

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерії та енергетики
Кафедра процесів, машин і обладнання в агроінженерії

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

МАЦЮК СЕРГІЙ ЮРІЙОВИЧ

УДК 631.362.633

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Оптимізація технологічного процесу виробництва борошна
(тема роботи)

208 «Агроінженерія»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Сукманюк Олена Миколаївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.і.н., доцент

(науковий ступінь, вчене звання)

АНОТАЦІЯ

Мацюк С.Ю. Оптимізація технологічного процесу виробництва борошна. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2020.

Робота присвячена проблемі оптимізації технологічного процесу виробництва борошна шляхом зволоження зерна пшениці у зволожувальній установці. Процес зволоження зерна відбувається шляхом попереднього вакуумування його до зволоження і наступною дією повітрям надлишкового тиску, що прискорює проникнення вологи у зернівку через її пори і скорочує тривалість відволоження.

Ключові слова: гідротермічна обробка, кондиціонування зерна, технологічний процес, зволоження, вакуумування.

ABSTRACT

Matsyuk S.Yu. Optimization of the technological process of flour production. Qualifying work for a master's degree in specialty 208 - Agroengineering. - Polissia National University, Zhytomyr, 2020.

The work is devoted to the problem of optimization of the technological process of flour production by moistening wheat grain in a humidifier. The process of moistening the grain occurs by pre-vacuuming it before moistening and the subsequent action of excess air pressure, which accelerates the penetration of moisture into the grain through its pores and reduces the duration of dehumidification.

Key words: hydrothermal treatment, grain conditioning, technological process, humidification, vacuuming.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН МЕТОДІВ І ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ЗВОЛОЖЕННЯ ЗЕРНА	6
1.1. Огляд існуючих методів і технологій для зволоження зерна перед помелом	6
1.2. Аналіз існуючих конструкцій для гідротермічної обробки зерна	9
1.3 Класифікація машин для зволоження зернових матеріалів	14
Висновки по розділу 1	15
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗВОЛОЖЕННЯ ЗЕРНА ПЕРЕД ПОМЕЛОМ	16
2.1. Обґрунтування способу зволоження зерна	16
2.2. Витрата води на зволоження зерна	17
2.3. Аналіз руху вологи в матеріалі зернівки	19
2.4. Аналіз технологічних операцій процесу зволоження зерна	22
Висновки по розділу 2	26
РОЗДІЛ 3. УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЗВОЛОЖЕННЯ ЗЕРНА	27
3.1. Опис експериментальної установки для зволоження зерна	27
3.2. Методика визначення показників вологопровідності, термовологопровідності і баровологопровідності зерна	29
3.3.Інтенсифікація процесу зволоження зерна перед помелом	31
3.4. Визначення набору, послідовності і тривлості операцій процесу зволоження зерна пшениці перед помелом	35
Висновки по розділу 3	37
ВИСНОВКИ	38
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	39
ДОДАТКИ	41

ВСТУП

У даний час гостро стоїть проблема забезпечення населення якісними продуктами харчування, вирішення якої покладено на переробні підприємства країни.

Важливою задачею, яка ставиться до працівників борошномельної промисловості, є підвищення виходу і якості готової продукції. Вирішення її неможливе без застосування нових і удосконалення відомих способів зволоження зерна перед помелом. Значення нових способів зволоження зерна набуло нині особливе значення, так як завилася велика кількість невеликих підприємств з переробки зерна, яким промислові методи обробки зерна перед помелом не доступні за економічними показниками.

У зв'язку з цим розробка нових і подальше удосконалення існуючих способів зволоження зерна, як і машин є достатньо актуальним науковим питанням загальної проблеми первинної обробки і переробки зерна.

Гідротермічна обробка зерна – це сукупність заходів при підготовці зернової суміші до переробки, яка застосовується з метою покращення технологічних властивостей зерна, для отримання найбільшого виходу продукту з кращими показниками. Тому застосування способу гідротермічної обробки зерна підвищують вихід і якість готової продукції при одночасному зниженні питомої витрати енергії на помел. Тому застосування даного методу обробки в умовах великих борошномельних підприємств економічно доцільно. В даний час апаратами для «гарячого» і швидкісного кондиціонування зерна оснащена більшість борошномельних підприємств, але не дивлячись на це, наукові питання зволоження зерна при підготовці його до подальшої переробки залишаються актуальними, особливо в період економічної кризи і тененції переробки його безпосередньо у виробника.

Відповідно до викладеного, у кваліфікаційній роботі сформульовано **мету дослідження**: удосконалення технології підготовки зерна до подальшої переробки, зміни його вихідних технологічних властивостей в напрямку

стабілізації і підтриманні їх на оптимальному рівні для подальшого процесу зволоження перед помелом.

Об'єкт дослідження: технологія зволоження зерна і процес роботи зволожувальної машини.

Предмет дослідження: закономірності процесу зволоження зерна пшениці у зволожувальних машинах.

Методи дослідження: теоретичні обґрунтування параметрів і режимів роботи зволожувальної установки проводилось з використанням математичного моделювання, використання теорії масообміну, що проходить всередині зернівки, гідродинаміки, методів планування багатofакторного експерименту і математичного аналізу отриманих результатів.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано тези у Збірнику доповідей учасників II Міжнародної науково-практичної конференції «Біоенергетичні системи в агропромисловому виробництві» та збірнику матеріалів науково-практичної конференції факультету інженерії та енергетики «Студентські читання – 2020».

Обсяг та структура роботи. Робота складається із вступу, трьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Робота викладена на 43 сторінках машинописного тексту, містить 6 таблиць, 14 рисунків, списку використаних джерел з 26 найменувань.

РОЗДІЛ 1.

СУЧАСНИЙ СТАН МЕТОДІВ І ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ЗВОЛОЖЕННЯ ЗЕРНА

1.1. Огляд існуючих методів і технологій для зволоження зерна перед помелом

Зерно яке надходить на підприємство має невисоку вологість, відмінність у технологічних властивостей оболонки і ендосперму незначна, відповідно, розділити їх досить важко. При проведенні гідротермічної обробки намагаються збільшити вологість оболонки відповідно до вимог переробної промисловості. Наприклад, на борошномельних підприємствах намагаються знизити міцність ендосперму і підвищити оболонки, а на круп'яних навпаки, підвищити міцність ендосперму і відповідно знизити оболонки. Степінь відмінності технологічних властивостей визначається конкретним способом обробки і перш за все, особливостями взаємодії зерна з водою [1].

Відповідно до проведених досліджень Г.А. Єгорова, В.Я. Грішсона, Я.Н. Купніца та ін. зерно є складним по структурі і властивостям об'єктом природи і живим організмом. При цьому вода є невід'ємним компонентом зерна на всіх стадіях його існування [2, 3]. Така тісна взаємодія води із зерном обумовлена морфологічними особливостями останнього.

Не дивлячись на існуючі різноманітності зерна в процесі його переробки на млинах необхідно забезпечити високу якість отриманої продукції. Це частково вирішується створенням помольних партій, інший варіант – гідротермічна обробка.

У зв'язку з цим одним із напрямів дослідження процесу гідротермічної обробки є пошук способів інтенсивного зволоження зерна [4]. Для цього необхідно більш повно розкрити механізм взаємодії зерна з водою.

У борошномельній промисловості використовують два способи обробки зерна водою:

- зволоження, при якому прагнуть до того, щоб вода через пори проникла у визначеній кількості в оболонки для зміни структури зерна;
- миття для очищення оболонки зерна і особливо борідок від пилу і мікроорганізмів, а також для виділення із маси зерна легких і важких домішок.

Класифікація методів, які використовуються на переробних підприємствах гідротермічною обробкою в остаточному вигляді не розроблена. Найбільш повну схему класифікації обробки зерна запропонував Я. Н. Куприц, в ній присутні і методи гідротермічної обробки, що використовуються на переробних підприємствах [5].

Існуючі методи гідротермічної обробки поділяються на: «холодне», «гаряче», швидкісне і вакуумне кондиціонування.

«Холодне кондиціонування» зерна полягає в зволоженні до оптимальних (відповідно до кожного сорту зерна) вологості і відволоження, тобто з наступним перебуванням зерна в бункерах для відволожування з метою проникнення вологи. При даному методі зерно зволожують тільки водою кімнатної температури (18-20 °С) або з підігрівом (30-35°С), що викликає невелике підвищення температури зерна у зв'язку з поглинанням води біополімерами, а потім відволожують у бункерах. Зерно зволожують в процесі миття або з додаванням до зернової маси необхідної кількості води крапельним або розпиленням методом а допомогою зволожувальних машин (ЗЗМ-2, ЗУМ-2 та ін.).

«Гаряче кондиціонування» зерна – гідротермічна машинна обробка зерна в кондиціонері (ЗК-10, ЗКУ-6) при температурі 45-57°С. Вона включає, крім зволоження і відволожування, проміжну обробку зерна теплом. Режим кондиціонування зерна залежить від специфічних особливостей виду і орту зерна, його структури і якості клейковини. Пшеницю доводять при цьому до вологості 16-20% (нижня межа для м'яких сортів, верхня – для твердих). Температура нагріву зерна складає 41-60°С (нижня межа для твердих сортів пшениці, верхня – для м'яких), час температурної дії коливається від 1½ до ¾ год.

Тривалість відволожування при холодному кондиціюванні зерна складає 12-16 год (нижня межа відноситься до м'яких сортів пшениці, верхня – до твердих). Чим слабкіша клейковина, тим сильніше необхідно прогрівати зернову масу [6].

«Швидкісне кондиціювання». Це спосіб отримав назву через нетривалий процес зволоження. Пов'язано це з обробкою зерна насиченням водяною парою. Зерно пропарюють протягом 0,5 хв, витримують декілька хвилин в нагрітому стані (45-60°C), миють холодною водою і направляють на 3 год. на відволожування. Швидкісне кондиціювання найбільш ефективне для зерна м'яких сортів пшениці зі слабкою клейковиною, що має низьку скловидність, так як сприяє отриманню більшої якості крупок і більш повному вимолуванню оболонок [7]. Але при даному процесі великі затрати ідуть на отримання пари, тому даний спосіб використовується тільки на великих підприємствах.

«Вакуумне кондиціювання» відрізняється від «гарячого» тим, що зволене зерно підігрівають і підсушують в радіаторному теплообміннику в умовах зниженого тиску до 2,66...5,33 кПа. Зерно при даному способі можна звожити до 20...23%, в результаті чого збільшується і степінь його технологічних властивостей.

Таким чином, при гідротермічній обробці зерна – кондиціювання зерна водою і теплом перед розмелом відбувається з метою зміни його структурно-механічних і біохімічних властивостей. В результаті кондиціювання зерна покращуються його борошномельні властивості, тобто оболонки стають більш в'язкими і еластичним, ніж ендосперм, що сприяє їх більш легкому відокремленню та покращенню хлібопекарських властивостей борошна внаслідок дії зерна. Крім того клейковина стає більш пружною, підвищується активність ферментів, що є позитивним фактором при бродінні тіста. Піддане кондиціюванню зерно легше подрібнюється, мука ліпше просіюється, тобто підвищуються і умови експлуатації машин [8].

1.2. Аналіз існуючих конструкцій для гідротермічної обробки зерна

Гідротермічна обробка зерна – це дія води і тепла на зернову суміш для покращення комплексу технологічних властивостей зерна і енергетичних показників переробки його в борошно [9-11].

Для гідротермічної обробки зерна водою в борошномельній промисловості застосовуються мийні, зволожувальні машини і кондиціонери.

До мийних машин відноситься агрегат марки БМА (рис. 1.1), що забезпечує одночасно і зволоження зерна. Складається він з мийної ванни з камневідбійником і відстійником, сплавної камери і віджимної колонки.

