

**ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Факультет інженерно-технологічний**  
**Кафедра безпеки життєдіяльності**

Пояснювальна записка до дипломної роботи  
на здобуття ступеня вищої освіти « магістр »

на тему: «Удосконалення процесу виробництва плющеного зерна в  
комбікормовому виробництві»

Виконав: здобувач вищої освіти за  
освітньо-професійною програмою  
Технології і засоби механізації  
сільськогосподарського виробництва  
спеціальності 208 Агроінженерія  
ступеня вищої освіти «магістр» групи 3  
Саксон О.В.

Керівник: Лапенко Т.Г.

Рецензент: Горбенко О.В.

**Полтава – 2021 року**

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 61 сторінка, 16 рисунків, 7 таблиць, 1 додаток, 25 джерел.

Об'єктом досліджень є процес плющення зерна.

Предмет досліджень - кінетичні закономірності процесів зволоження, пропарювання та плющення зерна.

Метою роботи є удосконалення процесу виробництва плющеного зерна.

Методи досліджень – аналіз та синтез, інтерпретація отриманих результатів, абстрактно-логічний, емпіричний та ймовірнісний методи.

В результаті досліджень експериментально отримано кінетичні закономірності процесів зволоження, пропарюванні та плющенні зерна з обґрунтуванням раціональних параметрів процесів зволоження, пропарювання та плющення зерна; розроблена математична модель процесу плющення зерна; запропонована удосконалена технологічна лінія виробництва плющених пластівців з розробкою конструкції рециркуляційної сушарки-охолоджувача, яка має більш високу теплову ефективність процесу сушіння, можливість поліпшення якості продукту; низькі енерговитрати; розширення сфери застосування за рахунок секційного підведення теплоносія.

Ступінь впровадження – результати досліджень були впроваджені в технологічному процесі виробництва плющених пластівців в комбикормовому виробництві.

Галузь застосування – переробна галузь.

В результаті впровадження результатів дослідження у виробництво очікується річний економічний ефект 814968 грн.

**ПЛЮЩЕНІ ПАСТІВЦІ, ПЛЮЩИЛЬНА МАШИНА, РЕЦИРКУЛЯЦІЙНА СУШАРКА-ОХОЛОДЖУВАЧ, КОНДИЦІОНЕР-ПРОПАРЮВАЧ, БЕЗПЕКА, ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ.**

## ЗМІСТ

ВСТУП . . . . .	7
1 СТАН ПИТАННЯ ТА ВИБІР НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕНЬ . . . . .	11
1.1 Наукові основи процесу плющення . . . . .	11
1.2 Огляд технологій виробництва плющеного зерна . . . . .	14
2 МЕТОДИКА Й ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ . . . . .	20
2.1 Експериментальна установка. . . . .	20
2.2 Методика досліджень . . . . .	22
2.3 Математична модель процесу плющення зерна в двохвалковій плющилиці . . . . .	23
3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ . . . . .	29
3.1 Дослідження процесу зволоження зерна ячменю водою . . . . .	29
3.2 Дослідження процесу пропарювання зерна . . . . .	31
3.3 Дослідження процесу плющення зерна ячменю . . . . .	34
3.4 Статистична модель процесу плющення зерна . . . . .	44
3.5 Рециркуляційна сушарка-охолоджувач . . . . .	47
4 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ДОСЛІДЖЕНЬ	52
4.1 Екологічна експертиза . . . . .	52
4.2 Охорона праці . . . . .	55
4.3 Техніко-економічне обґрунтування досліджень . . . . .	57
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ . . . . .	60
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ . . . . .	62
ДОДАТКИ . . . . .	64
Додаток А Результати досліджень . . . . .	65

## ВСТУП

*Актуальність теми.* Пріоритети розвитку тваринництва відзначені в державних програмах розвитку сільського господарства. Міцна кормова база є необхідною умовою успішного розвитку тваринництва і визначається, передусім, завданням раціональної та біологічно повноцінної годівлі тварин, з урахуванням потреб тварин у поживних речовинах. Тільки в цьому випадку можлива повна реалізація біологічного потенціалу продуктивності та продуктивного довголіття тварин.

Забезпеченість високоякісними комбікормами багато в чому визначає рівень розвитку та економіку тваринництва, оскільки в структурі собівартості тваринницької продукції ціна кормів сягає 65-70%.

Найбільше споживання комбікормів приходить на птахівництво, яке продовжує розвиватися і нарощувати виробництво. При цьому свинарство та розведення великої рогатої худоби демонструють негативну тенденцію. Виробництво кормів для домашньої птиці в Україні демонструє стабільне зростання, що обумовлено значною державною підтримкою даної галузі. А що стосовно комбікормів для ВРХ, то спостерігається тенденція до зниження рівня виробництва даної продукції. Причини цього явища пов'язані зі зниженням поголів'я худоби і недостатньо ефективною підтримкою з боку держави.

Існуюче комбікормове виробництво не дозволяє вирішити проблему потреб у забезпеченні тваринницьких, птахівницьких та рибницьких господарств високоякісними комбікормами без впровадження нових технологій та технічного переоснащення прогресивним сучасним обладнанням. Для існуючих технологій переробки кормів характерні високі енерго- та металомісткість обладнання, низька якість готового продукту та ін.

Одним із основних шляхів інтенсифікації тваринництва є покращення якості кормів, скорочення їх витрат на виробництво тваринницької продукції. У сучасних умовах вважається очевидним, що одна з головних умов економічного

та ефективного витрачання кормів – підготовка їх перед згодовуванням з метою підвищення їх засвоюваності.

Перспективним напрямком виробництва комбікормів підвищеної засвоюваності та доброякісності є вологотеплова обробка зерна, частка якого у складі комбікормів не нижче 60-70%. Як відомо, зерно злакових культур містить понад 50% крохмалю [8, 9]. Це цінний вуглевод, але ферментативна система травного тракту молодняку сільськогосподарських тварин мало адаптована до травлення рослинних кормів. Тому виникає необхідність у попередньому розщепленні біополімерів корму та переведенні їх у сполуки, доступні дії травних ферментів [5-7].

З усіх наявних способів найбільш прийнятним та ефективним є обробка, що полягає у зволоженні, пропарюванні та плющенні зерна. Плющене зерно можна широко використовувати у раціонах великої рогатої худоби, свиней, коней. Вологотеплова обробка зерна з подальшим плющенням сприяє покращенню смакових якостей та поїдання корму, підвищує поживну цінність вуглеводного та протеїнового комплексів, знижує витрати організму на перетравлення поживних речовин корму, дозволяє інактивувати антипоживні речовини та очистити зерно від патогенної та іншої мікрофлори. У процесі плющення відбувається розщеплення складних вуглеводів, крохмаль втрачає початкову структуру і легше піддається дії ферментів.

Проте технологія плющення досі не знайшла широкого застосування на комбікормових підприємствах через відсутність вітчизняного обладнання. У зв'язку з цим розробка технології та обладнання для вироблення пластівців із зерна для годування молодняку сільськогосподарських тварин є актуальною.

Удосконаленню технології виробництва плющеного зерна приділяється велика увага, оскільки вона досить енергоємна, а отже, значною мірою визначає вартість готового продукту і, крім того, істотно впливає на якісні показники товарної продукції.

Теоретичні основи процесу зволоження, пропарювання та плющення зерна та їх апаратурне оформлення відображені у роботах Сироватки В.І.,

Сисуєва Ст. А., Перекопського, А. Н., Афанасьєва Ст.А., Черняєва Н. П., Чистякова Д.І. та ін.

При цьому особливу увагу слід приділити розробці плющилок нового покоління, адаптованих до плющення зернових культур.

Дослідження вітчизняних та зарубіжних вчених процесів зволоження, пропарювання та плющення зерна присвячені, в основному, рішенням вузькоспеціалізованих завдань. Розроблені ними підходи до опису процесів зволоження, пропарювання та плющення зерна є спробами теоретичного узагальнення експериментальних даних. Однак на теперішній час немає єдиного методологічного підходу до вирішення поставлених завдань.

Комплексне дослідження процесів зволоження, пропарювання та плющення зерна відсутня. У зв'язку з цим розробка універсальних підходів для аналізу та пошуку рішень щодо підвищення ефективності процесів зволоження, пропарювання та плющення зерна є актуальним завданням.

**Мета дослідження** – удосконалення процесу виробництва плющеного зерна.

**Завдання досліджень:**

- дослідження кінетичних закономірностей процесів зволоження, пропарювання та плющення зерна з обґрунтуванням раціональних параметрів процесів зволоження, пропарювання та плющення зерна;

- дослідження впливу технологічних параметрів процесів зволоження, пропарювання та плющення зерна на зміну білково-вуглеводного комплексу та санітарний стан плющених зерен;

- математичне моделювання процесу плющення зерна;

- удосконалення технологічної лінії виробництва плющених пластівців.

**Об'єкт дослідження** - технологічний процес плющення зерна.

**Предмет дослідження** - кінетичні закономірності процесів зволоження, пропарювання та плющення зерна.

**Методи досліджень** - аналіз та синтез, інтерпретація отриманих результатів, абстрактно-логічний, емпіричний та ймовірнісний методи.

*Теоретична та практична значущість.* Визначено та обґрунтовано раціональні технологічні режими процесів зволоження, пропарювання та плющення зерна при виробництві стартерних комбикормів з плющеним зерном для годівлі молодняку сільськогосподарських тварин..

Розроблена математична модель процесу плющення зерна для оцінки впливу кругової швидкості та діаметру валків на продуктивність та питомі витрати енергії плющилки.

Запропонована удосконалена технологічна лінія виробництва плющених пластівців з розробкою конструкції рециркуляційної сушарки-охолоджувача, яка має більш високу теплову ефективність процесу сушіння за рахунок використання рециркуляції теплоносія і ступінчастого сушіння, а також внаслідок використання активних гідродинамічних режимів, можливість поліпшення якості продукту, що отримується за рахунок застосування більш м'яких режимів і рівномірної обробки; низькі енерговитрати за рахунок вибору раціональних режимів сушіння та охолодження з урахуванням зміни вмісту вологи продукту по довжині сит сушарки; розширення сфери застосування за рахунок секційного підведення теплоносія.

# 1 СТАН ПИТАННЯ ТА ВИБІР НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕНЬ

## 1.1 Наукові основи процесу плющення

Плющення використовується для підвищення поживної цінності зерна при виробництві комбікормів для молодняка сільськогосподарських тварин. [4]. У поєднанні з плющенням відомі і знайшли застосування наступні способи обробки зерна: холодне кондиціювання з відволожуванням; гаряче кондиціювання з відволожуванням; пропарювання; пропарювання з підсушуванням; «сухий» нагрів; нагрів струмом високої частоти; нагрів інфрачервоними променями [4].

Технологія плющення дозволяє домогтися наступних переваг: зменшення витрат електроенергії в порівнянні з дробаркою в 4 рази; мала кількість борошна, що утворюється; зниження злипання корму і поліпшення засвоюваності його тваринами; збільшення набухання підготовленої зернової маси в рідкому середовищі шлунка, що зменшує час годування тварин; збереженість поживних речовин і вітамінів в зерні через відсутність сушки зерна; підвищення приросту при відгодівлі свиней на 8,5-14,3%; економія на 10% кормів для тварин і птиці [4].

Плющене зерно повніше засвоюється сільськогосподарськими тваринами. При плющенні відбувається часткове ферментативне розщеплення, декстринізація крохмалю, «розчинення» протеїнових оболонок крохмальних зерен в результаті біохімічних процесів, що відбуваються в рубці тварини. Частка цукрів в плющеному зерні зростає в 2-3 рази. Все це сприяє поліпшенню поживної цінності вуглеводного і білкового компонентів, зменшує вміст непоживних речовин, в порівнянні з подрібненим зерном.

В зерновій сировині основним джерелом доступної енергії є крохмаль. Недостатня активність амілолітичних ферментів у молодняка тварин - одна з головних причин його утрудненого перетравлення. Виникає необхідність в деструкції крохмалю і переведення його в більш прості речовини. Як правило,

плющенню піддається зерно, що попередньо піддавалося гідротермічній обробці [4]. При обробці зерна парою відбувається його нагрівання і зволоження. Нагрівання здійснюється за рахунок конденсації пари, а також конвективної тепловіддачі парового потоку. Пропарювання зерна супроводжується збільшенням його вологості, причому приріст вологості буде визначатися умовами процесу: станом шару оброблюваного зерна, умовами і характером обтікання зерен потоком пара, параметрами і кількістю пара, тривалістю впливу пара. При розробці режимів процесу необхідно прагнути до того, щоб вся волога, внесена паром, була поглинена зерном.

Кожному виду зернового матеріалу відповідає своя оптимальна технологічна вологість для плющення між гладкими валками, яка варіює в межах 22-26%. При вологості зерна менше 16% вихід пластівців різко падає, тому що внаслідок недостатньої еластичності ендосперму відбувається просте дроблення зерна. При нагріванні поверхневий натяг води зменшується і процес її проникнення до крохмальних зерен значно прискорюється. Ефективність зволоження зерна вологим паром дуже висока, особливо, в початковий період до повного насичення водою. Збільшення витрати пари незначно інтенсифікує процес зволоження зерна [4].

Під впливом теплоти і вологи в зерні протікають складні біохімічні процеси, в результаті яких відбувається деструктуризація вуглеводного і білкового комплексів, а також зміна ліпідів зерна. Крохмаль піддається гідролізу, в процесі якого утворюються полісахариди - декстрини, за молекулярною вагою займають проміжне положення між крохмалем і олігосахаридами. Процес декстринізації супроводжується зниженням в'язкості суспензій, підвищенням вмісту водорозчинних речовин, зміною кількості редукуючих цукрів в водному екстракті. Нагрівання зерна в присутності вологи викликає клейстеризацію крохмалю, причому ступінь клейстеризації зростає зі збільшенням тривалості вологотеплової обробки. Підвищення тиску пара прискорює процес клейстеризації і сприяє накопиченню декстринів в зерні і зниження вмісту сирії клітковини.

