

**Замрій М.А.**доктор філософії з галузевого
машинобудування, ст. викладач**Вінницький національний
аграрний університет****Zamrii M.**

Ph.D., Senior Lecturer

**Vinnitsia National Agrarian
University****УДК 631.362.7****DOI: 10.37128/2306-8744-2026-1-3****ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-
МЕХАНІЧНИХ І ТЕПЛОФІЗИЧНИХ
ВЛАСТИВОСТЕЙ НАСІННЄВОЇ
МАСИ ЛЮЦЕРНИ**

У статті наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень, спрямованих на підвищення ефективності процесу сушіння насіннєвої маси люцерни на стаціонарному етапі післязбирального обробітку. Встановлено, що для забезпечення якісного проведення операцій витирання та сепарації насіннєву суміш необхідно доводити до вологості 19-21%, тоді як із поля вона надходить із вологістю 35-55%, що зумовлює обов'язковість та енергоємність операції сушіння. Основним об'єктом дослідження визначено боби люцерни з насінням, як ключовий компонент насіннєвої маси, що найбільше впливає на збереження посівних якостей.

У результаті експериментальних досліджень отримано залежності щільності бобів люцерни від їх вологості, що дозволило уточнити вихідні дані для розрахунків тепло- і масообміну. Визначено гранично допустимі температури нагріву бобів люцерни залежно від початкової вологості та експозиції сушіння. Встановлено, що підвищення вологості матеріалу істотно знижує допустиму температуру нагріву, причому вплив вологості є значно вагомим, ніж вплив тривалості теплової дії. Отримано аналітичну залежність, яка може бути використана для практичного вибору режимів сушіння з метою недопущення зниження схожості насіння.

Експериментально визначено теплофізичні характеристики бобів люцерни - теплоємність, теплопровідність і температуропровідність та встановлено їх зміну залежно від вологості матеріалу. Показано, що зі зростанням вологості теплоємність і теплопровідність бобів збільшуються, тоді як температуропровідність має характерний перегин у діапазоні вологості 30-35%, що пов'язано зі зміною форми зв'язку вологи з матеріалом. Отримані результати підтверджують доцільність урахування вологості як визначального параметра при математичному моделюванні процесів сушіння.

Практичне значення роботи полягає в тому, що встановлені експериментальні залежності та граничні температурні режими можуть бути використані для обґрунтування параметрів сушарок і оптимізації технологічних режимів сушіння насіннєвої маси люцерни, що забезпечує зниження енергетичних витрат і збереження високих посівних якостей насіння.

Ключові слова: насіннєва маса люцерни, теплопровідність, теплоємність, температуропровідність, щільність, конвективне сушіння.



Вступ. Основою сталого розвитку галузі тваринництва є забезпечення його кормами високої якості в достатній кількості. В багатьох джерелах вказувалось що незадовільний стан кормовиробництва в Україні пояснюється в тому числі недостатнім рівнем виробництва високопродуктивного насіння, в тому числі люцерни. Зокрема, це відмічається в Концепції розвитку кормовиробництва в Україні на період до 2030 року [1]. Там стверджується що потенціал вітчизняних сортів люцерни спроможний забезпечити урожай насіння в 5-6 ц/га, хоча в більшості господарств він не перевищує 2 ц/га. Ці відсутні 3-4 ц/га є наслідком недосконалості сучасних технологій збирання насінників трав. Більшість з цих технологій ґрунтується на використанні зернозбиральних комбайнів з використанням відповідних пристосувань або навіть без них.

Автори вже висвітлювали питання аналізу технології збирання насінників трав, наприклад [2, 3], з метою вибору раціональних варіантів їх реалізації. В цих та в багатьох інших працях стверджується що найбільш прийнятним є поєднання комбайнового збирання в полі та додатковий обробіток різного виду пожнивної суміші на стаціонарі.

Підтвердженням даної думки можуть бути публікації [4, 5, 6] де також стверджується що основною причиною дефіциту якісного насіння є недостатня ефективність технології збирання, на відмінну від питань вирощування насіння багаторічних трав. І навіть спеціалізовані та модернізовані зернозбиральні комбайни з різноманітними пристосування вимагають додаткового обробітку частини урожаю для зменшення загальних втрат [9].

Для успішного виконання технологічних операцій витирання та сепарації насінневу масу потрібно довести до вологості 19-21%, при якій дані операції проходять з найбільшим ефектом. З поля насіннева суміш поступає зі значно більшою вологістю.

Взагалі, операція сушіння є наявною практично у всіх технологіях переробки сільськогосподарської продукції. Вона використовується і як підготовча операція для успішного проведення наступних технологічних операцій (як в нашому випадку), так і може проводитись на заключному етапі при підготовці матеріалу для довгострокового зберігання. Це найбільш енергозатратна операція в усіх технологіях переробки сільськогосподарської продукції. В деяких випадках на реалізацію процесу отримання використовується практично половина всієї витраченої на переробку енергії.

В роботі [3] детально проаналізовано засоби для сушіння різноманітної сільськогосподарської продукції, в тому числі і

насінневої маси бобових трав, зокрема і головної з них – люцерни. Відмічається що одним з можливих ефективних варіантів є сушіння в нерухомому шарі завдяки продуванню теплоносієм в якості якого наступає підігріте атмосферне повітря

Інтенсивність процесу сушіння залежить значною мірою від параметрів теплоносія (головні це його температура і швидкість), конструктивних особливостей сушильного обладнання і фізико-механічних властивостей самого матеріалу. Для виробу правильного варіанту реалізації процесу сушіння необхідно мати максимальні відомості про матеріал, перш за все форму зв'язку вологи з його структурною основою, основні фізико-механічні та теплофізичні характеристики тощо. Особливо це важливо при проведенні теоретичних досліджень, при яких зазвичай використовують критеріальні форми представлення розв'язку поставлених задач, а самі критерії є поєднанням різних характеристик матеріалу і теплоносія.

