовувались зразки з мольною концентрацією крохмалю,  $\cdot 10^7$  (моль крохмалю)/(моль води): 1,1; 1,9; 4.

Під час досліджень зразки по черзі розміщали в резонатор ЕПР-спектрометра та висушували до рівноважного вологовмісту ( $\approx 10\%$ ). В процесі сушіння безперервно реєстрували сигнал ЕПР.

В результаті сушіння площа під 6-піковим сигналом ( $S_{6p}$ ) (а) та площа під 1-піковим ( $S_{1p}$ ) (б) змінювались з вологовмістом для зразків з мольною



концентрацією:  $\cdot 10^7$  (моль крохмалю)/(моль води): 1,1; 1,9; 4, як показано, відповідно, на рис.4.4, 4.5, 4.6.

З наведених рисунків видно, що характер кривих для мольних концентрацій крохмалю у губці однаковий. Так для 6-пікового сигналу: по мірі зменшення вологовмісту, відносно початкового,  $S_{6p}$  зменшується до досягнення певних величин вологовмісту, за яких мають місце локальні мінімум та максимум кривої. При подальшому зменшенні вологовмісту локальних екстремумів не має. Для 1-пікового сигналу залежність зворотна.

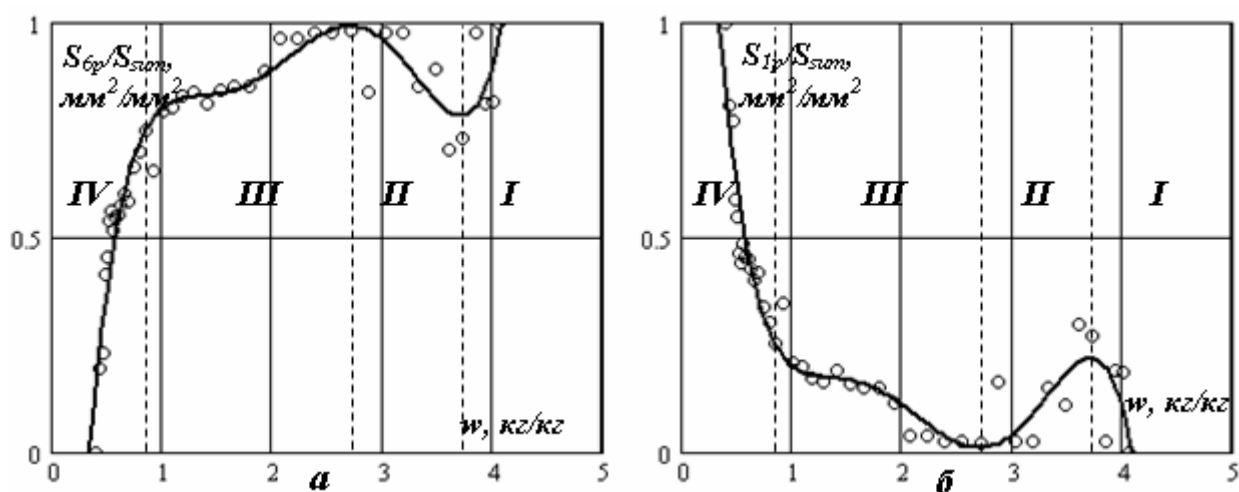


Рис.4.4 – Площа під 6-піковим (а) та 1-піковим (б) ЕПР-сигналом губки з мольною концентрацією  $1,1 \cdot 10^7$  (моль крохмалю)/(моль води) під час сушіння

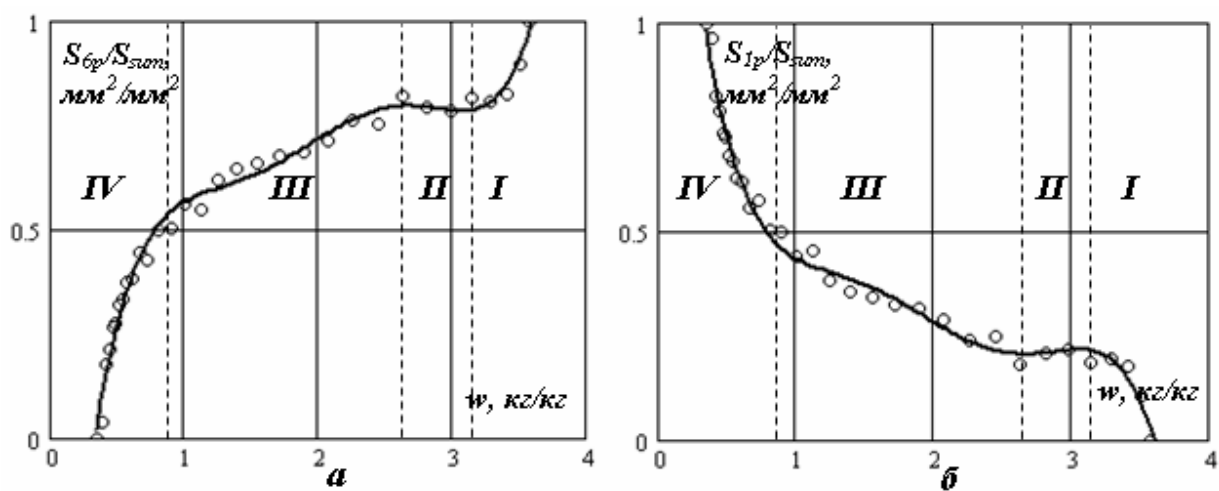


Рис.4.5 – Площа під 6-піковим (а) та 1-піковим (б) ЕПР-сигналом губки з мольною концентрацією  $1,9 \cdot 10^7$  (моль крохмалю)/(моль води) під час сушіння

Кожну із кривих можна розбити на 4 характерні ділянки.

На першій ділянці відбувається інтенсивне видалення вологи з поверхні матеріалу та підігрів зразка сушильним агентом. Через зменшення кількості системної вологи, зменшується кількість солі, яка знаходиться в розчині, результатом чого є зменшення  $S_{6p}$  та збільшення  $S_{1p}$ .

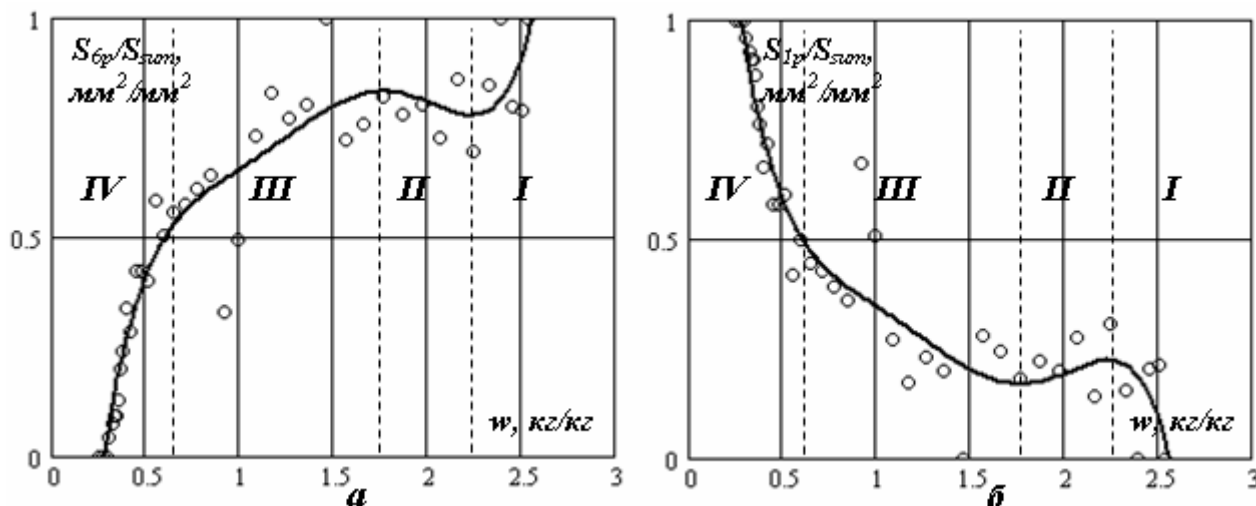


Рис.4.6 – Площа під 6-піковим (а) та 1-піковим (б) ЕПР-сигналом губки з мольною концентрацією  $4,0 \cdot 10^{-7}$  (моль крохмалю)/(моль води) під час сушіння

На другій ділянці видалення вологи продовжується, але розчинна здатність системної вологи збільшується через підвищення температури і кількість розчиненої солі  $MnSO_4$ , а відповідно і іонів  $Mn^{2+}$  в розчині, зростає. В результаті цього  $S_{6p}$  збільшується, а  $S_{1p}$  – зменшується.

Третя ділянка відповідає видаленню вологи змочування:  $S_{6p}$  монотонно зменшується, а  $S_{1p}$  – монотонно збільшується.

На четвертій ділянці відбувається збільшення кута нахилу кривої до осі вологовмісту. Пояснюється це тим, що мітка, тобто іон  $Mn^{2+}$ , є найбільш чутливою до найближчого свого оточення, а оскільки характер кривих стає більш різким, то це свідчить про видалення вологи із макро та мікрокапілярів, а також частини вологи полімолекулярної сорбції.

Оскільки дослідження вологи проводиться у даному випадку непрямим способом, тобто досліджується стан та оточення мітки, то на перших двох ділянках дослідження системної вологи ускладнене зміною розчинності солі  $MnSO_4$ . Таким чином, якісні дослідження вологи проводились лише на третій та четвертій ділянках. Необхідно відмітити, що дослідження проводилось для кожної ділянки окремо, оскільки чутливість мітки на них різна.

ЕПР спектри отримувались під час сушіння вологих зразків, тобто досліджувалась кінетика процесу видалення вологи, тому кількість молів води на третій та четвертій ділянках визначалась за формулами:

$$v_{w3}(\tau) = v_{w3}(\tau) \cdot A_{13}(v_{w3}) + v_{w3}(\tau) \cdot A_{23}(v_{w3}), \quad (4.2)$$

$$v_{w4}(\tau) = v_{w4}(\tau) \cdot A_{14}(v_{w4}) + v_{w4}(\tau) \cdot A_{24}(v_{w4}), \quad (4.3)$$

де  $A$  з індексом «1» відповідає частині вологи, яка є розчинником, а з індексом «2» частині води яка не розчиняє сіль  $MnSO_4$ .

Коефіцієнти  $A$  є тангенсами кута нахилу апроксимаційних прямих на відповідних ділянках кривих, які описують зміну площі під б-піковим та 1-піковим ЕПР-сигналами під час сушіння вологого зразка:

$$\begin{aligned} A_{13} &= \operatorname{tg} \alpha_{13}; A_{14} = \operatorname{tg} \alpha_{14}; \\ A_{23} &= \operatorname{tg} \alpha_{23}; A_{24} = \operatorname{tg} \alpha_{24}. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Приклад знаходження апроксимаційних прямих наведений на рис.4.7.

Величини розрахованих коефіцієнтів наведені в табл.4.1.

В таблиці наведені лише коефіцієнти з індексом «1», коефіцієнти з індексом «2» мають такі ж значення з протилежним знаком, оскільки експериментальні дані нормуються на сумарну площу і сума площі під б-піковим сигналом та площі під 1-піковим сигналом дорівнює одиниці за будь-якого поточного вологовмісту в процесі сушіння.

Значення коефіцієнтів  $A$  за різної мольної концентрації крохмалю в зразках

Концентрація, (моль крохмалю)/(моль води):	$A_{13}$	$A_{23}$
$1,1 \cdot 10^{-7}$	0,121	1,439
$1,9 \cdot 10^{-7}$	0,164	1,552
$4,0 \cdot 10^{-7}$	0,297	1,672

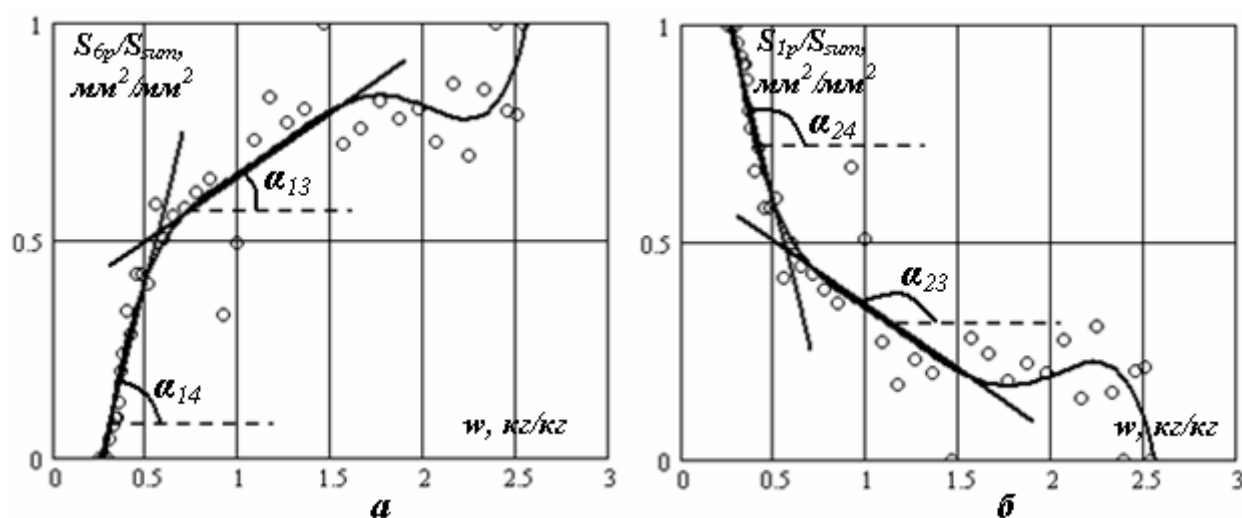


Рис.4.7 – Приклад знаходження коефіцієнтів  $A_i$  за апроксимаційними функціями

З наведених в таблиці даних видно, що тангенс кута нахилу як третьої, так і четвертої ділянок по мірі збільшення мольної концентрації зростає. По мірі збільшення кількості молекул крохмалю в одиниці об'єму зразка збільшується площа поверхні отримуваної крохмальної губки, в результаті чого збільшується кількість води моно та полімолекулярної сорбції, а також води мікро та макрокапілярів, а кількість води, яка виконує роль розчинника зменшується. Це свідчить про динамічну поведінку форм води у матеріалі, їх кількість змінюється в залежності від загальної кількості системної води та, очевидно, самого матеріалу та зовнішніх умов.

Також необхідно відмітити, що кількість та поведінка води під час сушіння для крохмальутримуючої сировини буде визначатися величиною молекул крохмалю, тобто його молярною масою.

#### 4.3. Дослідження пористості швидковідновлюваних каш, отриманих традиційними способами, та з використанням принципів ЗТП-сушіння

Пористість досліджувалась шляхом визначення диференціальних функцій розподілу пор за радіусами [135, 153]. Дані функції визначались за ізотермами сорбції досліджуваних зразків [133] (швидковідновлюваних каш, отриманих гідротермічною обробкою гречаної, пшоняної; пшеничної круп з використанням принципів ЗТП-сушіння) за формулами (2.2)-(2.5) та представлені на рис.4.8.

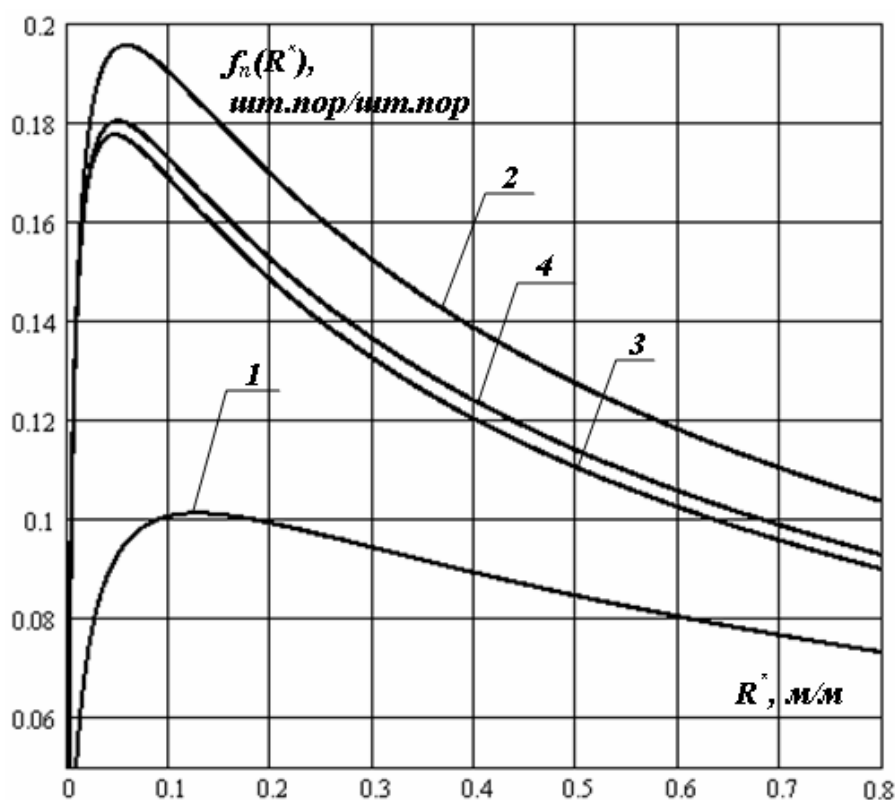


Рис.4.8 – Диференціальні функції розподілу пор за радіусами для швидковідновлюваних каш: 1 – гречаної; 2 – пшоняної; 3 – ячмінної; 4 – пшеничної

Отримані функції розподілу мають схожий характер та близькі положення максимумів відносно осі, на якій відкладено безрозмірний радіус пор. Відрізняються вони шириною ліній, це свідчить про те, що зразки відрізняються різною відносною кількістю пор різного радіусу.

За отриманими функціями розподілу за формулами (2.6) та (2.7) розраховані середній та найбільш імовірний радіуси пор наведені в табл.4.2.

Таблиця 4.2.

Середній та найбільш імовірний радіус пор швидковідновлюваних каш,  
отриманих із різних круп

Швидковідновлювана каша:	$\bar{R} \cdot 10^7, \text{ м } (\delta = 10\%)$	$R_m \cdot 10^7, \text{ м } (\delta = 10\%)$
гречана	16,0	3,38
пшоняна	6,1	3,17
ячмінна	9,7	3,14
пшенична	9,6	3,15

Як і у відповідній сировини, у отриманих каш розкид найбільш імовірних радіусів знаходиться в межах похибки, а середній радіус для гречаної каші найбільший ( $16,0 \cdot 10^{-7}$  м), для пшоняної – найменший ( $6,1 \cdot 10^{-7}$  м). Але необхідно відмітити, що після гідротермічної обробки з використанням принципів ЗТП-сушіння середній радіус досліджуваних зразків збільшився по відношенню до сировини (табл.2.1): для гречаної каші в 1,33 рази; для пшоняної – в 1,97; для ячмінної – в 1,15; для пшеничної – в 1,25 рази.

Встановлене означає, що під час гідротермічної обробки з використанням принципів ЗТП-сушіння відбувається розвиток пористої структури сировини. Причому розвиток пористості під час обробки з використанням ЗТП-сушіння відбувається в більшому ступені, ніж під час обробки з використанням інших способів. Підтверджується це дослідженнями пористості швидковідновлюваної гречаної каші, отриманої різними способами.

Об'єктами дослідження в даному експерименті були швидковідновлювані гречані каші ТМ «Каша Малаша», ТМ «Бистров» та каша, отримана розробленим способом, тобто гідротермічною обробкою з використанням принципів ЗТП-сушіння. Швидковідновлювана каша ТМ «Каша Малаша», отримана із плющеної гречаної крупи, ТМ «Бистров» – з попереднім проварюванням та подальшим конвективним сушінням. В якості контролю використовувалась несмажена гречана крупа.