Під впливом вологи відбувається набухання зерна, яке посилює пластичні деформації. У зерновій структурі відбувається ослаблення молекулярних зв'язків, що зменшує необхідне зусилля на механічну деформацію стиску при плющенні. Процес плющення пропареного зерна значно інтенсифікує процес клейстеризації і декстринізації крохмалю [2]. Причому більший ефект плющення проявляється при нетривалому пропарюванні. Мабуть, при цих умовах в зерні виникають значні внутрішні напруги, викликані швидким нагріванням і набуханням, які при плющенні сприяють розриву оболонок крохмальних зерен. Встановлено, що при плющенні зерна клейстеризація крохмалю збільшується приблизно на 25-30% і не залежить від початкового значення. Крім того, на ступінь клейстеризації крохмалю впливає величина зазору між валками плющильного верстата. Вважається що, при зменшенні зазору на 0,1 мм знижується об'ємна маса, різко зростають енерговитрати, а також при цьому погіршуються технологічні властивості пластівців.

Дослідженнями впливу плющення зерна ячменю між гладкими валками на ступінь деструкції крохмалю встановлено, що максимальне руйнування крохмальних зерен відбувається при вологості ячменю 16,5-18,5% і зазорі між валками 0,4-0,5 мм. При подальшому зменшенні зазору між валками зерно піддається дробленню, пластівці виходять крихкими з незадовільними технологічними властивостями. Зниження вмісту декстринів в пластівцях при вологості зерна понад 18,5% пояснюється збільшенням еластичності стінок крохмальних гранул. У роботах, присвячених вивченню процесу плющення зерна, відзначається підвищення перетравності крохмалю в 2,0-2,5 рази в порівнянні з вихідним зерном, збільшення ступеня клейстеризації крохмалю із збільшенням тривалості пропарювання зерна, зниження розчинності білка за рахунок його денатурації без зниження коефіцієнта перетравності при фіксованій тривалості пропарювання.

Таким же глибинним змінам піддається і протеїн зерна. За своїми фізико-механічними властивостями білки різноманітні. Вони представлені, в основному, альбумінами, глобулінами, проламіни, глютамін. Дослідженнями

встановлено, що м'які режими гідротермічної обробки не впливають на зміст загального азоту в зерні. Більш жорсткі режими викликають великі зміни азотовмісних речовин, а також зменшує їх загальний вміст за рахунок утворення летючих азотистих з'єднань в процесі реакції меланоїдиноутворення.

Процес плющення впливає на зміну білкового комплексу, при цьому вміст білка не змінюється, але спостерігається зниження розчинності всіх його фракцій. Є відомості про двократне зниженні розчинності білка за рахунок водо- і солерозчинних фракцій. Амінокислотний склад білка при плющенні практично не змінюється [1].

Виявлено помітні зміни в жировій складовій зерна. Показано, що при гідротермічної обробці жирова фракція стає більш стійкою до окислення, а отже, до прогоркання, що покращує умови зберігання продукту. Причиною тому є інактивація ферментів, ліпази і ліпоксідази, які каталізують гідроліз і окислення жирів.

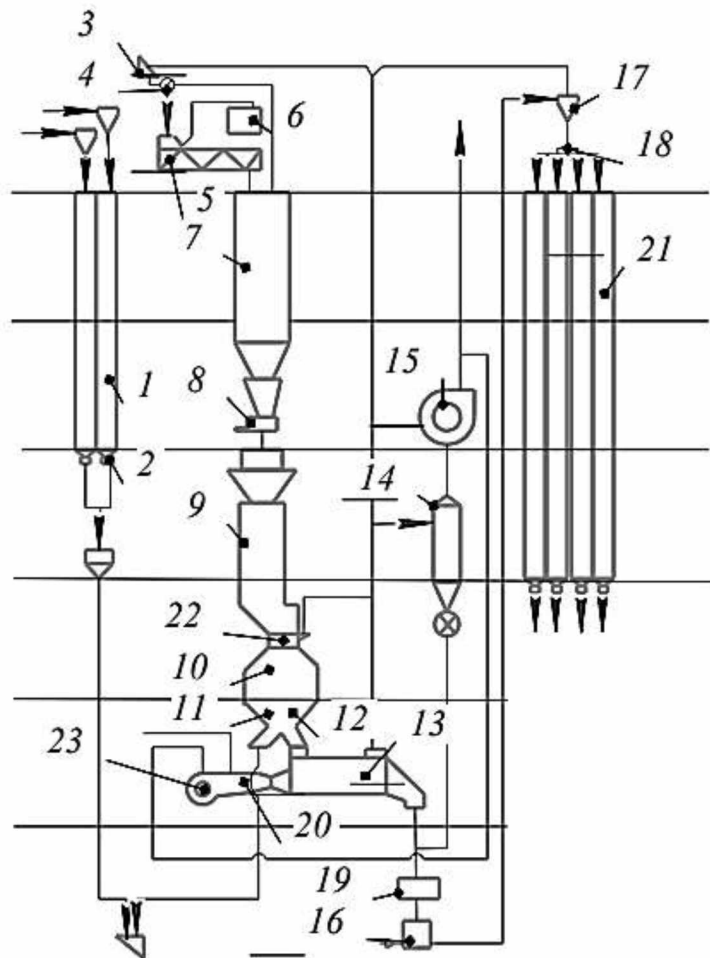
Таким чином, вибором оптимальних параметрів гідротермічної обробки і плющення зерна можна впливати на фізико-хімічні властивості крохмалю і білка, домагатися інактивації антипоживних речовин, прогнозувати збільшення перетравності поживних речовин, зниження вмісту клітковини, руйнування ферментів, які каталізують розщеплення жирів, що впливають на рівень мікрофлори в зерні.

## **1.2 Огляд технологій виробництва плющеного зерна**

Спосіб плющення зерна з попереднім його пропарюванням рекомендується до застосування в технології комбикормів для молодняку сільськогосподарський тварин [5].

Розглянемо технологічні процеси виробництва плющеного зерна.

1. Технологічний процес виробництва плющеного зерна (рис. 1.1) включає наступні операції: зволоження зерна водою на 4-5%; відволожування зволоженого зерно протягом 4-х годин з метою перерозподілу вологи за



1 - бункери для лущеного зерна; 2 - засувка; 3 - норія; 4 - перекидний клапан;  
 5 - зволожувальна машина; 6 - пристрій введення води; 7 - бункер для зволоження; 8 - засувка; 9 - пропарювач; 10 - двохвалкова плющилка;  
 11 - бункер з перекидним клапаном; 12-18 - перекидний клапан;  
 13 - сушарка-охолоджувач; 14 - фільтр; 15 - вентилятор; 16 - живильник;  
 17 - циклон-розвантажувач; 19 - витратомір; 20 - калорифер; 21 - бункери над дозаторами; 22 - живильник плющилки; 23 - вентилятор

Рисунок 1.1 - Технологічна схема лінії виробництва пластівців із зерна на комбікормовому заводі

обсягом зернівки; пропарювання зволоженого зерна та кондиціонування протягом 30 хвилин з метою його нагрівання до температури 80-100 °С і підвищення вологості до 22-24%; розплющення підготовленого зерна на плющилці; висушування пластівців в псевдозрідженому шарі до необхідної вологості і охолодження до температури навколишнього середовища.

Продуктивність лінії 3,5-4,0 т/год. при виготовленні пластівців з ячменю при товщині 0,4-0,5 мм, з вівса - при товщині 0,4 мм. Вироблені пластівці подрібнюються і спрямовуються на головну лінію дозування компонентів комбікормів.

У лінії є накопичувальні бункери ємністю 40 т, куди подається зерно для подальшого плющення. Апарат для зволоження зерна забезпечений апаратурою для дозування води. Бункер для відлежування зволоженого зерна має ємність 12-15 м<sup>3</sup>.

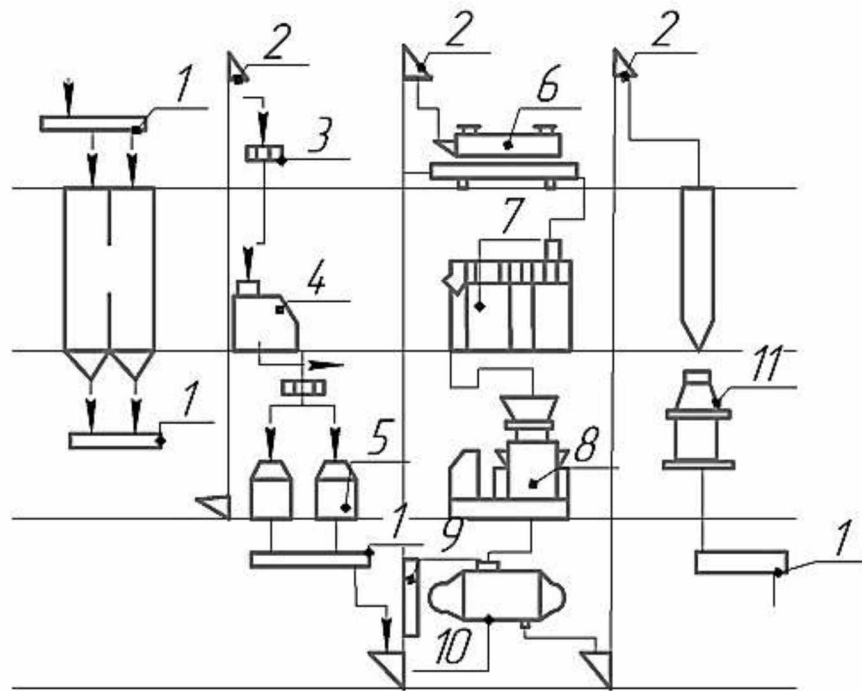
Пропарювач, що має вертикальну конструкцію і прямокутну форму, обладнаний паропроводами. Ємність пропарювача становить 2,5 м<sup>3</sup>. Витрата пара 220 кг/год. Живильник забезпечує рівномірний розподіл пропареного зерна по довжині валків і має регулювання числа обертів валка від 5 до 45хв<sup>-1</sup>

Двохвалкова плющилка має гладкі валки діаметром 600 мм і довжиною 1100 мм, швидкість обертання яких 300 хв<sup>-1</sup>. Валки мають водяне охолодження. Привід валків здійснюється від електродвигуна потужністю 55кВт через клинопасову передачу. Притиск валків проводиться із застосуванням гідравлічної системи, що входить до складу плющилки.

Під плющилкою встановлений невеликий бункер і перекидний клапан для направлення зерна на повторне зволоження-пропарювання або пластівців на сушарку-охолоджувач. Сушка відбувається в псевдо рідинному шарі, який створюється за рахунок роботи пульсаторів. Відпрацьований агент сушіння і охолоджуюче повітря відсмоктується в систему аспірації.

2. Технологічний процес (рис.1.2) передбачає очищення зерна від бур'янів і мінеральних домішок, зволоження підігрітою до 70 °С водою в апараті А2-КВА до вологості 18-20%, пропарювання в другій секції апарату А2-КВА паром протягом 4,5 хвилин і кондиціювання протягом 30 хвилин при постійному перемішуванні. Вологість зерна при цьому вирівнюється по всьому об'єму зернової маси.

Кондиційоване зерно плющиться на верстаті А1-КПК продуктивністю 1,5т/год. при товщині пластівців 0,3-0,5 мм. Валки плющилки діаметром 490 мм



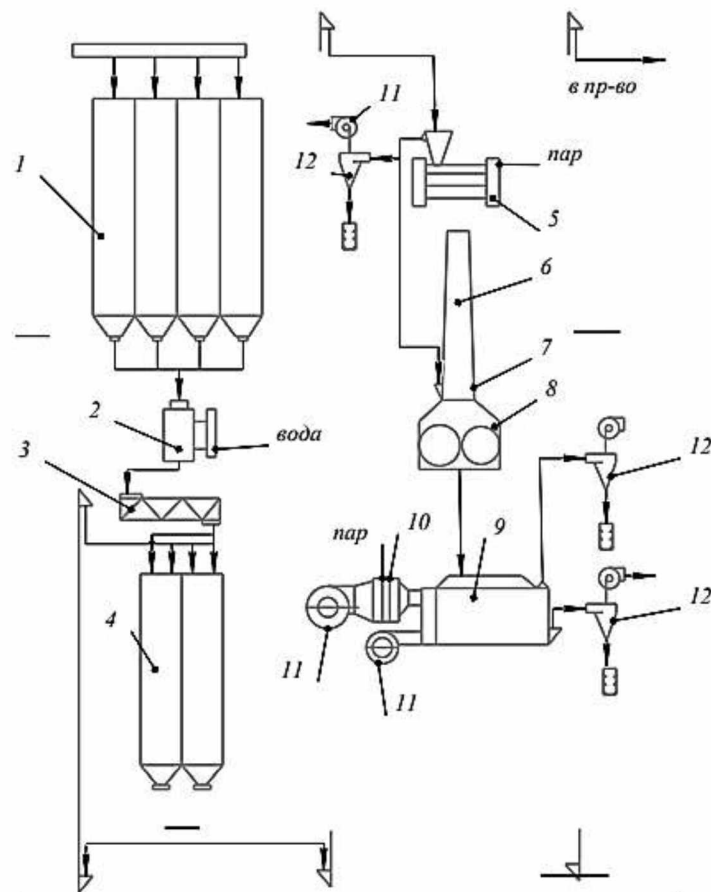
1 - цепний конвеєр; 2 - норія; 3 - магнітна колонка; 4 - сепаратор;  
 5 - каменевідокремлююча машина; 6 - апарат для зволоження; 7 - апарат для варки; 8 - плющильний станок; 9 - калорифер; 10 - стрічкова сушарка;  
 11 - дробарка

Рисунок 1.2 – Технологічна схема виробництва плющених зернових продуктів

і довжиною 800 мм обертаються з однаковою швидкістю. Зусилля стиснення валків досягає 12 МПа.

Вологі пластівці висушуються до вологості 11-13 % в стрічкової сушарці А1-КНС повітрям, що нагрівається в калорифері. У нижній частині сушарки продукт охолоджується. Готові пластівці подрібнюються на молотковій дробарці і направляються для виробництва комбікормів.

3. Технологічний процес виробництва пластівців (рис. 1.3) передбачає наступні операції: зберігання очищеного від мінеральних і металоманітних домішок лущеного зерна; зволоження і відлежування зерна; пропарювання і кондиціонування зерна; плющення; сушка і охолодження.



- 1 - бункери для лущеного зерна; 2 - зволожувача; 3 – шнек-зволожувач;  
 4 – бункери для відволожування; 5 - пропарювач; 6 – пропарювач-кондиціонер;  
 7 - живильник; 8 – двохвалкова плющилка; 9 – стрічкова сушарка-охолоджувач;  
 10 – калорифер паровий; 11 – вентилятор;  
 12 - циклон

Рисунок 1.3 – Технологічна схема лінії плющення зерна

Для зберігання підготовленого для плющення зерна в лінії передбачено 4 силоси однією загальною ємністю 200 т. До складу лінії входить наступне обладнання: машина для зволоження зерна 2, шнек-зволожувач 3, бункера для відлежування зволоженого зерна 4, апарат для пропарювання і кондиціонування 5, живильник 6, двохвалкова плющилка 8, сушарка-охолоджувач пластівців 9.