Саме вивченню характеристик насінневої маси люцерни як об'єкта процесу сушіння присвячена дана робота.

Аналіз останніх досліджень. Операція сушіння є однією з головних практично в усіх технологіях після збирального обробітку сільськогосподарських матеріалів. Адже на її реалізацію витрачається інколи навіть більше половини всієї енергії затраченої на переробку продукції.

Достатня кількість матеріалів присвячена теоретичним дослідженням, адже для успішного проведення експериментальних досліджень по сушінню різноманітних матеріалів, які потребують значних матеріальних та енергетичних затрат з огляду на складність самого процесу, доцільно провести ретельні теоретичні дослідження. Зокрема, багато праць присвячено розробці математичних моделей окремих технологічних процесів сушіння матеріалів з різними характеристиками.

Зазвичай результатами теоретичних досліджень в сфері сушіння є критеріальні рівняння, які характеризують залежності властивостей матеріалу в залежності від зміни конструктивних та режимних параметрів процесу. Далі ми проведемо ряд основних критеріїв які використовуються в дослідженнях процесу сушіння.

В роботах [8, 9] проведені результати теоретичних досліджень сушіння рослинних матеріалів в щільному нерухомому шарі. За результатами досліджень був визначений розподіл температури теплоносія і матеріалу за товщиною щільного нерухомого шару. Рівняння які визначають математичну модель динаміку сушіння представлені в критеріальній формі, для



чого потрібно знати теплофізичні характеристики матеріалу і теплоносія. Потрібно відмітити що аналогічні дослідження проводяться не тільки для вивчення сушіння рослинних матеріалів, але й матеріалів неорганічного походження. Наприклад в [10] висвітлено дослідження теплообміну в нерухомому шарі гранульованого керамзиту з рухомих повітряним середовищем. Попутно потрібно відмічати, що процеси сушіння рослинних матеріалів мають більш складений характер ніж більшості неорганічних матеріалів через особливості зв'язку вологи з скелетом рослин.

Як відмічалось в роботах [2, 3] основним способом сушіння насінневої маси люцерни є активне вентилування. В роботах [11, 12] наведені результати теоретичних та експериментальних досліджень сушіння відповідно пелет люцерни та зерна методом активного вентилування. Як і в попередніх випадках, для теоретичних досліджень використовуються критеріальні рівняння. Ще раз підкреслимо що для визначення цих критеріїв потрібно мати відомості про зв'язки вологи з матеріалом та теплофізичні характеристики матеріалу.

Багатогранність процесу сушіння полягає також в тому що для його реалізації використовується різноманітне обладнання, в тому числі і з вібраційною дією на матеріал, а також різні джерела енергії. Саме такий випадок описаний в роботі [13], де також використовуються критерії подібності для опису процесу тепло- і масообміну у вібраційній сушарці з інфрачервоним джерелом тепла.

Підсумовуючи огляд останніх джерел та публікацій з питань дослідження процесів сушіння різноманітних матеріалів, можна зробити висновок що в більшості випадків для створення математичних моделей тепло- і масообміну використовують критеріальні рівняння. Для їх складання і вирішення необхідні знання про фізико-механічні властивості матеріалів, зокрема форму зв'язку вологи з основою матеріалу і теплофізичні характеристики матеріалу. Протікання процесу сушіння передбачає зміну вологості матеріалу від початкової до кінцевої, причому цей інтервал має різні значення в конкретних технологічних випадках. Це вимагає знати залежність теплофізичних характеристик матеріалу від його вологості в межах які визначаються технологічним процесом. Визначенню цих характеристик і присвячена дана робота.

Мета роботи. Метою роботи є підвищення ефективності процесу сушіння насінневої маси люцерни на етапі проведення теоретичних та експериментальних досліджень шляхом визначення фізико-механічних та теплофізичних характеристик матеріалу від його вологості.

Виклад основного матеріалу. Процес сушіння спрощено можна представити як

віднімання вологи від сухої маси матеріалу. Але на реалізацію цього процесу «віднімання» завжди потрібно витратити певну кількість енергії. Інтенсивність процесу сушіння залежить від кількості цієї затраченої енергії. В свою чергу, величина енергії залежить від декількох факторів, в першу чергу, від форми зв'язку вологи з матеріалом, а також умовами випаровування вологи в навколишнє середовище.

Класифікація форм зв'язку вологи з матеріалом запропонована радянським вченим П.О. Ребінзером. Основні положення цієї класифікації авторами вже розглядалися [14]. За основу класифікації форм зв'язку вологи з матеріалом прийнята схема, згідно якої ця форма визначається енергією яка витрачається на руйнування цього зв'язку.

За П.О. Ребіндером всі форми зв'язку вологи з матеріалом поділяють на чотири види (у порядку зменшення енергії) і хімічно зв'язана волога, фізико-хімічна і фізико-механічна. Хімічно зв'язана волога найбільш міцно пов'язана з матеріалом і може бути видалена тільки при нагріванні матеріалу до високих температур або в результаті проведення хімічної реакції. Ця волога не може бути видалена з матеріалу при сушінні.

В процесі сушіння видалається, як правило, тільки волога зв'язана з матеріалом фізико-хімічно і механічною. Найбільш легко може бути видалена механічно зв'язана волога, яка, в свою чергу, поділяється на вологу макрокапілярів і мікрокапілярів (капілярів з розміром менше 10-7 м). Макрокапіляри заповнюються вологою при безпосередньому контакті її з матеріалом, в той час коли в мікрокапіляри волога поступає ще й в результаті поглинання її з навколишнього середовища.