Диференціальні функції розподілу пор за радіусами визначались за ізотермами сорбції досліджуваних зразків, представленими на рис.4.9.

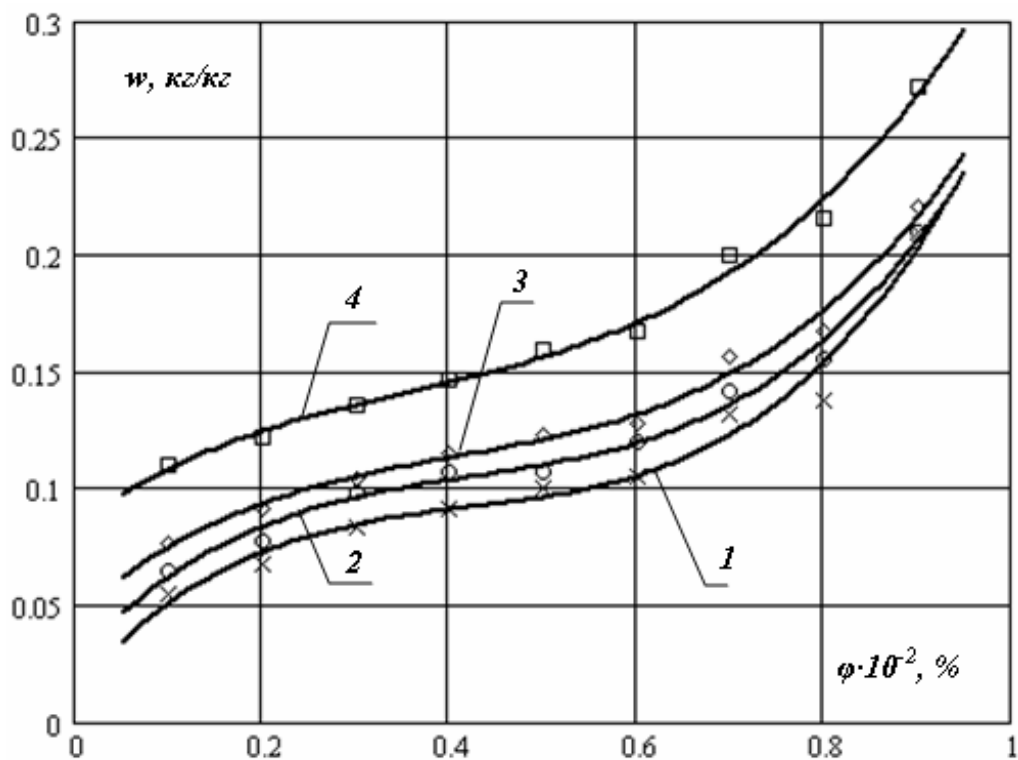


Рис.4.9 – Ізотерми сорбції несмаженої гречаної крупи (1) та швидковідновлюваних каш: 2 – ТМ «Каша Малаша»; 3 – ТМ «Бистров»; 4 – каша, отримана з використанням принципів ЗТП-сушіння

Диференціальні функції розподілу пор за радіусами визначались за методикою описаною в розділі 3 та мають вид (2.3). Отримані функції для досліджуваних зразків представлені на рис 4.10.

За отриманими диференціальними функціями розподілу пор за радіусами було розраховано середній та найбільш імовірний радіуси пор досліджуваних зразків, які наведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3.

Середній та найбільш імовірний радіус пор контролю та швидковідновлюваних каш, отриманих різним способом

Зразок	$\bar{R} \cdot 10^7, \text{ м } (\delta = 10\%)$	$R_m \cdot 10^7, \text{ м } (\delta = 10\%)$
контроль	12,0	3,08
ТМ «Каша Малаша»	14,0	3,12
ТМ «Бистров»	14,0	3,13
за розробленим способом	16,0	3,38

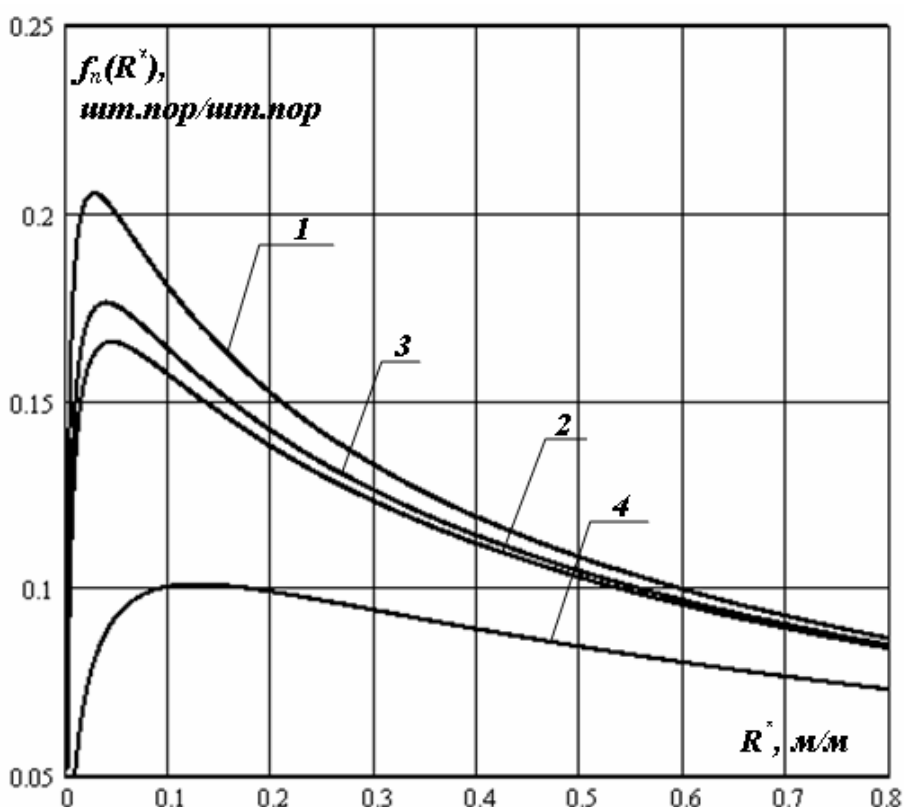


Рис.4.10 – Функції розподілу пор за радіусами для несмаженої гречаної крупи (1) та швидковідновлюваних каш: 2 – ТМ «Каша Малаша»; 3 – ТМ «Бистров»; 4 – каша, отримана з використанням принципів ЗТП-сушіння



Отримані результати показують, що швидковідновлювана каша, отримана розробленим способом має найширшу функцію розподілу пор за радіусом у порівнянні з іншими зразками, це свідчить про більшу відносну кількість пор з різними радіусами, тобто пориста структура каші найбільш віддалена від монопористої, що відбивається на її властивостях поглинати вологу.

Ті ж результати отримані і для середнього радіусу – середній радіус для швидковідновлюваної каші, отриманої розробленим способом, збільшився по відношенню до контролю, який був вихідною сировиною, в 1,33 рази, а для швидковідновлюваних каш від виробника ТМ «Каша Малаша» та ТМ «Бистров» в 1,16 рази.

Пояснюється отримане особливостями ЗТП-сушіння пов'язаними з розвитком дисипативних структур, виникнення яких супроводжується розвиненням площі випаровування і, як наслідок, збільшенням пористості отримуваної продукції.

Таким чином, гідротермічна обробка круп з використанням принципів ЗТП-сушіння, сприяє розвиненню пористості отримуваних із даної сировини швидковідновлюваних каш, внаслідок розвитку потужності дисипативних структур в процесі такої обробки.

#### **4.4. Дослідження відновлюваності швидковідновлюваних каш**

Наступним етапом визначення функціонально-технологічних властивостей швидковідновлюваних каш, отриманих гідротермічною обробкою крупи з використанням принципів ЗТП-сушіння, було дослідження їх відновлюваності [147, 153].

Досліджувались зразки, для яких проводилось дослідження пористості, тобто швидковідновлювані гречані каші ТМ «Каша Малаша», ТМ «Бистров» та каша, отримана розробленим способом. Контролем була несмажена гречана крупа. Кінетика набухання досліджуваних зразків, представлена на рис.4.11, визначалась на пристрої Догадкіна. В якості змочуючої рідини,

використовувалась вода з температурою від 20 до 23 °С. Вимірювання закінчувались за досягнення зразком постійного вологовмісту, який вважали кінцевим.

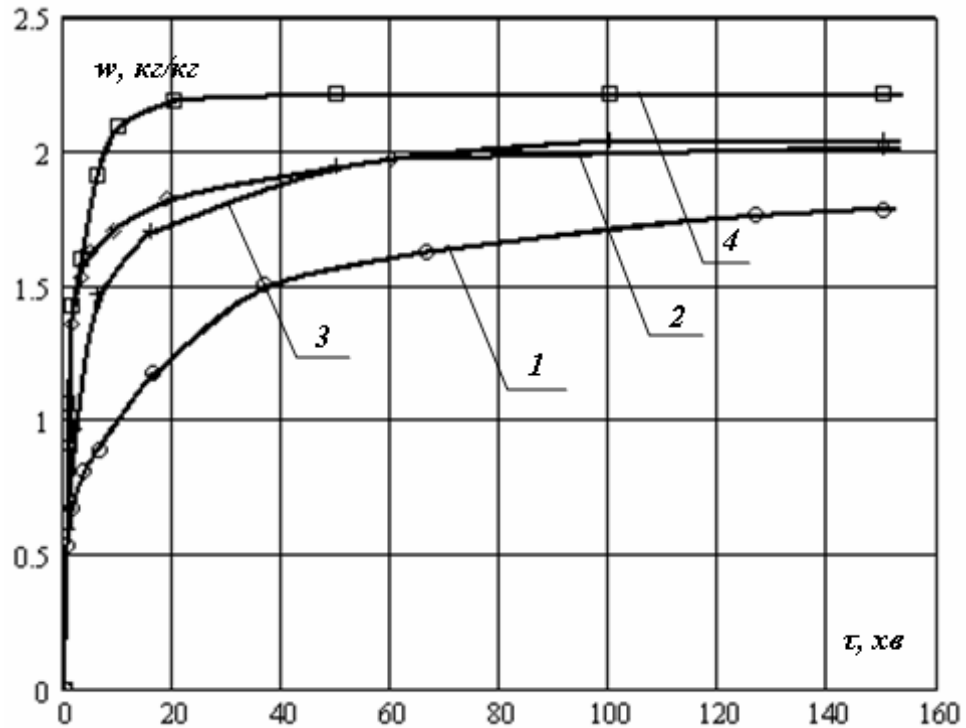


Рис.4.11 – Кінетика набухання несмаженої гречаної крупи (1) та швидковідновлюваних каш: 2 – ТМ «Каша Малаша»; 3 – ТМ «Бистров»; 4 – каша, отримана з використанням принципів ЗТП-сушіння

Кінетики набухання мають однаковий характер, але різний кінцевий вологовміст. Обумовлено отримане розвитком пористості отриманого продукту в процесі гідротермічної обробки сировини, причому за використання традиційної технології в меншому, а за використання принципів ЗТП-сушіння в більшому ступені.

З наведених кінетик набухання видно, що горизонтальна ділянка, ділянка кривої паралельна осі, на якій відкладено тривалість обводнювання, починається для різних каш за різної тривалості набухання. Вихід кривої на горизонтальну ділянку відповідає тривалості обводнювання, за якої зразок досягає кінцевого вологовмісту. Для швидковідновлюваних каш ТМ «Каша

Малаша» та ТМ «Бистров» тривалість набухання до кінцевого вологовмісту знаходиться в діапазоні від 40 до 50 хв., для швидковідновлюваної каші, отриманої розробленим способом, – 20 хв. Таким чином, швидкість відновлення швидковідновлюваної каші, отриманої гідротермічною обробкою гречаної крупи з використанням принципів ЗТП-сушіння, в 2...2,5 рази менша, ніж для швидковідновлюваних каш ТМ «Каша Малаша» та ТМ «Бистров», що є більш прийнятною функціонально-технологічною властивістю розробленої каші.

Дослідженнями кінетики набухання швидковідновлюваних каш, отриманих гідротермічною обробкою пшоняної, ячмінної та пшеничної круп з використанням принципів ЗТП-сушіння, визначено (Рис.4.12), що тривалість досягнення даними зразками кінцевого вологовмісту за температури змочуючої рідини 20...23°C складає, як і для гречаної каші, отриманої розробленим способом, 20 хв.

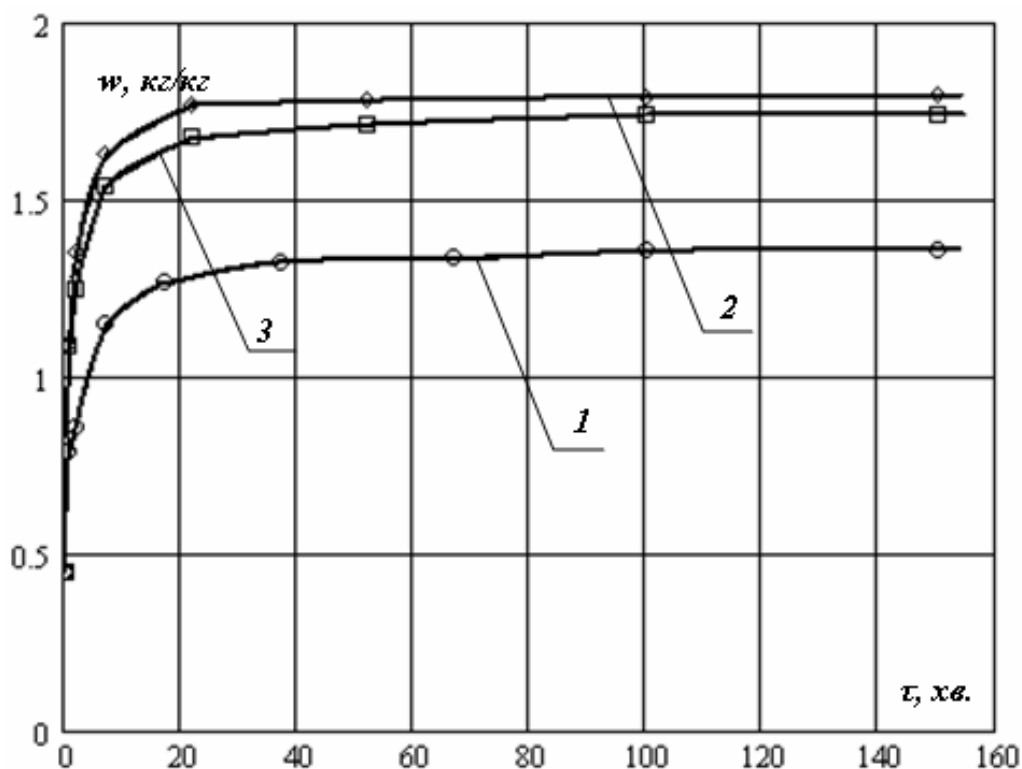


Рис.4.12 – Кінетика набухання каш, отриманих з використанням принципів ЗТП-сушіння: 1 – пшоняна; 2 – ячмінна; 3 – пшенична

Необхідно відмітити, що кінетика набухання отримувалась за температури води 20...23°C, а оскільки під час приготування швидковідновлюваних каш використовується окріп, тобто вода з температурою 85...95°C, то тривалість набухання зменшується в 4...5 разів [59, 91]. Звідси тривалість набухання швидковідновлюваних каш ТМ «Каша Малаша» та ТМ «Бистров», за умови використання в якості змочуючої рідини води з температурою 85...95°C, скорочується до 7...10 хв., а каш, отриманих розробленим способом, – до 3...5 хв.

Таким чином, встановлено, швидковідновлювані каші, отримані гідротермічною обробкою круп з використанням принципів ЗТП-сушіння, поглинають вологу під час приготування в 2...2,5 рази швидше, ніж швидковідновлювані каші, отримані традиційними способами, що підвищує їх функціонально-технологічні властивості. Визначено, що раціональною тривалістю набухання розроблених каш є тривалість, яка дорівнює 5 хв. за умови використання води з температурою 85...95°C.

#### **4.5. Дослідження мікробіологічних показників і вмісту токсичних елементів та радіонуклідів отримуваних швидковідновлюваних каш**

Вміст токсичних елементів та радіонуклідів у швидковідновлюваних кашах [147], отриманих гідротермічною обробкою з використанням принципів ЗТП-сушіння, проводився на базі лабораторії Харківського центру «Облдержродючість» атомно-абсорбційним методом за ГОСТ 30178-96 та ГН 6.6.1.1-130-2006 «Визначення допустимого рівня вмісту радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  у продуктах харчування» [154-156], та представлений в табл. 4.4.

В результаті дослідження рівня безпеки швидковідновлюваних каш, отриманих гідротермічною обробкою круп з використанням принципів ЗТП-сушіння, встановлено, що розроблена продукція містить незначну кількість токсичних елементів (свинцю, кадмію, миш'яку, ртуті, міді та цинку) та радіонуклідів (Cs, Sr).

Вміст токсичних елементів та радіонуклідів у розроблених  
швидковідновлюваних кашах

Каша:	Pb, мг/кг	As, мг/кг	Cd, мг/кг	Hg, мг/кг	Cu, мг/кг	Zn, мг/кг	Cs, Бк/кг	Sr, Бк/кг
гречана	0,11	0,05	0,01	0,01	8,0	15,0	5	6
пшоняна	0,12	0,06	0,01	0,01	3,3	13,3	3	5
пшенична	0,12	0,05	0,01	0,01	2,0	15,9	6	6
Допустимі рівні, не більше	0,50	0,20	0,10	0,03	10,0	50,0	80	140

Отримані данні свідчать про те, що вміст токсичних елементів та радіонуклідів не перевищує нормативи, встановлені «Медико-біологічним вимогам і санітарним нормам якості продовольчої сировини та харчових продуктів Мінздраву України» [156].

Попередня теплова обробка сировини та тепловий вплив в процесі сушіння практично повністю знищують мікрофлору, наявну в сировині. У зв'язку з цим виконання вимог інструкцій із санітарної обробки технологічного обладнання та сам процес сушіння виключають можливість привнесення мікрофлори ззовні.

Мікробіологічні показники швидковідновлюваних каш отриманих ЗТП-сушінням визначались відповідно до санітарних правил та норм 2.3.2.560-96 «Гигиенические требования к качеству и безопасности продовольственного сырья и пищевых продуктов» [155]. Отримані результати приведені в табл.4.5.

З таблиці видно, що основні мікробіологічні показники розроблених швидковідновлюваних каш не перевищують встановлені для даної групи товарів нормативи.

Мікробіологічні показники розроблених швидковідновлюваних каш

Каша:	Кількість мезофільних аеробних та факультативно анаеробних мікроорганізмів, КУО/1г	Маса продукту, в якій не допускається, г			Плісняви, КУО/1г
		БГКП	Патогенні мікроорганізми (в т.ч. сальмонели)	<i>B.cereus</i>	
гречана	$1 \cdot 10^3$	відсутні в 0,01 г	відсутні в 25 г	відсутні в 0,1г	відсутні в 1 г
пшоняна	$1 \cdot 10^3$	відсутні в 0,01 г	відсутні в 25 г	відсутні в 0,1 г	відсутні в 1 г
пшенична	$1 \cdot 10^3$	відсутні в 0,01 г	відсутні в 25 г	відсутні в 0,1 г	відсутні в 1 г
Допустимі рівні, не більше	$5 \cdot 10^3$	0,01	25	0,1	50

Дослідженнями мікробіологічних показників після рекомендованих 12 міс. зберігання за температури від 0 до 25°C та відносної вологості менше 75% встановлено, що вони не перевищують допустимих рівнів для даної групи товарів.