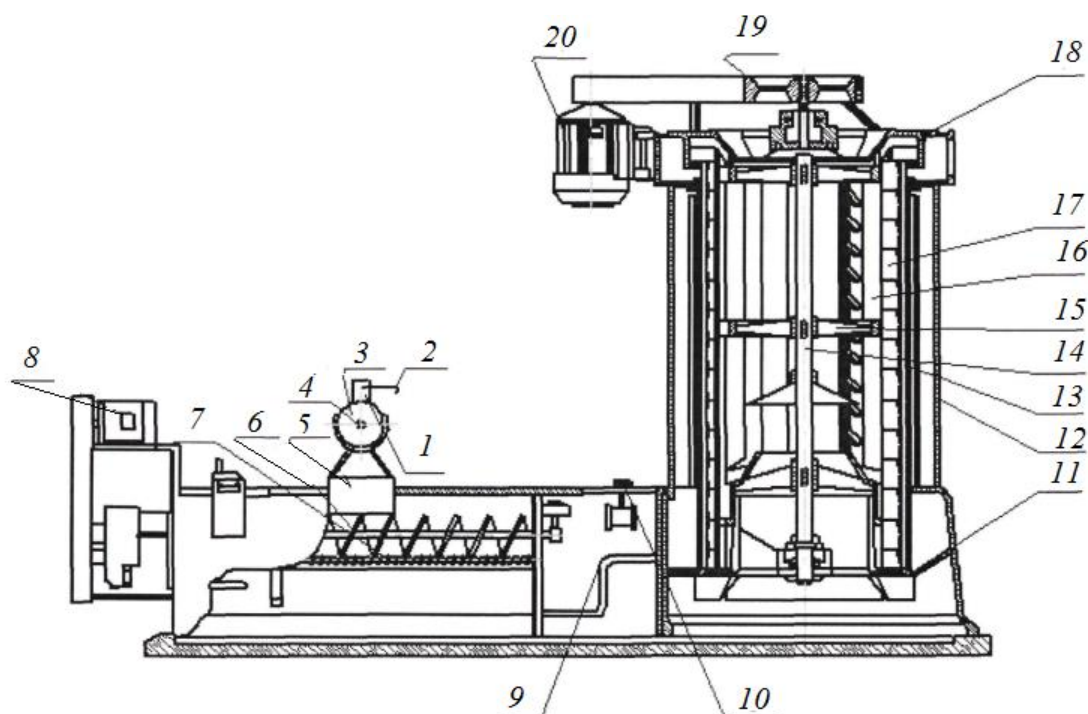


Рис. 1.1. Мийна машина БМА

Принцип дії даної машини полягає в наступному: зерно надходить в приймальний пристрій, що складається з воронки 1, яка регулюється засувкою 2 і шарової основи 3, що шарнірно закріплена на вісі. Шарнірна шарова основа дозволяє переміщувати приймальний ківш 5, вздовж вани, а розміщення ковша визначає термін перебування у ванні зерна. У мийній ванні розміщені чотири шнека. Два верхніх шнека 6 переміщують зерно важкі мінеральні і металічні домішки у протилежну сторону. Важкі домішки

надходять в гідрокамневідділювач, звідки періодично видоляються. Шнеки приводяться в рух електродвигуном 8 через редуктор.

Між мийною ванною і віджимною колонкою знаходиться камера, яка призначена для видалення із зерна легких домішок і подачі зерна у віджимну колонку.

У зв'язку зі зменшенням швидкості води зерно завантажується на дно камери, попадає в інжекторну трубу 9, що подає зерно в колонку.

Каркасом віджимної колонки служать: нижня фундаментальна чаша 11, чотири з'єднувальні вертикальні стійки, закриті зовнішнім металевим кожухом 12. Всередині по всій поверхні циліндричної частини віджимної колонки встановлена сітка 13 із шматків сит з продовгуватими отворами, краї яких зв'язані відігнутіредені сітки знаходиться барабан, що складається з вертикального валу 14 з трьома з'єднувачами 15, поєднанні між собою кутниками. До кутників прикріплені вертикальні бичі, до яких із зовнішньої сторони приварені гонки-лопатки 17. При обертанні барабану гонки переміщують зерно вгору. У верхній частині сітки встановлена кільцева труба з отворами(оприскувачами), через які надходить під тиском вода, що змиває частинки бруду. При обертанні барабану бичі з гонками-лопатками, що діють як крильчатки вентилятора, закривають повітря через отвори, в результаті відбувається очищення отворів сит і, таким чином, підсушується зерно перед виходом із віджимної колонки.

Основними недоліками мийних машин є недостатній розподіл вологи в зернівці і необхідність підсушування зерна перед його помелом.

Найбільше розповсюдження в технології переробки зерна знайшли зволожувальні машини НО.1035 (рис. 1.2), які використовуються в зерноочисних відділеннях млинів для інтенсивного зволоження поверхневих оболонок зерна перед його завантаженням у бункер відволоження або бункери до зволоження перед подачею зерна на помел.

Зволожувальна машина складається із корпусу з встановленим у ньому ротором з лопастями, електроприводу, індикатора наявності зерна і панелі дозування води. Машина оснащена шумопоглинальним кожухом. Зерно, яка

надходить у патрубок індикатора і повертає лопатку, що діє на мікроперемикач, який дає команду на вприскування води, дозування якої проходить за допомогою панелі дозування.

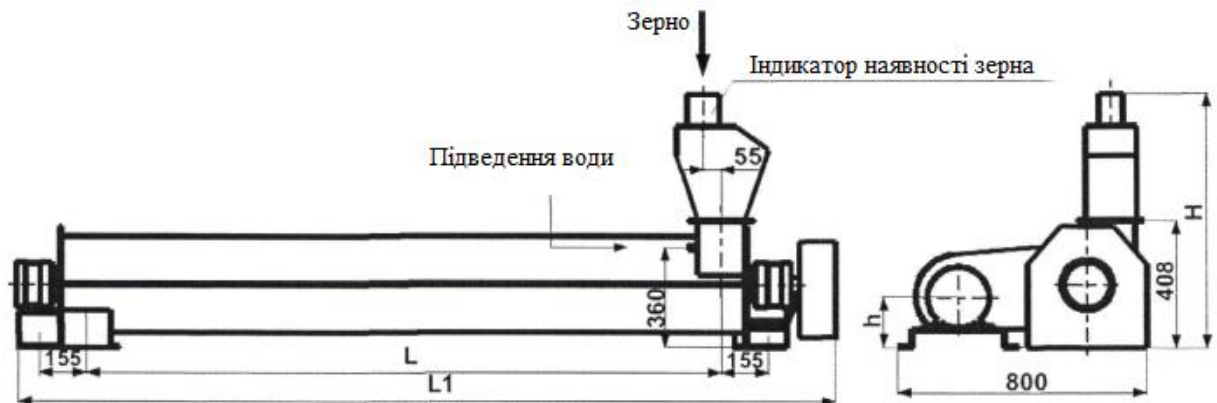


Рис. 1.2. Зволожувальна машина НО.1035

Машина забезпечує: простоту регулювання зволоження зерна і достатньо рівномірне зволоження оболонок зерна, що після відлежування сприяє підвищеному виходу якісного борошна.

Нові технологічні рішення зволоження зерна закладені в машину ЗУМ-2, яка використовується для зволоження зерна перед I драною системою і працює за принципом відцентрового рівномірного розпилення води [12].

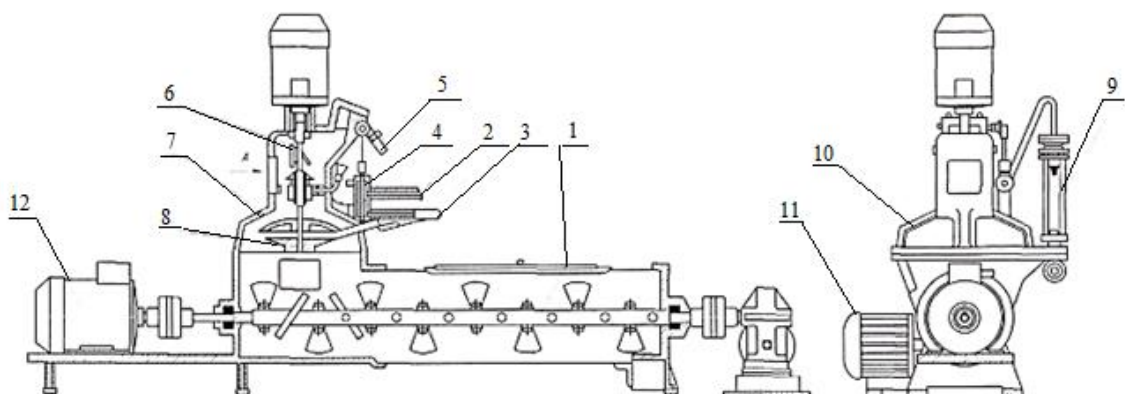


Рис. 1.3. Зволожувальна машина ЗУМ-2: 1 – шнек-змішувач; 2 – трубка; 3- пристрій для подачі води; 4 – механізм для регулювання подачі води; 5 – важіль з вантажем; 6 – клапан для регулювання подачі зерна; 7 – верхній диск; 8 – нижній диск; 9 – ротаметр; 10 – корпус; 11 і 12 – електричні двигуни

Зволоження зерна в даній машині відбувається наступним способом. На вході зерна в машину розміщений клапан 6, при неробочому стані заслінки

клапана за допомогою важеля 5 він в закритому стані. При надходженні зерна заслінка 6 разом із валиком повертається проти часової стрілки, зерно падає на обертаючий зі швидкістю 20 м/с верхній диск 7 і під дією відцентрової сили розбрискується по всій окружності зволожувальної частини машини. Вода, яка надходить по трубі 2, проходить через кільцевий зазор, що утворений голчастим клапаном і сідлом, позавдає на нижній обертаючий диск 8 і розпилюється. Зерно, попадає з верхнього диска, проходить через зону розпилення води, що забезпечує його зволоження. Витрату води регулюють механізмом 4.

В залежності від кількості зерна, що надходить в машину, заслінка клапана 6, відхиляючись на визначений кут, піднімає тягу, з'єднану з голчастим клапаном, збільшуючи подачу води. Регулювання подачі води в залежності від кількості надходженого зерна є перевагою даної машини перед іншими. Остаточо зерно перемішується з водою в шнеку 1, потім воно транспортується в бункер для відволоження. Не дивлячись на простоту конструкції дана машина має ряд недоліків. Швидко зношується шийка вертикального валу і валу змішувального шнека, пошкоджуються лопатки шнека, порушується форма розпилювальних дисків, зношується голчастий клапан, регулюючий подачу води. Процес розпилення води обертаючим диском не забезпечує рівномірного змочування зерна і потребує довшого перемішування у змішувальній машині.

Для зволоження зерна в підготовчому відділенні млина слугує машина для зволоження зерна Р1-БУС (рис. 1.4). Дана машина представляє собою розбірну металеву конструкцію і складається із наступних основних збірних одиниць: корпуса 1, ротора 2, опори 3, приводу 5, випусного патрубку 9, блока ротаметра 15 і датчика наявності зерна 16 і приймального патрубка 17.

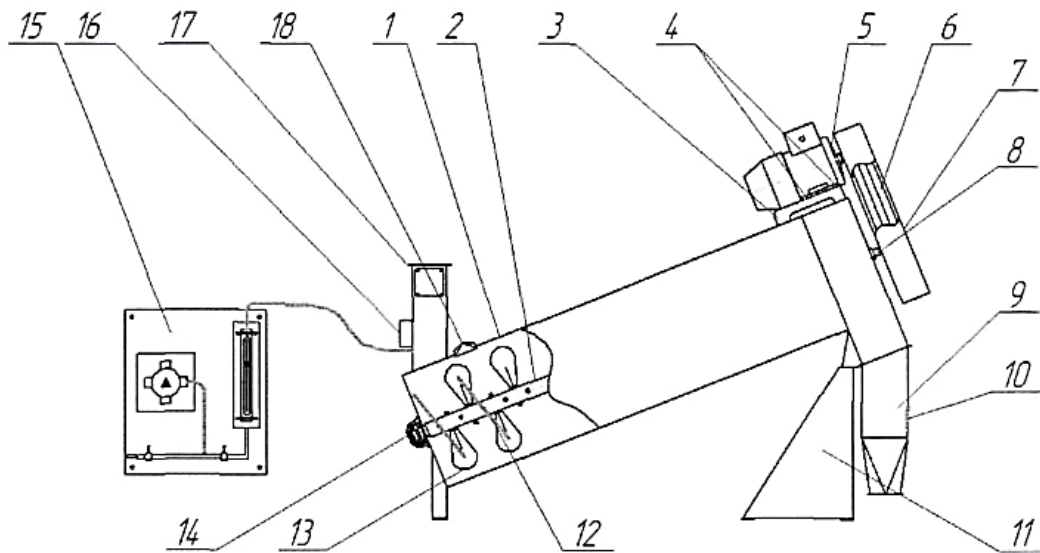


Рис. 1.4. Машина для зволоження зерна Р1-БУС

У корпус машини встановлений ротор 2, на якому зі сторони надходить змонтовані лопатки 13, що утворюють два витка шнека і бичі 12 для інтенсивного перемішування зерна і води. Ротор розміщений у двох підшипниках 8, 14 і приводиться в рух від електродвигуна 5 через пасову передачі 6, закриту кожухом 7. Електродвигун закріплений на плиті 3 за допомогою шпильок 4, з можливістю регулювання натягу ременів привода.