Волога макрокапілярів може бути видалена не тільки сушінням, але й механічним способом. Фізико-хімічний зв'язок поєднує два види вологи що відрізняються міцністю зв'язку з матеріалом: адсорбційно та осмотично зв'язана волога. Адсорбційна волога міцно утримується на поверхні і в парах матеріалу. Осмотична волога, або волога набухання, знаходяться всередині клітин рослин і утримується осмотичними силами. Адсорбційна волога потребує значно більше затрат енергії для свого видалення ніж волога осмотична.

Стосовно до процесу сушіння, вологу в матеріалі класифікують в більш широкому сенсі на вільну і зв'язану. Для вільної вологи швидкість випаровування води з вільної поверхні. Відповідно, зв'язана волога має швидкість випаровування з матеріалу менше швидкості випаровування води з вільної поверхні.

Зовнішні фактори можуть впливати на розтягування вологи в скелеті матеріалу. Звичайно, перш за все це стосується впливу температури середовища на матеріал, але й інші

фактори, як наприклад тиск зовнішнього середовища [15], можуть впливати на перерозподіл вологи.

За формою зв'язку вологи з матеріалом всі тіла, як об'єкти сушки, поділяються на капілярні, пористі, колоїдні та їх комбінації. Прийнято вважати що всі рослинні матеріали, в тому числі і люцерна та її частини відносяться до капілярно-пористих колоїдних тіл.

Розглянемо деякі властивості люцерни як об'єкту сушіння. Основний об'єкт сушки в насінній масі люцерни – біб з насінням. Форма бобів залежить від сорту люцерни і може являти собою циліндричну, серповидну або кільцеподібну форму.

Зовнішній вигляд бобів люцерни представлений на рис. 1.



Рис.1. Зовнішній вигляд бобів люцерни

Насіння в бобах невеликого розміру (еквівалентний діаметр 2,5 – 3,5 мм), маса 1000 штук більшості сортів становить 1,8...2,2 г.

Досвід збирання насіння люцерни [2] показує що при неблагоприятних погодних умовах збирання, а ваги, як правило, частіше за все такими бувають при збиранні) вологість насінневої

маси становить 35...55%. Вологість різних складових насінневої маси відрізняється на 5...6% між собою, причому вологість бобів вище вологості стебел та листків.

Польовими дослідженнями встановлено, що в травах вологістю більше 35 – 40 %, знаходиться вільна волога, а при зайвій вологості – термодинамічно зв'язана волога [16]. Це підтверджується аналізом кривих сушіння листків і стебел трав. При цьому період постійної швидкості сушіння проходить до вологості 30 – 40 %, а потім швидкість сушіння падає.

При сушінні трав зв'язана волога становить лише 10 – 20 % всієї кількості вологи яка має бути випарувана, тому енергія зв'язку вологи становить лише 0,2 – 0,4 % від теплоти, яку потрібно витратити для перетворення рідини в пару.

Частка тепла на подолання енергії зв'язку вологи з матеріалом при сушінні трав'яних матеріалів дуже мала і нею можна знехтувати. Це пояснюється тим, що насінневу масу сушать не до повного видалення з неї вологи, а до вологості 20 – 25 %, яка необхідна для проведення наступних технологічних операцій – витирання і сепарації. Ці залишкові 20 – 25 % вологості утворюють саме ті молекули води, які найбільш міцно зв'язані колоїдами клітин матеріалу.

Всі ці дані мають відношення, в основному, до одиночних бобів люцерни, як об'єкту сушіння. Він, дійсно, вважається головним об'єктом в насінній масі, яка поступає з поля на стаціонар. Ця насіннева маса складається із назначної кількості частин насінин, шматочків листя та стебла і бобів. Всі ці компоненти насінневої маси мають різні механічні, аеродинамічні та теплофізичні характеристики, звисно, нас цікавлять в першу чергу характеристики саме невитертих бобів.

Так, наприклад, елемент боба, який є основним об'єктом сушіння – насіння з оболонкою що його оточує, має площу поверхні 28-30 мм², а шматок стебла довжиною 30 мм має площу поверхні 90 – 100 мм². Через це і біб, шматок стебла, інші складові насінневої маси будуть мати різну температуру в процесі сушіння. Це змушує зробити певні допущення в теоретичних дослідженнях процесу сушіння насінневої маси люцерни. Так теплофізичні характеристики визначаються не для кожного окремо взятого компоненту насінневої маси (біб, насіння, стебло, листок тощо), а визначається інтегральна величина яка характеризує всю насінневу масу як об'єкт сушіння в цілому). При розгляді процесу сушіння, основна увага приділяється саме бобові люцерни, температурі на його поверхні і поверхні насіння. Основна задача процесу – висушити ворох до конденційної вологості без зниження посівних якостей насіння.



Метою кожного дослідження в царині процесів сушіння є підвищення його інтенсивності. Один з шляхів інтенсифікації процесу сушіння матеріалів – збільшення коефіцієнта теплообміну, який залежить від виду матеріалу, конструктивні та технологічні параметри сушарки, гідродинамічних та теплових характеристик потоку сушильного агента, фізико-механічних властивостей матеріалу.

На перший погляд, найбільш дієвим шляхом можна вважати збільшенням температури сушильного агента. Але температура сушильного агента обмежується небезпекою перегріву насінневої маси, в тому числі найбільш цінною її частиною – бобами. Перегрів насіння в бобах може призвести до погіршення посівних якостей насіння, тому різниця температур між сушильним агентом і бобами може підвищуватись лише до визначеного значення.

Детальні дослідження по визначенню гранично допустимих температур нагріву зернових матеріалів проведені С.Д. Птіциним [17]. Він отримав залежності для визначення гранично допустимої температури нагріву зерна пшениці в залежності від початкової його вологості, і зробив спробу пояснення механізму впливу температури нагріву на посівні якості насінневого зерна.

Для постійної експозиції процесу сушіння $\tau = 3600$ с була запропонована формула:

$$\tau_{гр} = \frac{235}{c}, \quad (1)$$

Де C – теплоємність зерна в $\left[\frac{\text{кал}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}\right]$.