## **5. РОЗРОБКА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ШВИДКОВІДНОВЛЮВАНИХ КАШ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИНЦИПІВ ЗТП-СУШІННЯ**

### **5.1. Визначення раціональних режимів отримання швидковідновлюваних каш**

За основу вибору раціональних режимів гідротермічної обробки круп з використанням принципів ЗТП-сушіння взяті результати та висновки, представлені в матеріалах викладених в попередніх розділах. При цьому, під режимом отримання мається на увазі:

- вид сировини, яку можна обробити розробленим способом;
- режими попередньої обробки сировини: перед проварюванням – тривалість замочування; перед сушінням – тривалість проварювання;
- форма, конструкція та геометричні розміри ФЄ;
- температура сушильного агента.

Раціональними вважаються такі режими сушіння, які будуть забезпечувати:

- мінімальну тривалість та енергоємність процесів підготовки сировини до сушіння;
- максимальну енергоефективність процесу сушіння;
- максимально високі функціонально-технологічні властивості готової продукції.

Багатофакторність ЗТП-процесу та велика кількість критеріїв раціональності вимагають вибору методу рішення поставленого завдання. Використання для цього математичних методів, наприклад регресійного аналізу, ускладнено великою кількістю перемінних. Тому в роботі використаний аналіз, заснований на визначенні, спочатку, діапазонів раціональних режимів, а потім – виборі раціонального режиму.

Першим чинником є вид сировини, яку можна обробити розробленим способом. Основними вимогами до сировини під час її гідротермічної обробки з використанням ЗТП-процесу є те, що вона не повинна змінювати свій об'єм більше ніж на 5...10 % та величина частинок сировини не повинна бути менша за ширину масообмінного зазору (1 мм). На відповідність даним вимогам досліджувались гречана, пшоняна, ячмінна та пшенична крупи із суцільного ядра: обрана сировина має велику кількість сухих речовин (понад 90%), внаслідок цього зміни об'єму під час гідротермічної обробки не спостерігалось; розмір частинок сировини більше за 1 мм.

Процес зневоднення досліджуваних видів сировини триває практично однаковий час та має характер типовий для ЗТП-сушіння, оскільки об'єктом сушіння під час ЗТП-процесу виступає ФЄ, а сировина, яка знаходиться всередині ФЄ визначає внутрішній тепловологоперенос цього об'єкту.

Таким чином, обрані види круп відповідають всім вимогам, що висуваються до сировини для реалізації ЗТП-процесу, причому раціональні режими та розроблена установка являються універсальними для виробництва швидковідновлюваних каш із них.

Гідротермічну обробку сировини за розробленим способом можна розділити на два етапи: проварювання всередині ФЄ за відсутності масообмінних зазорів на її поверхні та зневоднення всередині ФЄ з масообмінними зазорами за принципами ЗТП-сушіння.

Першим чинником є попередня підготовка сировини перед проварюванням, яка полягає у її замочуванні до максимального вологовмісту. Дослідженнями кінетики набухання круп (гречаної, пшоняної, ячмінної, пшеничної) встановлено, що раціональною тривалістю замочування для всіх зразків є тривалість 120 хв., оскільки за її збільшення відносно даного значення вологовміст сировини змінюється нехтовно мало.

Наступними чинниками, які впливають на попередню підготовку сировини перед процесом ЗТП-сушіння, являється температура, за якої відбувається проварювання сировини, та тривалість даного процесу.



Температура, за якої проварювання крупи із суцільного ядра не можливе, – це температура менше  $80^{\circ}\text{C}$ . Оскільки сировина знаходиться всередині ФЄ, то передача теплоти здійснюється крізь стінки ФЄ від повітря, яке омиває ФЄ ззовні. Таким чином, мінімальна температура сировини повинна бути не меншою за  $80^{\circ}\text{C}$ , інакше крупа не провариться до готовності.

Під час визначення максимальної температури керувались тим, що кількість вологи, в якій проварюється сировина обмежена тією кількістю, яку поглинула сировина під час замочування. Таким чином, за інтенсивного кипіння волога швидко випарюється і сировина також не проварюється до готовності. Граничною температурою повітря, що омиває ФЄ ззовні, за якої вологи для проварювання залишається достатня кількість, є температура  $100^{\circ}\text{C}$ . За збільшення температури відбувається викид вологи у виді пари крізь завантажувальний бункер.

Таким чином, для проварювання сировини температура сушильного агенту, який омиває ФЄ, повинна обиратися із діапазону температур від  $90$  до  $100^{\circ}\text{C}$ .

Раціональна тривалість проварювання визначалась шляхом періодичної органолептичної та мікроскопічної оцінки досліджуваної сировини під час даного процесу у ФЄ без масообмінних зазорів. За температури сушильного агенту  $90^{\circ}\text{C}$  вона складає 65 хв., а за температури  $100^{\circ}\text{C}$  – 60 хв.

Досліджуючи кінетики сушіння у ФЄ різної форми та виходячи із вимог до форми ФЄ, з точки зору одночасної реалізації процесів проварювання та сушіння сировини в одному апараті, встановлено, що раціональною формою ФЄ, за мінімальних конструкційних змін у сушильній камері типової ЗТП-сушарки, є ФЄ у формі паралелепіпеда. Оскільки висота та довжина ФЄ обмежені розмірами сушильної камери, то варіювання її об'ємом можливе шляхом зміни товщини ФЄ.

ФЄ складається з двох частин: перша без масообмінних зазорів, а друга з масообмінними зазорами.

Дослідженнями плинусировини у частині ФЄ без масообмінних зазорів (частина, в якій проводиться проварювання) встановлено, що ефективність перемішування сировини збільшується по мірі збільшення товщини ФЄ, причому граничним значенням товщини, за якої перемішування сировини стає помітним, є товщина 20 мм. Виходячи з цього, раціональною товщиною частини ФЄ без масообмінних зазорів є товщина не менша за 20 мм.

Дослідженнями кінетики сушіння сировини у частині ФЄ з масообмінними зазорами (частина, в якій проводиться ЗТП-сушіння) встановлено, що процес зневоднення сировини для товщини ФЄ 20 мм найближчий за характером до ЗТП-сушіння, за подальшого збільшення її товщини кінетика сушіння наближається до конвективного, що є небажаним, оскільки тривалість сушіння зразка за товщини, наприклад, 40 мм збільшується на 16%, а за товщини 60 мм – на 33%. Таким чином, раціональною товщиною частини ФЄ з масообмінними зазорами є товщина 20 мм.

Виходячи із вимог до товщини частини ФЄ без масообмінних зазорів та частини ФЄ з масообмінними зазорами, раціональною товщиною ФЄ слід вважати товщину 20 мм.

Ще одним чинником, який суттєво впливає на раціональність обраного режиму, є температура сушильного агента під час зневоднення сировини. Дослідженнями кінетики сушіння за різної температури сушильного агента, встановлено, що за збільшення даної температури тривалість процесу зневоднення зменшується за експоненційною залежністю, а ступінь використання теплоти сушильного агента більша в тому випадку, де тривалість сушіння менша. Таким чином, з точки зору енерговитрат, доцільно обирати температуру сушильного агента максимальною, але, враховуючи обмеження температури під час проварювання, раціональною температурою слід вважати температуру не більше 100°C. Саме це значення температури і було обрано для гідротермічної обробки круп з використанням принципів ЗТП-сушіння. Тривалість сушіння за цієї температури дорівнює 60 хв.

Швидкість руху сировини дорівнює 4 мм/хв. та забезпечується шнеком з валом-турбіною. Привід вала забезпечується трифазним асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором через понижуючий редуктор.

Таким чином, раціональними слід вважати режими наведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Раціональні режими отримання швидковідновлюваних каш з використанням принципів ЗТП-сушіння

Чинник	Проварювання	Сушіння	Загальний чинник або його значення
Спосіб підготовки	замочування протягом 120 хв.	проварювання протягом 60 хв.	тривалість замочування (120 хв.) + тривалість проварювання (60 хв.) + тривалість сушіння (60 хв.) = 240 хв.
ФЄ: форма	паралелепіпедна	паралелепіпедна	паралелепіпедна
розташування в сушильній камері	вертикальне	вертикальне	вертикальне
розміри, мм	250×500×20	250×500×20	500×500×20
Температура сушильного агента, °С	100	100	100

## 5.2. Структурна технологічна схема виробництва швидковідновлюваних каш з використанням принципів ЗТП-сушіння

Структурна технологічна схема виробництва швидковідновлюваних каш з використанням принципів ЗТП-сушіння, представлена на рис.5.1, побудована на основі технологічної схеми виробництва варено-сушених круп і бобових. Відрізняється розроблена схема відсутністю операції варіння гострою парою, плющення провареної сировини та операції досушування. Натомість в схемі присутня операція замочування. Проварювання та сушіння сировини проводиться у ФЄ з двох частин: з масообмінними зазорами та без них. Процес гідротермічної обробки з використанням ЗТП-сушіння являється безперервним.

Гідротермічна переробка круп з використанням принципів ЗТП-сушіння включає наступні операції: очищення від домішок, мийку, замочування, проварювання у ФЄ без масообмінних зазорів, сушіння у ФЄ з масообмінними зазорами, вивантаження сушеної продукції.

Очищення від домішок проводиться на зерновому сепараторі, оснащеному магнітними скобами для видалення металодомішок і набором сит різних розмірів залежно від виду сировини, що переробляється. Легкі домішки відокремлюють дворазовою продувкою повітрям під час надходження зерна в сепаратор і під час виходу з нього. На сепараторі залежно від виду крупи, що переробляється, установлюють штаповані сита із круглими або довгастими отворами. Розрізняють сита приймальні з отворами діаметром від 4,5 (пшоно) до 10 мм (рисова, вівсяна гречана, пшенична, ячмінна крупи); сортувальні – від 2,5 (пшоно) до 7...8 мм (рисова, вівсяна гречана, пшенична, ячмінна крупи) і сходове – 1 мм для всіх видів круп.

Приймальне, сортувальне й сходове сита під час роботи сепаратора виконують зворотно-поступальні рухи. На приймальному ситі видаляються великі грубі домішки (солома, камені, тріска й т.п.), на сортувальному – зернові й інші домішки, розмір яких крупніше зерна. Проходом через сходове сито – домішки розміром дрібніше зерна.

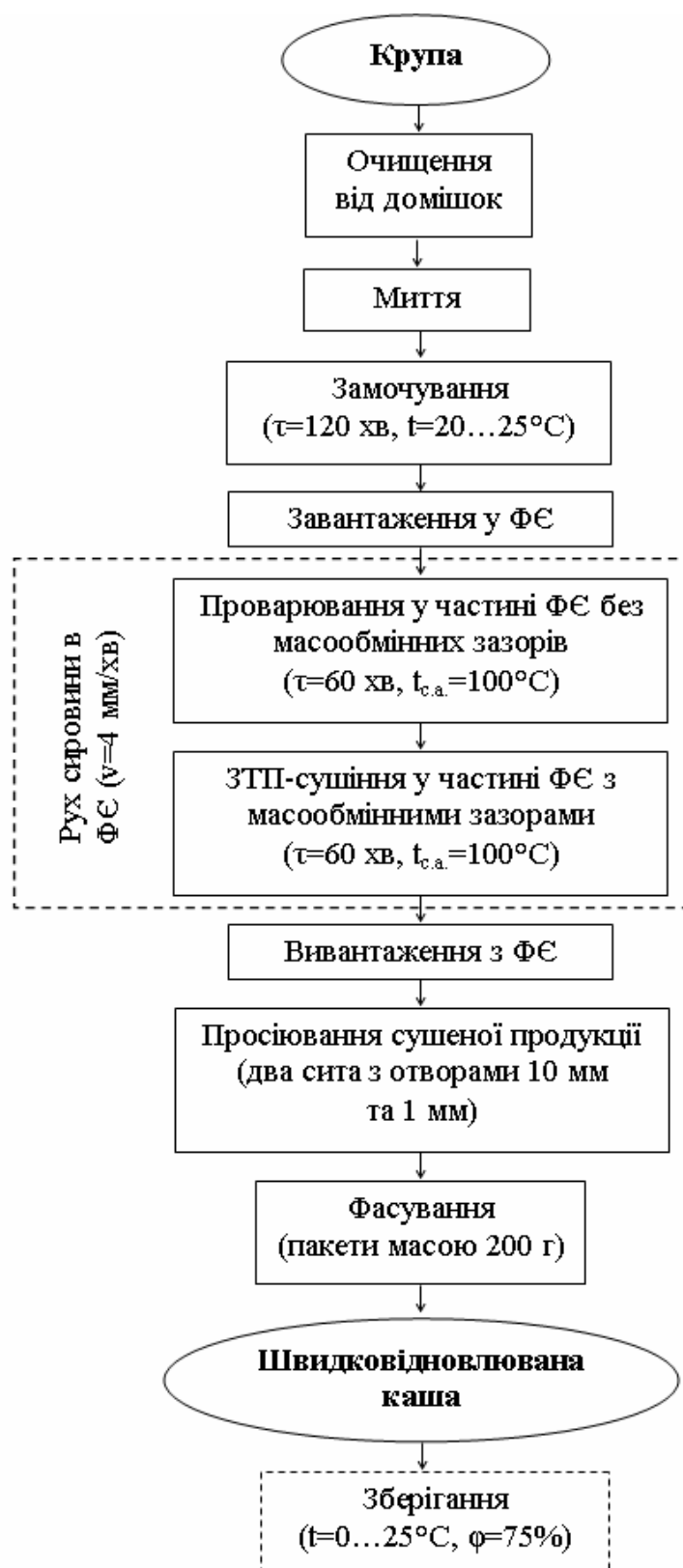


Рис.5.1 – Структурна технологічна схема виробництва швидковідновлюваних каш з використанням принципів ЗТП-сушіння

Для остаточного очищення від забруднень крупу миють на крупомієчній машині, де видаляють з її поверхні бруд, мучель, пил, відокремлюють насіння дикоростучих рослин, лузгу, органічне сміття. Використовують звичайну питну (водопровідну) воду. Якість сировини після мийки значно підвищується. Крупа повністю звільняється від мінерального забруднення; її доброякісність підвищується. Значно знижується вміст незавалених зерен, бур'янистої домішки, мучелі.

Далі крупу замочують у відкритих ємностях об'ємом 50...100 літрів. В якості змочуючої рідини використовують питну воду (за ГОСТ 2874-82 «Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством»). Рациональна тривалість замочування складає 120 хв. за температури води 20...25°C. Після визначеного терміну крупа надходить на вібраційне сито, де звільняється від поверхневої вологи.

Зволожену таким чином сировину засипають у завантажувальний бункер ФЄ, у першій її частині без масообмінних зазорів сировина проварюється до готовності, а в другій висушується до кінцевого вологовмісту. Процес протягування сировини крізь ФЄ забезпечується таким чином, щоб швидкість руху частинок крупи дорівнювала 4 мм/хв.

В процесі проварювання та сушіння деякі види круп можуть грудкуватись. Щоб звільнити одержуваний продукт від грудок, які знижують якість сушеної харчової продукції, його піддають просіванню. В якості просіювача використовують вібраційний пристрій, оснащений двома ситами: верхнім металевим штампованим з отворами діаметром 10 мм і нижнім (сходовим) металевим штампованим з отворами діаметром 1 мм. На верхньому ситі відбирають грудочки крупи, які потім дроблять і повертають на повторний просів. З нижнього сита сходить швидковідновлювана каша, звільнена від мучелі.

Отримані швидковідновлювані каші направляють у бункер рецептурно-змішувального відділення або фасують у полімерну упаковку масою 200 г.

Таким чином, технологічна схема гідротермічної обробки круп'яних культур спрощена за рахунок уникнення операцій проварювання, плющення та досушування, що досягається шляхом об'єднання процесів проварювання та сушіння в одному апараті безперервної дії, що працює з використанням принципів ЗТП-сушіння.

### **5.3. Розробка обладнання для виробництва швидковідновлюваних каш з використанням принципів ЗТП-сушіння**

За основу під час розробки обладнання для гідротермічної обробки круп культур з використанням принципів ЗТП-сушіння обрано типову ЗТП-сушарку. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження дозволили отримати емпіричні співвідношення, необхідні для інженерного розрахунку конструкційних особливостей ЗТП-сушарки, яку використано під час гідротермічної обробки. Відмінністю установки є використання ФЄ для гідротермічної обробки, для якої орієнтація сушильної камери повинна бути горизонтальною.

Під час розробки сушильної установки головними вимогами були: дешевизна виготовлення, простота й надійність в експлуатації, мінімальні енерговитрати на процес гідротермічної обробки. Вихідні дані для розробки і створення сушильної установки приведені в табл. 5.2.

У відповідності з вихідними даними була обрана сушильна установка періодичної дії з електрокалорифером.

Спосіб підведення теплоти до поверхні ФЄ – конвективний, теплоносій – повітря. Для зменшення енерговитрат у сушильній установці організована рециркуляція теплоносія із частковою конденсацією парів води на конденсаторі. Конденсатор омивається приточним повітрям, при цьому приточне повітря підігрівається в конденсаторі та потім надходить у сушильну камеру, де калорифери розігрівають його до заданої температури.

## Вихідні дані для розробки сушильної установки

Сировина	круп'яна культура
Продуктивність по сушеному продукту, кг/год	4...6
Завантаження сировини	ручне
Вивантаження продукту	автоматичне
Встановлена потужність, кВт	не більше 20
Контроль за режимом сушіння	автоматичний
Керування калориферами	автоматичне, електронне
Кількість обслуговуючого персоналу, чел.	1...2
Додаткові вимоги	відповідність стандартам, техніці безпеки та протипожежній безпеці

Відмінність установки від типових ЗТП-сушарок полягає в наступному. По перше, сушильна камера має конструкційні особливості: орієнтація сушильної камери змінена з горизонтальної на вертикальну; у верхній та нижній стінках камери зроблені отвори – верхній за формою завантажувального бункера, а нижній – за формою поперечного перерізу ФЄ. По друге, для вивантаження сушеної продукції через нижній отвір у ємність для готового продукту сушарку підняли на 500 мм над підлогою за рахунок підніжок відповідної довжини. Всередині сушильної камери зроблені держателі, які дають можливість використовувати типові паралелепіпедні ФЄ для ЗТП-сушіння за умови демонтажу ФЄ для гідротермічної обробки. Таким чином, розроблена ЗТП-сушарка є універсальною установкою, в якій можна проводити як гідротермічну обробку круп, так і сушіння сировини, властивості якої задовольняють вимогам ЗТП-процесу.

Основний робочий елемент – ФЄ, зображений на рис. 5.2.



Розміри поверхні ФЄ вибирали виходячи з розмірів сушильної камери та міркувань зручності роботи, а товщину – з раціональних режимів сушіння. В таку ємність розміщується до 4 кг сировини. Сама ФЄ складається з двох основних частин: з масообмінними зазорами та без них.