Випускний патрубок має оглядове вікно 10, що дозволяє дивитись за потоком зерна.

В робочому режимі вода подається через блок ротаметра 15. Наявність зерна контролюється датчиком 16. Зерно самопливом надходить в примальний патрубок 17, в якому встановлений датчик наявності зерна 16. Зерно, яке надходить в корпус машини розганяється за допомогою лопаток шнека і перемішується бичами з водою, що надходить із форсунки 18 машини. Вода очищається проходичи через фільтр, далі її витрата вимірюється ротаметром, датчик наявності зерна подає сигнал на електромагнітний клапан, що відкриває подачі води через ротаметр на форсунку. При відсутності зерна в приймальноу патрубці витрата води припиняється встановленням клапана у закрите положення. Зволожено зерно виводиться із машини через випускний патрубок [13].

Недолік даної машини полягає в тому, що зерно зволожується нерівномірно, внаслідок чого довжина шнека для перемішування зернової маси перевищує два метри.

Аналіз роботи зволожувальних і мийних машин показав, що вони не забезпечують достатнього зволоження зерна за один прохід і мають сутєві недоліки такі як, витрати часу і засобів на відволожування зерна перед помелом.

1.3.Класифікація машин для зволоження зернових матеріалів

Машини для зволожування зерна можна поділити на дві групи: машини для проведення гідротермічної обробки зернових матеріалів і машини для захисно-стимулюючої обробки насіння (рис. 1.5).

Найбільш група обладнання для зволоження представлена машинами для гідротермічної обробки зернових матеріалів, у даних машинах на продукт діють водою і теплом.

Ця група в свою чергу поділяється по областям перероблювальної промисловості: борошномельного, круп'яного і комбікормового виробництв. Одну із найбільших складають групи машин і апаратів гідротермічної обробки в борошномельному виробництві. Вони поділяються на машини і апарати з виконання операцій: зволожувальні машини, мийні машини, кондиціонери і гідротранспортні установки.

Особливий інтерес серед зволожувальних машин, що класифікуються по типу робочих органів, представляють машини шнекового, роторного і струйного типів. Із них найбільш широко використовуються машини з роторними і струйними робочими органами, що пояснюється їхніми деякими особливостями:

- термін надходження зерна в корпус цих машин знижено, відповідно, габаритні розміри цих машин невеликі;

- в цих машинах вода наноситься не тільки на поверхні, але і вбивається оболонку зерна [10, 14].

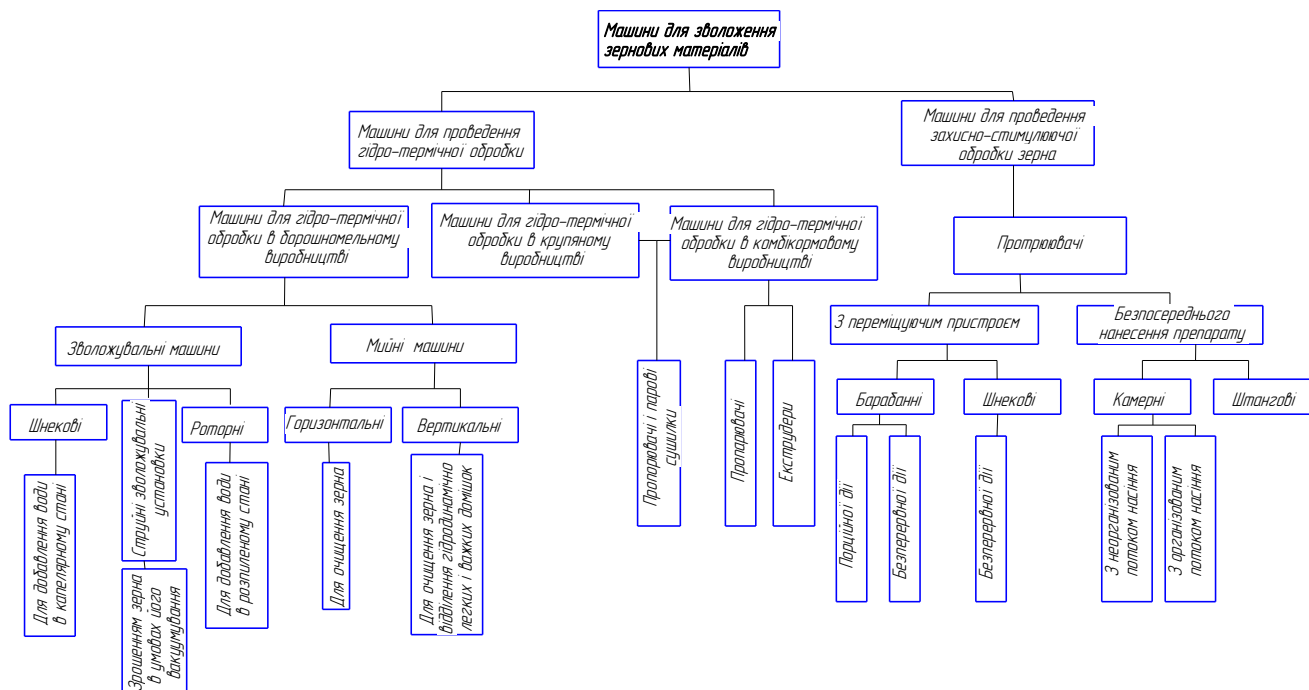


Рис. 1.5 Схема класифікації машин для зволоження зерна

Як шнекові, так і роторні зволожувальні машини можна додатково поділити по способу нанесення води на поверхні матеріалу: водострумні і водорозпилюючі.

Мийні машини поділені по розміщенню їх робочих органів на горизонтальні і вертикальні.

Існуючі протруювачі насіння класифікуються:

- за способом нанесення препаратів на насіння: з перемішуючим пристроєм і безпосереднім нанесенням рідини на насіння;
- за організацією процесу протравлювання: пропорційної дії і безперервної дії.

Перемішуючі протруювачі, в свою чергу, поділяються на шнекові і барабанні [15].

За даною класифікацією досліджувана зволожувальна машина відноситься до групи струйних зволожувачів із зрошенням зерна в умовах вакуумування.

Висновки по розділу 1

В даному розділі проведений огляд і аналіз існуючих методів і технологій, конструкцій і режимів роботи зволожувачів зерна. Представлена класифікація машин і апаратів для проведення гідро-термічної обробки зерна.

РОЗДІЛ 2.

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗВОЛОЖЕННЯ ЗЕРНА ПЕРЕД ПОМЕЛОМ

2.1. Обґрунтування способу зволоження зерна

Для вирішення задачі зволоження зерна, в роботі пропонуємо спосіб при якому дозволяють скоротити затрати часу на процес зволоження перед помелом. При запропонованому способі зволоження зерна водою перед помелом проводять попереднє вакуумування його до тиску 0,03...0,05 МПа протягом 30...90 с. Зволоження зерна здійснюється шляхом розбрискування води, потім після деякої витримки на змішування діють на зерно надлишковим тиском 0,03...0,05 МПа протягом такого ж часу і далі витримують його в бункерах для відволожування.

Витримка зерна при попередньому вакуумуванню до залишкового тиску 0,03...0,05 МПа протягом 30...90 с може сприяти вакуумуванню внутрішніх мікроплощин із-за пористості оболонки і ядра. Тривалість такої витримки залежить від оброблювального зерна і виду сільськогосподарської культури.

Зволоження зерна після вакуумної витримки розбрикуванням водою дозволить забезпечити покращення процесу змочування поверхні зерна і більш інтенсивно проникнути в середину зернівки. Наступні перемішування зволоженого зерна приведуть до рівномірного розподілу поверхні вологи на зернах, а витримування зерна протягом деякого часу в камері з надлишковим тиском порядку 0,03...0,05 МПа імовірно забезпечить примусове надходження вологи в мікротріщини зерна за рахунок перепаду тиску в середині (вакуум) і зовні його (надлишковий тиск).

Відповідно до запропонованого способу, тривалість процесу відволожування насиченою вологою зерна може скоротитися в 1,5...2,0рази, що приведе до його пластифікації, скороченню дроблення при наступному лущенні і підвищенні виходу і якості готової продукції із нього. Недостатне

витримування зерна при відволожуванні може не забезпечити рівномірного розподілу вологи по ядру, через що воно буде гірше подрібнюватись. При підвищенні затрат часу на відволожування пластичність ядра може забезпечити в потрібних межах, але даний процес буде нераціонально збільшуватись.

Запропонована технологічна схема обробки зерна з метою його зволоження перед помелом може суттєво скоротити затрати часу, зменшити площу цеху під обладнання лінії зволоження зерна і об'єми бункерів для його відволожування, але вона потребує досліджень з обґрунтування і оптимізації як всього процесу, так і окремих технологічних операцій.

2.2. Витрата води на зволоження зерна

Комплекс процесів зволоження зерна включає в себе дозоване його зволоження в різних машинах і апаратах, в яких, виходячи із конструкції і технологічних задач, проходить направлена зміна параметрів зерна в заданих межах [16].

При зволоженні поверхня зерна змочується водою і на його поверхні утворюється гідродинамічний шар, через який і проходить дифузія вологи від поверхні зерна до його серцевини.

В процесі зволоження з насупним відволожуванням вміст сухої речовини в зерні є постійним і рівним B_0 :

$$B_0 = \frac{B_1 \times \alpha_1}{100}, \quad (2.1)$$

де B_1 – маса зерна, що надходить на зволоження, кг; α_1 – частка сухої речовини в зерні, %.

$$W_1 = \frac{B_1 \times \omega_1}{100}, \quad (2.2)$$

де W_1 – вміст води в зерні до його зволоження, кг; ω_1 – вологість зерна до зволоження, %.

Після зволоження з наступним відволожуванням зернівка отримує вологу і набуває масу B_2 рівну:

$$B_2 = \frac{B_0 \times 100}{\alpha_2}, \quad (2.3)$$

де α_2 – частка сухої речовини в зерні після його зволоження, %.

Таким чином, можна визначити вміст вологи в зерні W_2 :

$$W_2 = \frac{B_2 \times \omega_2}{100}, \quad (2.4)$$

де ω_2 – вологість зерна після його зволоження і відволожування, %.

Беручи до уваги той факт, що в процесі зволоження і відволожування зерна вміст сухої речовини залишається постійним, то отримаємо залежність для визначення маси зерна після його зволоження з наступним відволожуванням:

$$B_2 = B_1 \times \frac{\alpha_1}{\alpha_2}, \quad (2.5)$$

Враховуючи попередній вираз для визначення маси зерна після його зволоження, кількість необхідної вологи W визначаємо за формулою:

$$W = W_1 - W_2 = B_2 - B_1 = B_1 \times \frac{\alpha_1}{\alpha_2} - B_1 = B_1 \times \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} - 1 \right), \text{ кг.} \quad (2.6)$$

Так як $\alpha_1 + \omega_1 = 100\%$, і $\alpha_2 + \omega_2 = 100\%$, тоді

$$W = B_1 \times \left(\frac{100 - \omega_1}{100 - \alpha_2} - 1 \right) = B_1 \times \left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{100 - \omega_2} \right). \quad (2.7)$$

Цей вираз дозволяє визначити один із основних параметрів зволожувальної машини – витрату води W , підлягаючу додатковому внесенню в зерно пшениці.

Але після зрошення зерна водою або зануренням його у воду і наступними операціями транспортування і відволожування в бункерах частина поверхневої води із зерен пшениці випаровується в атмосферу і фактично її витрата на зволоження декілька вища.

У зв'язку з цим фактична кількість води $W_{\text{фак}}$ на зволоження буде визначатись за наступною формулою

$$W_{\text{фак}} = k \times B_1 \times \left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{100 - \omega_2} \right), \text{ кг} \quad (2.8)$$

де k – коефіцієнт, що враховує втрати рідини зволожувальним зерном в атмосферу і на змочування деталей транспортувальних та бункерів.