Для визначення теплоємності зерна була запропонована залежність:

$$C = \frac{0,37(100-W)+W}{100}, \quad (2)$$

де W – початкова вологість зерна, %

Швидкість хімічних реакцій які протікають всередині зернини залежать від її температури. Одна з цих реакцій – коагуляція білку пришвидшується під дією температури, і негативно впливає на схожість зерна.

Формула (1) має той недолік, що вона придана лише для однієї фіксованої експозиції нагріву $\tau = 90$ хвилин. Для випадків з різною експозицією нагріву зерна пшениці були запропоновані формули:

$$t_3 = \frac{23,5}{c} + 20 - 10 \text{tg } \tau, \quad (3)$$

де τ – час дії температури, хв;

$$t_3 = 122 - 5,4 \text{tg } \tau - 44 \text{tg } W, \quad (4)$$

де W – початкова вологість зерна, %.

Дані залежності (1-4) не прийнятні для практичного використання при дослідженні люцерни. Для визначення гранично допустимої температури нагріву бобів люцерни були проведені експериментальні дослідження.

В основу досліджень по визначенню гранично допустимої температури насіння була використана стандартна методика [18]. Матеріал розмішували в скляному посуді з тонкими стінами, щільно закривали і розмішували в термостаті. Фіксувалась температура шару бобів на експозиції нагріву. Оцінку якості насіння після теплової обробки проводили за їхньою схожістю. Задача ускладнювалась тим, що потрібно було визначити максимальну температуру за якої ще не відбувається зниження схожості насіння. Попередньо цю температуру встановлювали приблизно за формулами (3,4). Для чистого насіння люцерни вона була меншою, і тому реальну гранично допустиму температуру нагріву визначали шляхом ступінчастого збільшення температури нагріву з інтервалом 3°C з одночасною фіксацією схожості насіння в даному досліді.

Початкова вологість та експозиція нагріву в даній серії дослідів були постійними. Для насіння в бобах початкову температуру встановлювали на 10°C вище, ніж для чистого насіння.

Для отримання математичної залежності гранично допустимої температури нагріву насіння була застосована методика експериментального планування експериментів [19].

В результаті проведення експериментів та обробки отриманих даних була визначена залежність гранично допустимої температури нагріву бобів люцерни в залежності від їх початкової вологості та експозиції нагріву;

$$t_{г.д.} = 0,0005(94,4 - \tau)^2 + 0,005(84,3 - W_n)^2 + 41,5 \quad (5)$$

де τ – експозиція нагріву, хв;

W_n – початкова вологість бобів, %

Графічна інтерпретація даної залежності представлена на рис 2.

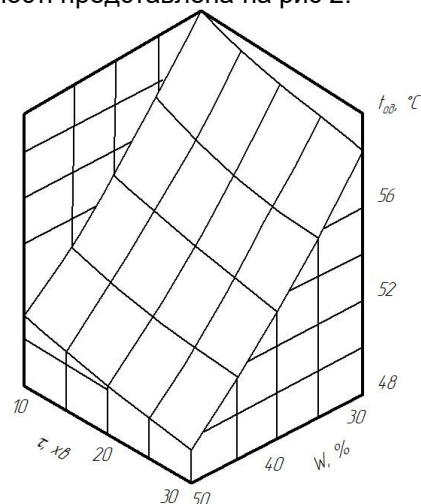


Рис. 2. Залежність гранично допустимої температури нагріву бобів люцерни від початкової вологості та експозиції сушіння



Як видно з (5) обидва фактори однонаправлено впливають на гранично допустиму температуру, тобто якщо обидва фактори підвищуються, то температура зменшується, і навпаки. Але початкова вологість бобів має більший вплив на величину гранично допустимої температури ніж експозиція сушіння. Так зміна початкової вологи (в ту або іншу сторону) на 10% при незмінній експозиції нагріву викличе відповідну зміну гранично допустимої температури в середньому на 3%, в той час як аналогічна зміна часу нагрівання при незмінній початковій вологості викликає відповідну зміну гранично допустимої температури в середньому лише на 0,07%. Для практичного використання можна зробити рекомендації що при надходженні на сушку матеріалу з більшою початковою вологістю потрібно зменшувати експозицію сушіння, зменшуючи, наприклад, питому навантаження шару матеріалу, і навпаки, у випадку зниження початкової вологості можна збільшувати експозицію сушіння. В цьому випадку температуру сушильного агента можна підвищити, що дозволить більш ефективно вести процес сушіння.

Кожна технологічна лінія, в тому числі і технологічна лінія для сушіння насінневої маси люцерни, являє собою систему яка складається з певної кількості елементів, номенклатура яких залежить від конкретних умов реалізації технології. Звичайно, всі елементи технологічної лінії мають бути підібрані за своїми технологічними характеристиками, в тому числі за продуктивністю, тобто продуктивність елементів повинна збільшуватись від першої машини до останньої в технологічному ряді. Ця вимога забезпечує безперервність роботи елементів технологічної лінії, унеможливує накопичення вологого матеріалу. Адаже при накопиченні значної кількості вологої насінневої маси може розпочатись небажаний процес його самозігрівання. Виділення значної кількості теплоти відбувається в результаті протікання різноманітних мікробіологічних процесів і недостатньої теплопровідності насінневої маси.

Кількість виділеної теплоти в насінневої масі залежить від її початкової вологості і температури навколишнього середовища.