Зерно з силосів для зберігання надходить на машину для введення води, де зволожується до 17-18%. Зволожене зерно переміщується шнеком і відволожується в бункерах протягом 4-6 годин. Відволожування проводиться до повного поглинання зерном води.

Для рівномірного зволоження застосовують рециркуляцію зерна. Після зволоження зерно надходить в апарат для пропарювання і кондиціювання, де обробляється паром, за рахунок чого вологість зерна підвищується до 20-22 %, а температура зростає до 70 °С. Тривалість кондиціювання пропареного зерна становить 24-30 хвилин. Пропарене зерно за допомогою валкового механізму подається на двовалкову плющилку, діаметр валків якої становить 600 мм, довжина - 1000 мм. Робочий зазор між валками - 0,2-0,3.

Отримані гарячі і вологі пластівці товщиною 0,3-0,5 мм направляються в сушарку-охолоджувач стрічкового типу, де висушуються до вологості 10,5-11,0% і охолоджуються до температури навколишнього середовища. Підготовлені пластівці подають на лінію подрібнення для виробництва регенерованого молока. Продуктивність лінії досягає 2 т/год. Вологість готових пластівців - 12,4-13,2 %, об'ємна маса - 330-340 кг/м<sup>3</sup>, кут природного укосу 47-48 °.

## 2 МЕТОДИКА Й ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1 Експериментальна установка

З метою встановлення режимів обробки зерна, які забезпечують отримання пластівців необхідної якості, були розроблені експериментальні установки для зволоження, пропарювання і плющення зерна, з яких була змонтована експериментальна лінія (рис. 2.1). Лінія включає установку для зволоження зерна 1, бункер для зволоження зерна 2, установку для пропарювання зерна 3, установку для плющення зерна 4 і сушилу - охолоджувач 5.

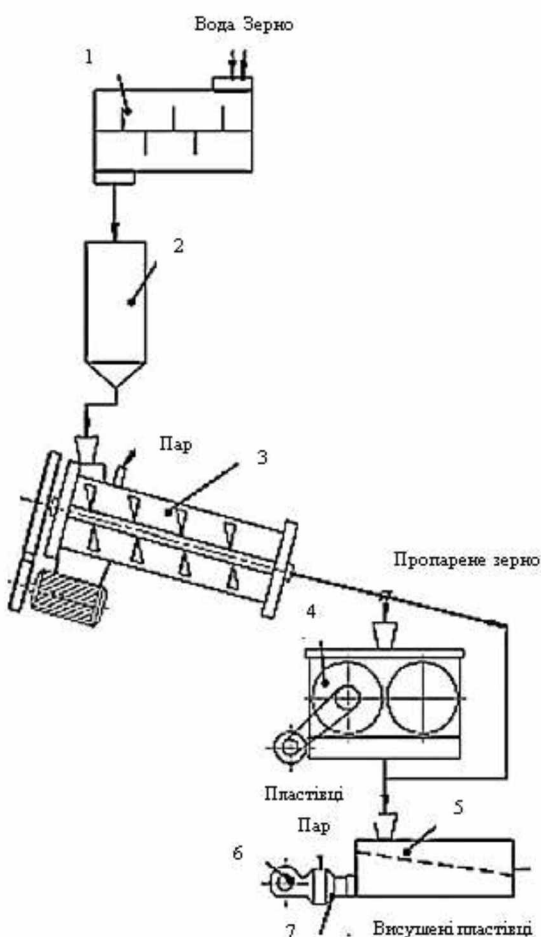


Рисунок 2.1 – Схема експериментальної лінії для зволоження, пропарювання та плющення зерна

*Експериментальна установка для зволоження зерна.* Для зволоження зерна водою була виготовлена розхідна ємність для води. Ємність забезпечена мішалкою, змійовиком для подачі холодної води, електронагрівачем і контактним термометром. Підведення води до ємності здійснювалося від водопровідної системи, а подача в змішувач - насосом типу АХ(О)40-25-160Д. Для рівномірної подачі води уздовж бічної стінки в неробочій зоні всередині лопатевого змішувача МС-50 був встановлений колектор з відцентровими форсунками. Кріплення колектора здійснювали в торцевій стінці змішувача. Колектор встановлений таким чином, щоб кут нахилу форсунок до горизонту був  $30^\circ$ , а факел розпилу був спрямований на зерно, яке надходить в змішувач. Подача води в змішувач здійснюється після завантаження зерна протягом 10-30 секунд в залежності від необхідного ступеня зволоження зерна. Зволоження зерна водою вели при зміні початкової температури в межах від  $20^\circ\text{C}$  до  $100^\circ\text{C}$  і тривалості обробки - від 1 до 10 хвилин. При проведенні експериментів зерно зволожували до вологості 18-20%, тобто до оптимальної вологості, при якій забезпечується стабільна якість пластівців.

*Експериментальна установка для пропарювання зерна.* Для обробки зерна парою при тиску, близькому до атмосферного, розроблена установка, яка складається з пропарювача лопатевого типу, приводу і бункера. Лопатевий пропарювач представляє собою жолоб, в якому встановлений вал з поворотними лопатками. Жолоб має парову сорочку. Пар 31 через конденсатовідвідник подається в пропарювач для пропарювання зерна і в парову сорочку для обігріву жолоба. Для вимірювання та регулювання параметрів пара встановлений редуційний клапан 184 НЖ, розходомір пара ДП-172Р та самопишучий манометр МСС-712. Для контролю температури зерна та пару передбачені термомпари і потенціометр ЕПП-09М. Пропарювання зерна проводили при тиску пари, близькому до атмосферного, варіюючи тривалість від 1 до 20 хвилин. Дослідженнями встановлено, що пропарювання при надмірному тиску 0,05-0,35 МПа не дозволяє підвищити вологість оброблюваного зерна до 18-20% без попереднього замочування.

*Експериментальна установка для плющення зерна.* Дослідження процесу плющення проводили з попереднім зволоженням зерна водою або пропарюванням. Для плющення зерна розроблений і виготовлений плющильний верстат, що складається з рами, рухомого і нерухомого валків діаметром 270 мм, механізму переміщення валків, приводу. Товщина пластівців регулюється за рахунок зміни зазору шляхом переміщення рухомого вальця за допомогою гвинтового важеля механізму переміщення вальців. Зазор між валками встановлювали в діапазоні від 0,1 до 1 мм і вимірювали набором щупів другого класу точності.

## **2.2 Методика досліджень**

До і після обробки зерна оцінювали його фізико-механічні та біохімічні властивості. Для оцінки фізико-механічних властивостей визначали наступні показники: вологість [1], об'ємну масу і кут природного укосу [2], гранулометричний склад частинок [3]. Товщину пластівців вимірювали мікрометром МК-25-1 [4]. Для оцінки біохімічних властивостей визначали наступні показники: зміст декстринів, ступінь клейстеризації крохмалю, вміст розчинних вуглеводів [5]; перетравність крохмалю *in vitro* - методом ферментативного гідролізу в присутності глюкоамілази з визначенням глюкози, що утворилася, фенолсірчанним методом; перетравність протеїну *in vitro*; фракційний склад білка; активність інгібіторів трипсину казеїнолітичним методом Какейда. Перевірку встановлених режимів плющення проводили на спеціально обладнаній лінії в стендовій установці, що забезпечує реалізацію наступних процесів підготовки зерна: зволоження зерна водою і відволожування; пропарювання зволоженого зерна; плющення пропареного зерна; сушіння та охолодження пластівців.

У процесі дослідження реєстрували такі параметри: тиск пари - манометром МСС-610; витрата пара - дифманометром ДП-710Р; витрата води -

по масі; температуру пропареного зерна і пластівців - термомпарою і ртутним термометром.

### 2.3 Математична модель процесу плющення зерна в двохвалковій плющилці

Розглянемо процес плющення зерна в двохвалковій плющилці (рис.2.2), вальці якої обертаються назустріч один одному з постійною кутовою швидкістю  $\omega$ , рад/с, тому лінійна швидкість на їх циліндричних поверхнях становитиме  $\omega R$ , м/с. Причому товщина одержуваних зернових пластівців  $\delta$  визначається не тільки величиною міжвальцового зазору, але і вологістю вихідного зерна, яка впливає на пружні властивості зернівки. Зернівка, контактуючи з поверхнями вальців (т.В) (рис. 2.2), має швидкість  $v_0$  і рухається вниз під дією сили тяжіння. Швидкість зернівки в точці В не повинна перевищувати лінійної швидкості  $v = \omega R$  робочих поверхонь вальців. Для виключення завалювання зони плющення зерном, що надходить, приймемо наступне обмеження  $\omega R \leq v_0$ . В іншому випадку це викличе погіршення умови захоплення зерна вальцями.

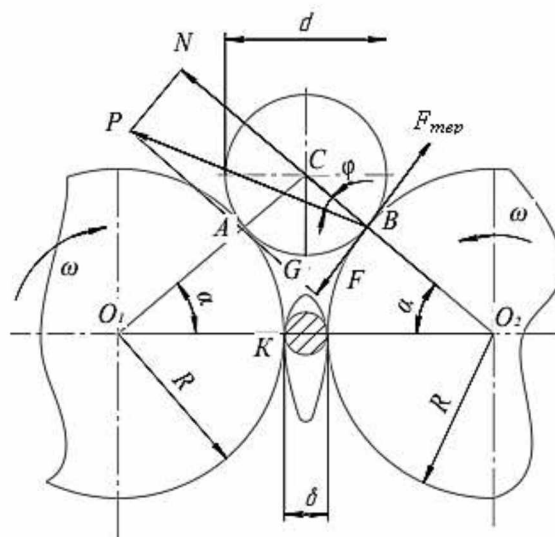


Рисунок 2.2 – Рух зернівки в робочій зоні плющення

При русі з просковзуванням в зоні плющення зернівки масою  $m$ , захопленої вальцями, на неї діє сила тяжіння  $mg$ , сила тертя  $F_{\text{тер}}$ , розпірна сила  $P$ , силою опору повітря нехтуємо через її незначність.

Рівняння руху зерна в міжвальцьовому зазорі має вигляд:

$$m\ddot{a} = m\vec{g} + \vec{F}_{\text{тп}} + \vec{P}. \quad (2.1)$$

Вираз (1) проецируємо на вертикальну вісь і отримуємо:

$$m \frac{d\nu}{d\tau} = mg - F_{\text{тп}} \cos \alpha - P \cos(\varphi + 90 - \alpha), \quad (2.2)$$

або

$$m \frac{d\nu}{d\tau} = mg - F_{\text{тп}} \cos \alpha + P \sin(\varphi - \alpha), \quad (2.3)$$

де  $F_{\text{тер}}$  - сила тертя, згідно закону Кулона дорівнює  $F_{\text{тер}} = Nf$ ,  
 $f$  - коефіцієнт тертя зернівка об циліндричну поверхню вальця;  
 $\varphi$  - кут тертя частинки об валець (кут між результуючою силою від заклинювання  $P$  та нормаллю складової  $N$ ).

Величина розпірної сили  $P$  визначається за рівняннями [3]:

$$P = k \frac{2 \cdot B \cdot l \cdot \sqrt{d \cdot \delta}}{(d - \delta) \cdot (\gamma - 1)} \cdot \left[ \left( \frac{\sqrt{d \cdot \delta}}{\delta} \right)^\gamma - 1 \right], \quad (2.4)$$

де  $k$  - поправочний коефіцієнт;

$B$  - ширина вальця;

$\gamma$  - коефіцієнт, що визначається за формулою:

$$\gamma = 2 \cdot f \frac{1}{d - \delta}, \quad (2.5)$$

де  $d$  - початкова товщина зернівки;

$\delta$  - товщина зернівки після плющення.

Довжина робочої зони плющилки  $l$  дорівнює:

$$l = \frac{\pi R}{180} \alpha, \quad (2.6)$$

де  $R$  - радіус вальців;

$\alpha$  - кут захвату вальців, град.

Рівняння (2.3) приведемо до виду:

$$m \frac{d\nu}{d\tau} = mg - F_{\text{тп}} \cos \alpha + P \sin(\varphi - \alpha) \quad (2.7)$$

або

$$\frac{d\nu}{d\tau} = g - \frac{F_{\text{тп}}}{m} \cos \alpha + \frac{P}{m} \sin(\varphi - \alpha). \quad (2.8)$$

Розділимо змінні в рівнянні (2.8) і отримаємо:

$$d\nu = \left[ g - \frac{F_{\text{тп}}}{m} \cos \alpha + \frac{P}{m} \sin(\varphi - \alpha) \right] d\tau. \quad (2.9)$$

З огляду на те, що сила тертя дорівнює  $F_{\text{тер}} = Nf$  і діаметр вальця  $D = 2R$  набагато більше товщини зернівки  $d$ , тому величина кута  $\alpha \rightarrow 0$ , то розпірна сила  $P = N$ , де  $N$  - сила, що притискає зернівку до циліндричної поверхні площильних вальців, маємо наступне:

$$d\nu = \left[ g - \frac{Nf}{m} + \frac{N}{m} \sin \varphi \right] d\tau = \left[ g - \frac{N}{m} (f - \sin \varphi) \right] d\tau. \quad (2.10)$$

Рівняння (2.10) описує миттєву швидкість зернівки в будь-який момент часу  $\tau$  після захвату її вальцями. Інтегруючи рівняння (2.10), отримаємо:

$$\nu = \left[ g - \frac{N}{m} (f - \sin \varphi) \right] \tau + \nu_0. \quad (2.11)$$

Перепишемо вираз (2.11):

$$\frac{dl}{d\tau} = \left[ g - \frac{N}{m} (f - \sin \varphi) \right] \tau + \nu_0. \quad (2.12)$$

Інтегруючи вираз (2.12), отримаємо:

$$l = \left[ g - \frac{N}{m} (f - \sin \varphi) \right] \frac{\tau^2}{2} + \nu_0 \tau + l_0. \quad (2.13)$$

або

$$l = \left[ \frac{g}{2} - \frac{N}{2m} (f - \sin \varphi) \right] \tau^2 + \nu_0 \tau + l_0. \quad (2.14)$$

З врахуванням обмежень:

$$0 \leq v_0 \leq v = \omega R \quad \text{и} \quad l_0 = 0, \quad l_{\max} \leq \sqrt{R(d - \delta)}, \quad \left( \frac{g}{2} - \frac{N}{2m}(f - \sin \varphi) \right) \geq 0,$$

вирішуючи квадратичне рівняння (2.13) і відкидаючи від'ємний корінь, отримуємо:

$$\tau = \frac{-v_0 + \sqrt{v_0^2 - 4 \left( \frac{g}{2} - \frac{N}{2m}(f - \sin \varphi) \right) l_0}}{2 \left( \frac{g}{2} - \frac{N}{2m}(f - \sin \varphi) \right)}. \quad (2.15)$$

Таким чином, якщо розділити довжину робочої зони плющилки 1 (2.6) на час для проходження зернівкою робочої зони плющення (2.15), знаходимо швидкість руху зернівки, а, отже, кутову швидкість вальців. Тоді продуктивність плющили (кг/с) визначається за формулою:

$$\Pi = 1800kDL\delta\rho\omega, \quad (2.16)$$

де  $k$  - коефіцієнт, що враховує неповноту використання довжини валків і пластичність матеріалу;

$D$  - діаметр валків, м;

$L$  - довжина валків, м;

$\delta$  - міжвальцьовий зазор, м;

$\rho$  - об'ємна маса зерна, кг/м<sup>3</sup>;

$\omega$  - кутова швидкість валків, с<sup>-1</sup>.