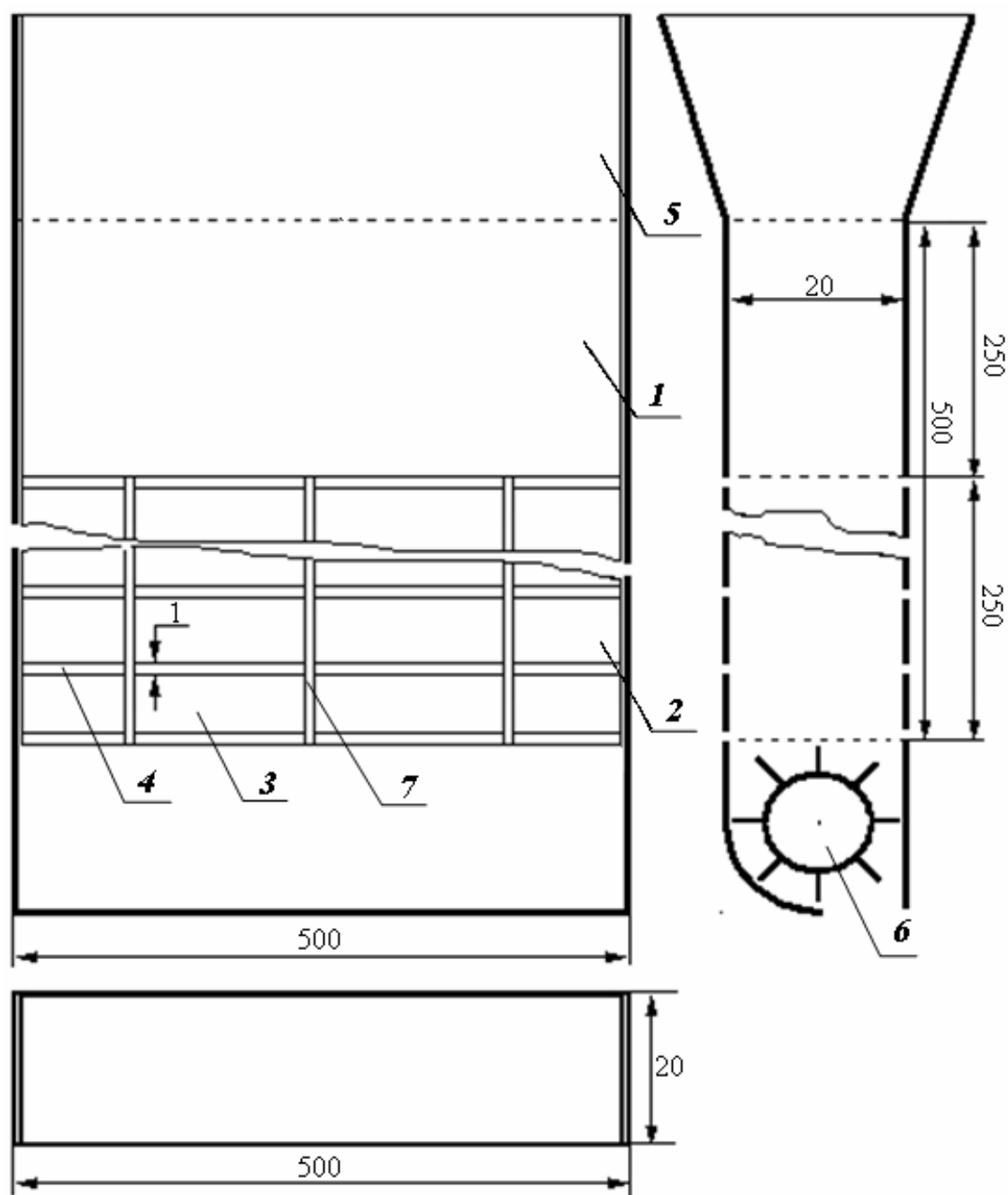


Рис.5.2 – ФЄ для гідротермічної обробки круп: 1 – частина ФЄ без масообмінних зазорів; 2 – частина ФЄ з масообмінними зазорами; 3 – теплообмінні поверхні; 4 – масообмінні зазори; 5 – завантажувальний бункер; 6 – вивантажувальний шнек; 7 – пластини жорсткості

Схема розробленої сушильної установки зображена на рис.5.3.

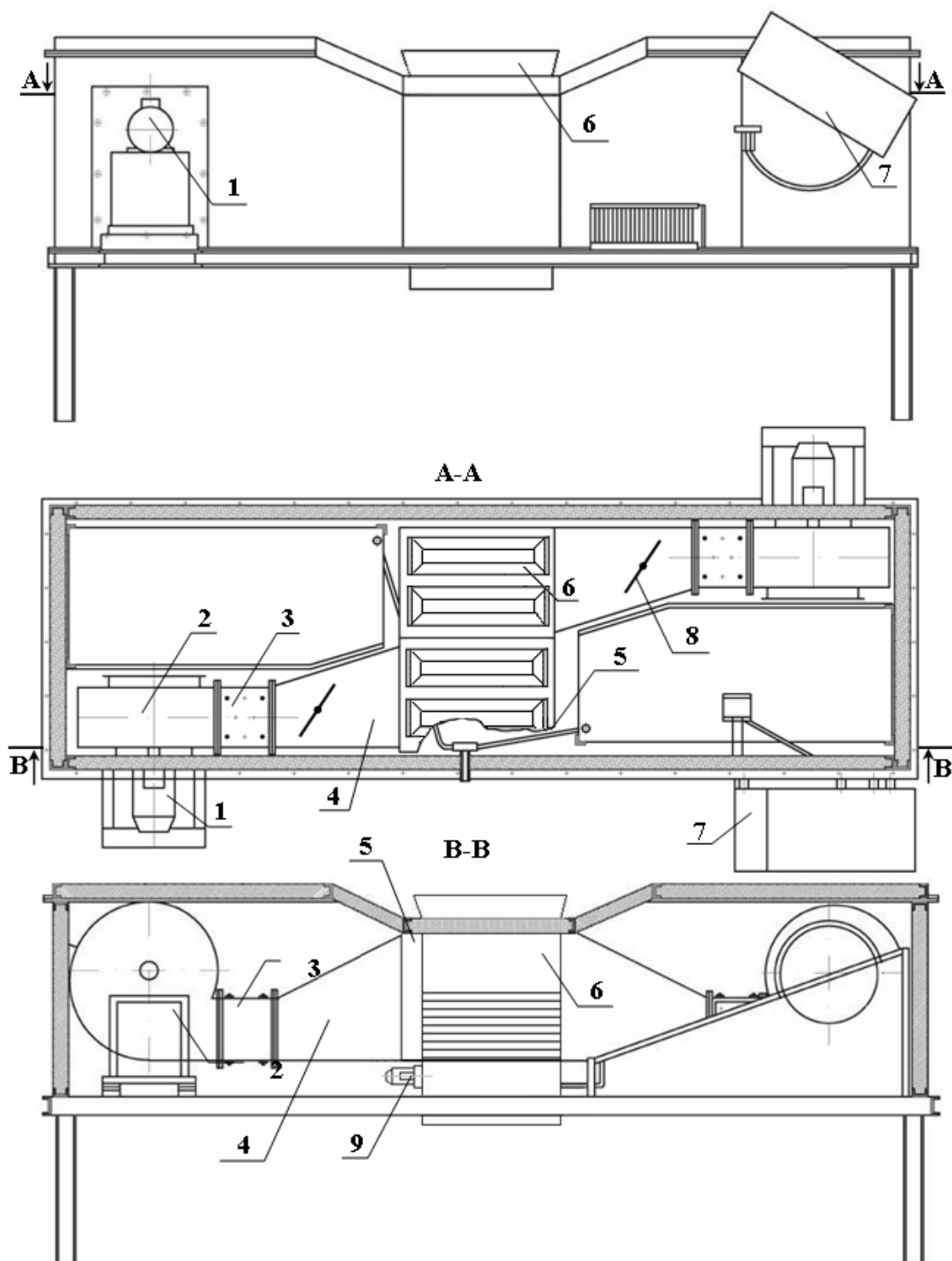


Рис.5.3 – Схема універсальної установки для гідротермічної обробки круп з використанням принципів ЗТП-сушіння: 1 – електродвигун; 2 – вентилятор; 3 – електрокалорифери; 4 – повітровід; 5 – сушильна камера; 6 – ФЄ; 7 – пульт керування; 8 – шибер; 9 – двигун шнека з редуктором

Установка складається з електродвигуна 1, вентилятора 2, електрокалориферів 3, повітровою 4, сушильної камери 5, в яку розміщується ФЄ 6, пульту керування 7, шиберів 8 та двигуна шнека з редуктором для вивантаження готової продукції.

Принцип дії установки наступний. Повітря відцентровим вентилятором нагнітається в блок калориферів, де нагрівається до необхідної температури і далі повітровою направляється в робочу камеру, де віддає теплоту і забирає вологу, що випарувалася. Потім викидається у вільний об'єм установки. Проходячи біля конденсатора, частина вологи з повітря конденсується й стікає в конденсатівідводчик. Для знімання надлишків теплоти з поверхні конденсації використовується повітря навколишнього середовища (виробничого приміщення), що проходить зі зворотної сторони конденсатора. Забравши теплоту, що виділилася при конденсації, зовнішнє повітря підігрівається та, змішавшись із пароповітряним середовищем, надходить на вхід вентилятора. Таким чином контур руху сушильного агента замикається, а теплота, витрачена на сушіння, максимально утилізується. Для регулювання ступеня змішання свіжого повітря з робочим, на вході встановлений шибер, положення якого визначає кількість свіжого повітря. Надходження свіжого повітря забезпечується різницею тисків між атмосферним тиском і тиском в зоні всосу відцентрового вентилятора.

Сировина, попередньо замочена, засипається через завантажувальний бункер у ФЄ. В розробленій установці одночасно використовується 4 ФЄ для гідротермічної обробки. Між ФЄ є напрямні для потоку сушильного агента та вставки-турбулізатори. Рух сушильного агента вздовж поверхонь ФЄ, напрямні потоку і вставки-турбулізатори створюють необхідний гідродинамічний режим плинину сушильного агента всередині робочої камери.

Установка оснащена електронним пультом керування, що забезпечує контроль і автоматичну підтримку температури сушильного агента.

На підставі отриманих у роботі емпіричних залежностей розроблена програма розрахунку ЗТП-сушарки з використанням пакету програм MathCad. Вихідними даними для розрахунку являються:

- навантаження сировини на одну ФЄ, кг;
- кількість ФЄ в робочій камері, шт.;
- початковий і кінцевий вологовміст, кг/кг;
- температура сушильного агента, °С;
- тривалість розігріву камери, хв.;
- геометричні розміри та маса установки;
- характеристики теплоізоляції (товщина, теплопровідність);
- геометрія повітропроводу, у тому числі: розміри, дифузорність і конфузорність каналів, живий перетин;
- швидкість сушильного агента в живому перетині робочої камери, м/с;
- перепад температур сушильного агента між входом і виходом у робочій камері.

Виходячи з обраних раціональних режимів, за емпіричними і стандартними рівняннями теплового й масового балансів були розраховані основні технічні характеристики установки малої продуктивності для гідротермічної обробки круп з використанням принципів ЗТП-сушіння (Додаток А2).

Основні характеристики розробленої установки наведені в табл. 5.3.

З порівняння даних по питомим витратам енергії на кг готової продукції для різних способів виробництва швидковідновлюваних каш, які наведені в табл.5.4 (дані по наведеним способам взято із розділу 1, окрім розробленого), видно, що при отриманні швидковідновлюваних каш за розробленим способом на розробленій установці питомі енерговитрати менші у порівнянні з іншими сушарками більше ніж 1,3 рази.

Основні характеристики установки для гідротермічної обробки круп

Характеристика	Значення характеристики
Встановлена потужність, кВт:	
калориферів	11,9 ± 1,1
вентилятора	1,0 ± 0,1
Витрата енергії $E \cdot 10^{-6}$ , Дж/кг:	
по готовій продукції	8,1 ± 1,8
по випаруваній волозі	3,9 ± 0,1
Теплові втрати, кВт	0,83 ± 0,05
Продуктивність, кг/год	
по сировині	16 ± 1
по сухому	6,0 ± 0,3
по випаруваній волозі	5,8 ± 0,2
Кількість ФЄ, шт.	4
Витрата повітря, м <sup>3</sup> /год:	
циркуляція	3428 ± 100
приплив	268 ± 10
вихлоп	303 ± 10
Повний тиск у тракті сушильного агента, Па	652 ± 50

Необхідно відмітити, що в розробленій установці проводиться повна гідротермічна обробка, тобто проварювання та сушіння. При цьому тривалість проварювання та сушіння сировини за способом з використанням принципів ЗТП-сушіння складає 120 хв., а для способів поширених на виробництві, враховуючи тривалість відокремлених від сушіння процесів проварювання (до 60 хв.) та плющення (до 20 хв. із завантаженням та вивантаженням), – не менше 140 хв (окрім екструзійного способу).

Таблиця 5.4.

Енерговитрати на кг готової продукції при виробництві швидко відновлюваних каш різними способами

Спосіб виробництва швидко відновлюваних каш	Енерговитрати, МДж/кг готової продукції
Замочування+ГЧ-обробка+плющення+темперування	11...14
Проварювання+сушіння+пропарювання+сушіння+плющення	14...16
Замочування+екструдкування	11...12
Замочування+проварювання+вакуумне сушіння	13...16
Розроблений спосіб	8...9

Таким чином, розроблено установку для гідротермічної обробки круп з використанням принципів ЗТП-сушіння з продуктивністю 6 кг/год та енерговитратами  $8,1 \cdot 10^6$  Дж/кг по сушеній продукції, де вихідною сировиною є швидко відновлювані каші.

Випробування дослідного зразка сушильної установки експериментально підтвердили отримані результати.

Економічний ефект розробки досягається за рахунок скорочення кількості використовуваних технологічних операцій, виконання основних операцій в одному апараті і, як наслідок, зменшення металоємності використовуваного устаткування і витрат на оплату праці робітників, і найважливіше за рахунок скорочення енерговитрат на одиницю продукції більш ніж у 1,3 рази.

Отримана продукція була апробована в якості гарнірів до других блюд: «Каша гречана», «Каша пшоняна», «Каша перлова», «Каша пшенична», та може використовуватись як складова в швидко відновлюваних кашах з однієї крупи або із декількох відразу, з додаванням фруктів, ягід, грибів, прянощів і т.ін. [157].

Наукові розробки підтверджені патентом України на корисну модель №48230 «Установка для гідротермічної обробки та сушіння крупи» (Додаток Б).

Соціальний ефект практичного впровадження розроблених технологій полягає у розширенні асортименту та можливості використання сушених напівфабрикатів при організації харчування населення як у закладах ресторанного господарства, так і споживачами в домашніх умовах; в ознайомленні студентів ХДУХТ з сучасними досягненнями в науці про сушіння та з основними результатами досліджень за даним науковим напрямком.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Байер К. Здоровый образ жизни / К. Байер, Л. Шейнберг. – М. : Мир, 1997. – 368 с.
2. Батурин А. К. Питание и здоровье: проблемы XXI века / А. К. Батурин, Г. И. Мендельсон // Пищевая промышленность. – 2005. – № 5. – С. 105-107.
3. Воробьев В. И. Слагаемые здоровья (о рациональном питании) / В.И. Воробьев. – М. : Знание, 1987. – 192 с.
4. Воробьев В. И. Питание и здоровье / В.И. Воробьев. – М. : Медицина, 1990. – 160 с.
5. Деренжи П. Свойства зерна, используемого в питании человека / П. Деренжи // Хлебопродукты. – 2001. – №3. – С. 13-15.
6. Зверев С. В. Функциональные зернопродукты / С. В. Зверев. – М. : ДеЛи принт, 2006. – 119 с.
7. Иунихина В. Крупяные продукты – источник пищевых волокон / В.Иунихина // Хлебопродукты. – 2009. – №5. – С.44-46.
8. Кудряшева А. А. Влияние питания на здоровье человека / А. А. Кудряшева // Пищевая промышленность. – 2004. – №12. – С.88-90.
9. Леонова С. Разработка технологии национального крупяного продукта из пророщенного зерна / С. Леонова, А. Нигматьянов, М. Фазылов // Хлебопродукты. – 2010. – №9. – С.48-49.
10. Микронутриенты в питании здорового и больного человека : справочное руководство по витаминам и минеральным веществам / В. А. Тутельян, В. Б. Спиричев, Б. П. Суханов, В. А. Кудашева – М. : Колос, 2002. – 424 с.
11. Мудрецова-Висс К. А. Микробиология, санитария и гигиена: учебник для вузов / К. А. Мудрецова Висс, А. А. Кудряшова, В. П. Дедюхина – 7-е изд. – М. : Издательский дом «Деловая литература», 2001. – 388 с.



12. Скурихин И. М. Все о пище с точки зрения химика : справ. издание / И. М. Скурихин, А. П. Нечаев. – М.: Высшая школа, 1991. – 288 с.
13. Скурихин И. М. Пищевая ценность хлеба и круп / И. М. Скурихин // Хлебопродукты. – 1989. – №11. – С.39-40.
14. Eggum B. O. The Protein Quality of Buckwheat in Comparison With Other Protein Sources of Plant and Animal Origin // Buckwheat: Symp. Ljubljana, 1-3 Sept. 1980. – Ljubljana. – 1980. – P.115-120.
15. Конь И. Я. Значение каш и вторых обеденных крупяных блюд в питании детей раннего возраста / И. Я. Конь, Т. В. Абрамова, В. И. Куркова, Е. М. Булатова // Вопросы детской диетологии. – 2008. – Т.6. – № 1. – С.71-76.
16. Бординова В. П. Антиоксидантные свойства зерна и продуктов его переработки в зарубежных исследованиях / В. П. Бординова, Н. В. Макарова // Журнал Пищевая технология – 2010– № 5-6 (317-318). – С.5-7.
17. Паньковский Г. А. Обогащение микронутриентами пищевых концентратов на зерновой основе / Г. А. Паньковский // Пищевая и перерабатывающая промышленность. Реферативный журнал. – 2005. №3. – С. 987.
18. Рудась П. Г. Потребительские предпочтения к овсяным кашам-инстант / П. Г. Рудась, Н. В. Цугленок // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2006. – № 11. – С. 240-242.
19. Сидоренко Т. А. Потребительские требования к овсяным кашам быстрого приготовления / Т. А. Сидоренко // Пищевая и перерабатывающая промышленность. Реферативный журнал. – 2008. – № 1. – С. 224.
20. Банков В. Г. Разработка обогащенных зерновых каш быстрого приготовления для учащейся молодежи / В. Г. Банков, О. Е. Бакуменко, А. Ф. Доронин // Журнал «Вопросы питания». – 2008. – Т.77. – № 2. – С. 80-83.

21. Рудась П. Г. Потребительские требования к овсяным кашам быстрого приготовления / П. Г. Рудась // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2007. – № 1. – С. 35-36.
22. Рудась П. Г. Разработка технологии новых видов овсяных каш быстрого приготовления, обогащенных микронутриентами / П. Г. Рудась, Н. В. Цугленок // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2006. – № 11. – С. 243-245.
23. Климова Е. В. Разработка обогащенных зерновых каш быстрого приготовления для учащейся молодежи / Е. В. Климова // Пищевая и перерабатывающая промышленность. Реферативный журнал. – 2009. – №1. – С. 210-210.
24. Османьян Р. Г. Обогащение витаминами сухих смесей пищевых концентратов на примере овсяных каш быстрого приготовления / Р. Г. Османьян // Пищевая и перерабатывающая промышленность. Реферативный журнал. – 2006. – № 4. – С. 12-14.
25. Мякинников А. Г. Оптимизация аминокислотного состава смесей кулинарно обработанных круп / А. Г. Мякинников // Пищевая и перерабатывающая промышленность. Реферативный журнал. – 2004. – № 1. – С.10.
26. Cremon K. Increase of food quality grain by means of heat processing // Poultry International, USA. – 1974. – V. 13. – № 11. – p. 55-59.
27. Чеботарев О. Н. Технология муки, крупы и комбикормов / О. Н. Чеботарев. – М. : ИКЦ«МарТ», 2004. – 688 с.
28. Бутковский В. А. Технологии зерноперерабатывающих производств / В. А. Бутковский, А. И. Мерко, Е. М. Мельников. – М. : Интерграфсервис, 1999. – 472 с.
29. Казаков Е. Д. Биохимия зерна и продуктов его переработки / Е. Д. Казаков, В. Л. Кретович. – М. : Агропромиздат, 1989. – 368 с.
30. Козьмина Н. П. Биохимия зерна и продуктов его переработки / Н. П. Козьмина. – М. : Колос, 1976. – 376 с.