При дослідженні процесу самозігрівання насінневої маси люцерни її поміщали в металеву ємність циліндричної форми діаметром 0,7 м і висотою 1,5 м. Температуру насінневої маси виміряли в дев'яти точках ємності: в точках з радіусом $r_1 = 0 \text{ м}$; $r_2 = 0,5 \text{ м}$; $r_3 = 0,3 \text{ м}$; і на трьох висотах $h_1 = 0,25 \text{ м}$; $h_2 = 0,75 \text{ м}$; $h_3 = 1,25 \text{ м}$. Потім вираховувалась середня за об'ємом температура насінневої маси. Потрібно відмітити що температура маси яку виміряли на одній висоті була практично однаковою для всіх трьох радіусів. По висоті зміна температури була більш суттєвою, причому вона зменшувалась від верху ємності донизу, що можна пояснити різними умовами

життєдіяльності бактерій через дефіцит повітря в нижній частині ємності.

Зміна середньої температури насінневої маси в часі в залежності від її вологості наведена на рис. 3.

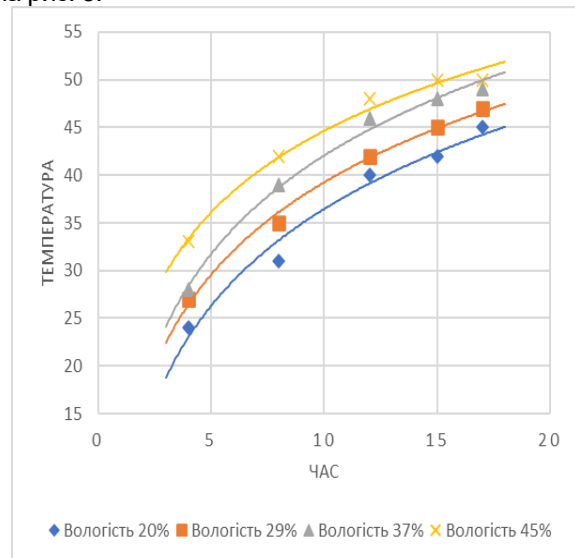


Рис. 3. Залежність середньої температури самонагрівання насінневої маси люцерни від часу і початкової вологості: 1 – вологість 20%; 2 – вологість 29%; 3 – вологість 37 %; 4 – вологість 45%.

Аналіз отриманих результатів показує що насіннева маса вологістю 29% досягає небезпечної (з точки зору зниження схожості насіння) температури через 12 годин зберігання. В більшості випадків приблизно самої такої вологості маса поступає з поля на стаціонарний пункт і може зберігатись там без вентилявання і перемішуватись не більше 10 – 12 годин.

Як уже було відмічено, в більшості випадків для теоретичних досліджень сушильних процесів використовують критерії подібності. Наведено дані про основні критерії що використовують в цих дослідженнях.

Критерій Рейнольдса (Re) – критерій подібності, що ґрунтується на відношенні інертності руху течії рідини до його в'язкості. Нагадаємо, що з фізичної точки зору підігріте повітря, яке використовується в якості сушильного агента, також вважається рідиною. Критерій Re можна визначити для низки різних становищ, коли рідина (сушильний агент) перебуває у відносному руху до поверхні твердих тіл (наприклад, бобів люцерни). Він залежить від густини і в'язкості рідини, а також її швидкості та характерного розміру твердого тіла.

Математичний запис (вираз):

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot l}{\eta} = \frac{u \cdot l}{\nu}, \quad (6)$$

де ρ – густина рідини або газу;

u – характеристична швидкість;



l – визначальний(характерний) розмір тіла;

η – динамічна в'язкість рідини або газу;

ν – кінематична в'язкість рідини або газу.

Критерій Фур'є (Fo) – характеризує співвідношення між швидкістю зміни теплових умов в навколишньому середовищі і швидкістю зміни поля температур всередині системи що вивчається. Залежить від розмірів тіла і його коефіцієнту теплопровідності.

Математичний запис:

$$Fo = \frac{a\tau}{l^2}, \quad (7)$$

де a – коефіцієнт теплопровідності тіла;

τ – характерний час зміни зовнішніх умов;

l – характерний розмір тіла.

Критерій Біо (Bi) – один з критеріїв подібності стаціонарного теплообміну між нагрітим або охолодженим твердим тілом і навколишнім середовищем. У випадку сушіння твердих тіл він характеризує відношення кількості тепла, яке підводиться до тіла, і тепла, яке відводиться від поверхні в гліб тіла.

Математичний запис:

$$Bi = \frac{\alpha l}{\lambda}, \quad (8)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні тіла до навколишнього середовища

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріала тіла.

Відношення коефіцієнтів α і λ позначають

$$H = \frac{\alpha}{\lambda} \quad (9)$$

тоді

$$Bi = Hl \quad (10).$$

Критерій Нуссельта (Nu) – один з основних критеріїв подібності теплових процесів, який характеризує співвідношення між інтенсивністю теплообміну за рахунок конвекції та інтенсивністю теплообміну за рахунок конвекції та інтенсивністю теплообміну за рахунок теплопровідності (в умовах нерухомого середовища)

Математичний запис:

$$Nu = \frac{q_c}{q_\lambda} = \frac{\alpha l}{\lambda}, \quad (11)$$

де q_c – тепловий потік за рахунок конвекції;

q_λ – тепловий потік за рахунок теплопровідності;

α – коефіцієнт тепловіддачі;

λ – коефіцієнт теплопровідності середовища;

l – характерний розмір.

Потрібно зауважити що завжди $Nu \geq 1$, тобто тепловий потік за рахунок конвекції завжди перевищує за своєю величиною тепловий потік за рахунок теплопровідності.

Це основні критерії подібності які використовуються при дослідженні процесів сушки.

Крім перерахованих можна згадати, наприклад, ще й критерії Прандтля (Pr), Пекле (Pe), Померанцева (Po) та інші. Але в склад всіх критеріїв входять в різноманітних комбінаціях декілька основних властивостей матеріалу: щільність матеріалу та теплоємність, теплопровідність, температуропровідність матеріалу.

Що стосується щільності, то можна говорити тільки про її значення для окремих елементів. Для всієї насінневої маси можна говорити про об'ємну масу і насипну масу.