Встановлено, що при швидкості введення зернівки в робочу зону плющення  $v_0 = \Omega R$ , потрібно найменше часу для проходження зернівкою робочої зони плющення  $BK$ , отже, при даній швидкості введення має місце максимальна пропускна здатність двовалкової плющилки.

Отже, зернівка захоплюється вальцями в точці  $B$ , рухається без просковзування в робочій зоні плющення  $BK$  (рис. 2.2) і прискорюється зі швидкості  $v$  (точка  $B$ ) до  $\omega R$  (точка  $K$ ). При проходженні відстані  $BK$  зерно розплющується з товщини  $d$  до  $\delta$ , де  $\delta$  - величина міжвальцьового зазору плющення.

Рядом авторів (Андріанов А.М., Казаков В.А., Пунько А.І., Сисуєв В.А. та ін.) [75,76] визначено умови захоплення частинки внаслідок заклинювання частинки між вальцями:

$$\varphi \geq \alpha, \quad (2.17)$$

де  $\varphi$  - кут тертя частинки об валець (кут між регулюючою силою від заклинювання  $P$  та нормаллю складової  $N$ ).

Якщо частинка піддавалася зминанню(стисненню), то під дією сил тертя вона буде затягуватися в між вальцьовий простір. Помножив вираз  $f = \operatorname{tg} \alpha$  на  $N$ , отримаємо:

$$Nf = N \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha}, \quad (2.18)$$

звідки отримаємо вираз:

$$F_{\text{тер}} \cos \alpha \geq N \sin \alpha \quad (2.19)$$

Враховуючи, що коефіцієнт тертя дорівнює  $f_{\text{тер}} \geq \operatorname{tg} \alpha$ , визначаємо радіус вальців  $R$  з прямокутного трикутника  $KCO_2$  (рис.2.2):

$$KC^2 = CO_2^2 - KO_2^2 = (R+r)^2 - (R+\delta/2)^2; \quad (2.20)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{KC}{KO_2} = \frac{\sqrt{(R+r)^2 - (R+\frac{\delta}{2})^2}}{R+\frac{\delta}{2}}, \quad (2.21)$$

де  $\delta$  - зазор між вальцями, м.

Звідси:

$$f \geq \operatorname{tg} \alpha = \frac{\sqrt{(D+2r)^2 - (D+\delta)^2}}{D+\delta}. \quad (2.22)$$

Для врахування впливу вологості зерна на коефіцієнт тертя введемо коефіцієнт  $\xi = 1,07-1,11$ . Тоді:

$$f \geq \xi \operatorname{tg} \alpha = \xi \frac{\sqrt{(D+2r)^2 - (D+\delta)^2}}{D+\delta}. \quad (2.23)$$

Аналіз рівняння (2.23) показує, що навіть незначна зміна коефіцієнта тертя істотно впливає на величину діаметра вальця  $D$ : при зменшенні сили тертя зернівки  $f_{\text{тер}}$  діаметр вальця  $D$  швидко зростає. Однак при великих значеннях сили тертя  $f_{\text{тер}}$  ця залежність швидко зменшується.

Формула (2.23) свідчить, що чим менше зазор і більше розмір зернівки, тим при меншому коефіцієнті тертя відбувається заклинювання зернівки. Встановлено, що при умові, коли розмір зерна дорівнює міжвальцьовому зазору заклинювання відбуватиметься при нескінченно малому коефіцієнті тертя.

Таким чином виявлено, що мінімальний радіус вальців визначається коефіцієнтом тертя зернівки об поверхню вальців і одержуваною товщиною плющення пластівців.

*Висновки.* Для проведення досліджень визначені методи експериментальних досліджень. Розроблені експериментальні установки для зволоження зерна, для пропарювання зерна, для плющення зерна, які зведені в експериментальну лінію для зволоження, пропарювання та плющення зерна. А також розроблена математична модель процесу плющення зерна в двохвалковій плющилці, завдяки якій виявлено, що мінімальний радіус вальців визначається коефіцієнтом тертя зернівки об поверхню вальців і одержуваною товщиною плющення пластівців.

## 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 3.1 Дослідження процесу зволоження зерна ячменю водою

Відомо, що зерно ячменю складається, в основному, з гідрофільних біополімерів - білків і вуглеводів, які мають здатність поглинати і утримувати вологу. Білки при набуханні можуть поглинати до 220% води, крохмаль та клітковина - до 30-40%. Дана властивість гідрофільних біополімерів залежить від температури навколишнього середовища, режимів зволоження та інших факторів. При вивченні процесу зволоження зерна в залежності від температури води дослідження проводили в змішувачі лопаткового типу з електрообігрівом. Процес зволоження вивчали при зміні температури води від 20 до 100 °С та тривалості обробки до 10 хвилин (рис. 3.1). Результати дослідів показали, що основна маса доданої води вбирається зерном ячменю в перші 3 хвилини обробки (рис. 3.2).

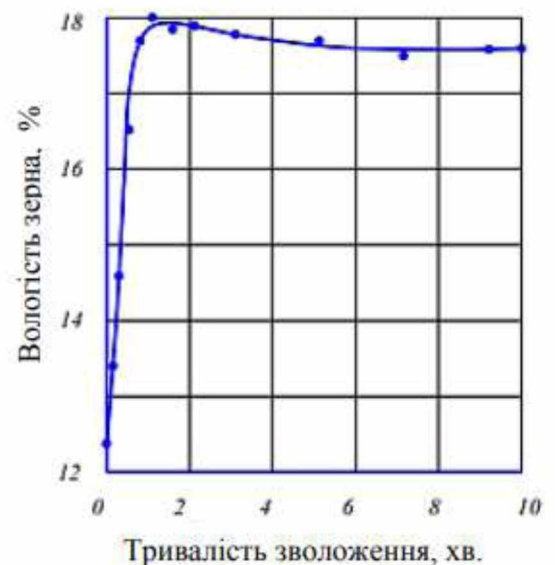
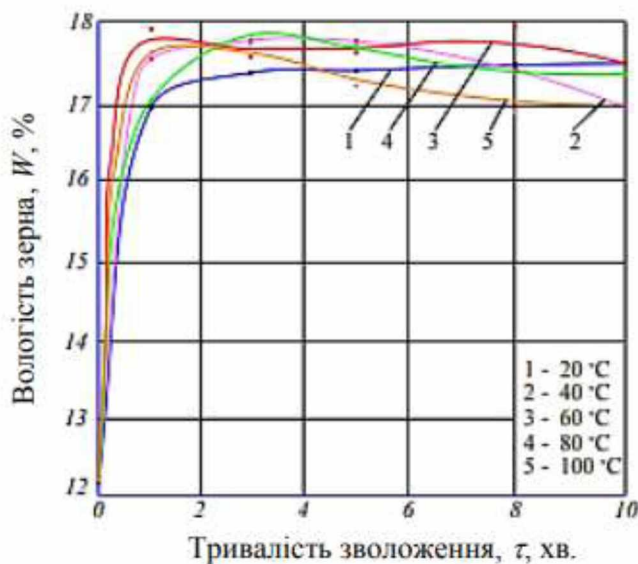


Рисунок 3.1 - Зміна вологості зерна ячменю при зволоженні водою

Рисунок 3.2 - Кінетика зволоження зерна ячменю

На процес зволоження впливає температура води. Найбільш інтенсивно відбувається процес зволоження водою, нагрітою до температури 40-60 °С (рис. 3.3).

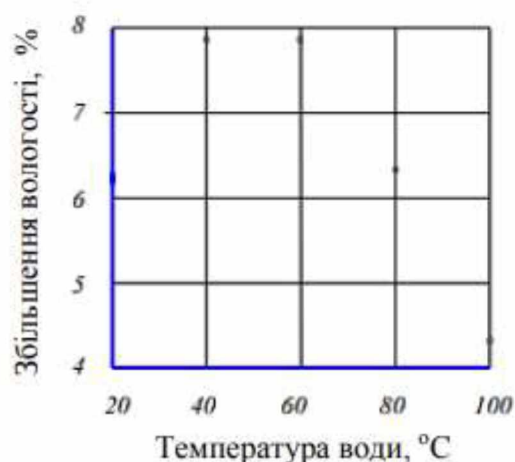


Рисунок 3.3 - Залежність ступеня вологості зерна від температури води

За цих умов протягом першої хвилини зерно повністю вбирає внесену воду. Про біохімічні зміни в зерні, що відбуваються при його зволоженні, судили за рівнем клейстеризації крохмалю (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 - Вплив зволоження зерна водою на ступінь клейстеризації крохмалю

Зразок	Тривалість зволоження, хв.	Вологість зерна, %	Ступінь клейстеризації крохмалю, %
Ячмінь вихідний	-	11,4	12,0
Ячмінь зволожений	1	17,9	16,0
Ячмінь зволожений	3	17,6	18,8
Ячмінь зволожений	5	17,5	20,0
Ячмінь зволожений	7	17,2	20,5
Ячмінь зволожений	10	17,0	23,0

З даних таблиці видно, що в перший момент збільшення вологості зерна з 11,4% до 17,9%, ступінь клейстеризації крохмалю збільшується з 12% до 16%. В подальшому ступінь клейстеризації збільшується незначно, що пов'язано зі збільшенням набухання зерна при сприятливій температурі 60 °С.

При вивченні впливу вологості зерна при замочуванні водою різної температури встановлена така закономірність: поглинання води відбувається

у два етапи – у початковий період різко зростає вологість, а потім вода повільно проникає всередину ендосперму.

Таким чином, в результаті експериментів встановлено, що зерно краще зволожувати водою температурою 40-60 °С протягом 1-2 хвилин.

### **3.2 Дослідження процесу пропарювання зерна**

Зволоження зерна можна досягти також шляхом пропарювання. Ефективність зволоження зерна залежить від параметрів пари, що надходить. При однаковій витраті пари та тривалості обробки процес зволоження відбувається інтенсивніше при подачі пари з меншим тиском. Так, при використанні сухої пари тиском 0,4-0,6 МПа зволоження зерна проходить менш інтенсивно, ніж при використанні вологої пари тиском 0,2-0,3 МПа. Встановлено характер зміни вологості зерна при обробці його в пропарювачі парою тиском 0,5 МПа (рис. 3.4).

Результати дослідів з обробки ячменю вологою парою тиском 1,5-2,0 МПа показують, що процес зволоження проходить інтенсивніше. Так, вологість зерна досягає величини 30-33 % протягом 3-5 хвилин при витраті пари 0,11 кг/хв. на 1 кг зерна (рис. 3.5).

Збільшення витрати пари хоч і інтенсифікує процес зволоження зерна, проте призводить до більшої його витрати і, отже, економічно недоцільно. Слід зазначити, що в процесі пропарювання молекули води, що утворюють насичену або перегріту пару, мають більший запас кінетичної енергії та безперешкодно долають вологоутримуючі шари зерна.

Внаслідок пропарювання зволоження зерна та його набухання відбуваються набагато швидше, ніж при обробці водою. У процесі обробки ячменю паром відзначено зміни фізико-механічних властивостей. Так, температура зерна після пропарювання зросла до 85-90 °С, об'ємна маса пропареного ячменю знизилася з 670 кг/м<sup>3</sup> до 610-630кг/м<sup>3</sup>, що пояснюється набуханням зерна при зволоженні.