31. Pomeranz Y. Buckwheat: Structure, composition and utilization / Crit. Rev. Food Sci. Nutr. – 1983 – 19(3). – P. 213-250.
32. Биохимия растительного сырья / под ред. В. Г. Щербакова. – М. : Колос, 1999. – 376 с.
33. Kusano T. On the Nutritive Components in Buckwheat (part 1) / T. Kusano, H. Miyashita // J. Jap. Soc. Food Nutr. – 1973. – Vol.26. – № 4. – P.239-242.
34. Анискин В. И. Гигроскопические свойства зерна различных культур / В. И. Анискин, Г. С. Окунь и др. – М. : ЦИНТИ Госкомзага, 1967. – 86 с.
35. Вышелесский А. Н. Теплофизические характеристики круп / А. Н. Вышелесский, М. А. Громов, В. В. Переверзев // Хранение и переработка зерна. Сер. Мукомоль-но-крупяная пром-сть. – М. : ЦНИИТЭИ Минзага СССР, 1974. – № 2. – С.32-37.
36. Гергесов Б. А. Теплофизические свойства зерна пшеницы в зависимости от влажности / Б. А. Гергесов, Г. Н. Серых // Изв. ВУЗов. Пищевая технология. – 1977. – №1. – С.150-151.
37. Егоров Г. А. Технологические свойства зерна / Г. А. Егоров. – М. : Агропромиздат, 1985. – 334 с.
38. Казаков Е. Д. Биохимия зерна и хлебопродуктов / Е. Д. Казаков, Г. П. Карпиленко. – 3-е перераб. и доп. изд. Санкт-Петербург: ГИОРД, 2005 – 512 с.
39. Казаков Е. Д. Функции воды в зерне / Е. Д. Казаков // Хлебопродукты. – 1995. – №5. – С.20-21.
40. Попова Е. П. Микроструктура зерна и семян / Е. П. Попова. – М. : Колос, 1979. – 224 с.
41. Пищевая химия / под ред. А.П. Нечаева. – СПб. : ГИОРД, 2004. – 640 с.
42. Кретович В. Л. Биохимия растений / В. Л. Кретович. – М. : Мир, 1980. – 368 с.

- 43.Алексеева Е. С. Культура гречихи. История культуры, ботанические и биологические особенности / Е. С. Алексеева, И. Н. Елагин, Л. К. Тараненко и др. – Каменец-Подольский : Издатель Мошак М.И., 2005. – 192 с.
- 44.Dorrell D. G. Fatty Acid Composition of Buckwheat Seed / D. G. Dorrell // Journal of the American Oil Chemists Society. – 1971. – Vol.48. – P. 693-696.
- 45.Ikeda S. Zinc in Cereals / S. Ikeda, N.Matsui, T. Shimizu and T. Murakami // In: Cereals International. Eds. D.J. Martin and C.W. Wrigley, Royal Australian Chem. Inst., Parkville. – 1991. – pp. 248-250.
- 46.Javornik B. Buckwheat Proteins / B. Javornik // Buckwheat: Symp. Ljubljana, 1-3 Sept. 1980. – Ljubljana. – 1980. – P.121-126.
- 47.Dawis R. I. Drying starch with flash dryers / R. I. Dawis // II Chemical engineering progress symposium series. – 1968. – V.64 – №86. – p.105-110.
- 48.Анисимова Л. В. Исследование способа гидротермической обработки зерна проса без пропаривания / Л. В. Анисимова, Е. Я. Некрасова // Ползуновский альманах. – 1999. –№ 3. – С.104-105.
- 49.Егоров Г. А. Влияние тепла и влаги на процессы переработки и хранения зерна / Г. А. Егоров. – М. : Колос, 1973. – 264 с.
- 50.Егоров Г. А. Управление технологическими свойствами зерна / Г. А. Егоров. – М. : Колос, 2000. – 348 с.
- 51.Анисимова Л. В. Распределение влаги в зерне крупяных культур при увлажнении и отволаживании / Л. В. Анисимова // Известия ВУЗов. Пищевая технология. – 2005. – №1. – С.60-62.
- 52.Криволапов Ф. Г. О расщепляемости крахмала крупы при гидротермической обработке / Ф. Г. Криволапов, Л. Е. Синельникова // Изв.вузов. Пищевая технология. – 1959. – №1. – С.90-93.
- 53.Криволапов Ф. Г. Влияние гидротермической обработки на некоторые свойства крахмала крупяных культур / Ф. Г. Криволапов, Л. Е.

- Синельникова, Л. И. Шилова // Изв.вузов. Пищевая технология. – 1963. – №3. – С.54-56.
- 54.Криволапов Ф. Г. Гидрофильность крупы в связи с ее гидротермической обработкой / Ф. Г. Криволапов, Л. И. Шилова // Изв.вузов. Пищевая технология. – 1959. – №5. – С.13-16.
- 55.Козьмина Е. П. Изменение структуры некоторых видов круп при влаготепловой обработке / Е. П. Козьмина, Е. Я. Троицкая // Изв.вузов. Пищевая технология. – 1973. – №6. – С.59-60.
- 56.Козьмина Е. П. Влияние длительности замачивания на физико-химические свойства круп / Е. П. Козьмина, Е. Я. Троицкая // Обзор информ. Серия Муком. - крупяная пром-сть. – М. : ЦНИИТЭИ Минзага СССР, 1972. – вып 4. – 17 с.
- 57.Смирнов В. С. Изменение химического состава ядра проса, овса, гречихи при водно-тепловой обработке / В. С. Смирнов, И. П. Салун, А. Н. Рукосуев // Труды МИНХ. – 1963. – Вып.24. – С.119-125.
- 58.Яковенко В. А. Влияние гидротермической обработки зерна на белки круп пшеницы и ядрицы / В. А. Яковенко, В. В. Манераки, Г. А. Ставицкая // Изв.вузов. Пищевая технология. – 1974. – №1. – С.55-57.
- 59.Чеботарев О. Н. Гидротермическая обработка как средство оптимизации технологических свойств зерна / О. Н. Чеботарев, Ж. П. Соловьева // Изв. вузов. Пищевая технология. – 2005. – №5-6. – С.15-17.
- 60.Егоров Г. А. Гидротермическая обработка зерна / Г. А. Егоров – М. : Колос, 1968. – 97 с.
- 61.Егоров Г. А. Теория и практика ГТО зерна : дис. ... канд. техн. наук. / Г. А. Егоров. – МТИПП, М., 1970. – 305 с.
- 62.Пат. №2203562 РФ, А 23 L 1/164. Линия для производства не требующих варки хлопьев / Елькин Н. В., Кирдяшкин В. В. ; опубл. 10.05.2003, Бюл. №13 – 3с.

63. А. с. 880400 СССР, МКИ А 23 L 01/10. Способ производства ячменных хлопьев / Мельников Е. М., Хотетовская М. К. – № 2833036 ; заявл. 12.10.79 ; опубл. 15.11.81, Бюл. №42. – 5с.
64. Пат. №2200429 РФ : А 23 L 1/164, 1/20. Способ получения хлопьев из злаковых и бобовых культур / Корчагин С.П. ; опубл. 20.03.2003. – 5с.
65. Пат. №2436407 RU, МПК А 23 G 3/00, А 23 L 1/09, А 23 L 1/10, А 23 L 1/164, А 23 G 3/54 Способ производства и состав продукта на основе хлопьев злаковых культур / Крыжановский А. В. ; заявл. 29.06.2010 ; опубл. 29.08.2011. – 11с.
66. А.с. 1711789 СССР, МКИ5 А 23 L 1/10. Способ гидротермической обработки круп при производстве пищевых концентратов / Кретов И. Т. и др. заявитель и патентообладатель Воронежский технологический институт. – № 4673835/13 ; заявл. 04.04.1989 ; опубл. 15.02.1992. – Бюл. № 6.
67. Пат. №2320199 RU, МПК А 23 L 1/168 Продукт быстрого приготовления "бизнес меню" на основе гречневых хлопьев / Нгуен Чи Киен (RU) ; заявл. 24.04.2006 ; опубл. 27.10.2007. – 7с.
68. Пат. №2203561 РФ, А 23 L 1/164. Способ производства не требующих варки хлопьев / Елькин Н.В., Кирдяшкин В.В. ; опубл. 10.05.2003, Бюл. №13 – 5с.
69. А. с. №1107822 СССР, МКИ А 23 L 01/10. Способ производства из ядра гречихи продукта, не требующего варки / Лопатинский С. Н. и др. ; опубл. в Б.И. № 30, 1984. – 7с.
70. Пат. №2175497 Россия, МКИ7 А 23 L 1/168 Способ производства крупяного продукта, не требующего варки / Иунихина В. С., Курцева В. Г., Виноградова И. Л., Бумагина Ю. А. – № 2000102367/13 ; заявл. 31.01.2000 ; опубл. 10.11.2001, Бюл. № 6. – 6с.
71. А. с. №1421292 СССР, МКИ А 23 L 01/10. Варочно-сушильный аппарат / Кравченко В. М., Остриков А. Н., Калашников Г. В. (СССР). – №

- 4102817/3013 ; заявл. 25.07.86 ; опубл. 07.09.88. Бюл. № 33 // Открытия. Изобретения. 1988. – №33. – С. 6-7.
72. Пат. №2236152 RU, МПК А 23 L 1/164 Способ производства зерновых хлопьев / Петруня Е. В. (RU), Мельников Е. М. (RU) ; заявл. 28.11.2002 ; опубл. 28.12.2002. – 4с.
73. А. с. №1540782, МКИ А 23 L 1/10. Способ производства гречневой крупы, не требующей варки / Гусев П. Г., Виноградов В. Л., Ведмидь П. В. ; опубл. в Б.И., 1990. – №5.
74. Пат. №2165714 RU, МПК А 23 L 1/168, А 23 L 1/164, А 23 L 1/212, А 23 L 1/483 Лаковый продукт быстрого приготовления с добавленными овощами и способ его получения / Эрнст Х. Раймердес (DE), Пьер Дюпар (FR), Освальдо Джеромини (IT), Жан-Жак Дежардан (FR) ; заявл. 22.12.1995 ; опубл. 27.04.2001. – 6с.
75. А. с. №102760 СССР, МКИ5 А 23 L 1/10 Способ получения быстрорастваривающихся крупяных продуктов / Спиридонова Д. И., Клейнман М. С., Гинзбург М. Е. – №4992/451860 ; заявл. 16.07.1955 ; опубл. 16.07.1955. – 4с.
76. А. с. №197384 СССР, МКИ5 А 23 L 1/164. Способ производства крупяных концентратов, не требующих варки при приготовлении пищи / Генин С. А., Гуляев В. Н. – №1009855/28 ; заявл. 28.05.1965 ; опубл. 31.05.1967. – 4с.
77. А. с. №1554869, МКИ А 23 L 1/164 Способ производства ячменных хлопьев / Агеенко И. С., Ильясов С. Г. ; опубл. в Б.И., 1990. – №7. – 5с.
78. Доронин А. Ф. Особенности экструзионной технологии при производстве пищевых продуктов / А. Ф. Доронин, М. А. Климова // Вестник Университета пищевых производств – М. : МГУПП, 1997. – 20 с.
79. Пат. №2366277 RU, МПК А 23 L 1/10, А 23 L 1/164 Способ производства мультизерновых хлопьев / Окулич-Казарин Е. Г. (RU), Шапран В. Г.

- (RU), Быков А. А. (RU), Рудометкин А. С. (RU) ; заявл. 03.08.2007 ; опубл. 10.02.2009. – 5с.
80. Пат. №2459425, МПК А 23 L 1/10, А 23 L 1/164, А 23 L 1/0522, А 23 L 1/18, А 23 L 1/308 Вспученные экструдированные зерновые продукты с богатым источником пищевого волокна / Четел Р. (US), Мьюи С. (US), Френч Д. (US) ; заявл. 20.10.2009 ; опубл. 27.08.2012. – 9с.
81. Пат. №2081617 Россия, МКИ6 А 23 L 001/18 Продукт экструзионной технологии сухой завтрак «Новинка» / Артемьева Н. К., Макарова Г. А., Нижник О. К. – №95107954 ; заявл. 15.01.1997 ; опубл. 20.06.1997, Бюл. №8. – 5с.
82. Пат. №2067399 РФ, МПК А 23 L 1/164, А 23 L 1/18, А 23 L 1/168 Способ изготовления готового к употреблению крупяного продукта / Жуан де Алмейда [PT] ; заявл. 17.07.1992 ; опубл. 10.10.1996. – 4с.
83. Пат. №2067833 RU, МПК А 21 В 5/02, А 23 L 1/18, А 23 Р 1/14 Устройство для переработки зерна / Минаев М. М. ; заявл. 17.01.1994 ; опубл. 20.10.1996. – 8с.
84. Пат. №2137407 RU, МПК А 23 Р 1/14, А 23 L 1/18, А 21 В 5/02 Устройство для переработки зерна / Белогорцев А. М., Илларионов А. А., Баранов Ю. П. ; заявл. 18.09.1998 ; опубл. 20.09.1999. – 7с.
85. Пат. №2281004 RU, МПК А 23 L 1/164, 1/18, 1/168 Способ получения пищевого продукта из зерновых культур / Бастриков Д. Н. (RU), Панкратов Г. Н. (RU) ; заявл. 19.10.2005 ; опубл. 13.06.2006 – 4с.
86. Пат. №2294650 RU, МПК А 23 L 1/10, А 23 L 1/18 А 23 L 1/182 (2006.01) Способ получения сушеного альфа-риса с помощью вакуумной сушки / Чхой Чхулбэ (KR), Чхой Кхюсик (KR), Чхой Кхюнхо (KR), Хан Кхвансун (KR), Ан Хваджин (KR) ; заявл. 21.04.2003 ; опубл. 27.10.2005. – 11с.
87. Малин Н. И. Энергосберегающая сушка зерна / Н. И. Малин. – М. : Колос, 2004. – 240 с.



88. Станкевич Г. Н. Научные основы совершенствования сушки зерна и кормовых средств : Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.03 / Г. Н. Станкевич ; [Одесская гос. академия пищевых технологий]. - О., 1997. - 35с.
89. Сажин Б. С. Научные основы техники сушки / Б. С. Сажин, В. Б. Сажин. - М. : Наука, 1997. - 448 с.
90. Мельников Е. М. Интенсификация крупяного производства на основе гидротермической обработки зерна : дис. ... д-ра техн. наук / Е. М. Мельников. - М., 1976. - 461 с.
91. Иунихина В. Крупяные продукты быстрого приготовления / В. Иунихина, Е. Мельников // Хлебопродукты. - 2006. - №1. - С.30-32.
92. Андреев Н. Р. Структура, химический состав и технологические признаки основных видов крахмалсодержащего сырья / Н. Р. Андреев, В. Г. Карпов // Хранение и переработка сельхозсырья. - 1999. - №7. - С. 30-33.
93. Панфилова И. А. Разработка технологии быстрорастворимой крупы и хлопьев из цельного зерна пшеницы профилактического назначения с использованием ИК-обработки : дис. ... канд. техн. наук / И. А. Панфилова. - М., 1997 - 175с.
94. Гинзбург М. Е. Технология крупяного производства / М. Е. Гинзбург - 4-е изд., доп. и перераб. - М. : Колос, 1981. - 208 с.
95. Вертяков Ф. Н. Влияние температуры на разрыхление эндосперма зерна пшеницы при увлажнении / Ф. Н. Вертяков, Н. П. Владимиров, О. Н. Чеботарев, Г. А. Егоров // Мукомольно-крупяная промышленность. Реферативная информация. - 1978. - Вып.3. - С. 6-7.
96. Гончарова З. Д. Влияние гидротермической обработки зерна на его структурно-механические свойства : дис. ... канд. техн. наук / З. Д. Гончарова. - М., 1962. - 232 с.
97. Гулюк Н. Г. Крахмал и крахмалопродукты / Н. Г. Гулюк. - М. : Агропромиздат, 1985. - 240 с.

98. Бачурская Л. Д. Пищевые концентраты / Л. Д. Бачурская, В. Н. Гуляев. – М. : Пищевая промышленность, 1976. – 336 с.
99. Бачурская Л. Д. Технология пищевых концентратов / Л. Д. Бачурская, В. Н. Гуляев. – М. : Пищевая промышленность, 1970. – 312с.
100. Мельников Е. Технология производства гречневых хлопьев / Е. Мельников, А. Ушакова, Е. Серегина // Хлебопродукты. – 2000. – №9. – С.10-11.
101. Гинзбург А. С. Сушка пищевых продуктов / А. С. Гинзбург. – М. : Пищепромиздат, 1960. – 684с.
102. Бутковский В. А. Технологии зерноперерабатывающих производств / В. А. Бутковский, А. И. Мерко, Е. М. Мельников. – М. : Интеграф сервис, 1999. – 472с.
103. Пат. №2096962 РФ : МКИ А 23 В 7/03. Способ сушки пищевых продуктов / Погожих Н. И., Потапов В. А., Цуркан Н. М. (Украина). – №94033280/13 ; заявл. 13.09.94 ; опубл. 22.06.89. БИ №40. – 3с.
104. Погожих Н. И. Научные основы теории и техники сушки пищевого сырья в массообменных модулях : дис. ...д-ра техн. наук / Н. И. Погожих. – Харьков : ХДАТОХ, 2002. – 331 с.
105. Цуркан Н. М. Разработка рациональных режимов производства сушеного быстровосстанавливаемого картофеля : дис. ...канд. техн. наук / Н. М. Цуркан. – Харьков : ХДАТОХ., 2000. – 156 с.
106. Потапов В. А. Рациональные режимы сушки овощей смешанным теплоподводом : Автореф. дис. ...канд. техн. наук : 05.18.12 / В. А. Потапов – Одесса : ОНАХТ., 1994. – 19 с.
107. Пак А. О. Розробка процесу сушіння плодово-ягідної сировини змішаним теплопідводом зі штучним пороутворенням : дис. ... канд. техн. наук / А. О. Пак. – Харків: ХДУХТ, 2008. – 153 с.
108. Погожих Н. И. Гидравлические характеристики канала сушильного агента для СТП-сушки / Н. И. Погожих, А. С. Сомов, В. А. Потапов.//

- Прогресивні технології та удосконалення процесів харчових виробництв : Зб. наук. пр. – Харків : ХДАТОХ, 2000. – Ч.2. – С.16-20.
109. Брэдшоу П. Введение в турбулентность и ее измерение / П. Брэдшоу. – М. : Мир, 1974. – 278с.
110. Борщевский Ю. Т. Управление турбулентным пограничным слоем / Ю. Т. Борщевский, С. Н. Рудин. – К. : Вища школа, 1978. – 320с.
111. Прандтль Л. Гидроаэромеханика / Л. Прандтль. – М. : Изд-во иностр. лит-ры, 1951. – 575с.
112. Лыков А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1968. – 470с.
113. Погожих Н. И. Исследование процессов сушки материалов смешанным теплоподводом вблизи критических режимов / Н. И. Погожих, Н. М. Цуркан, В. А. Потапов // Актуальні науково-методичні проблеми в підготовці спеціалістів вищої кваліфікації для торгівлі і харчування : Зб. наук. пр. – Харків : ХДАТОХ, 1997. – Ч.1. – С.343-346
114. Grishin M. A. Research of the drying process of materials by mixed heat transfer / M. A. Grishin, V. V. Zhukov, N. I. Pogozhih, V. A. Potapov // Abstracts of Reports International Conference “Heat and Mass Transfer in Technological Process”. – Jurmala. – 1991. – P.13-15.
115. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев. – М. : Госэнергоиздат, 1956. – 276с.
116. Никитина Л. М. Термодинамические параметры и коэффициенты массопереноса во влажных материалах / Л. М. Никитина. – М. : Энергия, 1968. – 500с.
117. Hartnet J. P. Mass transfer cooling in laminar boundary layer with constant fluid properties / J. P. Hartnet, E. R. G. Eckert. – In: Recent Advances in Heat and Mass Transfer, McGraw-Hill. – 1961. – P.142-160

118. Лыков А. В. Тепломассообмен : [Справочник] / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1971. – 476с.
119. Погожих Н. И. Основы технологии и техники сушки смешанным теплоподводом / Н. И. Погожих // Актуальні науково-методичні проблеми в підготовці спеціалістів вищої кваліфікації для торгівлі і харчування : Зб. наук. пр. – Харків : ХДАТОХ, 1997. – Ч.1. – С.358-361.
120. Погожих Н. И. Механизмы тепломассообмена при СТП-сушке / Н. И. Погожих // Прогресивні технології та удосконалення процесів харчових виробництв : Зб. наук. пр. – Харків : ХДАТОХ, 2000. – Ч.2. – С.49-53.
121. Гришин М. А. Особенности кинетики СТП-сушки пищевых растительных материалов / М. А. Гришин, Н. И. Погожих, В. А. Потапов // Проблемы общественного питания на пути к рынку : Сб. научн. раб. – Харьков : ХГАТОХ, 1993. – С.167-171.
122. Погожих Н. И. Исследование процесса сушки со смешанным теплоподводом / Н. И. Погожих, В. А. Потапов, Г. Н. Червинский // Технология и качество пищевых продуктов : Сб. научн. тр. – Харьков : ХИОП, 1992. – С.10-14.
123. Погожих Н. И. Технология и особенности процесса сушки со смешанным теплоподводом / Н. И. Погожих // Труды научн. техн. конф. «Разработка комбинированных продуктов питания. (Медико-биологические аспекты, технология, аппаратурное оформление, оптимизация)». – Кемерово : КемТИПП. – 1991. – С.110-112.
124. Погожих Н. И. Особенности тепломассообменных процессов при сушке смешанным теплоподводом / Н. И. Погожих // Нові технології та удосконалення процесів харчових виробництв : Зб. наук. пр. – Харків : ХДАТОХ, 1999. – С.204-208.
125. Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов / И. Пригожин : Пер. с англ. – М. : ИЛ, 1960. – 127с.