Із складових частин вороху найбільш важливими для нашого процесу сушіння є саме боби люцерни з насінинами. Була визначена залежність щільності бобів в залежності від їх вологості. Вологість бобів визначалась по відомій методиці шляхом повного висушування і зважування. Результати цих дослідів в графічній інтерпретації представлені на рис. 4.

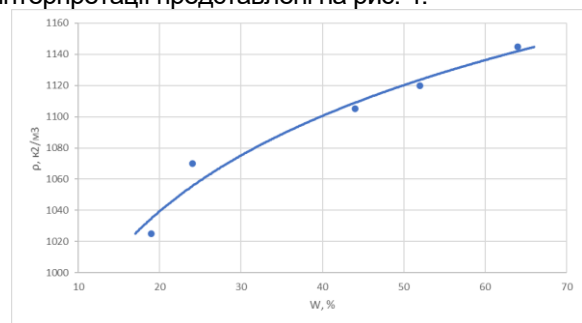


Рис. 4. Залежність щільності бобів люцерни від вологості

Всі критерії які використовуються при дослідженні процесів сушіння, включають в себе наступні теплофізичні характеристики і теплоємність C [Дж/кг·°C], теплопровідність α [м²/с] і теплопровідність λ [Вт/м·°C]. Для успішного виділення задач сушіння потрібно знати їх залежність від початкової вологості насінневої маси.

Основні теплофізичні характеристики матеріалу зв'язані між собою співвідношенням:

$$C = \frac{\lambda}{\alpha \gamma}, \quad (12)$$

де γ [кг/м³] – щільність матеріалу.

Теплоємність матеріалу чисельно дорівнює кількості теплоти, яку необхідно підвести до одиниці маси матеріалу, щоб підвищити його температуру на один градус.

Теплоємність рослинних матеріалів залежить від теплоємності води і сухої речовини. Теплоємність води вище теплоємності сухої речовини, тому при сушінні теплоємність рослинних матеріалів, в тому числі насінневої маси люцерни, зменшується. Окрім того, теплоємність залежить і від температури матеріалу – при збільшенні температури вона збільшується.

Коефіцієнт теплопровідності характеризує здатність матеріалу проводити тепло і чисельно

дорівнює кількості теплоти, яка проходить в одиницю часу через одиницю поверхні при зміні температури на один градус на одиницю довжини матеріалу. Теплопровідність матеріалу залежить від його структури, вологості, щільності, температури. При зменшенні вологості в процесі сушіння матеріалу теплопровідність його зменшується. Теплопровідність насінневої маси нижче теплопровідності його окремих складових через наявність повітряних проміжків між ними.

Коефіцієнт теплопровідності визначає швидкість розвитку нестационарного теплового процесу тобто здатність частинок матеріалу при нагріві або охолодженні вирівнювати температуру в окремих його місцях. Коефіцієнт температуропровідності залежить від інтенсивності переносу вологи всередині і характерні зв'язку вологи з матеріалом [20].

Для визначення теплофізичних характеристик насінневої маси був використаний метод викладений в роботі [21].

Метод ґрунтується на використанні закономірностей нестационарного нагріву двох напівобмежених стрижнів, в місці контакту яких розміщено джерело теплоти постійної потужності.

Теоретичне обґрунтування методу, основні рівняння та графічні закономірності, які лежать в основі методу, детально викладені авторами в [21]. Тому в даній роботі ми наведемо вже результати експериментальних досліджень по визначенню теплофізичних властивостей компонентів насінневої маси люцерни. Загальний вигляд лабораторної установки для визначення теплофізичних властивостей люцерни представлений на рис. 5.



Рис. 5. Загальний вигляд лабораторної установки для визначення теплофізичних властивостей люцерни: 1 – теплоізолюванні паралелепіпеди; 2 – плоский електричний нагрівач; 3 – диференційні термометри

В результаті проведення досліджень та обробки досліджених даних отримані залежності

теплофізичних властивостей бобів люцерни від його вологості, які наведені на рис. 6.

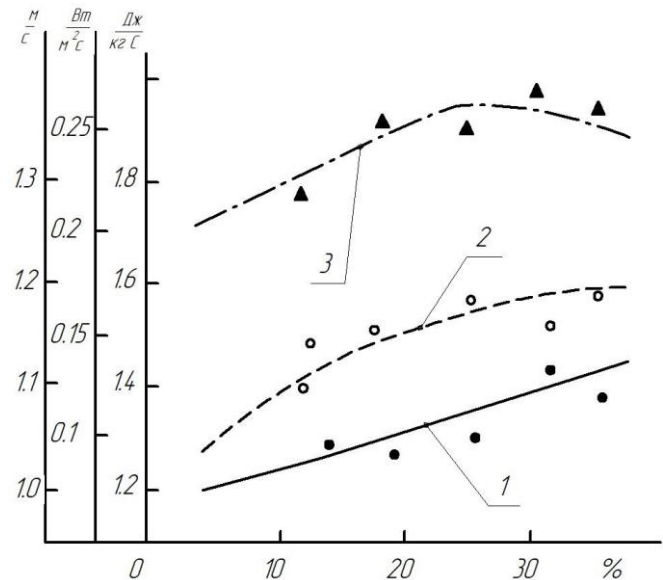


Рис. 6. Залежність теплофізичних характеристик бобів люцерни від їх вологості: 1 – теплоємність; 2 – теплопровідність; 3 – температуропровідність.

Аналіз наведених графіків засвідчує що теплоємність і теплопровідність бобів люцерни збільшується зі збільшенням вологості матеріалу. Температуропровідність має точку перегину в районі вологості 30...35%. Цей перетин можна пояснити переходом води із вільного в зв'язаний стан.

Висновки:

1. Для успішного проведення стаціонарних операцій після збирального обробітку насінневої маси люцерни її необхідно довести до вологості 19-21%, що потребує обов'язкового проведення операції сушіння.