Для зволоження на виробництві може бути використана вода, температура якої знаходиться в межах 10...19°C, або підігріта для інтенсифікації процесу зволоження [1].

2.3. Аналіз руху вологи в матеріалі зернівки

Після зволоження зерна розпиленням рідини або зануренням в неї на деякий час частина вільної вологи вбирається зерною оболонкою. Частина заповнює мікротріщини, пори і капіляри, і значна частина води утримується поверхнею зерна в результаті його смочування.

Тому зовнішні шари насичені вологою в більшій мірі, ніж віддалені від поверхні. Рідина рухається від більш насичених шарів до менш насичених – в ендоспермі. Таким чином, одним із факторів руху рідини при насиченні зерна вологою є неоднакова вологість її зовнішніх шарів.

Швидкість руху зерна визначається процесами переміщення вологи в середині матеріалу та випаровуванням її з поверхні. Переміщення вологи всередині матеріалу – дифузійний процес. Рухомою силою в ній є різниця концентрацій вологи в зовнішній і внутрішній шарах, що утворюють різницю парціальних тисків в цих шарах.

Кількість вологи W_g , що пройшла через площу F (m^2), визначається рівнянням [17]:

$$W_g = \frac{\mu \times F \times \Delta u \times \tau}{r}, \quad (2.9)$$

де $\Delta u = \frac{du}{dn}$ – графієнт вологості, тобто зміна вологості через одиницю об'єма зерна, kg/m^3 ; τ – тривалість відволожування, с; μ – коефіцієнт дифузії, m^2/s ; r – умовний радіус зерна, м.

Діаметр умовної частинки зерна [18]:

$$d_{\text{ч}} = k_{\phi} \times \alpha \times \sqrt[3]{\frac{l}{a}} \approx 3 * a, \quad (2.10)$$

де l – довжина зерна, м; d – масимальний діаметр переречного перетину зерна, м; $\sqrt[3]{\frac{l}{d}}$ – коефіцієнт перекручування форми зерна, $\sqrt[3]{\frac{l}{d}} \approx 1,461$ [19], k_ϕ – коефіцієнт форми, $k_\phi = 2$.

Припустимо, що умовна форма зерна є шаром, тоді його площа зовнішньої поверхні:

$$F = 4 \times \pi \times r^2 = \pi \times d_q = \pi \times k_\phi \times \alpha^2 \times \sqrt[3]{\frac{l^2}{d^2}} \approx 2^2 \times 1.46^2 \times \pi \times \alpha^2 \approx 9 \times \pi \times d_q^2, \quad (2.11)$$

$$\text{Відповідно} \quad W_g = 9 \times \pi \times \mu \times d_q^2 \times \frac{\Delta u}{r} \times \tau, \quad (2.12)$$

або

$$W_g = \mu \times f_3 \times \nabla W \times t, \quad (2.13)$$

Звідси тривалість поглинання води за рахунок дифузії складає:

$$\tau_1 = \frac{W_g \times r}{9 \times \pi \times \mu \times d_q^2 \times \Delta u}. \quad (2.14)$$

Другий фактор, що впливає на інтенсивність протікання процесу зволоження – температурний градієнт Δt . Для інтенсифікації зволоження зерна повинно мати температуру менше температури навколишнього середовища і води на зволоження.

Кількість переміщуючої води в зерно за рахунок температурного градієнта W_t визначається за формулою [17]:

$$W_t = \frac{k_t \times F \times \Delta t \times \tau}{r}, \quad (2.15)$$

де k_t – коефіцієнт теплової дифузії (теплопровідність), $k_t = \mu \times \delta$, м²/(с*град); Δt – температурний градієнт, що показує різницю температур води і ендосперма зерна, (кг*град)/м³.

З врахуванням дифузії і різниці температур сумарна кількість переміщуємої в зерно вологи буде:

$$W = W_g + W_t, \quad (2.16)$$

Одночасно, з поверхні зерна пара дифузує в навколишнє середовище, кількість її складає:

$$W_n = b \times (P_n - P_b) \times F \times \tau, \quad (2.17)$$

де b – коефіцієнт дифузії;

P_n, P_b – парціальний тиск пари в плівці і в навколишньому середовищі, Па.

З врахуванням цього в зерно надходить $W = W_g + W_t - W_p$, кг вологи.

$$W = 112 \times r \times \tau [\mu \times \Delta u \times k_t \times B \times r \times (P_n - P_b)]. \quad (2.18)$$

Тоді тривалість поглинання води зерном при дії розгляне них двох факторів буде:

$$\tau_2 = \left| -\frac{11200 \times r \times B_2 \times (100 - \omega_2) \times (W_g + \delta \times k \times W_t)}{q} \right|, \quad (2.19)$$

де q – кількість рідини, перемішуючої в одиницю часу через одиницю площини поперечного перерізу зерна, кг/(с*м²); δ – коефіцієнт термовологопровідності, град⁻¹.

Для інтенсифікації процесу зволоження зерна в досліджуваній установці використовується його попереднє вакуумування, що забезпечує появу нового фактора руху вологи в зерно – перепаду тиску або градієнта тиску ΔP .

Даний фактор обумовлений різницею тиску в зерні і навколишньому середовищі, яке може бути і вище атмосферного.

Кількість надходженої вологи в зерно за рахунок градієнта тиску може бути визначено за формулою:

$$W_p = \frac{F \times \tau \times k_p \times \Delta P}{r}, \quad (2.20)$$

де k_p – коефіцієнт баропровідності (дифузії внаслідок різниці тиску); ΔP – градієнт тиску, (кг*Па/м³).

Після перетворення даного виразу набуває вигляду:

$$W_p = F \times \tau \times k_p \times \Delta P, \quad (2.21)$$

У зв'язку з цим процес зволоження зерна за дослідженим способом і може бути представлений наступною формулою:

$$q = -k \times B_0 \times (\Delta u + \delta \times \Delta t + k_p \times \Delta P). \quad (2.22)$$

Звідси тривалість поглинання води зерном при дії трьох факторів буде:

$$\tau_3 = \frac{B_1 \times (\omega_2 - \omega_1) \times r}{\mu \times F \times (100 - \omega_2) \times (\Delta u - \Delta t \times \delta + \Delta P \times k)}. \quad (2.23)$$

2.4. Аналіз технологічних операцій процесу зволоження зерна

Технологічний процес обробки зерна пшениці у зволожувальній установці включає наступні операції: завантаження зерна, вакуумування, зрошення водою, перемішування, дія повітрям надлишкового тиску, зовнішнє підсушування і вивантаження (рис. 2.1).

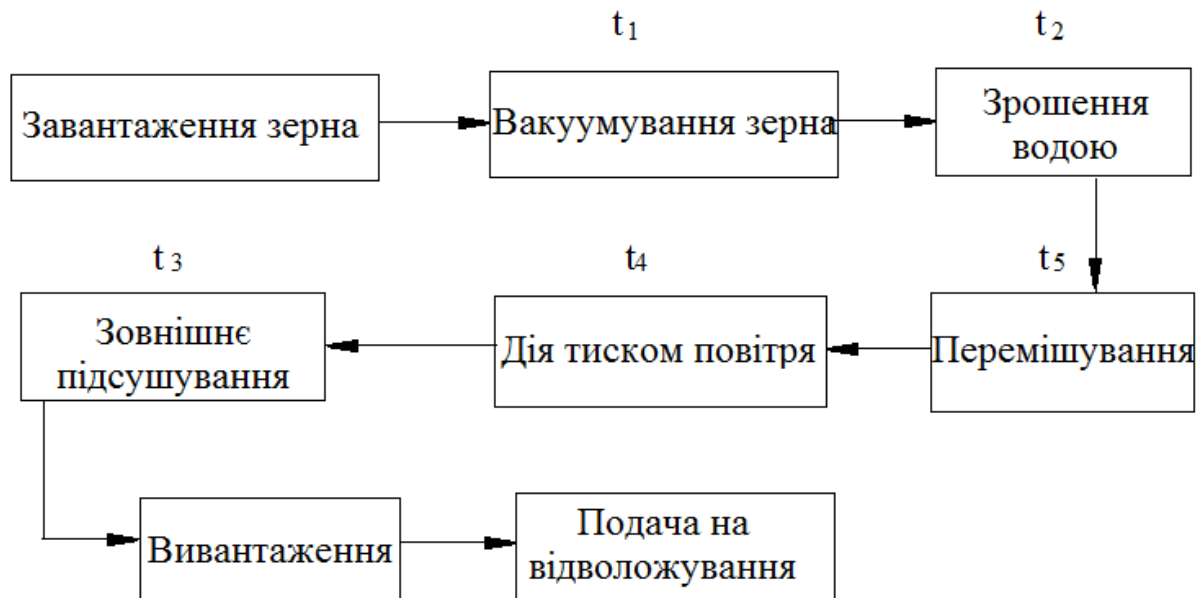


Рис. 2.1. Послідовність технологічних операцій зволоження зерна пшениці перед помелом

Завантаження зерна у зволожувальну установку відбувається із завантажувального бункера за допомогою шлюзового затвору і рагулюється заслінкою, яка розрахована на проектну продуктивність зволожувальної установки і забезпечує безперервну подачу зерна.

Вакумування зерна є наступною технологічною операцією, що призначена для зволоження частини повітря із внутрішніх пор зернівки, що може сприяти прискореному проникненню вологи в зерно. Тривалість даної операції залежить від глибини вакуума, вмістимости пор зерна і пропускну здатності мікроканалів його оболонки (рис. 2.2).

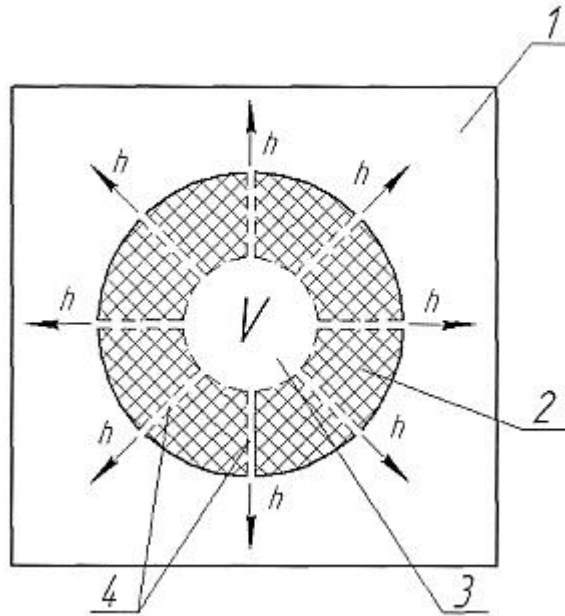


Рис. 2.2. Схема відкачування повітря із зернівки: 1 – вакууму вальна ємність; 2 – зернівка; 3 – умовна ємність пор зернівки; 4 -мікрокапіляри

Представляючи умовно місткість пор зерна у вигляді жмності 3 обємом V , а «живий» перетин мікроканалів 4, через які відбувається відтік повітря із пор зерна сумарною площею їх поперечного перетину f на коефіцієнт протікання μ , для відкачування повітря отримаємо наступне рівняння [20]:

$$V \cdot d\left(\frac{P_1}{P}\right) = -\frac{P_1}{P_{\text{опт}}} \cdot \mu \cdot \psi \cdot f \cdot \sqrt{P_{\text{опт}} \cdot V_{\text{опт}}} \cdot dt, \quad (2.24)$$

де P_1 – поточний тиск в порах зерна по мірі відкачування із них, Па;
 $P_{\text{опт}}$ і $V_{\text{опт}}$ – атмосферний тиск і питомий об'єм повітря в ньому, Па і $\text{м}^3/\text{кг}$; t – тривалість відкачування повітря, с;

ψ – функція витрати повітря:

$$\psi = \sqrt{2g\left[\left(\frac{P}{P_1}\right)^{\frac{2}{k}} + \left(\frac{P}{P_1}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]}; \quad (2.25)$$

де k – показник адіабати, $k = 1,41$;

$$P = P_{\text{атм}} - h; \quad (2.26)$$

де h - глибина вакуума в камері вакуумування зерна, Па.

Витікання повітря із зернівки проходить із камери постійного об'єму в камеру з великим об'ємом при постійній температурі, що відповідає ізотермічному процесу протікання газу [21].