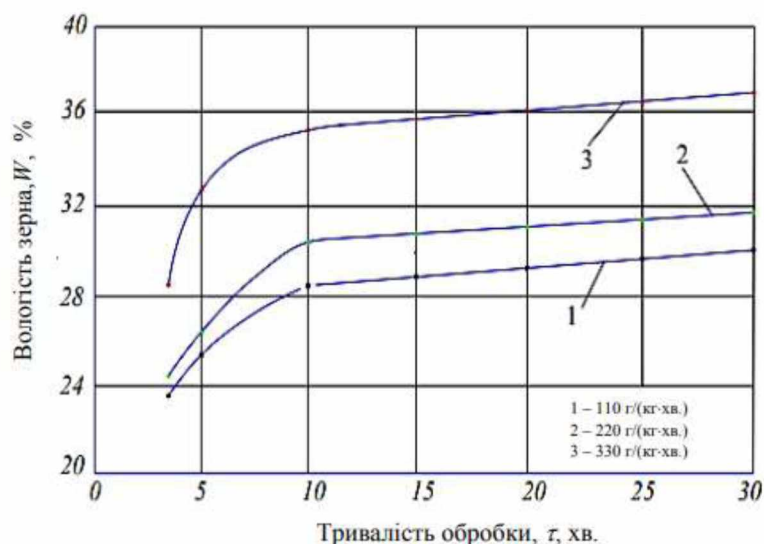


Рисунок 3.4 – Характер зміни вологості зерна при обробці його в пропарювачі паром тиском 0,5 МПа

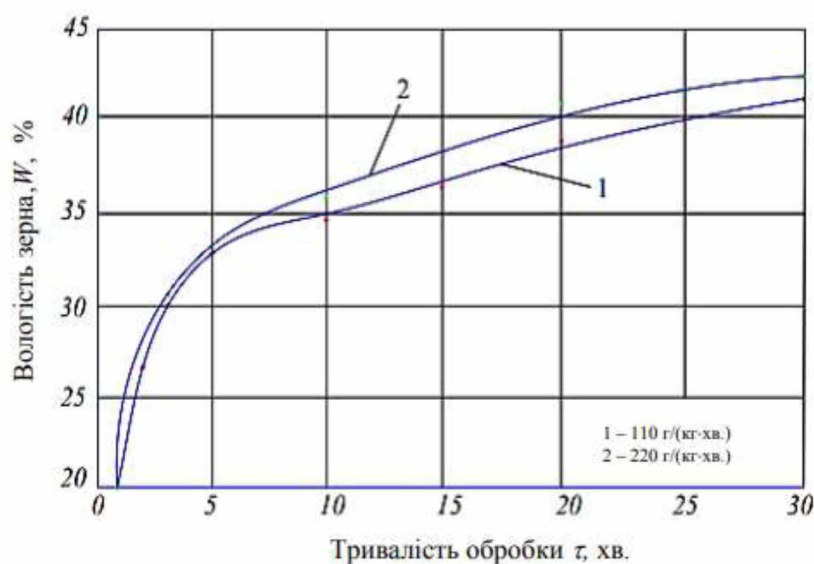


Рисунок 3.5 – Характер зміни вологості зерна при обробці паром тиском 0,15-0,2 МПа

Внаслідок пропарювання зволоження зерна та його набухання відбуваються набагато швидше, ніж при обробці водою. У процесі обробки ячменю паром відзначено зміни фізико-механічних властивостей. Так, температура зерна після пропарювання зросла до 85-90 °С, об'ємна маса пропареного ячменю знизився з 670 кг/м<sup>3</sup> до 610-630 кг/м<sup>3</sup>, що пояснюється набуханням зерна при зволоженні. Крім фізико-механічних властивостей змін

зазнали і біохімічні властивості зерна. Виявлено вплив тривалості обробки та витрати пари на ступінь клейстеризації крохмалю. Отримані результати (рис. 3.6) дозволяють зробити висновок про те, що ступінь клейстеризації крохмалю збільшується із збільшенням тривалості пропарювання та практично не залежить від витрати пари в досліджених межах.

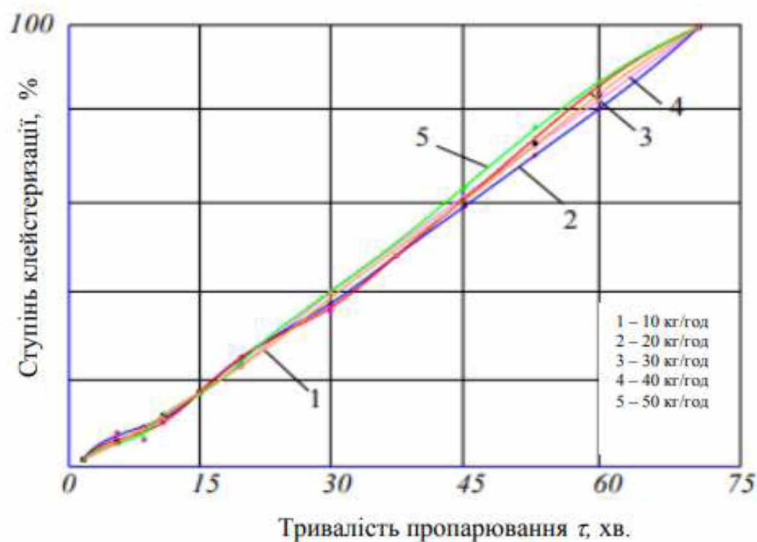


Рисунок 3.6 – Вплив витрати пари та тривалості пропарювання на ступінь клейстеризації крохмалю ячменя

У процесі пропарювання зерна під дією високої температури та вологості створюються умови для перетворення крохмалю в декстрини. Тому було визначено зміст декстринів у зерні при обробці його парою атмосферного тиску протягом 60 хвилин (рис.3.7). Результати дослідження, представлені на рисунку 3.7, свідчать про те, що загальний зміст декстринів у зерні збільшується із збільшенням тривалості обробки.

Протягом 10 хвилин пропарювання вміст декстринів збільшується приблизно на 0,5-1,0 % порівняно з вихідним зразком, через 30 хвилин – на 1,5-2,0 %, а після 60 хвилин пропарювання – на 4,0-4,5%. Тобто можна зробити висновок, що ступінь декстринізації крохмалю в процесі пропарювання зерна незначний.

У процесі пропарювання молекули води, що утворюють пару, мають великий запас кінетичної енергії та безперешкодно долають вологоутримуючі

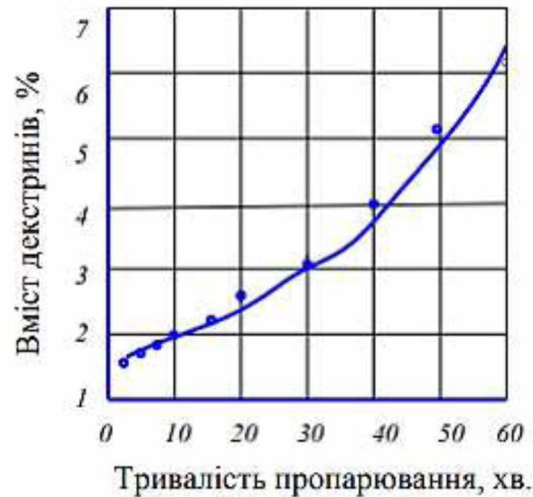


Рисунок 3.7 - Зміна кількості декстринів у процесі пропарювання зерна

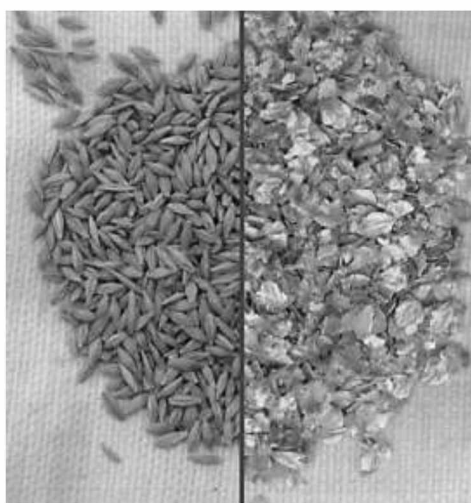
шари зерна. В результаті обробки паром зерно набагато швидше зволожується і набухає, ніж під час обробки водою

Відзначено зміни фізико-механічних та біохімічних властивостей зерна. Так, температура зерна після пропарювання зростає до 85-90°C, об'ємна маса знижується. Зі збільшенням тривалості обробки паром збільшується ступінь клейстеризації крохмалю зерна та створюються умови для перетворення крохмалю на декстрини.

### 3.3 Дослідження процесу плющення зерна ячменю

Для встановлення впливу процесу обробки зерна ячменю пропарюванням та плющенням на його фізичні та біохімічні властивості були проведені дослідження на спеціально виготовленому плющильному верстаті з регульованим зазором між валками. При плющенні має місце механічне руйнування структури набряклих крохмальних зерен - деструкція, яка спільно з дією теплоти, вологи та тиску призводить до клейстеризації крохмалю, що визначається розривом оболонок крохмальних гранул (рис. 3.8). Для вивчення цього явища проведено дослідження щодо впливу на ступінь клейстеризації крохмалю зерна ячменю величини зазору між валками. З цією метою зразки

ячменю, обробленого паром при атмосферному тиску протягом 10 хвилин, пропускали через плющильний верстат, змінюючи величину зазору між валками.



*a*                      *б*

Рисунок 3.8 – Зерна ячменю: *a* – вихідне; *б* - плющене

Ступінь клейстеризації пропареного ячменю становила 12%.

Результати дослідів показують, що із зменшенням величини зазору між валками ступінь клейстеризації збільшується (рис. 3.9). В отриманих пластівцях ступінь клейстеризації крохмалю склав 29 % при зазорі 0,5 мм та 68 % при зазорі 0,1 мм.

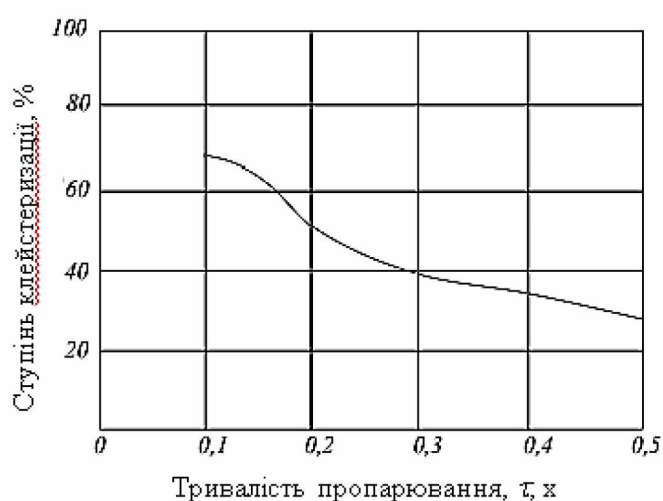


Рисунок 3.9 - Зміни ступеня клейстеризації крохмалю в залежності від величини зазору між валками плющильного станка

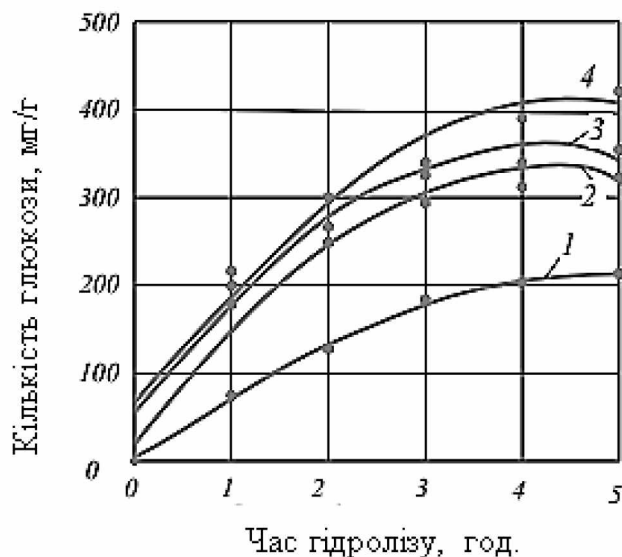
Пластівці, вироблені при величині зазору 0,1-0,5 мм, мали крихку структуру внаслідок того, що зерно зазнавало дуже сильного механічного роздавлювання. У зв'язку з тим, що зменшення зазору між валками призводить до значного збільшення потужності установки, подальші дослідження проводили при зазор між валками 0,2-0,25 мм.

Встановлено, що тривалість пропарювання та витрата пари збільшують ступінь клейстеризації крохмалю (табл. А1 додатку А).

Так, після плющення ячменю, пропареного протягом 1 хвилини, ступінь клейстеризації крохмалю в пластівцях збільшився до 33-40%, у процесі пропарювання ячменю протягом 30 хвилин - склав 36-40%, а після плющення - 54-60%. Тільки після пропарювання протягом 60 хвилин та наступного плющення ступінь клейстеризації крохмалю досяг спочатку 83-89%, потім після плющення – 100%.

Крім того, пропарювання та плющення впливають на процес перетравності крохмалю.

Як показали результати досліджень, процес перетравності крохмалю *in vitro* триває щонайменше 5 годин (рис. 3.10).



1 – ячмінь вихідний; 2 – час пропарювання 5 хв.;  
3 – час пропарювання 10 хв.; 4 – час пропарювання 30 хв.

Рисунок 3.10 - Динаміка утворення глюкози при гідролізі крохмалю ячмінних пластівців

Як для необробленого, так і для пропареного ячменю найбільша кількість глюкози при гідролізі у присутності глюкоамілази утворюється в перші 1-2 години реакції, тобто процес протікає із загасанням у часі. Якщо в першу годину виділилося від 100 до 200 мг/г глюкози, то на п'ятій годині її кількість становила 10-20 мг/г, тобто процес гідролізу практично припинився.

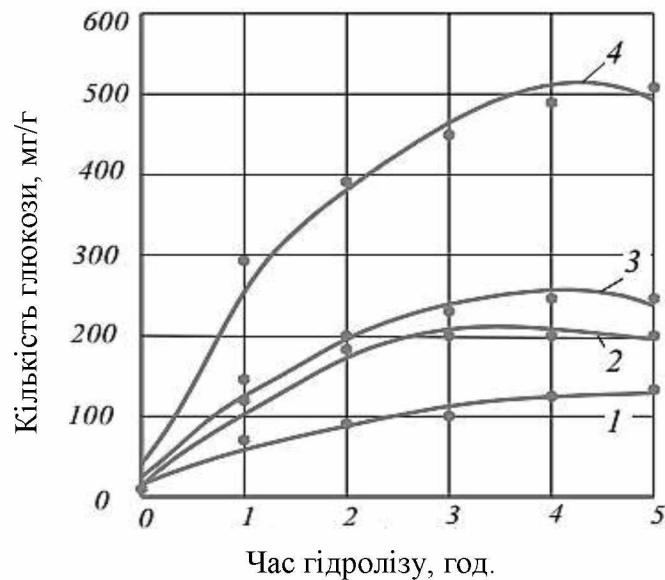
Меншу перетравність має крохмаль необробленого ячменю (вихідний ячмінь). Протягом 5 годин крохмаль цього зерна розщепився з утворенням 215 мг/г глюкози. У той час як при п'ятигодинному гідролізі крохмалю пластівців, отриманих з пропареного ячменю, утворилося 320-430 мг/г глюкози.

Зазначається загальна закономірність підвищення перетравності крохмалю із збільшенням тривалості пропарювання ячменю перед його плющенням. У цілому нині перетравність *in vitro* крохмалю ячменю, плющеного після обробки парою при атмосферному тиску, підвищується проти вихідного зерна вдвічі. Проведено дослідження щодо виявлення впливу ступеня клейстеризації крохмалю на його перетравність. Отримані результати показали, що кількість глюкози, що утворюється, при ферментативному гідролізі крохмалю за однаковий проміжок часу в більш клейстеризованому зерні більше порівняно з менш клейстеризованим (рис. 3.11).

При цьому слід зазначити, що для пластівців з більшого ступеня клестеризації тривалість гідролізу скорочується до 4 годин. У кількісному виразі через 5 годин гідролізу вихідного зерна утворилося 140 мг/г глюкози; пластівців з ячменю зі ступенем клейстеризації крохмалю 50% - 270 мг/г; пластівців з ячменю зі ступенем клейстеризації 100% - 500 мг/г.