2. Інтенсивність процесу сушіння залежить від значної кількості факторів, в тому числі форми зв'язку вологи з матеріалом, його фізико-механічних характеристик. Для успішного дослідження процесів сушіння насінневої маси необхідно знати ці властивості основних компонентів.

3. Аналіз попередніх досліджень дозволив вибрати метод визначення теплофізичних характеристик бобів люцерни. Метод ґрунтується на використанні особливостей нестационарного нагріву двох напівобмежених стрижнів з джерелом тепла постійної потужності.

4. Отримані залежності теплофізичних характеристик бобів люцерни від вологості. Графічна інтерпретація залежностей має перегини в районі вологості 30 - 35% що пов'язано зі зміною форми зв'язку вологи з матеріалом.



Список використаних джерел

1. Замрій М. А. Обґрунтування параметрів та режимів роботи обладнання для сушіння насінневої маси люцерни : дис. ... д-ра філософії : 133 Галузеве машинобудування / Вінницький національний аграрний університет. Вінниця, 2026. 197 с.
2. Туфекчі В.І., Вересоцький Ю.І. Дослідження верхнього жалюзійного розподілення теплоносія та визначення ефективних параметрів сушіння в комплексах розпилювального типу. *Харчова Промисловість*. 2021. № 30. С. 96–109. DOI: 10.24263/2225-2916-2021-30-12
3. Солоня О.В., Замрій М.А. Дослідження процесу сушіння насінників трав. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. № 3(106). С. 78–87. DOI: 10.37128/2306-8744-2022-3-11
4. Kotov B., Kalinichenko R., Spirin A., Gudzenko N., Didyk A., Zamrii M. Development and research of energy-efficient helio-air collectors for drying agricultural products. *Technology audit and production reserves*. 2024. № 6/1(80). P. 54-60. DOI: 10.15587/2706-5448.2024.318480.
5. Moss, W. M., Guzzomi, A. L., Foster, K. J., Ryan, M. H., Nichols, P. G. H. (2021). Harvesting subterranean clover seed – Current practices, technology and issues. *Crop & Pasture Science*, Vol. 72, pp. 223-235, <https://doi.org/10.1071/CP20269>
6. Kaletnik H., Solona O., Kotov B., Stepanenko S., Shvydia V., Kalinichenko R., Tverdokhlib I., Polievoda Y., The usage of the elemental base of the vibratory mill with the spatial circulation movement of material to create drying rig. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2024. Vol. 100, № 3. P. 232–237. DOI: 10.15199/48.2024.03.41
7. Spirin A., Borysiuk D., Tsurkan O., Tverdokhlib I., Veselovska N., Edl M. Ways of Identification of Grass Seed Production. *Journal of Engineering Sciences*. 2023. Vol. 10, Issue 1. P. F11-F19. DOI:10.21272/jes.2023.10(1).f3
8. Tokarchuk, O., Mytko, M., Burlaka, S., Zozulyak, I., Stadnik, M. Comparison of technological operations in processing alfalifer hay in terms of their impact on forage quality and quantity. *Technology Audit and Production Reserves*. 2025. 2/3 (82). P. 43–51. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.326047>.
9. Kaletnik H., Yaropud V., Polievoda Y., Solona O., Babyn I., Tverdokhlib I. Study of the process of active-ventilation drying of legume grasses' fractional processing products. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2024. Vol. 100, № 2. P. 156-163. <https://doi.org/10.15199/48.2024.02.32>
10. Калініченко Р. А., Войтюк В. Д. Математичне моделювання тепломасообмінних процесів високотемпературної термообробки зернових матеріалів. *Техніка та енергетика*. 2017. № 275. С. 59–65.
11. Spirin A., Kupchuk I., Tverdokhlib I., Polievoda Y., Kovalova K., Dmytrenko V. Substantiation of modes of drying alfalfa pulp by active ventilation in a laboratory electric dryer. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2022. 98 (5). pp. 11–15. doi:10.15199/48.2022.05.02
12. Калетнік Г.М., Яропуд В.М., Полева Ю.А. Чисельне моделювання процесу сушіння активним вентиляванням продуктів фракційної переробки бобових трав в конвективній стрічковій сушарці. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. № 2 (121). С. 5–15. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-2-1
13. Bandura V., Kalinichenko R., Kotov B., Spirin A. Theoretical rationale and identification of heat and mass transfer processes in vibration dryers with IR-energy supply. *Eastern-European journal of Enterprise Technologies*. 94(2018), №.4. pp. 50 – 58.
14. Котов Б.І., Степаненко С.П., Калініченко Р.А. Концептуальні основи створення технічних засобів первинної обробки зерна в умовах господарств АПК. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2017. Вип. 47. Ч. 1. С. 104-114.
15. Baranovskyi V., Spirin A., Tverdokhlib I., Volynets Ye. Modeling of drying processes of alfalfa processed products taking into account equilibrium moisture content. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2025. Випуск 4/2025(153). С.347-352. DOI: 10.32782/1995-0519.2025.4.40
16. Спірін А.В., Деркач В.В., Коробко М.М. Обґрунтування технології та режимних параметрів ресурсозберігаючого процесу підбирання сіна: Монографія. К: ЦП «КОМПРИНТ», 2019. 169 с.
17. Paziuk V., Snezhkin Y., Dmytrenko N., Ivanov S., Tokarchuk O., Kupchuk I. Thermal and physical properties and heat-mass transfer processes of drying pumpkin seeds. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2022. Vol. 98 (7). P. 154–157. DOI: 10.15199/48.2022.07.25
18. Барановський В.М., Бурлака С.А., Купчук І.М., Борецька Т.Ю. Вплив ультрафіолетових ламп на мікробіологічну чистоту кормів під час сушіння. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2025. № 2 (117). С. 110-116. DOI: 10.37128/2306-8744-2025-2-13
19. Ломач С.М. Теорія планування експериментів. Виконання розрахунково-графічної роботи: навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2020. – 86 с.
20. Матвієнко С.М. Вдосконалення методу визначення складу речовини за їх теплопровідністю / Київ – 2019. Автореф. дис... к.т.н.
21. Solona O., Spirin A., Zamrii M., Tverdokhlib I., Polievoda Y., Kovalova K.