126. Гленсдсдорф П. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций / П. Гленсдсдорф, И. Пригожин : Пер. с англ. – М. : Мир, 1973. – 317с.
127. Гродинз Ф. Теория регулирования и биологические системы / Ф. Гродинз : Пер. с англ. – М. : Мир, 1966. – 254с.
128. MathCad 2000: учебный курс / В. Дьяконов. – СПб : Питер, 2000. – 592с.:ил.
129. Погожих М. І. Шляхи підвищення якості швидко відновлювальних продуктів харчування, які отримують з використанням сушіння змішаним теплопідводом / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. В. Жеребкін // Матеріали IV Міжнародної конференції «Strategy of Quality in Industry and education» : 4-11 юня 2010г., Варна, – Болгарія : Матеріали в 4-х томах. – Т.1. – Ч.1. – С.422-424.
130. Пат. №48230 UA : МПК А 23 L 3/00 Установка для гідротермічної обробки та сушіння крупи / Черевко О. І., Погожих М. І., Жеребкін М. В., Пак А. О., Цуркан М. М. – № U2009 09646 ; заявл. 21.09.2009 ; опубл. 10.03.2010. – Бюл. №5, 2010 р.– 2 с.
131. Погожих М. І. Внутрішні чинники процесу гідротермічної обробки круп з використанням принципів ЗТП-сушіння / М. І. Погожих, А. О. Пак, Т. В. Міщенко, М. В. Жеребкін // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 5/3 (53). – С.60-63.
132. Погожих М. І. Способ и установка для получения быстровосстанавливаемых каш с использованием принципов СТП-сушки / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. В. Жеребкін // Труды международного научно-технического семинара «Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов» : 11-13 мая 2010г. : ГОУ ВПО «ВГЛТА» : Воронеж, 2010. – С. 220-223
133. Гинзбург А. С. Теплофизические свойства зерна, муки и крупы / А. С. Гинзбург, М. А. Громов. – М. : Колос, 1984. – 304 с.

134. Лаврушина Ю. А. Исследование сорбционных свойств и химического состава крупяных изделий / Ю. А. Лаврушина, Р. А. Филичкина, А. А. Иванова, О. А. Шпигун // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2000. – № 2. – С.52-53.
135. Потапов В. О. Структурно-енергетичний метод аналізу ізотерм сорбції-десорбції харчової сировини / В. О. Потапов // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства та торгівлі : Зб. наук. пр. Харків : ХДУХТ, 2005. – Вип.1. – С.313-322.
136. Потапов В. А. Научные основы анализа и управления кинетикой сушки пищевого сырья : дис. ... д-ра. техн. наук / Потапов В. А. – Харьков, 2007. – 348с.
137. Оспанов А. Моделирование процесса увлажнения зерна при гидротермической обработке / А. Оспанов, А. Румянцев, Н. Борзов // Хлебопродукты. – 2008. – №4. – С. 56-57.
138. Погожих М. І. Дослідження плинину вологої сировини в функціональній ємності прямокутного перерізу / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. В. Жеребкін // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2009. – №6/5 (42). – С.56-59
139. Погожих М. І. Дослідження кінетики сушіння сировини при виробництві швидковідновлюваних каш / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. В. Жеребкін // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини [Текст] : Всеукр. науково-практ. конф., 3-4 листопада 2011р. : [тези] / редкол. : О. І. Черевко [та ін.] ; Харк. держ. ун-т харч. та торгівлі. – Х. : ХДУХТ, 2011. – С. 62-63.
140. Погожих М. І. Математична модель кінетики температури сировини під час ЗТП-сушіння / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. А. Чеканов, М. В. Жеребкін / Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск : Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2011. – № 43. – С. 7-12.

141. Погожих Н. И. Постановка задачи исследования развития диссипативных структур при сушке смешанным теплоподводом / Н. И. Погожих, А. О. Пак // Труды четвертой Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (Сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ – 2011» [Текст] : 20-23 сентября 2011г. – Москва : ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина», 2011. – Т.1. – С. 432-436.
142. Самарский А. А. Вычислительная теплопередача / А. А. Самарский, П. Н. Вабищевич. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.
143. Тихонов А. Н. Дифференциальные уравнения / А. Н. Тихонов, А. Б. Васильева, А. Г. Свешников. – М. : «Наука», 1980. – 231с.
144. Кошляков Н. С. Уравнения в частных производных математической физики / Н. С. Кошляков, Э. Б. Глинер, М. М. Смирнов. – М. : «Высшая школа», 1970. – 712с.
145. Погожих М. І. Функція розподілення потужності дисипативних структур всередині ФЄ під час ЗТП-сушіння / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. В. Жеребкін // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2/12 (56). – Харьков, 2012. – С.59-63
146. Матц С. А. Структура и консистенция пищевых продуктов / С. А. Матц : Пер. с англ. – М. : Пищевая промышленность, 1972. – 237с.
147. Погожих М. І. Дослідження умов зберігання та показників якості швидковідновлювальних каш отриманих сушінням змішаним теплопідводом / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. В. Жеребкін // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства та торгівлі [Текст] : зб. наук. праць ХДУХТ. – Харків, 2011. – Вип.1(13). – С.21-26.
148. Погожих М. І. Визначення умов зберігання швидковідновлювальних каш, отриманих сушінням змішаним теплопідведенням / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. В. Жеребкін // Прогресивні

- техніка та технології харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг [Текст] : Міжнародна науково-практична конференція, 19 травня 2011р. : [тези : у 4 ч.]. – Харків : ХДУХТ, 2011. – Ч.2. – С.85-86.
149. Берлинер Л. Метод спиновых меток. Теория и применение / Л.Берлинер. – М. : Мир, 1979. – 400с.
150. Погожих М. І. Дослідження системної вологи крохмалю зернових культур методом ЕПР / М. І. Погожих, А. О. Пак, А. В. Пак, М. В. Жеребкін // Восточно-европейский журнал передовых технологий, 5/6 (59). Харьков, 2012. – С.62-66.
151. Погожих М. І. Дослідження стану вологи швидковідновлюваної каші методом ЕПР-спінових міток / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. В. Жеребкін // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг [Текст] : Міжнародна науково-практична конференція, 18 жовтня 2012р. : [присвячена 45-річчю ХДУХТ тези : у 2 ч.]. – Харків : ХДУХТ, 2012. – Ч.1. – С.425-427.
152. Ребиндер П. А. О формах связи влаги с материалом в процессе сушки / П. А. Ребиндер // ВНТ совещание «По интенсификации процессов и улучшению качества материалов при сушке в основных отраслях промышленности и сельском хозяйстве». – М. : Профиздат, 1958. – С.20-33.
153. Погожих М. І. Пористість швидковідновлювальної каші, отриманої сушінням змішаним тепlopідводом / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. В. Жеребкін // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій Міністерства освіти і науки України. – Одеса : 2011. – Вип. 40. – Том 1. – С. 54-57



154. Державні гігієнічні нормативи. Допустимі рівні вмісту радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  у продуктах харчування та питній воді : ДР-97. – К., 1997. – 7 с.
155. Гигиенические требования к качеству и безопасности продовольственного сырья и пищевых продуктов : СанПиН 2.3.2.560-96 – М. : Изд-во стандартов, 1997. – 313 с.
156. ГОСТ № 5061-89. «Медиико-биологические требования и санитарные нормы качества продовольственного сырья и пищевых продуктов». – М. : Изд-во стандартов. 1990. – 200с.
157. Сборник рецептур и кулинарных изделий для предприятий общественного питания. – М. : Экономика, 1983. – 720 с. – (Министерство торговли СССР).

## ДОДАТКИ

## **ДОДАТОК А**

### **Приклади розрахунку за допомогою пакету програм MathCad**

- А.1. Приклади програм для розрахунку деяких функцій для математичної моделі розвитку дисипативних структур в процесі ЗТП-сушіння**
- А.2. Розрахунок основних технічних характеристик установки малої продуктивності для гідротермічної обробки круп з використанням принципів ЗТП-сушіння**

Определение кинетики температуры как функции температуры сушильного агента

$$F(x,y,P,z) := \begin{cases} \text{for } n \in 0..P \\ \quad \vec{X}^{(n)} \leftarrow x^n \\ \quad a \leftarrow (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot y \\ \quad f \leftarrow 0 \\ \quad \text{for } i \in 0..P \\ \quad \quad f \leftarrow f + a_1 \cdot z^i \\ \quad f \end{cases} \quad \text{ap}(x,y,P) := \begin{cases} \text{for } n \in 0..P \\ \quad \vec{X}^{(n)} \leftarrow x^n \\ \quad a \leftarrow (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot y \end{cases}$$

data0 := READPRN("temp\_vs\_tau\_40.txt")

data1 := READPRN("temp\_vs\_tau\_70.txt")

t0 := data0<0>      T0 := data0<1>

t1 := data1<0>      T1 := data1<1>

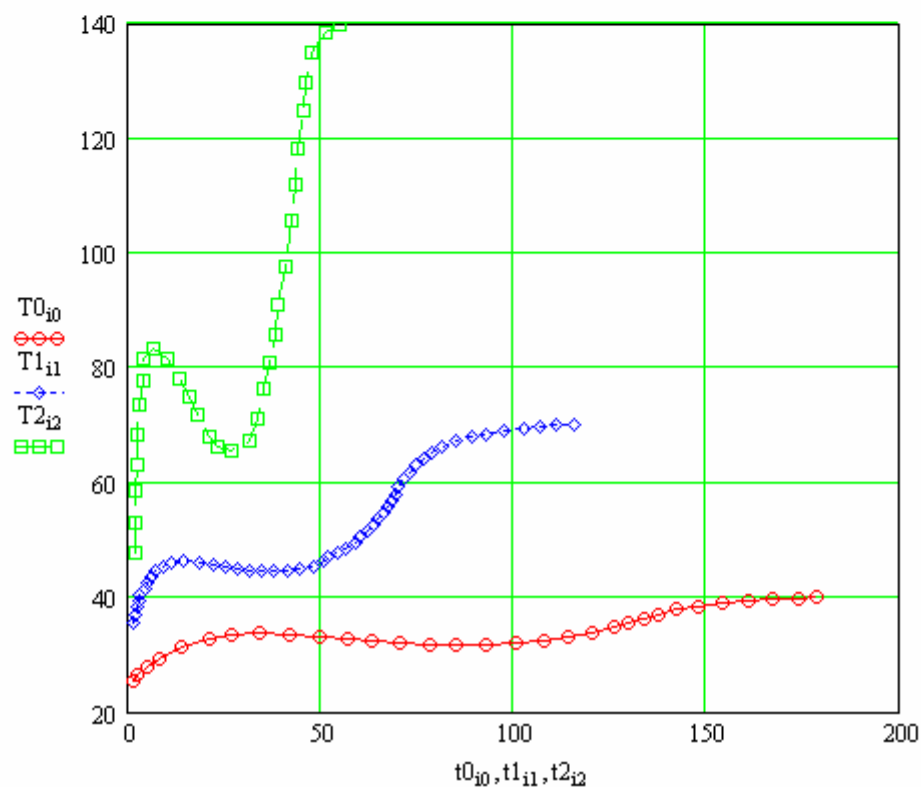
i0 := 0..last(t0)

i1 := 0..last(t1)

data2 := READPRN("temp\_vs\_tau\_140.txt")

t2 := data2<0>      T2 := data2<1>

i2 := 0..last(t2)



Функция, описывающая продолжительность процесса сушки от температуры сушильного агента

$$\tau_{0} := \max(t0) \quad \tau_{1} := \max(t1) - 10 \quad \tau_{2} := \max(t2) - 20$$

temp :=

	0
0	40
1	70
2	140

k := 0..last(temp)

a := intercept(temp, ln(tau))

b := slope(temp, ln(tau))

## TAU VS TEMP

$$a = 5.823 \quad b = -0.016$$

at0 := e<sup>intercept(temp, ln(tau))</sup>

at1 := slope(temp, ln(tau))

$$at0 = 337.857$$

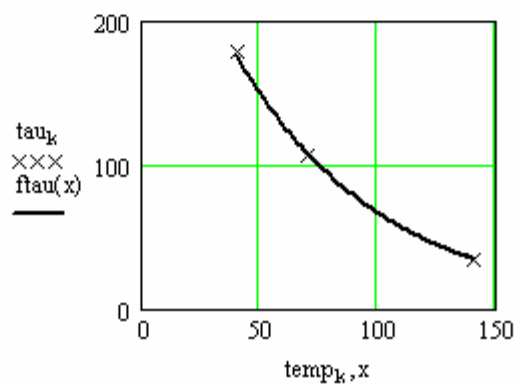
$$at1 = -0.016$$

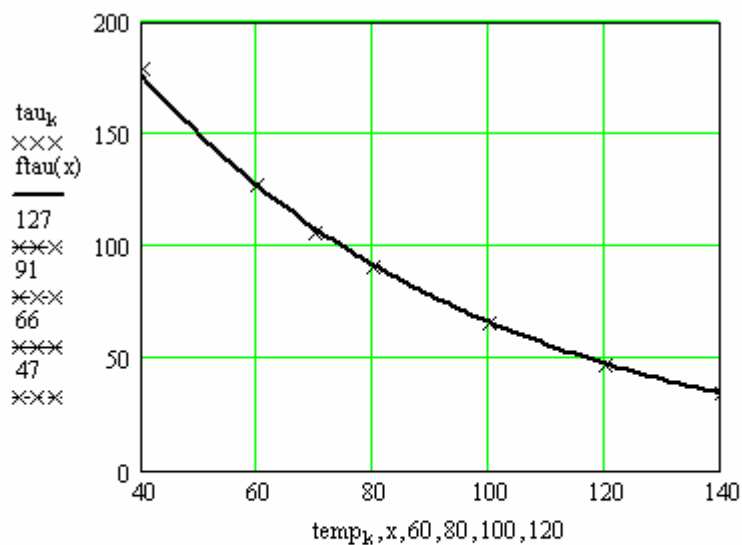
$$f_{\tau}(\theta_{sa}) := 337.857 \cdot e^{-0.016 \cdot \theta_{sa}}$$

$$\text{corr}(\tau, f_{\tau}(\text{temp})) = 0.999$$

$$f_{\tau}(x) := at0 \cdot e^{at1 \cdot x}$$

$$x := 40..140$$





$$ftau(30) = 207.168 \quad ftau(100) = 66.175$$

$$ftau(40) = 176.002 \quad ftau(120) = 47.763$$

$$ftau(60) = 127.031 \quad ftau(140) = 34.473$$

$$ftau(70) = 107.921$$

Функция, описывающая кинетику температуры

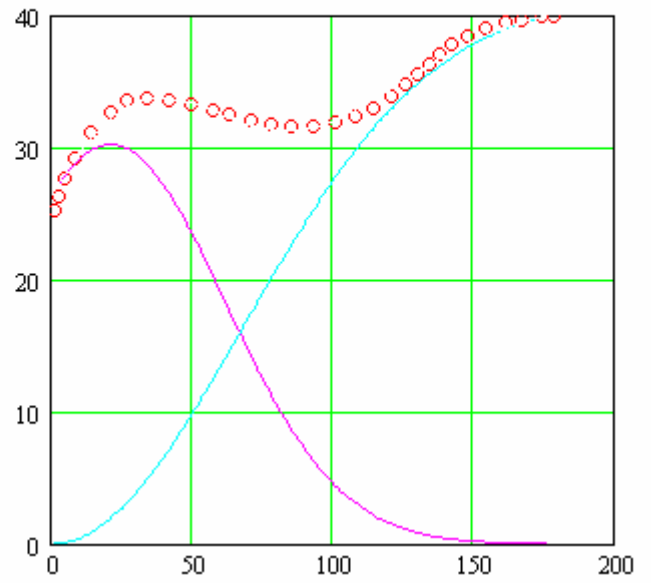
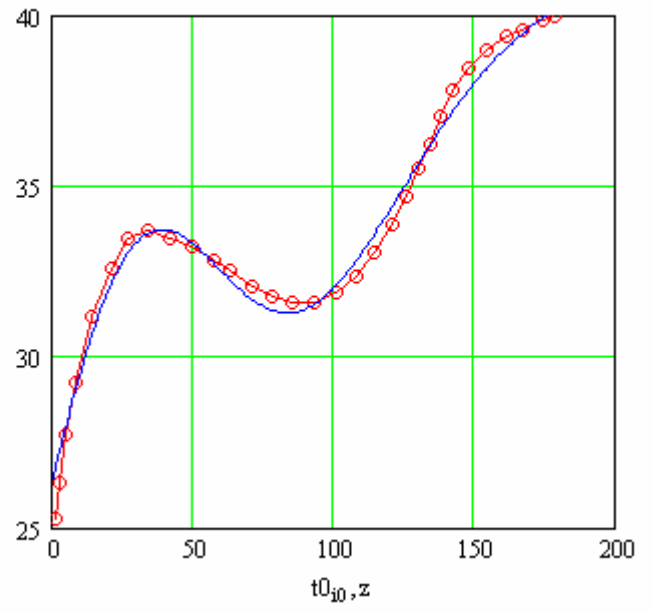
$$fsum(z, a0, a1, a2, a3) := \left[ 1 - e^{-z^2 \cdot a3} + a0 \cdot e^{\frac{-(z-a1)^2}{a2}} \right]$$

$$a0 := 0.73 \quad a1 := 21 \quad a2 := 3300 \quad a3 := 1.09 \cdot 10^{-4} \quad a4 := \max(T0) \quad a5 := ftau(\max(T0))$$

$$A0_0 := a0 \quad A0_1 := a1 \quad A0_2 := a2 \quad A0_3 := a3 \quad A0_4 := a4 \quad A0_5 := a5$$

z := 0.. a5

$T0_{j0}$   
 $\frac{fsum(z, a0, a1, a2, a3)}{fsum(a5, a0, a1, a2, a3)} \cdot a4$