Таким чином, порівняно з вихідним ячменем швидкість перетравності крохмалю пластівців з пропареного ячменю з високим ступенем клейстеризації підвищується в 2-3,5 рази.

При цьому крохмаль пластівців з пропареного ячменю зі 100% ступенем клейстеризації розщеплюється з утворенням глюкози протягом 4 годин. Тобто пластівці, отримані з пропареного ячменю з високим ступенем клейстеризації, мають кращу перетравність крохмалю.



1 - ячмінь вихідний; 2 -  $K = 30\%$ ; 3 -  $K = 50\%$ ; 4 -  $K = 100\%$

Рисунок 3.11 - Залежність перетравності крохмалю ячменя від часу гідролізу при різному ступені клейстеризації  $K$

На підставі проведених досліджень встановлено, що для пропареного ячменю при тих самих режимах можна отримати різний ступінь клейстеризації крохмалю в залежності від величини зазору між валками плющильного верстата, тобто від товщини пластівців. У зв'язку з цим пластівці різної товщини можуть мати різну поживність.

Як показали результати наших досліджень, кількість глюкози, що утворилася, при гідролізі крохмалю ячмінних пластівців збільшується із зменшенням їх товщини, тобто при зменшенні зазору між валками в процесі плющення (рис. 3.12).

Найкращі результати перетравності досягаються при плющенні ячменю на вальцях із зазором 0,1-0,5 мм. Кількість утвореної глюкози при гідролізі протягом 4 годин пластівців товщиною 0,1 мм становило близько 400 мг/г, тоді як пластівців товщиною 0,5 мм - всього 300 мг/г.

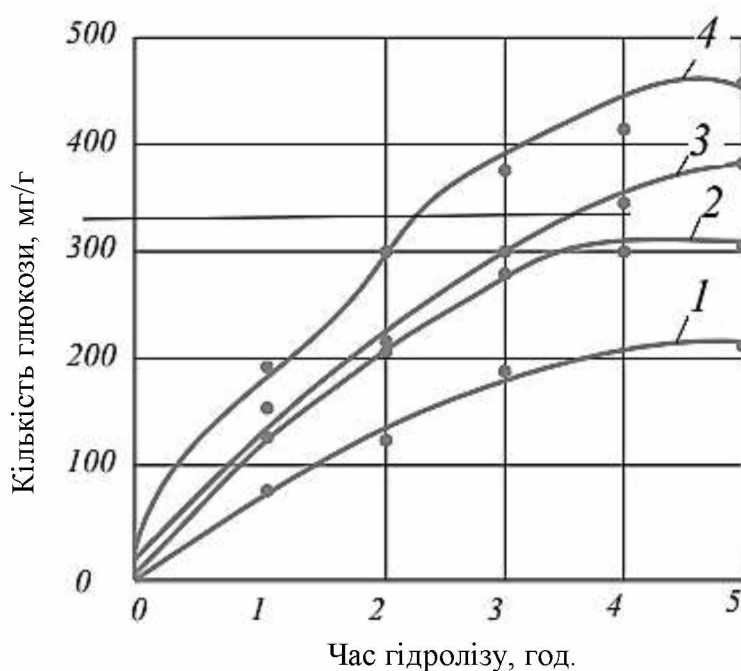


Рисунок 3.12 - Залежність перетравності крохмалю від товщини пластівців  $\delta$

При цьому час гідролізу крохмалю збільшився і становив понад 5 годин.

Слід зазначити, що кількість глюкози, що утворилася при гідролізі протягом 5 годин пластівців товщиною 0,1 мм досягає 440 мг/г, що у 2 рази більше, ніж у вихідному ячмені.

Це пояснюється тим, що із зменшенням зазору між вальцями та зменшенням товщини пластівців ступінь клейстеризації крохмалю та водопоглинальна здатність збільшується, що, зрештою, підвищує поживну цінність пластівців.

Вивчено вплив пропарювання зерна при атмосферному тиску з подальшим плющенням на вміст та фракційний склад білка. Встановлено, що плющення практично не змінює суми азотних речовин у ячмені, проте впливає на їхній склад, що призводить до змін у співвідношенні білкових фракцій (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 - Вплив тривалості пропарювання ячменю та плющення на вміст і фракційний склад білка

Тривалість пропарювання, хв.	Вміст сирого протеїну, %	Кількість фракцій білка, %				Нерозчинний залишок, %
		водорозчинна	соле-розчинна	спирторозчинна	лужнорозчинна	
Вихідний ячмінь	13,87	11,0	3,12	20,01	61,34	4,53
5	14,02	8,71	2,86	15,09	55,22	17,12
10	13,80	9,11	2,45	10,80	58,77	18,97
30	13,84	3,13	2,69	7,30	64,99	21,89
45	13,75	2,50	2,49	6,90	64,10	22,00
60	13,68	1,35	1,73	63,21	64,89	25,72

Так, пропарювання при атмосферному тиску пари протягом 5 хвилин призводить до зниження розчинності всіх фракцій білка при одночасному збільшенні білків нерозчинного залишку.

При подальшій обробці до 60 хвилин кількість водорозчинних, солевих та спирторозчинних фракцій білка також зменшується, а лужнорозчинних – зростає. Збільшення лужнорозчинного білка можна пояснити тим, що водорозчинні білки ячменю при пропарюванні стають нездатними розчинятися у воді та частково розчиняються у лузі. Втрата білком розчинності свідчить про денатураційні зміни. При цьому найбільш мобільними є альбуміни. Як показують результати наших досліджень, денатурація водорозчинних білків при обробці зерна паром при атмосферному тиску протягом 5 хвилин становить 28%, через 10 хвилин - 47,2% і через 60 хвилин - 87,7%.

Відомий негативний вплив нагрівання на поживну цінність білків. Деякі дослідники визначили, що перетравність білка і продуктивність тварин знижувалися при згодовуванні кормів, що пройшли теплову обробку. Це пояснюється тим, що вплив тепла може викликати зміни хімічних і фізичних властивостей білка. Внаслідок надмірного нагрівання білків ε-аміногрупа лізину може вступати в реакцію з амідами з утворенням сполук, що розщеплюються під дією ферментів на біологічно недоступні пептиди. Для виявлення впливу нагріву при пропарюванні та плющенні ячменю на зміну

білкового комплексу були проведені дослідження щодо визначення перетравності *in vitro* протеїну. Для цього в процесі пропарювання були відібрані зразки ячменю, які піддавалися гідролізу в соляній кислоті при  $\text{pH} = 1,2$  у присутності пепсину протягом 24 годин. По закінченні гідролізу білки осаджували і визначали кількість неперетравного протеїну колориметричним методом з використанням реактиву Несслера. Як показали результати досліджень, вміст сирого протеїну у всіх зразках ячменю знаходиться на одному рівні, вміст неперетравного протеїну в ячмені, обробленому паром при атмосферному тиску протягом 5-30 хвилин практично не відрізняється від вихідного ячменю (табл. 3.3). Незначне зниження коефіцієнта перетравності протеїну спостерігається при пропарюванні ячменю протягом 45 хвилин.

Таблиця 3.3 - Залежність перетравності *in vitro* протеїну ячменю від часу обробки паром

Тривалість пропарювання, хв.	Сирий протеїн, %	Неперетравний протеїн, %	Перетравний протеїн, %	Коефіцієнт перетравності протеїну, %
Вихідний ячмінь	13,87	2,36	11,51	82,9
5	14,02	2,42	11,60	82,7
10	13,80	2,29	11,51	83,4
30	13,84	2,30	11,54	83,4
45	13,75	2,75	11,00	80,0
60	13,68	3,42	10,26	75,0

Подальше збільшення тривалості пропарювання до 60 хвилин призводить до підвищення кількості неперетравного протеїну, що негативно впливає на його перетравність в цілому. Зниження перетравності протеїну ячменю, обробленого паром при атмосферному тиску протягом 60 хвилин, порівняно з вихідним ячменем становило 8%.

За результатами даних досліджень можна зробити висновок, що для запобігання зниження перетравності протеїну ячменю тривалість пропарювання його при атмосферному тиску не повинна перевищувати 30 хвилин. Звідси випливає, що експозиція пропарювання є основним фактором, що впливає на перетравність протеїну ячменю, обробленого паром при атмосферному тиску.

Методом пропарювання та плющення обробляється зерно не лише злакових (кукурудза, пшениця, ячмінь лущений, овес лущений, жито, тритикале), а й бобових культур (горох, соя, ріпак). Зерно, що пройшло спеціальну обробку, використовується при виробництві передстартерних та стартерних комбікормів.

При розплющуванні між валками пропареного зерна відбувається механічне руйнування структури набряклих крохмальних зерен – деструкція, яка спільно з дією тепла, вологи та тиску призводить до клейстеризації крохмалю, що визначається розривом оболонок крохмальних гранул. З зменшенням величини зазору між валками ступінь клейстеризації збільшується.

Зменшення зазору між валками призводить до значної перевитрати електроенергії, необхідної для роботи установки. У порівнянні з вихідним ячменем швидкість перетравлення крохмалю пластівців з пропареного ячменю з високим ступенем клейстеризації підвищується у 2-3,5 рази.

Як показали результати досліджень, процес перетравлення *in vitro* крохмалю ячменю триває щонайменше 5 годин. Як для необробленого, так і для пропареного ячменю найбільша кількість глюкози при гідролізі в присутності глюкоамілази утворюється у перші дві години реакції, тобто процес протікає із загасанням у часі. Крохмаль пластівців з пропареного ячменю зі 100% ступенем клейстеризації розщеплюється з утворенням глюкози вже через 4 години. Тобто пластівці, отримані з пропареного ячменю з високим ступенем клейстеризації, мають кращу перетравність крохмалю.

Відзначається загальна закономірність підвищення перетравності крохмалю з збільшенням тривалості пропарювання ячменю перед його плющенням. У цілому нині перетравність *in vitro* крохмалю ячменю, плющеного після обробки паром при атмосферному тиску, підвищується проти вихідного зерна в два рази.

На підставі проведених досліджень встановлено, що для пропареного ячменю при одних і тих же режимах можна отримати різну ступінь клейстеризації крохмалю залежно від величини зазору між валками

плющильного верстата, тобто від товщини пластівців. У зв'язку з цим пластівці різної товщини можуть мати різну поживність. Як показали результати досліджень, кількість утвореної глюкози при гідролізі крохмалю ячмінних пластівців збільшується із зменшенням їхньої товщини, тобто при зменшенні зазору між валками у процесі плющення.

Вивчено вплив пропарювання зерна при атмосферному тиску з подальшим плющенням на вміст та фракційний склад білка. Встановлено, що плющення практично не змінює суми азотних речовин у ячмені, проте впливає на їхній склад, що призводить до змін у співвідношенні білкових фракцій. Втрата білком розчинності свідчить про денатураційні зміни. При цьому наймобільнішими є альбуміни. Відомий негативний вплив нагрівання на поживну цінність білків.

Деякі дослідники визначили, що перетравність білка та продуктивність тварин знижувалися при згодовуванні кормів, що пройшли теплову обробку. Це тим, що вплив теплоти може викликати зміни хімічних і фізичних властивостей білка. В результаті надмірного нагрівання білків  $\epsilon$ -аміногрупа лізину може вступати в реакцію з амідами з утворенням сполук, які розщеплюються під дією ферментів на біологічно недоступні пептиди. Для виявлення впливу нагріву при пропарюванні та плющенні гороху на зміну білкового комплексу були проведені дослідження щодо визначення атакованості білка трипсином *in vitro*. Вміст сирого протеїну у всіх зразках горохових пластівців знаходився на одному рівні, вміст непереварюваного протеїну гороху, обробленому паром при атмосферному тиску протягом 5-30 хвилин, практично не відрізняється від вихідного зерна. Незначне зниження атакованості білка трипсином спостерігається при пропарюванні гороху протягом більше 45 хвилин. Подальше збільшення тривалості пропарювання до 60 хвилин призводить до підвищення кількості непереварюваного протеїну, що негативно позначається на його перетравності загалом.

Пропарювання, кондиціонування та плющення гороху призводило до зниження антипоживних речовин, наприклад, інгібіторів трипсину, з 1,5-

2,6 мг/г до 0,11-0,20 мг/г, інгібіторів хімотрипсину з 2,0-2,9 мг/г до 0,24-0,30 мг/г. Крім того, відзначається покращення мікробіологічного фону зерна після обробки пропарюванням з подальшим плющенням.

Отже, пропарювання, кондиціонування, плющення зерна забезпечує зниження вмісту антипоживних речовин, що підвищує кормову цінність, покращує мікробіологічні характеристики.

### 3.4 Статистична модель процесу плющення зерна

При дослідженні режимів виробництва пластівців із зерна обробляли зерно ячменю та гороху. Методика проведення досліджень була наступною. Зерно зволожували водою в змішувачі лопатевого типу та направляли в бункер для відволоження. Кількість води, що додається в змішувач, розраховували виходячи із вихідної та заданої вологості за формулою:

$$M = \frac{Q(W_2 - W_1)}{100 - W_2}, \quad (3.1)$$

де  $Q$  - продуктивність лінії, кг/год.;

$W_1$  - початкова вологість зерна, що надходить на зволоження, %;

$W_2$  - вологість, до якої необхідно довести зерно внаслідок зволоження, %;

100 - максимальний вміст води у продукті, %.

Потім зерно пропарювали у пропарювачі лопатевого типу до температури 80-100 °С. Тиск пари становив 0,22-0,32 МПа, температура - 130-140 °С, витрата пари - 120-220 кг/т (1,320-2,420 кг/кг·хв). Плющення пропареного зерна проводили на двовалковій плющилці при швидкості обертання валків 11,4 м/с та 7,6 м/с. Для отримання пластівців різної товщини змінювали зазор між валками у межах від 0,1 до 1,0 мм. Сушіння пластівців проводили на сушарці з ситом, яке розташоване під нахилом, під час продування гарячого повітря через шар пластівців. Потік гарячого повітря подавався вентилятором через паровий калорифер. Температура сушильного агента становила 95-98 °С, час сушіння - 7-13 хв. Сушіння здійснювали до вологості пластівців 8-12%.