Якщо перепад тиску в камері 1 вакуумування і в зернівці $\frac{P}{P_{\text{атм}}} < 0,526$, то витікання із зерна починається в надкритичній області ($\psi_{\text{max}} = 0.68$), а термін витікання визначається інтегруванням і складає:

$$t = \frac{V \cdot \ln \frac{P_{\text{атм}}}{\beta \cdot P}}{\mu \cdot \psi_{\text{max}} \cdot f \cdot \sqrt{P_{\text{опт}} \cdot V_{\text{опт}}}} + \frac{V \cdot z_{\text{max}}}{\mu \cdot \psi_{\text{max}} \cdot f \cdot \sqrt{P_{\text{опт}} \cdot V_{\text{опт}}}}, \quad (2.27)$$

де $\beta = \frac{P_{\text{кр}}}{P}$ – критичне відношення тиску (для повітря $\beta = 1,89$); $P_{\text{кр}}$ – тиск в зернівці, відповідає $\frac{P}{P_{\text{атм}}} = 0,526$; z_{max} – максимальне значення інтеграла виду $z = \sum_{P/P_1}^1 \frac{d(\frac{P}{P_1})}{\psi \cdot \frac{P}{P_1}}$, по [21], $z_{\text{max}} = 1.35$.

При вакуумі в камері 1, при $\frac{P}{P_{\text{атм}}} = 0,526$ тривалість вакуумування зернівки буде:

$$t_{\text{в}} = \frac{V \cdot (z_{\text{max}} - z)}{\mu \cdot \psi_{\text{max}} \cdot f \cdot \sqrt{P_{\text{опт}} \cdot V_{\text{опт}}}}, \text{ с} \quad (2.28)$$

де z – значення інтеграла z_1 при відповідному початковому відношенні тиску $\frac{P}{P_{\text{атм}}}$, приймається за табличними даними [21].

Відповідно до цих даних тривалість вакуумування зерна визначається насиченістю його повітрям, величиною вакууму і площею «живого» перетину» капілярів оболонки, яка може бути визначена в процесі експериментальних досліджень.

Цим часом обмежується мінімальний термін знаходження зерна в камері 1 (рис. 2.1) до початку його зрошення водою і визначається тривалість його польоту від завантаження до розпилення водою:

$$t_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot h_1}{g}} \geq t_{\text{в}}, \quad (2.29)$$

звідси висота камери вакуумування зерна:

$$h_1 \geq \frac{g \cdot t_{\text{в}}^2}{2}, \text{ м} \quad (2.30)$$

В першому приближенні можна знехтувати впливом розбризкуючих капель води на політ зерна, тоді тривалість t_2 знаходження його в зоні зрошення h_2 складає:

$$t_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot (h_1 + h_2)}{g}} - \sqrt{\frac{2 \cdot h_1}{g}}, \quad (2.31)$$

Процес перемішування зерна після зрошення повинен здійснюватись протягом часу не менше тривалості руху вологи в матеріалі зернівки за рахунок дифузії із-за градієнтів вологості і температури в умовах вакуумування зерна, визначає мого раніше наведеними рівняннями і забезпечує отримання рівномірної плівки води на його поверхні.

Після цього зерно шлюзовим затвором виводиться із зони вакуумної обробки в шнек волого знімача, тобто в зону надлишкового тиску нагрітого повітря. Тут у вакуумовану зернівку «вдавлюється» поверхнева волога та інтенсивно заповнює пори зерна. Тривалість цієї технологічної операції t_n дії різниці тиску повітря і у вакуумованому зерні визначається часом руху вологи в зернівці за рахунок градієнта тиску.

Загальна тривалість переування зерна в цьому шнеку залежить додатково від інтенсивності видалення залишкової вологи з поверхні кожної зернівки і може бути визначена виходячи з відомої залежності [22]:

$$t_5 = \frac{W}{F \cdot k \cdot \sqrt{\omega \cdot \gamma} \cdot (t_n - t_p)}, \quad (2.32)$$

де W – кількість води, яка залишилася на поверхні зерна, кг; F – площа поверхні зерна, m^2 ; k – коефіцієнт, характеризуючий структуру поверхні, $k = 25 \dots 30$; ω – швидкість повітря над зерном, м/с; γ – питома вага повітря, kg/m^3 ; t_n і t_p – температура повітря і води на поверхні зерна, $^{\circ}C$.

Таким чином, загальна тривалість обробки зерна в досліджуваній установці складає:

$$T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_{з.в.}, \text{ год} \quad (2.33)$$

де $t_{з.в.}$ – затрати часу на вивантаження і відвантаження зерна із установки.

Висновок по розділу 2

Процес зволоження зерна пшениці дифузійний і може бути інтенсифікований вакуумуванням його перед зрошенням водою і наступним впливом на нього повітрям надлишкового тиску, для чого і запропонована установка для зволоження.

Витрата води на зволоження в процесі підготовки його до помолу визначається виразом (2.8) і залежить не тільки від різниці відносної вологи зволоженого та вихідного зерна, але і від втрат рідини випаровуванням і на мочування робочих поверхонь установки.

Вакуумування зерна пшениці перед зрошенням його водою підвищує вміст пор і мікрокапілярів зернівки для вільної вологи і збільшує поглинальну властивість зерна в процесі його зволоження, яка залежить не тільки від градієнта вологості зерна, але і від температурного градієнта і градієнта тиску. Тривалість вакуумування зернівки описується виразом (2.27) і визначається площиною «живого» перетину її мікропор $\mu \cdot f$, її об'ємів і величиною розрідження.

РОЗДІЛ 3.

УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЗВОЛОЖЕННЯ ЗЕРНА

У процесі досліджень необхідно було провести достовірність прийнятих теоретичних залежностей, визначити погрішність в розрахунку параметрів зволожувальної установки відповідно до запропонованими нами виразами, обґрунтувати основні параметри і режими роботи установки.

В програму експериментальних досліджень ввійшли наступні питання:

- перевірка отриманих аналітичних залежностей процесу зволоження зерна на експериментальній установці;
- уточнення процесу руху вологи в зернівці при зволоженні;
- обґрунтування основних параметрів і режимів зволожувальної установки.

3.1. Опис експериментальної установки для зволоження зерна

При проведенні аналізу існуючих зволожувальних машин різних типів, були зроблені висновки про значні недоліки їх при застосуванні у технологічному процесі і наявності додаткової площі та матеріальних витат для будівництва і обслуговування ємностей для до зволоження. Як правило для цієї операції застосовується значна кількість відволожувальних і комплекс транспортуючих машин.

Нами була запропонована гіпотеза про те, що процес зволоження може бути інтенсифікований шляхом вакуумування в процесі зволоження з наступним проникненням вологи в зернівку через тріщини і пори в її оболонці.

Дана установка складається з вертикального шнекового змішувача 1, розділений вздовж вісі на дві секції зварною конструкцією перегородки 7 з розміщеним в ній шнеком 6, на шнековому змішувачі змонтований завантажувальний пристрій (бункер 5 і шлюзовий затвор 4), розпилювач 2,

вентиль 3, шиберна заслінка 17, вивантажувальний патрубок 18, вакуумна система, яка складається із вентиля 8, вакуум-балона 9, вакуумрегулятора 10, вакуумного насоса 11, глушника 12 і нагнітальної системи, в склад якої входить фільтр 13, компресор 14, манометр 15 і вентиль 16.

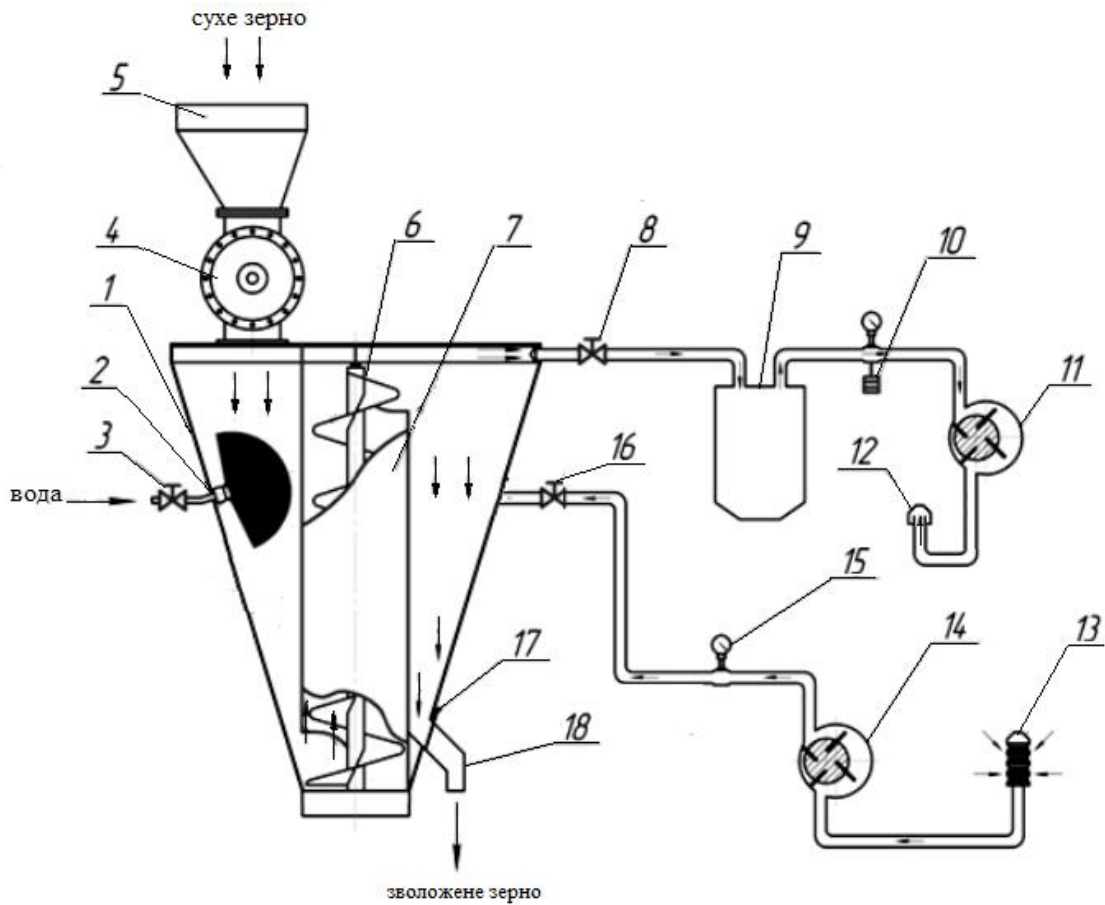


Рис. 3.1. Експериментальна установка для зволоження зерна

Технологічний процес зволоження зерна здійснювався наступним чином: вмикаючи вакуумний насос і вертикальний шнековий змішувач вакуумувався до визначеної глибини вакуума. Далі в нього подавали зерно і одночасно відкривали вентиль 3 в системі подачі води. Через розпилювач 2 вода розпилювалась на потік зерна і зволожено зерно накопичувалось у нижній частині бункера. Потім шнеком 6 транспортувалось зерно в наступну секцію, де здійснювалось його змішування. Після обробки зерна вмикали компресор 14, створюючи надлишковий тиск в змішувачі, в результаті чого волога, нанесена на поверхню зерна потрапляла в зернівку через вакуумовані тріщини і пори. Потім зерно вивантажувалось із змішувача 1 через шиберну заслінку 17 у вивантажувальний патрубок і досліджувалось на вміст вологи.

Положення форсунки 2 по відношенню до шлюзового затвора 4 регулювалось в межах від 20 до 120 см з шагом 20 см. Глибина вакууму змінювалась в межах від 0 до 70 кПа через кожні 10кПа, а тиск – від 0 до 50 кПа також через кожні 10 кПа.

Тривалість знаходження зерна у вакуумному бункер змішувача встановлювалась в межах від 30 с до 5 хв, а витримка його в середовищі вз надлишковим тиском – від 30 с до 3 хв.

3.2. Методика визначення показників вологопровідності, термовологопровідності і баровологопровідності зерна

З методів визначення показників переносу речовин у вологому тілі найбільше розповсюдження отримали методи нестационарного масообміну [23], які характерні також для несталих режимів масообміних процесів при зволоженні зерна водою.