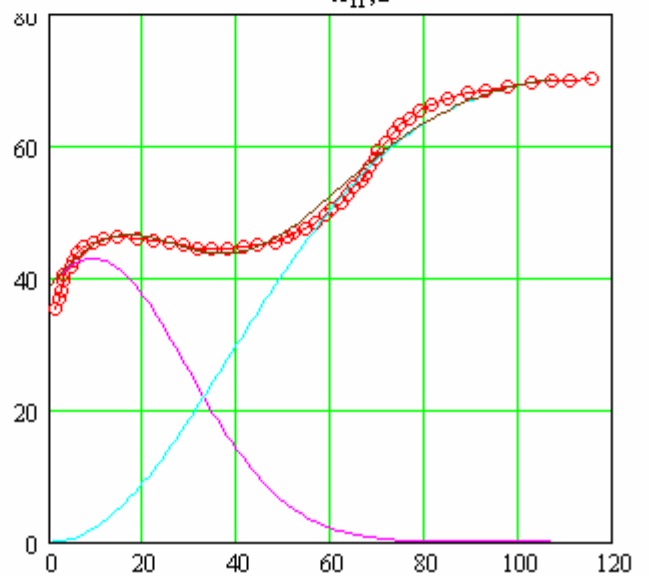
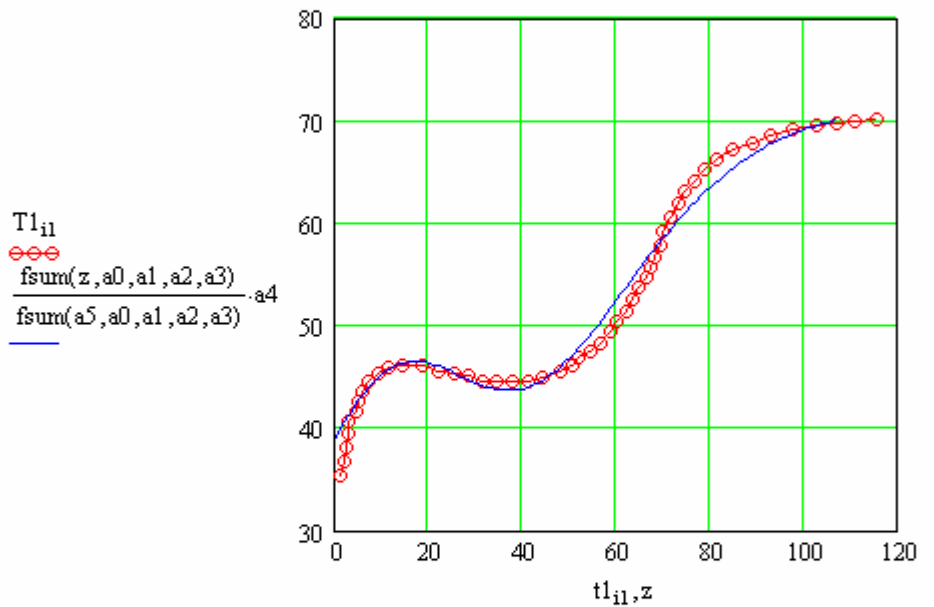
+++++

$$fsum(z, a0, a1, a2, a3) := \left[ 1 - e^{-z^2 \cdot a3} + a0 \cdot e^{-\frac{(z-a1)^2}{a2}} \right]$$

a0 := 0.6    a1 := 9    a2 := 850    a3 := 3.4 · 10<sup>-4</sup>    a4 := max(T1)    a5 := flau(max(T1))

A1<sub>0</sub> := a0    A1<sub>1</sub> := a1    A1<sub>2</sub> := a2    A1<sub>3</sub> := a3    A1<sub>4</sub> := a4    A1<sub>5</sub> := a5

z := 0.. a5





+++++

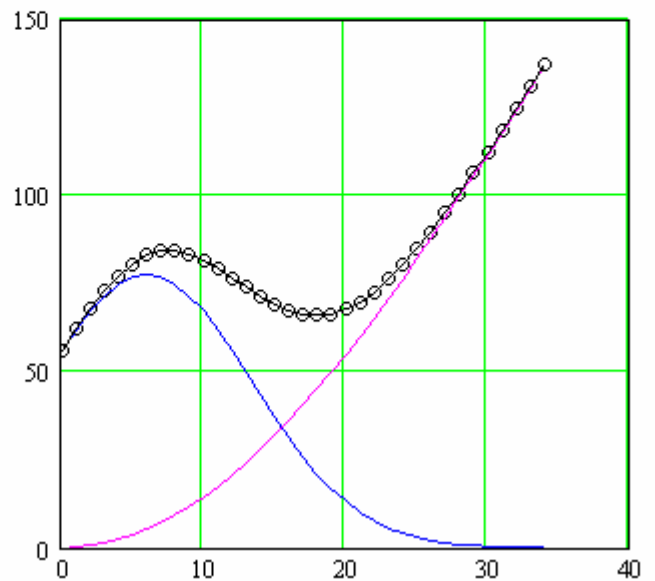
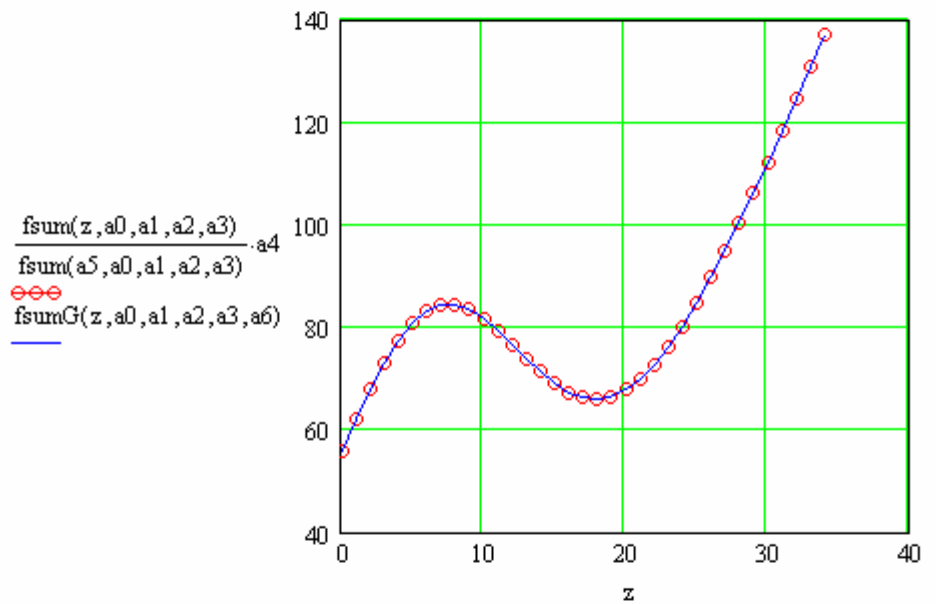
$$fsum(z, a0, a1, a2, a3) := \left[ 1 - e^{-z^2 \cdot a3} + a0 \cdot e^{-\frac{(z-a1)^2}{a2}} \right]$$

a0 := 0.21    a1 := 6    a2 := 110    a3 := 4 · 10<sup>-4</sup>    a4 := max(T2)    a5 := flau(max(T2))

A2<sub>0</sub> := a0    A2<sub>1</sub> := a1    A2<sub>2</sub> := a2    A2<sub>3</sub> := a3    A2<sub>4</sub> := a4    A2<sub>5</sub> := a5

$$a6 := \frac{1}{fsum(a5, a0, a1, a2, a3)} \cdot a4 \qquad A2_6 := a6$$

fsumG(z, a0, a1, a2, a3, a6) := a6 · fsum(z, a0, a1, a2, a3)    z := 0.. a5



```
z1 := 0..fau(40)  z3 := 0..fau(140)
```

```
z2 := 0..fau(70)
```



Расчет коэффициентов

$$A^{(0)} := A0 \quad A^{(1)} := A1 \quad A^{(2)} := A2 \quad A := A^T$$

$$A = \begin{pmatrix} 0.73 & 21 & 3.3 \times 10^3 & 1.09 \times 10^{-4} & 40 & 176.002 & 41.394 \\ 0.6 & 9 & 850 & 3.4 \times 10^{-4} & 70.132 & 107.689 & 71.519 \\ 0.21 & 6 & 110 & 4 \times 10^{-4} & 140 & 34.473 & 369.91 \end{pmatrix}$$

$$C0 := A^{(0)} \quad C1 := A^{(1)} \quad C2 := A^{(2)} \quad C3 := A^{(3)} \quad C4 := A^{(4)} \quad C6 := A^{(6)}$$

$$i := 0..last(C0)$$

coef0

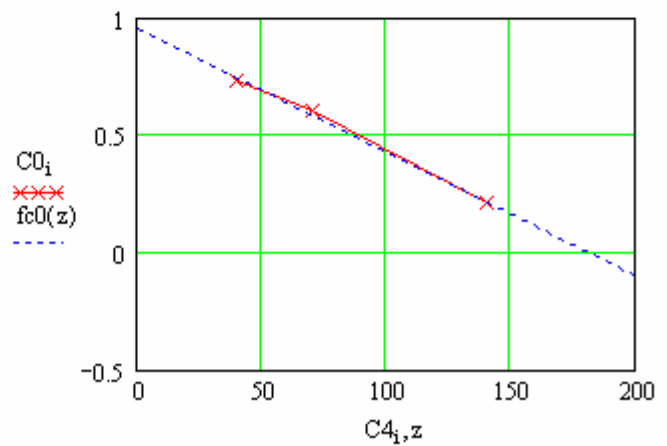
$$c00 := \text{intercept}(C4, C0) \quad c01 := \text{slope}(C4, C0)$$

$$c00 = 0.952 \quad c01 = -5.267 \times 10^{-3}$$

$$fc0(z) := c00 + c01 \cdot z$$

$$z := 0..200$$

$$C0 = \begin{pmatrix} 0.73 \\ 0.6 \\ 0.21 \end{pmatrix}$$



$$\text{coef0}(\theta_{sa}) := 0.952 - 5.267 \times 10^{-3} \cdot \theta_{sa}$$

## coef1

$$c10 := e^{\text{intercept}(C4, \ln(C1))}$$

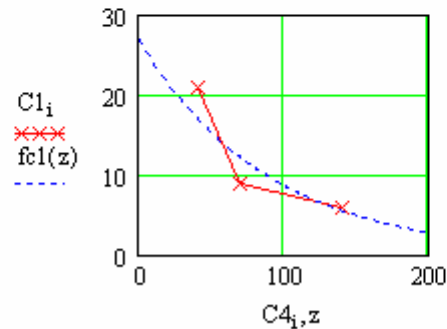
$$c11 := \text{slope}(C4, \ln(C1))$$

$$c10 = 26.855$$

$$c11 = -0.011$$

$$fcl(x) := c10 \cdot e^{c11 \cdot x}$$

$$C1 = \begin{pmatrix} 21 \\ 9 \\ 6 \end{pmatrix}$$



$$\text{coef1}(\theta_{sa}) := 26.855 \cdot e^{-0.011 \cdot \theta_{sa}}$$

## coef2

$$c20 := e^{\text{intercept}(C4, \ln(C2))}$$

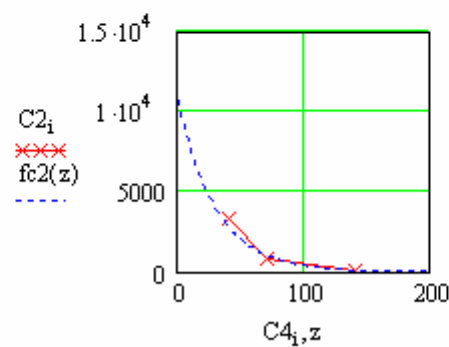
$$c21 := \text{slope}(C4, \ln(C2))$$

$$fc2(x) := c20 \cdot e^{c21 \cdot x}$$

$$c20 = 1.074 \times 10^4$$

$$c21 = -0.033$$

$$C2 = \begin{pmatrix} 3.3 \times 10^3 \\ 850 \\ 110 \end{pmatrix}$$



$$\text{coef2}(\theta_{sa}) := 1.074 \times 10^4 \cdot e^{-0.033 \cdot \theta_{sa}}$$

## coef3

$$C3 = \begin{pmatrix} 1.09 \times 10^{-4} \\ 3.4 \times 10^{-4} \\ 4 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

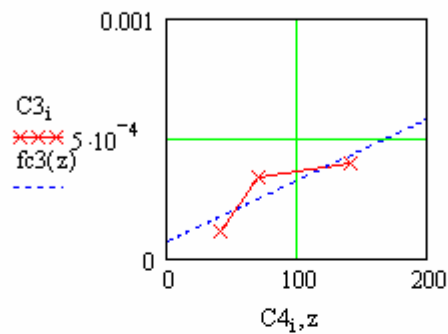
$$c30 := \text{intercept}(C4, C3)$$

$$c31 := \text{slope}(C4, C3)$$

$$fc3(z) := c30 + c31 \cdot z$$

$$c30 = 7.044 \times 10^{-5}$$

$$c31 = 2.549 \times 10^{-6}$$



$$\text{coef3}(\theta_{sa}) := 7.044 \times 10^{-5} + 2.549 \times 10^{-6} \cdot \theta_{sa}$$

## coef4

$$C6 = \begin{pmatrix} 41.394 \\ 71.519 \\ 369.91 \end{pmatrix}$$

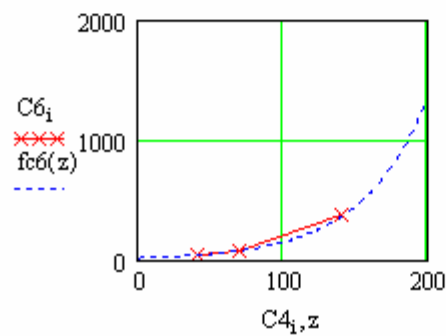
$$c60 := e^{\text{intercept}(C4, \ln(C6))}$$

$$c61 := \text{slope}(C4, \ln(C6))$$

$$fc6(x) := c60 \cdot e^{c61 \cdot x}$$

$$c60 = 16.21$$

$$c61 = 0.022$$



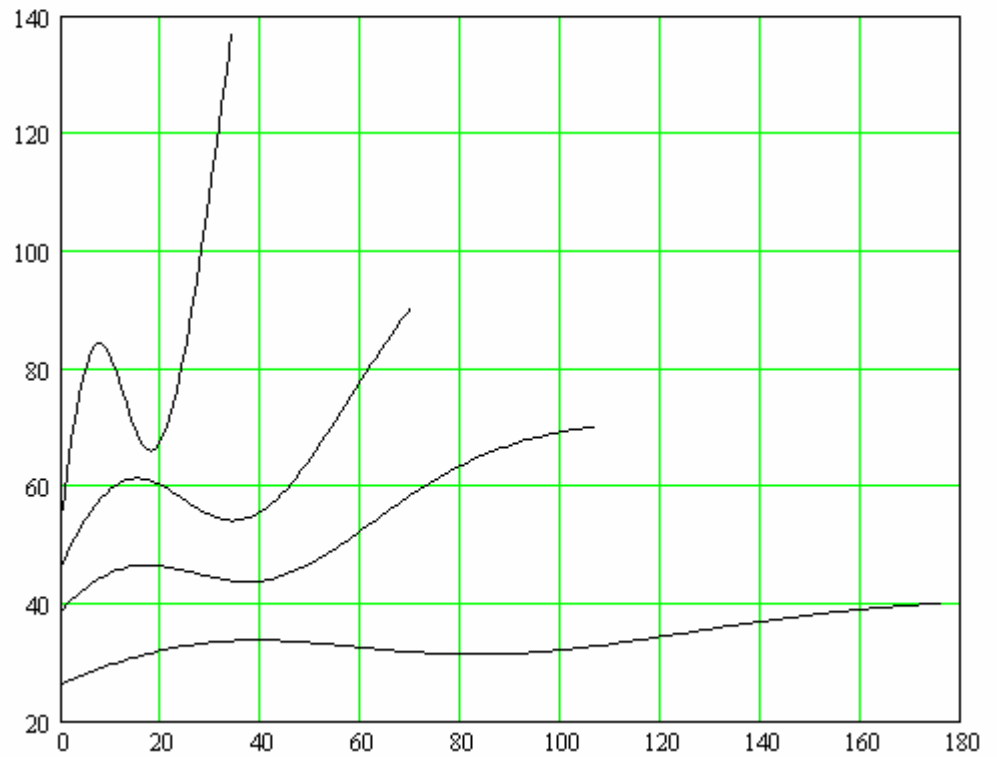
$$\text{coef4}(\theta_{sa}) := 16.21 \cdot e^{0.022 \cdot \theta_{sa}}$$

$$FSUM(\tau, \theta_{sa}) := \text{coef4}(\theta_{sa}) \cdot \left[ \text{coef0}(\theta_{sa}) \cdot e^{-\frac{(\tau - \text{coef1}(\theta_{sa}))^2}{\text{coef2}(\theta_{sa})}} + 1 - e^{-\tau^2 \cdot \text{coef3}(\theta_{sa})} \right]$$

z := 0..70

z1 := 0..ftau(40)    z3 := 0..ftau(140)

z2 := 0..ftau(70)



## Расчет СТП-сушилки для крупы

Нагрузка на ФЕ	$G := 4$		
Количество ФЕ	$N := 4$		
Характеристики продукта	$W0 := 180$	$Wk := 10$	$Cc := 1.424$
Режим сушки	$t := 100$	$\phi := 20$	
	$dt := 8.5$	$t0 := 20$	$d0 := 12$
Продолжительность	нагрева	сушки	
	$th1 := 10$	$th2 := 60$	

Размеры камеры	
стенка 1	$F := \begin{pmatrix} 1.6 \cdot 2.2 \cdot 2.2 \\ 1.2 \cdot 2.2 \cdot 2.2 \\ 1.2 \cdot 1.6 \\ 1.2 \cdot 1.6 \end{pmatrix}$
стенка 2	
крышка	
дно	

Живое сечение для воздуха	$Fa := 1.7 \cdot 0.03 \cdot 0.5$
---------------------------	----------------------------------