Вибір інтервалів зміни факторів обумовлений технологічними умовами процесу плющення, технічними характеристиками плющильної машини. При проведенні досліджень як критерій оцінки ефективності процесу плющення приймали вміст розчинних вуглеводів у пластівцях ячменю та гороху  $Y$ . Факторами, що варіюються були:

$X_1$  - вологість зволоженого продукту, %;

$X_2$  - тривалість пропарювання, хв.;

$X_3$  - вологість пластівців, %;

$X_4$  - зазор між валками, мм.

Всі ці фактори сумісні та некорельовані між собою. Межі зміни досліджуваних факторів наведено у таблиці 3.4.

Вибір критерію оцінки – вміст розчинних вуглеводів у пластівцях  $Y$  обумовлений їх найбільшою значимістю для процесу плющення. Він визначає глибину фізико-хімічних змін поживних речовин під час плющення.

Програма досліджень була закладена у матрицю планування експерименту (табл. А2 додатку А).

Таблиця 3.4 - Межі зміни вхідних факторів

Умови планування	Межі зміни факторів			
	$X_1$ , %	$X_2$ , год.	$X_3$ , %	$X_4$ , мм
Основний рівень	18	4	5,5	0,7
Інтервал варіювання	0,5	0,5	0,3	0,1
Верхній рівень	20	6	12,8	1,0
Нижній рівень	16	2	4,8	0,3
Верхня «зіркова точка»	18,0	4,8	8,8	0,8
Нижня «зіркова точка»	17,0	3,7	5,2	0,6

Для дослідження було обрано дробовий факторний експеримент  $2^{5-1}$  з дробовою реплікою  $X_5 = X_1X_2X_3X_4$ . Порядок дослідів ранжували за допомогою таблиці випадкових чисел, що унеможливило вплив неконтрольованих параметрів на результати експерименту.

При обробці результатів експерименту було застосовано такі статистичні критерії: перевірка однорідності дисперсій – критерій Кохрена, важливість

коефіцієнтів рівнянь регресії – критерій Стьюдента, адекватність рівнянь – критерій Фішера.

Взаємозв'язок чотирьох основних технологічних параметрів, що визначають ефективність обробки зерна зволоженням, пропарюванням і плющенням, апроксимований рівнянням множинної регресії. Встановлено, що найбільшу адекватність мають квадратичні моделі.

Отримані наступні рівняння регресії:

Для пластівців із зерна ячменю:

$$Y=0,753+0,9936X_1+0,5131X_2-0,2296X_3-8,7635X_4-0,02128X_1^2+0,00037X_1X_2-0,0712X_1X_3-0,1375X_1X_4-0,03398X_2^2-0,01929X_2X_3+0,15007X_2X_4+0,3142X_3^2-0,06841X_3X_4+1,56X_4^2 \quad (3.2)$$

Для пластівців із гороху:

$$Y=28,27-0,2009X_1-0,6209X_2+1,049X_3+5,4798X_4-0,03656X_1^2+0,08313X_1X_2+0,01402X_1X_3-0,8086X_1X_4+0,02883X_2^2+0,1876X_2X_3-2,4914X_2X_4-0,08577X_3^2-2,6801X_3X_4+21,805X_4^2 \quad (3.3)$$

Через малі обсяги вибірки рівняння (3.2) і (3.3) являють собою практично функціональні квадратичні залежності при коефіцієнті кореляції  $R=1,0$ . Середнє квадратичне відхилення становило 0,4999, критерій Фішера  $F = 0,8199$ , середня відносна помилка - 6,3%.

Рішення отриманих рівнянь регресії дозволило визначити раціональні режими, за яких має місце найбільша ефективність процесу зволоження, пропарювання та плющення пластівців ячменю та гороху (табл. 3.5).

Таблиця 3.5 – Раціональні режими плющення ячменю та гороху

Найменування зерна	Вологість зволоженого водою зерна, %	Час відволожування, год.	Температура пропареного зерна, °С	Зазор між валками плющилки, мм
Ячмінь	16,0-17,0	2-3	95-100	0,3-0,6
Горох	17,0-19,0	4-6	95-100	0,8-1,0

В таблиця 3.5 представлені раціональні значення факторів, що забезпечують найкращі умови роботи обладнання та найбільші значення вмісту розчинних і легкогідролізованих вуглеводів.

Аналіз рівнянь регресії (3.2) - (3.3) дозволяє виділити фактори, що найбільше впливають на аналізований процес. Ступінь впливу параметрів відносно один одного  $b_2: b_1 = - 0,4$ ;  $b_2: b_3 = 4,2$ ;  $b_2: b_4 = - 9,8$ ;  $b_2: b_5 = - 0,9$ ; причому знак плюс перед коефіцієнтом при лінійних членах вказує на те, що зі збільшенням вхідного параметра значення вихідного параметра збільшується, а знак мінус - зменшується.

На вміст розчинних вуглеводів у пластівцях, найбільший вплив має конструктивний параметр, найменший – коефіцієнт живого перерізу матриці.

Отримані рівняння (3.2), (3.3) нелінійні.

Таким чином, в результаті виконання дослідів отримано інформацію про вплив факторів і побудовано математичну модель процесу, що дозволяє розрахувати вміст розчинних вуглеводів у пластівцях усередині обраних інтервалів варіювання вхідних факторів.

### 3.5 Рециркуляційна сушарка-охолоджувач

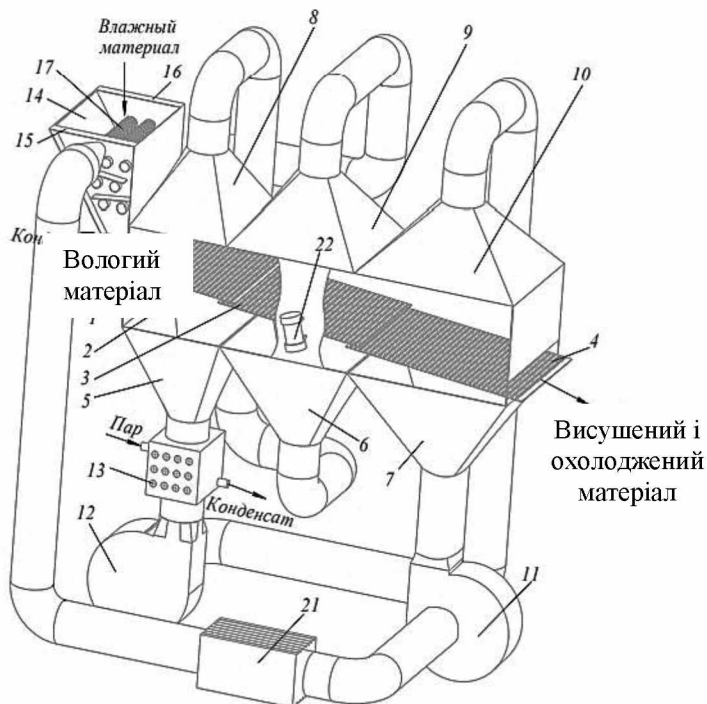
Пропонована технологічна лінія виробництва пластівців зернових та бобових складається з:

- кондиціонера-пропарювача (рис.А1 додатку А), призначеного для зволоження та нагріву зерна, доведення вологості його до 20% і температури до 80-100°C шляхом пропарювання та передачі підготовленого зерна на плющильну машину;

- плющильної машини (рис.А2 додатку А), призначеної для механічної обробки попередньо зволоженого та прогрітого зерна з метою отримання з нього пластівців різної товщини від 0,4 до 1,0 мм та передачі їх на сушарку-охолоджувач;

- сушарки-охолоджувача (рис.А3 додатку А), призначеної для зниження вологості пластівців з 20% до 14% або нижче та температури з 80-100 °С до температури навколишнього повітря або вище, але не більш як на 10°С.

Пропонується рециркуляційна сушарка-охолоджувач (рис.3.13).



1 – камера; 2, 3 та 4 – перфоровані сита; 5, 6 та 7 – газопідвідні короби; 8, 9 та 10 – витяжні дифузори; 11 та 12 – вентилятори; 13 – калорифер; 14-приймальний бункер; 15 та 16 – двотільний корпус; 17 – теплообмінні трубки; 18 – похилі пластини; 19 – патрубки; 20 - розподільний шнек; 21 - осушувач повітря; 22– вібропривід

Рисунок 3.13 – Рециркуляційна сушарка

Рециркуляційна сушарка-охолоджувач працює наступним чином. Включаються приводи вентиляторів 11 і 12, в паровий калорифер 13 подається пар для нагрівання теплоносія (повітря).

Сушарка прогрівається до заданої температури і виводиться на робочий режим. Сипучий вологий дисперсний матеріал (наприклад, зерно ячменю, гранули комбікорму тощо) подається в приймальний бункер 14.

Відпрацьований теплоносій з витяжного дифузора 9 по повітропроводу подається у двотільний корпус 15 приймального бункера 14, який з'єднаний

порожністими оребреними теплообмінними трубками 17 з двотілим корпусом 16. Повітря, проходячи трубками 17, нагріває їх і бічні внутрішні стінки приймального бункера 14.

Сипучий вологий дисперсний матеріал, рухаючись між гарячими трубками 17 і бічними стінками бункера 14 кондуктивно нагрівається.

Відпрацьоване повітря, при цьому охолоджується, а водяні пари, що містяться в ньому, конденсуються. Так як всередині двотільних корпусів 15 і 16 розташовані похилі пластини 18 для зигзагоподібного руху теплоносія, то конденсат, що утворюється з водяної пари, стікає вниз і відводиться з корпусів 15 та 16 через патрубки 19.

Відпрацьований та охолоджений теплоносій із двотільного корпусу 16 приймального бункера 14 по повітропроводу надходить у осушувач повітря 21, з якого відсмоктується першим нагнітальним вентилятором 11.

Одночасно включається привід розподільного шнека 20, який рівномірно розподіляє попередньо нагрітий у приймальному бункері 14 матеріал по всій ширині першого сита 2. Включаються віброприводи 22, які приводять у рух похилі перфоровані сита 2, 3 та 4.

Сипучий дисперсний вологий матеріал, переміщаючись по похилому перфорованому сити 2, контактує з гарячим теплоносієм, що подається другим нагнітальним вентилятором 12 через паровий калорифер 13, в якому повітря нагрівається до заданої температури. При цьому дисперсний матеріал переміщається по вібруючому сити 2 коливання якого здійснюються від вібратора 22. Віброкиплячий шар утворюється за рахунок спільного впливу коливань похилого сита 2 та теплоносія, що надходить з газовідвідного короба 5. Коливання сита 2 сприяють дезагрегації грудок дисперсного вологого матеріалу, а потік теплоносія, що омиває частинки продукту з усіх сторін, швидкому їх висушуванню.

Кут нахилу сита 2 регулюється та за рахунок цього коригується швидкість переміщення оброблюваного матеріалу.

Частини, що висушуються, вологого дисперсного матеріалу, переміщаючись по ситі 2, пересипаються на похило перфороване сито 3, при цьому товщина шару матеріалу, що висушується, на ньому зменшується за рахунок регулювання кута нахилу та параметрів коливань (частоти та амплітуди) сита 3.

Відпрацьований теплоносій, пройшовши через шар матеріалу на ситі 2, надходить у витяжний дифузор 8, а потім по повітропроводу через газовідвідний короб 6, прямує під сито 3. Матеріал на ситі 3 досушується у віброкиплячому шарі в потоці теплоносія, що подається з газопідвідного короба 6. Цей потік теплоносія, пройшовши через шар матеріалу на ситі 3, надходить у витяжний дифузор 9, а потім по повітропроводу направляється у двотільний корпус 15 приймального бункера 14.

Висушені частинки вологого дисперсного матеріалу, переміщаючись по ситі 3, пересипаються на похило перфороване сито 4, при цьому товщина шару матеріалу, що висушується на ньому зменшується за рахунок регулювання кута нахилу та параметрів коливань (частоти та амплітуди) сита 4. Потік осушеного та охолодженого теплоносія першим нагнітальним вентилятором 11 подається через витяжний дифузор 7 під сито 4. Охолоджений та осушений потік теплоносія пронизує шар висушеного матеріалу на ситі 4 і охолоджує його, а сам при цьому нагрівається. Потім нагрітий потік теплоносія через витяжний дифузор 10 відсмоктується другим вентилятором 12.

Пропонована рециркуляційна сушарка-охолоджувач має наступні переваги: більш високу теплову ефективність процесу сушіння за рахунок використання рециркуляції теплоносія і ступінчастого сушіння, а також внаслідок використання активних гідродинамічних режимів, можливість поліпшення якості продукту, що отримується за рахунок застосування більш м'яких режимів і рівномірної обробки; низькі енерговитрати за рахунок вибору раціональних режимів сушіння та охолодження з урахуванням зміни вмісту вологи продукту по довжині сит сушарки; розширення сфери застосування за рахунок секційного підведення теплоносія.

*Висновки.* В результаті досліджень встановлено, що зерно краще зволожувати водою температурою 40-60 °С протягом 1-2 хвилин.

Відзначено зміни фізико-механічних та біохімічних властивостей зерна. Так, температура зерна після пропарювання зростає до 85-90°C, об'ємна маса знижується. Зі збільшенням тривалості обробки паром збільшується ступінь клейстеризації крохмалю зерна та створюються умови для перетворення крохмалю на декстрини.

Встановлено, що пропарювання, кондиціонування, плющення зерна забезпечує зниження вмісту антипоживних речовин, що підвищує кормову цінність, покращує мікробіологічні характеристики.

Розроблена математична модель процесу плющення зерна, що дозволяє розрахувати вміст розчинних вуглеводів у пластівцях усередині обраних інтервалів варіювання вхідних факторів..

Запропонована технологічна лінія виробництва плющених пластівців із зерна зернових та бобових культур з удосконаленою конструкцією рециркуляційної сушарки-охолоджувача, яка має більш високу теплову ефективність процесу сушіння за рахунок використання рециркуляції теплоносія і ступінчастого сушіння, а також внаслідок використання активних гідродинамічних режимів, можливість поліпшення якості продукту, що отримується за рахунок застосування більш м'яких режимів і рівномірної обробки; низькі енерговитрати за рахунок вибору раціональних режимів сушіння та охолодження з урахуванням зміни вмісту вологи продукту по довжині сит сушарки; розширення сфери застосування за рахунок секційного підведення теплоносія.

## 4 РЕКОМЕНДАЦІ ЩОДО ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ДОСЛІДЖЕНЬ

Рекомендовано впровадження розробленої технологічної лінії виробництва плющених пластівців для виробництва стартерних та престартерних комбікормів; використання в технологічному процесі обґрунтовані в ході досліджень раціональні технологічні режими процесів зволоження, пропарювання та плющення зерна в комбіковому виробництві.