Для визначення термоградієнтного коефіцієнта δ використали метою А.В. Ликова [24], так як він дозволяє визначити коефіцієнт переносу речовини у вологому тілі. Даний метод заснований на закономірностях температурного поля в метастабільному стані.

$$t = t_c + A \cdot \frac{\vartheta^2}{R^2}, \quad (3.1)$$

$$U = U_c - B \frac{\vartheta^2}{R^2}, \quad (3.2)$$

де t_c – температура центра тіла, °С; ϑ – координата тіла, що вибирається у відповідності до її форми; U_c – вологість в центрі тіла, %; А – постійна, рівня різниці температур між поверхнею і центром тіла; В – постійна, рівна різниці в центрі і на поверхні тіла; R – характерний розмір тіла (умовний радіус зернівки), м.

Дослід проводився наступним чином: в металеву колбу (рис. 3.2.) розміщали зволене зерно. Потім колбу 1 закривали резиноюю пробкою 2 з термопарами 3 і 4, які регулювали температуру зернівки, і нагрівали за допомогою нагрівальних елементів 5.

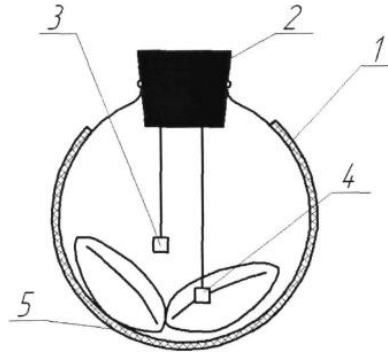


Рис. 3.2. Установка для визначення термоградієнтного коефіцієнта: 1 – металева колба; 2 – резинова термостійка пробка; 3, 4 термопари; 5 – нагрівальний елемент

Далі застосовуючи метод найменших квадратів, знаходили постійні А і В, а потім термоградієнтний коефіцієнт:

$$\delta = -\frac{\frac{du}{d\vartheta}}{\frac{dt}{d\vartheta}} = \frac{B}{A}. \quad (3.3)$$

Відомо, що коефіцієнт потенціалопровідності k_t можна визначити аналітичним методом по кривим розподілу вологи всередині зернівки двома можливими варіантами метода нестационарного масообміну: диференціальним і інтегральним [23, 25].

При визначенні інтенсивності випаровування або конденсації вологи використовуємо диференціальний спосіб:

$$i = -k_t \cdot \gamma_0 \cdot [(\nabla u)_n + \delta \cdot (\Delta t)_n]. \quad (3.4)$$

де γ_0 – густина абсолютного сухого матеріалу; δ – термоградієнтний коефіцієнт питомого вмісту речовини, град⁻¹; $(\nabla u)_n$ – градієнт вологості на поверхні зернівки; $(\Delta t)_n$ – градієнт температури на поверхні зернівки.

Досліди зі зволоження зерна проходили при постійній температурі, тому можна вважати, що градієнт температури рівень нулю. Тоді весь масообмін проходив в досліді виключно за рахунок градієнта вологості, який визначається графічним методом – за кутом дотичної, проведеної до кривої розподілу вологості і постійної за даними експеримента в зернівці (рис. 1 додаток 1., крива 1):

$$(\nabla u)_n = tg\varphi. \quad (3.5)$$

Для визначення коефіцієнта потенціалопровідності k формула (3.4) представлена у вигляді:

$$k_t = -\frac{i}{\gamma_0 \cdot tg\varphi}. \quad (3.6)$$

Для пошуків методів визначення показників баропровідності залежність (3.4) доповнюється складовою дії градієнта тиску:

$$i = -k_t \cdot \gamma_0 \cdot [(\nabla u)_n + \delta \cdot (\nabla t)_n + \varepsilon_0 (\nabla p)_n]. \quad (3.7)$$

де ε_0 – коефіцієнт баровологопровідності; $(\nabla p)_n$ – градієнт тиску на поверхні тіла, Па/м.

Коефіцієнт баровологопровідності визначався експериментальним методом. Зволоження зерна проводилось у вакуумній установці водою, що пофарбована метиленовим синім 2,5%-им розчином або розчином йоду. Після створення вакууму в робочій камері до зерна подавали воду. Після 30 с в цю камеру подавали повітря надлишкового тиску з витримкою протягом 30 с. Далі зерно виймали із установки і видаляли залишки вологи з поверхні зернівок за допомогою фільтрованої бумаги [26]. Зерно розколювали і діставали лезом зразки матеріалу для визначення вологи в різних шарах зерна по його товщині.

Аналіз отриманих даних визначали за допомогою графічних залежностей (рис. 1 додаток 1) за кутом дотичної проведеної до кривої розподілу вологості в зернівці (крива 2):

$$(\nabla p)_n = tg\varphi_0, \quad (3.8)$$

За рис. 3.3. отримуємо:

$$\varphi_0 = \varphi + \alpha, \quad (3.9)$$

тоді

$$tg\varphi_0 = tg\varphi + tg\alpha. \quad (3.10)$$

Підставивши значення в формулу 3.7, для коефіцієнта баровологопровідності отримаємо:

$$\varepsilon_0 = -\frac{i \cdot [2 \cdot tg\varphi + tg\alpha]}{\gamma_0 \cdot k}. \quad (3.11)$$

3.3.Інтенсифікація процесу зволоження зерна перед помелом

Відомо, що на характер взаємодіє зерна пшениці з водою при зволоженні виявляють вплив сорбційні властивості зерна, параметри волоносія (вода) і навколишнього середовища (повітря) [24].

Основним параметром волоносія є температура води, збільшення її температури і температури зерна на 10°C (від 20°C до 30°C) скорочує

тривалість сорбації однієї і тієї ж кількості вологи (на 1% підвищення відносної вологості зерна) в 1,5...1,7 рази. Це пояснюється зростанням кінематичної енергії молекул в теплій воді та інтенсивності вологопереносу в зерні [15].

Але, в роботі використання теплої води пов'язане з необхідністю суттєвих витрат додаткової енергії на їх отримання. У зв'язку з цим при холодному кондиціонуванні зерна процеси зволоження здійснюються при кімнатній температурі 20°C, а в холодний період доводять температуру води до 30°C, а зерна до 15°C [26].

Однією із основних причин повільного поглинання вологи зерном при холодному кондиціонуванні є тривалість заповнення пор, мікрокапілярів водою після зволоження.

Тривалість процесу відкачування повітря із зерна залежить від об'єму пор і капілярів в ній, глибини розрідження h і партерів пор оболонки: площі їх попереднього перетину f їх і коефіцієнта витікання повітря μ із них.

Результати дослідів по відношенню витрати повітря через половину зрнівки і її оболонки преставлені в додатку 2 табл. 1.

За даними табл. 1(додаток 2) пропускна здотність зерна з відкачування повітря із нього в основному обмежується значеннями $\mu \cdot f$ мікрокапілярами оболонки і в середньому для зерна з умовним діаметром у межах 3,5...4 мм складає $0,02 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$, що в тисячу разів перевищує площу перетину молекул води (їх діаметр $\approx 10^{-7} \text{ см}$).

Знаючи добуток $\mu \cdot f$ еквівалентного трубопроводу для пневмоканалів зернівки пшениці, можна визначити тривалість її вакуумування, запропонувавши на основі даних рис. 2.2 об'єм пор в ній порядку 3% від об'єму зерна. Для зернівки збільшивши з $d_y = 4 \text{ мм}$ об'ємом $16,65 \text{ мм}^3$ він складає приблизно $0,5 \text{ мм}^3$. Збільшивши його у два рази отримаємо $V_{\text{пор}} \approx 1 \text{ мм}^3$. Для вакуума $h=55 \text{ кПа}$ при температурі навколишнього мсередовища 20°C тривалість відкачування повітря із зернівки відповідно до (2.27) складає:

$$t = \frac{V \cdot \ln \frac{P_{\text{атм}}}{\beta \cdot P}}{\mu \cdot \psi_{\text{max}} \cdot f \cdot \sqrt{P_{\text{опт}} \cdot V_{\text{опт}}}} + \frac{V \cdot z_{\text{max}}}{\mu \cdot \psi_{\text{max}} \cdot f \cdot \sqrt{P_{\text{опт}} \cdot V_{\text{опт}}}} = \frac{1 \cdot 10^{-9} \cdot \ln \frac{101000}{1,89 \cdot 46000}}{0,02 \cdot 10^{-9} \cdot 0,68 \cdot \sqrt{101000 \cdot 0,077}} + \frac{1 \cdot 10^{-9} \cdot 1,35}{0,02 \cdot 10^{-9} \cdot \sqrt{101000 \cdot 0,077}} = 0,25 \text{ с.}$$

Відповідно, зерно встигає вакуумуватися за проміжок часу менше половини секунди. За цей час воно в бункері вакуумування установки для зволоження зерна встигає пролетіти, падаючи від шлюзового затвора подачі зерна в установку (2.30):

$$h_1 = \frac{g \cdot t^2}{2} = \frac{9,81 \cdot 0,25^2}{2} = 0,30 \text{ м.}$$

Таким, чином, зрошення зерна водою із розпилувача при вакуумній обробці потрібно здійснювати в зоні нижче 0,30 м від шлюзового затвора в зволожувальній установці.

Подальші дослідження зі зволоження зерна під вакуумом проведені при витримці його під вакуумом до зволоження не менше 60 с, що гарантовано його звільнення від повітря до потрібної величини вакуума в мікропорах і капілярах.

У залежності від тривалості витримки (табл. 2 додаток 2) кількість поглиненої вологи вакуумованим зерном було вище ніж при атмосферному тиску.

Це перевищення при вакуумі 50 кПа і хвилинній витримці у воді складає ($t = 30^\circ\text{C}$) 1,35% від маси зерна або на 45,5%, а при витримці протягом 10 с - 0,35% або 35%. Відповідно, попереднє вакуумування зерна перед його зволоженням дозволяє в більшій мірі наситити його водою до операції відволоження.

Потрібно відмітити, що інтенсивність поглинання вологи зерном від підвищення температури навіть під вакуумом значно нижча, ніж від ефекту вакуумування зернівки 1,36%, тобто ефективність вакуумування у зволоженні зерна значно вища, ніж ефективність нагрівання води і зерна.

На рис. 2 (додаток 1) подана залежність поглинання води ΔW зерном пшениці «Миронівська-65» від величини розрідження перед зволоженням у порівнянні з вихідною вологістю 10,5%. За цими даними зі збільшенням

вакууму вологоємність пор і капілярів зерна збільшується. Це збільшення в середньому 0,24% на кожні 10 кПа збільшення вакууму для твердих пшениць і 0,4% для м'яких сортів пшениць.

При вакуумі в межах 40...60 кПа це збільшення знижується. Відповідно величина його у зволожувальній установці можна рекомендувати у межах 45...55 кПа, що необхідно додатково перевірити дослідженнями якості розмелювання підготовленого таким способом.

Надходження вологи у вакуумовану зернівку відбувається при такому ж способі інтенсифікації процесу під дією перепаду тиску: атмосферного за межами змішувача $P_{\text{атм}}$ і залишкового тиску у порах P , тобто під дією вакуума $h = P_{\text{атм}} - P$.

Результати впливу повітря надлишкового тиску на вакуумоване зволожене зерно представлені в табл. 3 (додаток 2).

За цими даними під дією тиску повітря 130...140 кПа вологість зерна, що надходить після його обробки у вакуумний змішувач у вологознімач, додатково збільшується приблизно на 1%. Це відбувається за 30...40 с, в подальшому вологість може знижуватись за рахунок винесення вологи із поверхневих шарів.

На рис. 3 (додаток 1) представлені зведені дані досліджень направлення інтенсифікації процесу зволоження зерна пшениці «Миронівська-65». Процес може бути інтенсифікований і проведений за один прохід зерна у зволожувальній установці. Для цього доцільно зволоження його і перемішування проводити під вакуумом, глибина якого повинна бути в межах 45...55 кПа (крива 2 рис. 3 додаток 1), з наступним підсугуванням при атмосферному повітря. Підвищення вологості при цьому складає 1,5...2,5% в залежності від твердості пшениці у порівнянні із звичайним способом (крива 1 рис. 3, додаток 1).

3.4. Визначення набору, послідовності і тривлості операцій процесу зволоження зерна пшениці перед помелом

Початок роботи зволожувальної установки безперервної дії передують операції налаштування і регулювання її продуктивності, витрати води, відкачування повітря із зволожувального бункера, регулювання величини вакуума і надлишкового тиску. Загальна тривалість їх не перевищує 10...15 хв. При продуктивності зволожувальної установки 10т/год об'єм бункера V_6 буде складатися біля $0,5 \text{ м}^3$. На рис. 4 (додаток 1) подана залежність тривалості відкачування повітря із нього від створеного в ньому вакуума.