Масса установки	$mi := 450$
-----------------	-------------

Характеристики теплоизоляции		
стенка 1	$\lambda := \begin{pmatrix} 45 & 0.035 \\ 45 & 0.035 \\ 45 & 0.035 \\ 45 & 0.035 \end{pmatrix}$	$\delta := \begin{pmatrix} 3 & 50 \\ 3 & 50 \\ 3 & 50 \\ 3 & 50 \end{pmatrix}$
стенка 2		
крышка		
дно		

$$w(W) := \frac{W}{100 + W} \quad m0 := N \cdot G \quad mc := m0 \cdot (1 - w(W0)) \quad mk := \frac{mc}{1 - w(Wk)}$$

$$mw := m0 - mk \quad M := \frac{mw}{th2} \cdot 60$$

$$mk = 6.286 \quad m0 = 16 \quad mw = 9.714 \quad M = 9.714$$

$$a := \begin{pmatrix} 16.293 \\ -3732.4 \\ -232020 \end{pmatrix} \quad m := 0..2 \quad B := 99.325 \quad h(t) := \exp \left[ \sum_m \frac{a_m}{(273 + t)^m} \right]$$

$$d(t, \text{phi}) := 6.22 \cdot \text{phi} \cdot \frac{h(t)}{B - \text{phi} \cdot 0.01 \cdot h(t)} \quad x := t$$

$$I(t, d) := t + \frac{d}{1000} \cdot (2500 + 1.875 \cdot t) \quad d1 := d(t, \text{phi})$$

$$\text{Pr} := \begin{pmatrix} \frac{m0}{\text{th2}} \cdot 60 \\ \frac{mk}{\text{th2}} \cdot 60 \\ M \end{pmatrix}$$

$$I1 := I(t, d1)$$

$$tm := \text{root}(I(x, d(x, 100)) - I1, x)$$

$$d1 = 159.548 \quad tm = -1.253 \times 10^4$$

$$Va(t, d) := \left[ 0.461 \cdot (273 + t) \cdot \frac{622 + d}{B \cdot 1000} \right]$$

$$Qh := (mc \cdot Cc + mw \cdot 4.19) \cdot (tm - t0) + mi \cdot 0.46 \cdot \frac{t - t0}{2}$$

$$qh := \frac{Qh}{m0 - mk} \quad Ph := \frac{Qh}{\text{th1} \cdot 60} \quad Ph = -1.008 \times 10^3$$

$$k(j) := \left( \frac{1}{10} + \frac{1}{23} + \text{delt}_{1,0} \cdot \frac{0.001}{\text{lamb}_{i,0}} + \text{delt}_{1,1} \cdot \frac{0.001}{\text{lamb}_{i,1}} \right)^{-1} \quad j := 0..3$$

$$P_j := k(j) \cdot F_j \cdot (t - t0) \quad t2 := t - dt$$

$$P5 := \sum P \cdot 0.001 \cdot 1.5 \quad q5 := \frac{P5}{M} \cdot 3600$$

$$P5 = 1.328 \quad q5 = 491.969$$



$$x := d1$$

$$d2 := \text{root}\left[\left[11 - I(t2, x) - q5 \cdot 10^{-3} \cdot (x - d1)\right], x\right] \quad d2 = 163.039$$

$$\text{eps} := \frac{d2 - d1}{d2 - d0} \quad I01 := I(t0, d0) \cdot \text{eps} + I(t2, d2) \cdot (1 - \text{eps}) \quad L1 := \frac{1}{d2 - d1}$$

$$t01 := \text{root}(I(x, d1) - I01, x) \quad t01 = 90.199$$

$$V := \begin{pmatrix} Va(t0, d0) \\ Va(th2, d1) \\ Va(t2, d2) \end{pmatrix} \quad L := \begin{pmatrix} V_0 \cdot L1 \cdot \text{eps} \\ V_1 \cdot L1 \\ V_2 \cdot L1 \cdot \text{eps} \end{pmatrix} \cdot M \cdot 1000 \quad L = \begin{pmatrix} 55.453 \\ 3.362 \times 10^3 \\ 85.419 \end{pmatrix}$$

$$qi := \frac{I(t2, d2) - I01}{d2 - d1} \cdot 1000 - \text{tm} \cdot 4.19 \quad v := \frac{L1}{3600 \cdot Fa}$$

$$qc := 1.1 \cdot (qh + qi + q5) \quad Pk := (qi + q5) \cdot M \cdot \frac{1.1}{3600} \quad \text{Exp} := \begin{pmatrix} \frac{mw}{m0} \\ \frac{mw}{mk} \\ 1 \end{pmatrix} \cdot \frac{qc}{3600}$$

$$h := 60 \quad \text{min} := 1$$

$$\text{ksi\_rash}(f, F) := \left(\frac{f}{F} - 1\right)^2 \quad \text{ksi\_suzh}(f, F) := 0.5 \cdot \left(1 - \frac{f}{F}\right)$$

$$\text{ksi\_dia}(f, F) := \left(1 + \frac{0.707}{\sqrt{1 - \frac{f}{F}}}\right)^2 \cdot \left(\frac{F}{f} - 1\right)^2 \quad \text{ksi\_pov90} := 1.1 \quad \text{ksi\_pov135} := 0.35$$

$$\text{ksi\_konf}(F, f, \text{alf}) := \sin(\text{alf}) \cdot \left(1 - \frac{f}{F}\right)^2 + \frac{0.02}{8 \cdot \sin(\text{alf})} \cdot \left[1 - \left(\frac{f}{F}\right)^2\right] \quad \text{fd} := 1.02$$

$$akam := [(24 + 30) \cdot N + 24] \cdot 0.01$$

$$hkam := 0.51$$

$$hpod := 0.026$$

$$ab := 0.35$$

$$bkam := 0.5$$

$$akam := 0.348$$

$$delth := 0.024 - 0.01$$

$$Db := 0.5$$

$$F := \begin{bmatrix} bkam \cdot akam \\ \pi \cdot Db^2 \cdot 0.25 \\ ab \cdot 0.5 \\ ab \cdot akam \\ ab \cdot akam \\ 0.5 \cdot akam \\ bkam \cdot akam \\ (akam - N \cdot hpod) \cdot bkam \\ delth \cdot bkam \cdot (N + 1) \\ (akam - N \cdot hpod) \cdot bkam \end{bmatrix} \quad ksi := \begin{pmatrix} ksi\_pov90 \\ ksi\_suzh(F_1, F_0) \\ ksi\_pov135 \\ ksi\_rash(F_3, F_4) \\ ksi\_pov90 \\ ksi\_pov90 \\ ksi\_dia(F_6, fd) \\ ksi\_suzh(F_7, F_6) \\ ksi\_rash(F_8, F_7) \cdot 3 \\ ksi\_rash(F_9, F_6) \end{pmatrix}$$

$$ro(t, d) := 2.17 \cdot \frac{101}{t + 273} \cdot \frac{1000 + d}{622 + d}$$

$$n := \text{rows}(F) - 1$$

$$i := 0..n$$

$$v_i := \frac{L_1}{3600 \cdot F_i}$$

$$vinp := v_0$$

$$vout := v_0$$

$$P = \begin{pmatrix} 394.068 \\ 295.551 \\ 97.703 \\ 97.703 \end{pmatrix}$$

$$p := \frac{ro(t, d)}{2} \cdot \overrightarrow{[v^2 \cdot (1 + ksi)]}$$

$$P := \sum p$$

$$Finp := \frac{L_0}{3600 \cdot vinp}$$

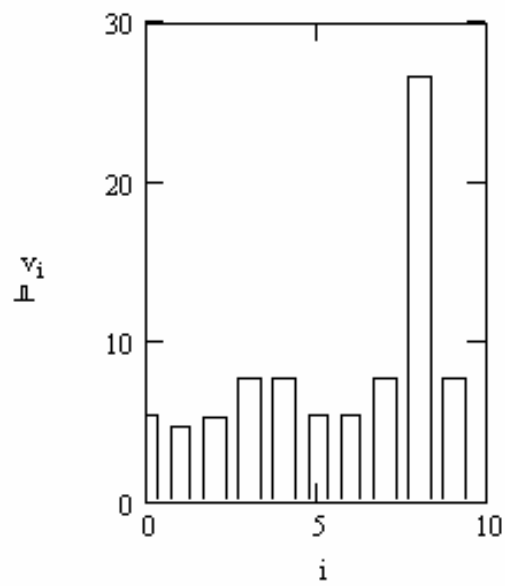
$$Fout := \frac{L_2}{3600 \cdot vout}$$

$$Finp = 2.87 \times 10^{-3} \quad Fout = 4.421 \times 10^{-3}$$

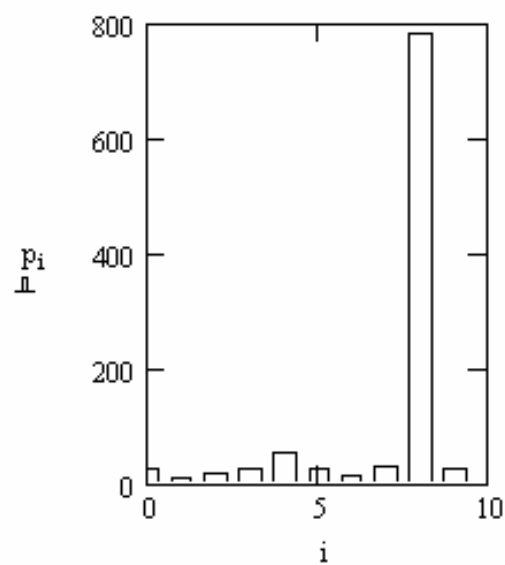
$$\frac{L_1}{3600 \cdot fd} = 4.669$$

$$Pv := L_1 \cdot P \cdot \frac{1.1}{3600000 \cdot 0.7 \cdot 0.97} \quad Pv = 1.534$$

$$sm := 0.01$$



	0
0	5.367
1	4.756
2	5.336
3	7.666
4	7.666
5	5.367
6	5.367
7	7.654
8	26.679
9	7.654



	0
0	26.362
1	9.225
2	16.754
3	25.619
4	53.801
5	26.362
6	15.011
7	29.351
8	783.594
9	27.816

## Характеристики установки

	циркуляция	приток	выхлоп
Расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч	$L_1 = 3.428 \times 10^3$	$L_0 = 252.542$	$L_2 = 303.216$
	$d1 = 41.643$	$d0 = 12$	$d2 = 44.775$
	сушка	нагрев	потери
Мощность калорифера, кВт	$P_k = 11.875$	$P_h = 10.926$	$P_5 = 0.83$
	сырье	сушье	вода
Производительность, кг/ч	$Pr_0 = 16$	$Pr_1 = 6.0$	$Pr_2 = 5.8$
Расход энергии, кВт ч/кг	$Exp_0 = 8.1$	$Exp_1 = 3.9$	$Exp_2 = 0.83$
Масса продукта	$m_0 = 18$	$m_k = 3.6$	$m_w = 14.4$
Режим сушки	$W_0 = 450$	$W_k = 10$	$m_c = 3.273$
	$t = 70$ $t_{01} = 57.739$	$t_m = 41.237$	min v $v_7 = 9.919$
	$t_0 = 20$ $dt = 8.5$	$\phi = 20$	max v $v_8 = 19.432$
Продолжительность: нагрев/сушка, мин	$th1 = 10$	$th2 = 60$	$N = 4$
Характеристики вентилятора:	$L_1 = 3.428 \times 10^3$	$P = 652.284$	$P_v = 1.006$
Площадь прит.-вытяж. каналов		$F_{inp} = 0.013$	$F_{out} = 0.015$

**ДОДАТОК Б**

**Деклараційний патент України на корисну модель  
№48230 «Установка для гідротермічної обробки та сушіння  
круп»**



## НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 48230

### УСТАНОВКА ДЛЯ ГІДРОТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ТА СУШІННЯ КРУПИ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 10.03.2010.

Голова Державного департаменту  
інтелектуальної власності

М.В. Паладій



(11) 48230

(19) UA

(51) МПК (2009)  
A23L 3/00

(21) Номер заявки: u 2009 09646

(22) Дата подання заявки: 21.09.2009

(24) Дата, з якої є чинними  
права на корисну модель: 10.03.2010(46) Дата публікації відомостей  
про видачу патенту та  
номер бюлетеня: 10.03.2010,  
Бюл. № 5

(72) Винахідники:

Черевко Олександр  
Іванович, UA,Погожих Микола Іванович,  
UA,

Жеребкін Максим

Васильович, UA,

Пак Андрій Олександрович, UA,

Цуркан Микола Михайлович,  
UA

(73) Власник:

ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧУВАННЯ  
ТА ТОРГІВЛІ,вул. Клочківська, 333, м.  
Харків, 61051, UA

(54) Назва корисної моделі:

УСТАНОВКА ДЛЯ ГІДРОТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ТА СУШІННЯ КРУПИ

(57) Формула корисної моделі:

Установка для гідротермічної обробки та сушіння крупи, що складається з камери, пристрою для подачі та вивантаження продукту і підводу в камеру нагрітого повітря, яка відрізняється тим, що гідротермічна обробка та сушіння сировини проводиться у функціональній ємності із паронепроникного матеріалу за принципами сушіння змішаного теплопідводу.

(11) 48230

Пронумеровано, прошито металевими  
люверсами та скріплено печаткою  
2 арк.  
10.03.2010



Уповноважена особа



(підпис)





УКРАЇНА

(19) UA (11) 48230 (13) U  
(51) МПК (2009)  
A23L 3/00МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІОПИС  
ДО ПАТЕНТУ  
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬВидатється під  
відповідальність  
власника  
патенту

(54) УСТАНОВКА ДЛЯ ГІДРОТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ТА СУШІННЯ КРУПИ

1

(21) u200909646  
(22) 21.09.2009  
(24) 10.03.2010  
(46) 10.03.2010, Бюл.№ 5, 2010 р.  
(72) ЧЕРЕВКО ОЛЕКСАНДР ІВАНОВИЧ, ПОГО-  
ЖИХ МИКОЛА ІВАНОВИЧ, ЖЕРЕБКІН МАКСИМ  
ВАСИЛЬОВИЧ, ПАК АНДРІЙ ОЛЕГОВИЧ, ЦУРКАН  
МИКОЛА МИХАЙЛОВИЧ  
(73) ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ХАРЧУВАННЯ ТА ТОРГІВЛІ

2

(57) Установа для гідротермічної обробки та сушіння крупи, що складається з камери, пристрою для подачі та вивантаження продукту і підводу в камеру нагрітого повітря, яка відрізняється тим, що гідротермічна обробка та сушіння сировини проводиться у функціональній ємності із паронепроникного матеріалу за принципами сушіння змішаного теплопідводу.

Корисна модель відноситься до харчової промисловості, зокрема до виробництва харчових добавок, і може бути використана в переробній галузі сільськогосподарської продукції, харчоконцентратній та харчовій галузях промисловості.

Відомі установки для гідротермічної обробки та сушіння крупи, що включають окреме відділення для гідротермічної обробки і плющення крупи та стрічкову або шафову сушарку [1].

Недоліком цих пристроїв є необхідність забезпечення високих температур під час гідротермічної обробки крупи та низька ефективність сушильного обладнання.

Найбільш близьким технічним рішенням до корисної моделі є установка для термообробки харчових продуктів, що включає камеру, транспортери, пристрій для подачі та вивантаження продукту і підводу в камеру нагрітого повітря. Камера розділена на секції, в кожній з яких встановлено транспортер. Пристрій для підводу нагрітого повітря знаходяться в кожній секції камери [2].

Недоліком даної установки є велика питома металоемність та складність обладнання, прямий контакт сировини з сушильним агентом і необхідність плющення крупи для підвищення ефективності процесу сушіння та, як наслідок, ускладнення технологічної схеми термообробки крупи.

В основу корисної моделі поставлена задача створення установки з метою спрощення технологічної схеми термообробки крупи, підвищення енергоефективності та якості отримуваної продукції шляхом використання для зневоднення сушіння змішаним теплопідводом [3].

Поставлена задача досягається тим, що у відомій установці для гідротермічної обробки та су-

шіння крупи, що складається з камери, пристрою для подачі та вивантаження продукту і підводу в камеру нагрітого повітря, згідно корисної моделі, гідротермічна обробка та сушіння сировини проводиться у функціональній ємності із паронепроникного матеріалу за принципами сушіння змішаного теплопідводу.

Відміна даної установки полягає у тому, що гідротермічна обробка сировини проводиться у функціональній ємності, виконаній із паронепроникного матеріалу з високою теплопровідністю та розділеній на дві частини, одна з яких, призначена для гідротермічної обробки, не має масообмінних зазорів, а в іншій, призначеній для сушіння, містяться масообмінні зазори, площа яких принаймні на порядок менша, ніж площа теплообмінних поверхонь.

Суть корисної моделі пояснюється ілюстративним матеріалом (Fig.), на якому зображена установка для гідротермічної обробки та сушіння крупи, що складається з вентилятора 1, нагрівачів 2, сушильної камери 3, в якій міститься функціональна ємність з двох частин 4 та 5, завантажувального бункера 6 та дозуючих шнеків 7, 8.

Установа для гідротермічної обробки та сушіння крупи працює наступним чином. Волога сировина із завантажувального бункера 6 дозуючими шнеками 7 та 8 протягується крізь функціональну ємність, виконану із паронепроникного матеріалу, з визначеною швидкістю. У першій частині 4 функціональної ємності проводиться гідротермічна обробка крупи до готовності, в другій 5 - сушіння. Оскільки друга частина 5 функціональної ємності виконана таким чином, що площа масообмінних зазорів принаймні на порядок менша, ніж площа

(19) UA (11) 48230 (13) U

3 48230 4

теплообмінних поверхонь, то зневоднення сировини проводиться згідно умов для сушіння змішаним теплопідводом [3]. Продукція, отримана сушінням змішаним теплопідводом, характеризується високою якістю, а процес високою - енергоефективністю.

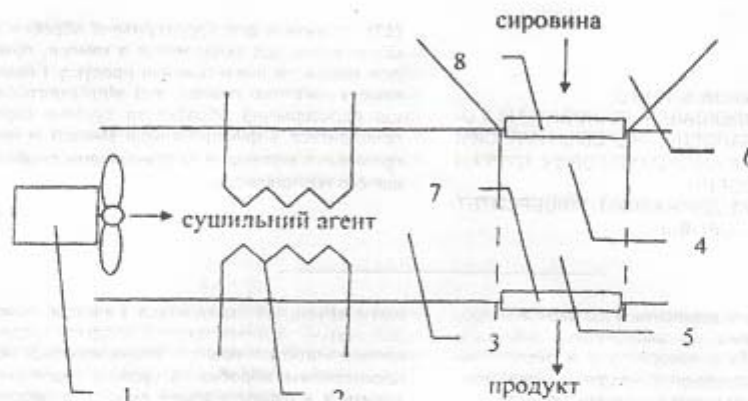
Таким чином, запропонований пристрій дає можливість зменшити контакт сушильного агенту з сировиною, уникнути плісневення сировини, підвищити енергоефективність процесу зневоднення та якість отримуваної продукції.

Література

1. Гришин М.А., Атаназевич В.И., Семенов Ю.Г. Установки для сушки пищевых продуктов: Справочник. - М: Агропромиздат, 1989. - 215с.

2. Пат. № 1785644 А1 СУ, МКИ<sup>6</sup> А23L3/54, F26B17/04. Устройство для термообработки пищевых продуктов /В.Е. Бабенко, Ю.М. Плаксин, Н.Х. Беридзе, М.Е. Чернов, Г.А. Дахамидзе. - № 4897449/13; Заявл. 28.12.1990; Опубл. 07.01.1993, Бюл. №1.

3. Пат. 2096962 Рф, МКИ<sup>6</sup> А23В7/03. Способ сушки пищевых продуктов /Н.И. Погожих, В.А. Потапов, Н.М. Цурхан (Украина). - № 94033280/13; Заявл. 13.09.94; Опубл. 27.11.97. Бюл. №33. - 4с.



Фіг.

Комп'ютерна верстка Л.Литвиненко

Підписне

Тираж 26 прим.

Міністерство освіти і науки України

Державний департамент інтелектуальної власності, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ - 42, 01601

**Наукове видання**

ПОГОЖИХ Микола Іванович  
ПАК Андрій Олегович  
ПАК Аліна Володимирівна  
ЖЕРЕБКІН Максим Васильович

**ГІДРОТЕРМІЧНА ОБРОБКА КРУП  
З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИНЦИПІВ СУШІННЯ  
ЗМІШАНИМ ТЕПЛОПІДВОДОМ**

**Монографія**

**Авторська редакція**

---

Підписано до друку                      Формат 60×90/16. Папір офсет. Друк офсет.  
Умов. друк. арк. 12,0 Тираж 100 прим. Замовл. №

---

Видавець і виготовлювач  
Харківський державний університет харчування та торгівлі.  
Вул. Клочківська 333, Харків, 61051  
Свідоцтво суб'єкта видавничої діяльності  
ДК №4417 від 10.10.2012 р.