### 4.1 Екологічна експертиза

Метою екологічної експертизи є запобігання негативному впливу антропогенної діяльності на стан навколишнього природного середовища та здоров'я людей, а також оцінка ступеня екологічної безпеки господарської діяльності та екологічної ситуації на окремих територіях і об'єкта [13].

Еколого-експертна оцінка зерноочисно-сушильного комплексу проводиться з метою:

- перевірки відповідності об'єкту вимогам чинного природоохоронного законодавства;
- визначення переліку можливих екологічних небезпечних факторів і зон впливів діяльності на навколишнє середовище;
- оцінки ступеня екологічної безпеки, достатності та ефективності екологічних обґрунтувань діяльності об'єкту з питань екології;
- оцінки ефективності, повноти і обґрунтувань заходів, що вживаються для охорони навколишнього природного середовища на об'єкті.

Забруднення навколишнього природного середовища, як правило, відбувається при аваріях.

З метою недопущення аварійних ситуацій передбачається ряд організаційно-технічних заходів, спрямованих на ліквідацію виниклої ситуації та недопущення забруднення навколишнього природного середовища.

Передбачаються такі природоохоронні заходи:

- недопущення перевищення викидів розрахунково визначених концентрацій по основних забруднюючих речовинах в атмосферне повітря;
- недопущення використання обладнання з перевищенням у викиди відпрацьованих газів нормативно встановлених показників CO, CH, NO<sub>2</sub>;
- регулювання викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря в періоди несприятливих метеорологічних умов відповідно заходів передбачених матеріалами ОВНС та документами дозвільного характеру;
- реалізація заходів, з метою мінімізації викиду забруднюючих речовин до атмосферного повітря при впровадженні технологічних операцій;
- суворе дотримання технологічного регламенту;
- ведення технологічного процесу і обслуговування обладнання в суворій відповідності з керівництвом по експлуатації, проектною документацією, виробничими інструкціями, інструкціями з охорони праці, протипожежної і екологічної безпеки;
- вжити заходів щодо недопущення втрат сировини при транспортуванні;
- реалізація заходів щодо зниження пилоутворення під час впровадження планової діяльності;
- наявність чіткого регламенту та необхідної кількості засобів на випадок виникнення необхідності оперативної ліквідації, у повному обсязі, з метою мінімізації можливого негативного впливу на оточуюче природне середовище, будь-якої аварійної ситуації;
- припинення будь-яких робіт при виникненні будь-яких нештатних ситуацій до приведення технологічного процесу до нормальних умов;
- організація спеціально відведених та відповідно обладнаних місць для тимчасового зберігання кожного окремого виду небезпечних відходів згідно з їх характеристикою небезпеки та відповідно до вимог діючих санітарно-гігієнічних норм і правил;
- виконання запланованих заходів з охорони та раціонального використання водних ресурсів;

- використання сучасного технологічного обладнання для ведення технологічного процесу;
- очищення пило-газоповітряної суміші за допомогою циклонів та сепаратора;
- оснащення газорозподільного обладнання скидними клапанами, запірною арматурою, контрольно-вимірювальною апаратурою та автоматикою, забезпечення мінімальної кількості фланцевих з'єднань на технологічних трубопроводах;
- вжиття заходів щодо зниження рівнів шуму;
- влаштування водонепроникного покриття на території проммайданчику та під'їзних автодоріг;
- відведення господарсько-побутових стічних вод в гідроізольований септик з подальшим вивезенням на очисні споруди комунального підприємства;
- використання труб для системи водопостачання й водовідведення із сучасних високоякісних матеріалів;
- реалізація заходів з виключення виникнення забруднення ґрунту;
- недопущення використання техніки з підтіканням ПММ;
- ремонтні роботи техніки, обладнання проводити у спеціально відведених місцях;
- стежити за герметичністю обшивки енергетичних установок, вибухових клапанів, зварних сполучень технологічних трубопроводів, регулярно усувати присоси повітря через обшивку установок, повітропроводів і газоходів;
- забезпечення проведення екологічного моніторингу за станом навколишнього природного середовища.

## 4.2 Охорона праці

Охорона праці – це система законодавчих, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та лікувально-профілактичних заходів, спрямованих на збереження здоров'я та працездатності людини в процесі праці [14].

Критична ситуація в Україні у сфері безпеки праці проявляється високим рівнем виробничого травматизму і професійної захворюваності, незадовільними умовами праці та санітарним станом підприємств, внаслідок чого держава втрачає кваліфікованих працівників, а натомість отримує десятки тисяч осіб, які потребують повноцінного соціального захисту.

Домінуючими причинами формування несприятливих умов праці залишаються недосконалі технології, машини і механізми, їхня несправність, невикористання засобів захисту, порушення правил безпеки, режимів праці і відпочинку.

Охорона праці в нашій країні охоплює заходи по подальшому полегшенню умов праці на основі механізації важких і шкідливих виробничих процесів, широкому впровадженню сучасних засобів охорони праці, усуненню причин, що породжують травматизм і професійні захворювання робітників. Вона тісно пов'язана з умовами праці.

Умови праці – це складне об'єктивне суспільне явище, що формується в процесі трудової діяльності під впливом взаємопов'язаних факторів соціально-економічного характеру, які впливають на здоров'я, працездатність людини, на її відношення до праці та ступінь задоволення від неї, на ефективність праці та інші економічні результати виробництва. Вони характеризуються оціночними показниками мікроклімату, наявністю в робочій зоні шкідливих та небезпечних виробничих факторів, психофізичним та естетичними елементами діяльності працівників господарства.

Охорона праці в умовах сільськогосподарського виробництва – важливе завдання, вирішення якого забезпечить нормальні умови праці працівниками

сільського господарства. Це заходи по подальшому поліпшенню і оздоровленню умов праці, широкому впровадженню сучасних засобів безпеки, усуненню причин, що породжують травматизм, створенню на виробництві необхідних гігієнічних і санітарно-побутових умов.

Машини та обладнання, які використовуються для плющення зерна перед введенням в експлуатацію повинні бути приведені в технічно справний стан, відповідати вимогам технічних нормативних правових актів.

Рухомі, обертові частини машин і устаткування (плющильні вальці, ланцюгові, ремінні передачі) повинні мати захисні огороження, що забезпечують безпеку працівників.

На захисних огороженнях і біля вузлів машин, небезпечних при обслуговуванні, повинні бути написи, що попереджають працівників про небезпеку.

На машинах, що працюють від валу відбору потужності трактора, захисний кожух карданного валу повинен бути зафіксований, а на тракторі і машині повинні бути встановлені захисні огорожі (кожуха), що перекривають воронки захисного кожуха на величину не менше 50 мм.

Під час роботи машин і устаткування забороняється знімати і встановлювати захисні огороження.

Машини повинні бути укомплектовані необхідними засобами для очищення робочих органів. Очищення чи технологічна регулювання робочих органів при працюючому обладнанні забороняється.

Машини та обладнання, що мають електричний привід, повинні бути надійно заземлені.

Обладнання повинно бути забезпечено автоматичним захистом від перевантажень приводу.

Працівники повинні проходити навчання безпечним методам роботи з плющильним обладнанням і на КЗС.

Ширина сховищ для плющеного зерна повинна бути не менше 4 м для безперешкодного проїзду трактора, який здійснює трамбування зерна.

З боку в'їзду та виїзду з силосних траншей і сховищ повинні бути підготовлені під'їзні шляхи і рівні майданчики, достатні для маневрування транспортних засобів.

Роботи по ремонту повинні проводитися тільки після повного відключення від мережі електроживлення з обов'язковим вивішуванням в місцях відключення попереджувальних табличок.

Знаходження людей в кузовах автомашин або тракторних причепів при заповненні їх зерном і при транспортуванні продукту до місця зберігання не допускається.

Вимкнення окремих машин лінії при виникненні в них несправностей (крім аварійних ситуацій) повинен робити тільки старший по даній ділянці лінії. У разі аварії, поломки машини, загрози безпеки працівників відключення лінії може створити будь-який працівник, який перебуває поблизу кнопки аварійної зупинки.

Дотримання вимог безпеки значно знижує ризик виробничого травматизму.

### 4.3 Техніко-економічне обґрунтування досліджень

Річний економічний ефект від впровадження лінії плющення розраховували за формулою:

$$E = [(C_1 + E_n \cdot K_1) - (C_2 + E_n \cdot K_2)] \cdot A_2, \quad (4.1)$$

де  $E$  - річний економічний ефект, грн;

$C_1$  та  $C_2$  - собівартість одиниці продукції, отриманої на базовій та пропонованій лінії, грн;

$K_1$  та  $K_2$  - питомі капітальні вкладення у виробничі фонди базової та пропонованій лінії, грн;

$A_2$  - річний обсяг виробництва продукції, виробленої на пропонованій лінії, т;

$E_n$  - нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень (0,15%).

1. Річний обсяг виробництва плющеного зерна на базовій та пропонованій лініях.

Як базову використовували лінію плющення фірми «Бюлер», встановлену на комбікормовому заводі.

$$A_{б} = 2,0 \cdot 24 \cdot 231 = 11088 \text{ т,}$$

$$A_{пр} = 3,0 \cdot 24 \cdot 231 = 16632 \text{ т,}$$

де  $A_{б}$ ,  $A_{пр}$  - річний обсяг виробництва плющеного зерна на базовій та пропонованій лініях, т;

2,0 та 3,0 - продуктивність базової та пропонованої лінії, т/год.;

24 - тривалість роботи лінії на добу, год.;

231 - річний обсяг робочих днів, днів.

2. Капітальні вкладення в базову лінію – 2000 тис. грн, зокрема питомі капітальні вкладення ( $K_1$ ) – 180 грн/т, в пропоновану – 1100 тис.грн, в т.ч. питомі капітальні вкладення ( $K_2$ ) – 66 грн/т.

3. Встановлена потужність електродвигунів: базового - 70 кВт, пропонованого - 81 кВт.

4 . Розрахунок витрат за виробництво плющеного зерна по базовій та пропонованій лініях представлений у таблиці 4.1.

5. Собівартість виробництва плющеного зерна (ячменю) представлена у таблиці 4.2.

Таблиця 4.1 – Розрахунок витрат на виробництво плющеного зерна

Статті витрат	Розрахунок	Сума витрат, грн	
		базовий варіант	пропонований варіант
1	2	3	4
Заробітна плата – апаратник (2 особи)	$8000 \cdot 12 \cdot 2$	192000	192000
Додаткова зарплата (30%)	$192000 \cdot 0,3$	57600	57600
Всього - зарплата (ЗП)	$192000 + 57600$	249000	249000
Нарахування на зарплату (22%)	$ЗП \cdot 0,22$	54780	54780
Амортизаційні відрахування (10%)	$КВ \cdot 0,1$	200000	110000

Продовження табл. 4.1

1	2	3	4
Вартість споживаної електроенергії, грн/кВт·год.	81·0,85·24·231·1,68 70·0,85·24·231·1,68	554868	641263
Всього витрат виробництва (ВП)		1058648	1055043
Витрати на 1 т плющеного ячменю, грн	ВП/А	95	63

Таблиця 4.2 - Собівартість виробництва плющеного зерна ячменю

Показники	Базова лінія	Пропонована лінія
Вартість сировини , грн/т	7000	7000
Виробничі втрати та усушка (1,1%), грн	77,00	77,00
Витрати виробництва 1 т плющеного зерна, грн.	95	63
Собівартість 1 т плющеного зерна, грн	7172	7140

Економічний ефект:

$$E = [(7172 + 0,15 \cdot 180) - (7140 + 0,15 \cdot 66)] \cdot 16632 = 814968 \text{ грн.}$$

Термін окупності:

$$T = \frac{1055043}{814968} = 1,3 \text{ роки.}$$

Таким чином, при впровадженні запропонованої технологічної лінії плющення очікуваний економічний ефект 814968 грн. Термін окупності 1,3 роки.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В результаті досліджень виявлено основні кінетичні закономірності процесів зволоження, пропарювання та плющення зерна та встановлено характер впливу їх технологічних параметрів на клейстеризацію та перетравність крохмалю, на співвідношення білкових фракцій, на загальну бактеріальну обсімененість плющених пластівців.

Обґрунтовано такі раціональні параметри процесів зволоження, пропарювання та плющення зерна:

- зерно краще зволожувати водою температурою 40-60°C протягом 1-2 хвилин до вологості 15-19 % (ячмінь – 15-17%; горох – 17-19 %), рівномірний розподіл води в зернівці досягається при тривалості відволажування зерна ячменю – 2-4 години; гороху – 4-6 годин;

- пропарювання зволоженого зерна ячменю доцільно здійснювати протягом 10-20 хвилин до вологості 19-20 %; гороху – протягом 20-30 хвилин до вологості 20-21 % при температурі пропарювання 80-100 °C.

- плющення пропареного зерна доцільно вести при установці зазору між валками 0,5-0,6 мм для ячменю; 0,8-1,0 мм – для гороху.

3. Розроблені режими дозволили збільшити вміст розчинних вуглеводів у пластівцях на 25,7-43,5 %, підвищити доступність дії травних ферментів на плющені зерна та збільшити перетравність крохмалю, зокрема атакованість крохмалю глюкоамілазою зросла на 33,4-63,4 %, покращився санітарний стан: загальна бактеріальна обсімененість зерна після вологотеплової обробки знизилася на 94,2 - 98,0 %.

4. Розроблено математичну модель процесу плющення зерна у двовалковій плющилці, що дозволяє розрахувати швидкість руху зернівки у робочій зоні плющення зерна, за якої спостерігається найбільша пропускна здатність плющилки.

5. Запропонована технологічна лінія виробництва плющених пластівців із зерна зернових та бобових культур з удосконаленою конструкцією

рециркуляційної сушарки-охолоджувача, яка має більш високу теплову ефективність процесу сушіння за рахунок використання рециркуляції теплоносія і ступінчастого сушіння, а також внаслідок використання активних гідродинамічних режимів, можливість поліпшення якості продукту, що отримується за рахунок застосування більш м'яких режимів і рівномірної обробки; низькі енерговитрати за рахунок вибору раціональних режимів сушіння та охолодження з урахуванням зміни вмісту вологи продукту по довжині сит сушарки; розширення сфери застосування за рахунок секційного підведення теплоносія.

6. При впровадженні запропонованої технологічної лінії плющення зерна зернових та бобових культур очікуваний економічний ефект 814968 грн. Термін окупності 1,3 роки.