Аналіз даних (рис. 4, додаток 1) показує, що тривалість відкачування повітря із бункера в основному залежить від пропускної здатності пневмолінії його вакуумування і складає при вакуумі 50 кПа $t = 6,5$ хв при $\mu \cdot f = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ (шланг діаметром 10 мм і довжиною 1,5 м) і $t = 1,4$ хв шланг діаметром 15 мм тієї ж довжини, що майже в 5 разів швидше.

Тривалість операції вакуумування зерна визначається тривалістю його польоту до зони зрошення за залежністю (2.29) з врахуванням дослідних даних для «живого перетину» мікрокапілярів зернівки. За даними попереднього розділа 3.4 для зернівки діаметром 4 мм і $h = 55$ кПа тривалість вакуумування її складає не менше 0,25 с.

Враховуючи наявність у зволожувальній зерновій масі зернівок більших розмірів цей час необхідно збільшити на 50%, тоді $t_1 = 0,5$ с., а висота бункера повинна бути:

$$h_1 = \frac{g \cdot t^2}{2} = \frac{9,81 \cdot 0,5^2}{2} = 1,22 \text{ м.}$$

тобто 1,2 м.

Технологічна операція зрошення зерна пшениці водою шляхом її розбризкування проходить в зоні польота зерна в нижній частині бункера від $h_1 = 1,2$ м до $h_2 = 1,5$ м, затрати часу у ній за (2.31) складає:

$$t_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot (h_2 - h_1)}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (1,5 - 1,2)}{9,81}} = 0,06 \text{ с.}$$

Наступна технологічна операція – перемішування зволоженого зерна з метою більш рівномірного покриття його зовнішньої поверхні вологою. Дослідним шляхом встановлено (табл. 3.1), що повністю покривається вологою зерно після змочування його протягом $t_4 = 65 \dots 80$ с.

Таблиця 3.1

Вплив часу перемішування зерна після зволоження на степінь змочування його поверхні

Тривалість перемішування, с	45	60	75	90
% змочування зерна	71	92	100	100

Приймаючи $t_4 = 90$ с при продуктивності зволожувальної установки 10 т/год, отримаємо довжину змішувача:

$$L = \frac{4 \cdot Q \cdot t_c}{3600 \cdot \psi \cdot \pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 10 \cdot 90}{3600 \cdot 0.6 \cdot 3.14 \cdot 0.6^2} \approx 1.5 \text{ м.}$$

Витрата води на зволоження зерна, наприклад, від 1,05% до 16,0% складає 60 г/кг, тобто на зволоження 1 м³ зерна потрібно 0,046 м³ води. Якщо уявити всю подану на зрошення зерна воду у вигляді плівки на кожній зернівці, тоді товщина її буде складати біля 0,05 мм. однак більша частина води, вбралась до моменту надходження зерна у вологозмішувач, і товщина цієї плівки θ_n стане значно менша.

Вважаючи її рівною $\theta_n = 0,02$ мм, кількість залишеної води на зернівці буде рівна:

$$G_p = \theta_n \cdot \frac{\pi \cdot d_y^2}{4} \cdot \gamma = 0.02 \cdot \frac{3.14 \cdot 4^2}{4} \cdot 1.01 \cdot 10^{-6} \text{ г.}$$

$$\text{Відповідно } \Delta P \cdot k_n = \frac{G_p \cdot r_y}{F \cdot \tau} = \frac{2.5 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{450 \cdot 30} = 0.0037 \cdot 10^{-12} \text{ Па/м}^3 \text{с.}$$

Якщо тривалість ΔP постінім по товщині зернівки і рівним $\Delta P = \frac{\nabla P}{r_y} = \frac{70000}{2 \cdot 10^{-3}} = 3,5 \cdot 10^7$ Па/м, то коефіцієнт баропровідності повинен бути $k_n = 0,0011 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2/\text{с}$.

Відповідно, коефіцієнт баропереому аналогічний коефіцієнту дифузії, але в сотні раз нижчий за нього, це свідчить про те, що процес вбирання вологи в зернівку носить не дифузійний характер, як пропонувалось в теоретичній частині, а в більшій мірі механічний процес вдавлювання вологи у

вакуумовані порожнини зернівки. Диффузія при цьому виконує допоміжну роль в насиченні вологою зернівку.

В таблиці 3.2 наведені зведені дані про тривалість технологічних операцій зволоження зерна в досліджуваній установці.

Таблиця 3.2.

Перелік і тривалість технологічних операцій процесу зволоження зерна пшениці перед помелом

Перелік технологічних операцій	Рекомендуємі параметри	Тривалість операції, с
Завантаження зерна	В потоці з подачею, відповідною продуктивності установки	
Вакуумування зерна	Величина вакууму $h = 40 \dots 50$ кПа	0,4
Зрошення зерна водою під вакуумом	Розбризгування води	0,06...0,1
Перемішування зерна	В шнеку-змішувачі продуктивністю не нижче продуктивності установки	90
Обробка у вологознімачі: в тому числі механічний переніс вологи в зерно тисном повітря	Тиск повітря, 30 кПа	90
		30
Зовнішнє підсушування і вивантаження	Швидкість повітря 0,05 м/с в потоці, відповідному продуктивності установки	30

Висновки по розділу 3

Поглинання зерном води на перших етапах зволоження здійснюється вбиранням її в мікрокапіляри, а також в пори і трищини. Вологоємність зерна по вільній волозі може бути збільшена відкачуванням повітря із його мікропор ді зволоження. Рациональна величина вакуума для цього складає 40...50 кПа.

Процес відкачування повітря із мікропор зернівки представлений складною пневматичною системою, що має місцевий опір, так і мікротрубопроводи, коефіцієнт пропускнуї здатності який визначається методом заміни її еквівалентним трубопроводам, площини «живого» пертину якого склади для зернівки з умовним діаметром 3,5...4,0 мм $0,02 \cdot 10^{-9}$ м². Тривалість відкачування 0,25 с.

ВИСНОВКИ

Розроблена класифіційна схема способів і засобів зволоження зерна перед помелом. Найбільше розповсюдження отримав спосіб «холодного» кондиціонування зерна, який супроводжується великими затратами часу на наступне відволожування його і затрати засобів на бункера і збільшення площі для технологічних операцій відволожування.

Перший етап проникнення вологи в зернівку при зрошенні її водою в існуючій технології зволоження зерна перед помелом обмежується наявністю повітря і мікропор зернівки.

Попереднє вакуумування їх перед зрошення водою підвищує її вологість. Тривалість вакуумування зернівки складає при вакуумі 50 кПа для зернівки з умовним діаметром 4 мм не менше 0,25 с і залежить від її пропускної здатності, яка в основному обмежена площиною «живого» перетину мікрокапілярами оболонок і в середині рівна $0,02 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$.

Зневоднення поверхні зерна після перемішування рекомендується проводити дією повітря надлишкового тиску величиною 30 кПа протягом 70...90 с. Процес переносу поверхневої вологи в зернівку при цьому носить не дифузійний, а механічний характер вдавлювання води у вакуумовані порожнини зернівки. Коефіцієнт баропереносу при цьому аналогічний коефіцієнту дифузії і складає порядку $0,0011 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2/\text{с}$.

Обґрунтований набір, послідовність і тривалість операцій удосконаленої технології зволоження зерна перед помелом при виробництві борошна, що включає:

- завантаження зерна в бункер;
- вакуумування зерна при розрідженні 40...50 кПа протягом 0,4 с;
- зрошення зерна водою розбризкуванням під вакуумом протягом 0,06 с;
- перемішування зерна в умовах вакуума протягом 90 с;
- вивантаження зерна в потік шлюзовим затвором.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пищевая промышленность Украины: ретроспективный анализ и современные проблемы развития / Хрипьюк В.И. // Экономика АПК. - 2018. - № 9 - С. 77.
2. Егоров Г.А. Термодинамическое взаимодействие зерна с водой / Г.А. Егоров // Хлебопродукты. - 2004. - №2. - с. 22-23.
3. Могучева Э.П., Устинова Л.В. Проектирование мукомольных заводов, учебное пособие./ Э.П. Могучева, Л.В. Устинова. - Барнаул. - 2009. - 151с.
4. Якушев СВ. Исследование процесса распределения влаги в зерне пшеницы / СВ. Якушев, Л.В. Анисимова [и др.] // Наука и молодежь, Барнаул. - 2006. с. 41-42.
5. Соколов А. Я. Технологическое оборудование предприятий по хранению и переработке зерна / А.Я. Соколов. - М.: «Колос». - 1967.
6. Protein in endosperm, «Milling», Великобритания, 1973, 155, №4.
7. Дерев`янюк Д. А. Вплив технічних засобів та технологічних процесів на травмування і якість насіння: монографія / Д. А. Дерев`янюк // Ж.. Полісся: - 2015. – 772с.
8. Романов А.И. Практикум по оборудованию предприятий по хранению и переработке зерна / А.И. Романов, Е.П. Тихомиров. - М.: «Колос», 1981.- 143с.
9. <https://po-teme.com.ua/tekhnologieskie-temy/tekhnologiya-i-obladnannya-pererobki-ta-zberigannya-silskogospodarskoji-produktsiji/2077-gidrotermichna-obrobka-zerna.html>
10. <http://www.brig-zerno.com.ua/uk/statti/19-krup-yane-obladnannya-dlya-organizatsiji-vlasnogo-virobnitstva>.
11. <https://simo.com.ua/ua/public/gidrotermicheskaya-obrabotka-zerna>
12. Мерко И. Т. Технологические основы автоматизации мукомольного производства. Одесса,.
13. Becker N. A. On the absorption of liquid water by the wheat kernel // Cereal Chem. -1960 . - № 37 . - P. 309-320.
14. Цециновский В. М. Технологическое оборудование зерноперерабатывающих предприятий / В. М. Цециновский и др. - М : Колос, 1976. - 368с.
15. Шеруда С.Д. Состояние и перспективные направления для защитностимулирующей обработки семян в СССР и за рубежом / С.Д. Шеруда и др. -М.:ЦНИИТЭИтракторосельмаш, 1973. - 49 с.

16. Установка для гидротермической обработки та сушіння зерна крупи [Текст]: Пат. №48230 Україні, МПК А 23.1 3/00 / Черевко О.І., Погожих М.І., Цуркан М.М., Жеребкін М.В., Пак А.О.; заявник та патентовласник ХДУХТ – Опубл. 10.03.2010 Бюл. №5 – 4 с.

17. Гинзбург А.С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов. Справочник. — Издание второе, дополненное и переработанное. — М.: Пищевая промышленность, 1980. — 288 с.

18. Рева А.Ф. Совершенствование процесса истечения сыпучих сельскохозяйственных материалов из глубоких бункеров кормоцехов: автор. диссерт. канд. тех. наук. - зерноград, 2000 - с. 140.

19. Богомягкий В.А., Пепчук А.Л. Интенсификация разгрузки бункерных устройств в условиях сводообразования зерновых материалов. - зерноград, 1995.-162 с.

20. Краснов И.Н. Доильные аппараты / И.Н. Краснов. - Издательство Ростовского университета. -1974. -220 с. 88.

21. <https://www.amazon.com/Handbook-Engineering-Calculations-McGraw-Hill-Handbooks/dp/0071472932>

22. Кук Г.А. Теория и расчет основного оборудования предприятий молочной промышленности / Г.А. Кук. - М.: Агропромиздат, 1934г. - 471с.

23. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. - М.: Высшая школа. - 1967. - 592 с.

24. Лыков А.В. Явление переноса в капиллярно-пористых телах / А.В. Лыков. - М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954-296с.

25. Лыков А.В. Тепломассообмен: Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1978. 480 с.

26. Лыков А.В. Тепло- и массообмен в процессах сушки. - М.: ГЭИ, 1956. 26 с.

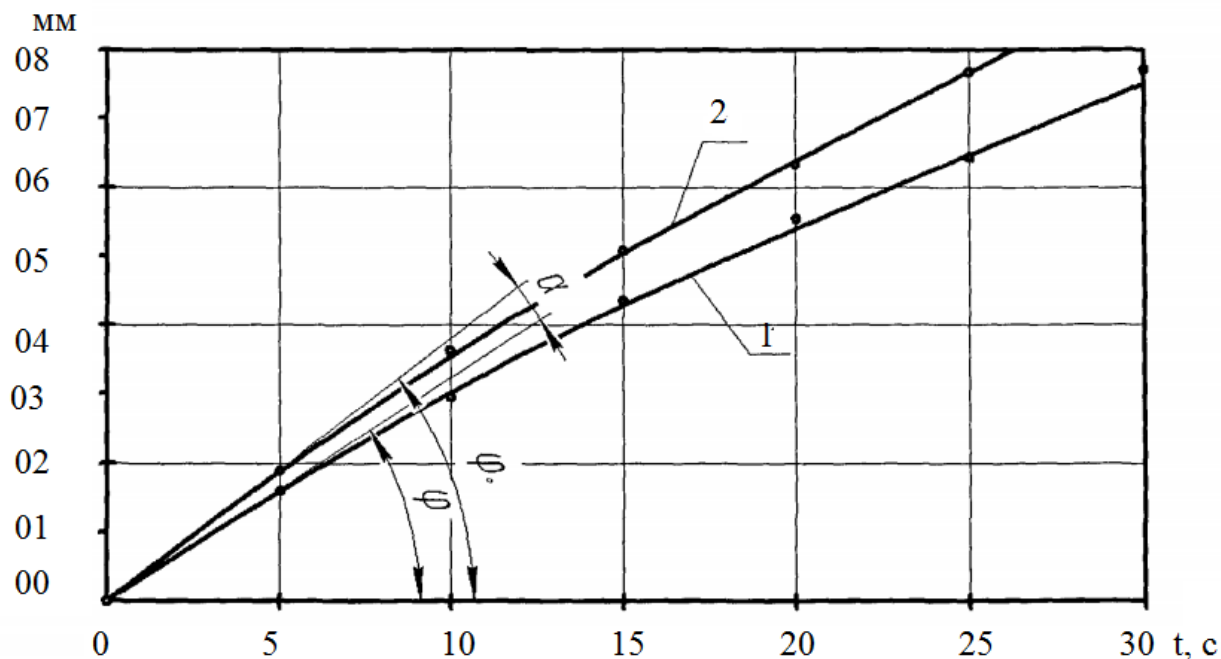


Рисунок 1. Графіки розподілу вологості в зразках пшениці в залежності від тривалості процесу зволоження: 1 – крива розподілу вологості в зернівці при холодному кондиціонуванні; 2 – крива розподілу вологості в зернівці пшениці при інтенсифікованому зволоженні

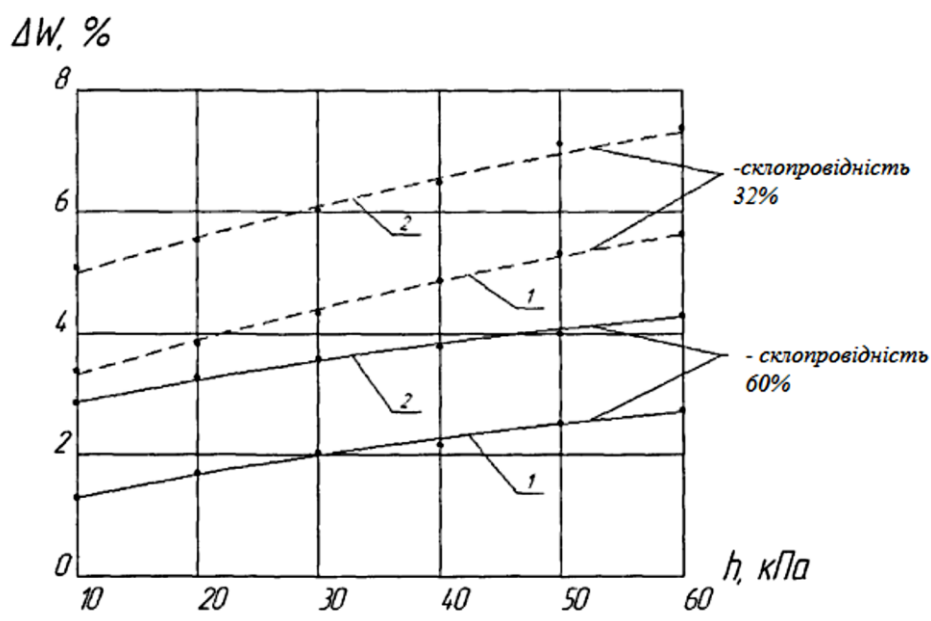


Рис.2. Вплив величини розрідження на поглинальну властивість зерна при зволоженні (вихідна вологість 10,0%) і часу витримки у воді: 1 – 30с; 2 – 60 с.

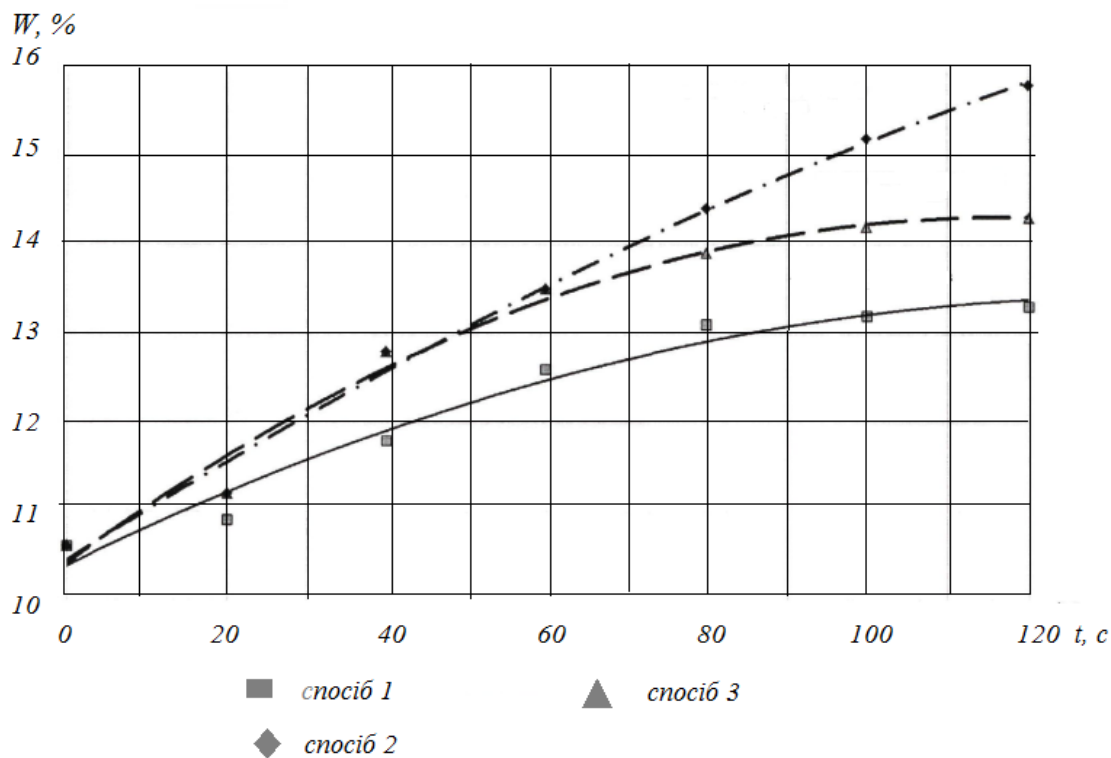


Рис. 3 Порівняльний графік зволоження зерна пшениці в досліджуваній установці: 1 – зволоження при атмосферному тиску; 2 – зволоження у вакуумі; 3 – зволоження під вакуумом ($h=50$ кПа) з наспутною дією тиску повітря ($P_H=130$ кПа)

— — поліноміальна спосіб 1 $y = 0.066x^2 + 1.034x + 9.421$ $R^2 = 0.968$;
 - - - поліноміальна спосіб 2 $y = -0,1144x^2 + 1.577x + 8.975$ $R^2 = 0.988$;
 - · - поліноміальна спосіб 3 $y = -0,044x^2 + 1.253x + 9.256$ $R^2 = 0.993$.

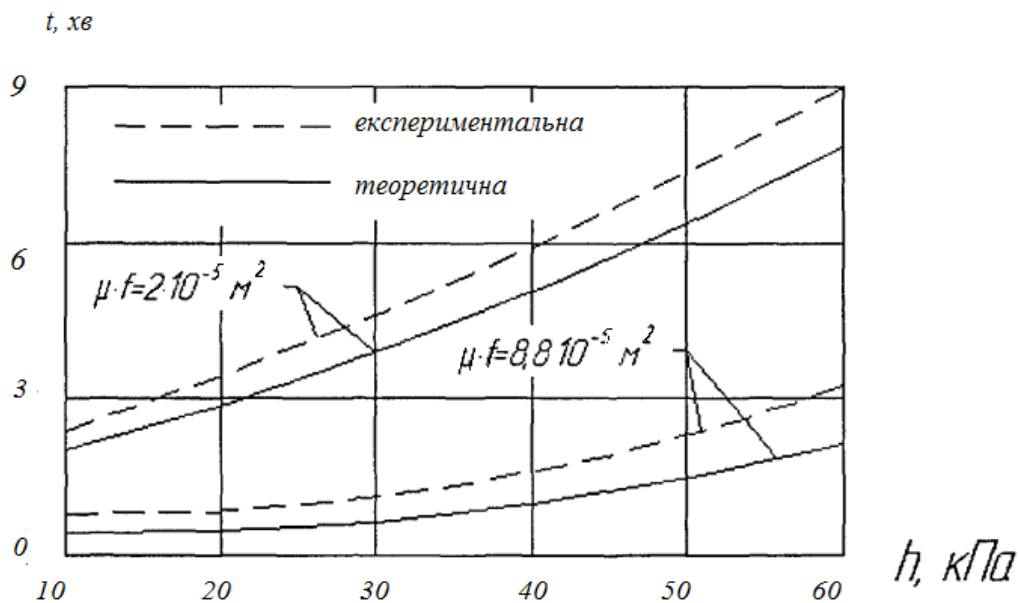


Рис. 4. Залежність тривалості вакуумування зволоженого бункера від величини розрідження в ньому при різному перетині $\mu \cdot f$ лінії відкачування повітря.

ДОДАТОК 2

Таблиця 1

Значення добутку $\mu \cdot f$ для зерна пшениці «Миронівська-65»

d_y , мм	Результати вимірів			Розрахункові величини $\mu \cdot f \cdot 10^{-9}$ м ²	
	тривалість дослідів, хв	витрати повітря		в надкритичній частині протікання	в підкритичній частині протікання
		за дослідів, см ³	час секундний, мм ³		
для зернівки					
4,0	30	6,50	3,47	0,0210	0,0202
3,5	30	5,30	3,18	0,0180	0,0180
3,0	30	4,80	2,86	0,0195	0,0160
для оболонок зернівки					
4,0	30	7,10	4,05	0,0210	0,0222
3,5	30	6,25	3,65	0,0205	0,0202
3,0	30	5,75	3,25	0,0180	0,0175

Таблиця 2

Поглинання води : від маси зерна пшениці сорта «Миронівська-65» при різних витримках його при вакуумі 50 кПа та вихідної вологості 10%

Тривалість витримки зерна у воді, с	прирощування ΔW води в умовах, %			
	вакуумування		при атмосферному тиску	
	при температурі води			
	15°C	30°C	15°C	30°C
5	0,54	0,72	0,28	0,43
10	1,02	1,36	0,75	0,98
20	1,84	2,06	1,19	1,34
40	2,62	2,98	1,78	2,14
60	3,75	4,18	2,61	2,83

Таблиця 3

Вплив повітря надлишкового тиску на відносну вологість вакуумуванням зволоженого зерна (тривалість вакуумної обробки 60 с, глибина вакуума 50 кПа)

Тривалість обробки зерна тиском, с	Відносна вологість зерна, %			
	при тиску повітря $P_n=120$ кПа		при тиску повітря $P_n=140$ кПа	
	при температурі повітря			
	20°C	60°C	20°C	60°C
0	15,56	15,56	15,56	15,56
5	15,75	15,85	15,85	16,05
10	15,95	16,05	16,05	16,15
20	16,05	16,10	16,10	16,35
40	16,25	16,30	16,30	16,45
60	16,45	16,50	16,50	16,55