Determination of the dependence of the physico-mechanical properties of alfalfa seed pods on moisture content. *Technology Audit and Production Reserves*. 2025. 3/3 (83). P. 84–90. DOI: 10.15587/2706-5448.2025.331286

References

- Zamrii, M. A. (2026). *Obgruntuvannia parametriv ta rezhymiv roboty obladnannia dlia sushinnia nasinnivoi masy liutserny* [Doctoral dissertation, Vinnytsia National Agrarian University]. Vinnytsia, Ukraine.
- Tufekchi, V. I., & Veresotskyi, Yu. I. (2021). Doslidzhennia verkhnoho zhaliuziinoho rozpodilennia teplonosia ta vyznachennia efektyvnykh parametriv sushinnia v kompleksakh rozpylniuvального typu. *Kharchova Promyslovist*, 30, 96–109. <https://doi.org/10.24263/2225-2916-2021-30-12>
- Solona, O. V., & Zamrii, M. A. (2022). Doslidzhennia protsesu sushinnia nasinniv trav. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*, 3(106), 78–87. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2022-3-11>
- Kotov, B., Kalinichenko, R., Spirin, A., Gudzenko, N., Didyk, A., & Zamrii, M. (2024). Development and research of energy-efficient helio-air collectors for drying agricultural products. *Technology Audit and Production Reserves*, 6/1(80), 54–60. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.318480>
- Moss, W. M., Guzzomi, A. L., Foster, K. J., Ryan, M. H., & Nichols, P. G. H. (2021). Harvesting subterranean clover seed: Current practices, technology and issues. *Crop & Pasture Science*, 72, 223–235. <https://doi.org/10.1071/CP20269>
- Kaletnik, H., Solona, O., Kotov, B., Stepanenko, S., Shvydia, V., Kalinichenko, R., Tverdokhlib, I., & Polievoda, Y. (2024). The usage of the elemental base of the vibratory mill with the spatial circulation movement of material to create drying rig. *Przegląd Elektrotechniczny*, 100(3), 232–237. <https://doi.org/10.15199/48.2024.03.41>
- Spirin, A., Borysiuk, D., Tsurkan, O., Tverdokhlib, I., Veselovska, N., & Edl, M. (2023). Ways of intensification of grass seed production. *Journal of Engineering Sciences*, 10(1), F11–F19. [https://doi.org/10.21272/jes.2023.10\(1\).f3](https://doi.org/10.21272/jes.2023.10(1).f3)
- Tokarchuk, O., Mytko, M., Burlaka, S., Zozulyak, I., & Stadnik, M. (2025). Comparison of technological operations in processing alfalfa hay in terms of their impact on forage quality and quantity. *Technology Audit and Production Reserves*, 2/3(82), 43–51. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.326047>
- Kaletnik, H., Yaropud, V., Polievoda, Y., Solona, O., Babyn, I., & Tverdokhlib, I. (2024). Study of the process of active-ventilation drying of legume grasses' fractional processing products. *Przegląd Elektrotechniczny*, 100(2), 156–163. <https://doi.org/10.15199/48.2024.02.32>
- Kalinichenko, R. A., & Voitiuk, V. D. (2017). Matematychnе modeliuвання teplomasoobminnykh protsesiv vysokotemperaturnoi termoobrobky zernovykh materialiv. *Tekhnika ta enerhetyka*, 275, 59–65.
- Spirin, A., Kupchuk, I., Tverdokhlib, I., Polievoda, Y., Kovalova, K., & Dmytrenko, V. (2022). Substantiation of modes of drying alfalfa pulp by active ventilation in a laboratory electric dryer. *Przegląd Elektrotechniczny*, 98(5), 11–15. <https://doi.org/10.15199/48.2022.05.02>
- Kaletnik, H. M., Yaropud, V. M., & Polievoda, Y. A. (2023). Chyselne modeliuвання protsesu sushinnia aktyvnym ventyliuvanniam produktiv fraktsiinoi pererobky bobovykh trav v konvektyvni strichkovii sushartsi. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*, 2(121), 5–15. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2023-2-1>
- Bandura, V., Kalinichenko, R., Kotov, B., & Spirin, A. (2018). Theoretical rationale and identification of heat and mass transfer processes in vibration dryers with IR-energy supply. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 94(4), 50–58.
- Kotov, B. I., Stepanenko, S. P., & Kalinichenko, R. A. (2017). Kontseptualni osnovy stvorennia tekhnichnykh zasobiv pervynnoi obrobky zerna v umovakh hospodarstv APK. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn*, 47(1), 104–114.
- Baranovskyi, V., Spirin, A., Tverdokhlib, I., & Volynets, Ye. (2025). Modeling of drying processes of alfalfa processed products taking into account equilibrium moisture content. *Visnyk Kremenchutskoho Natsionalnoho Universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho*, 4(153), 347–352. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.4.40>
- Spirin, A. V., Derkach, V. V., & Korobko, M. M. (2019). *Obgruntuvannia tekhnolohii ta rezhymnykh parametriv resursozberihaiuchoho protsesu pidbyrannia sina*. Kyiv: Komprint.
- Paziuk, V., Snezhkin, Y., Dmytrenko, N., Ivanov, S., Tokarchuk, O., & Kupchuk, I. (2022). Thermal and physical properties and heat-mass transfer processes of drying pumpkin seeds. *Przegląd Elektrotechniczny*, 98(7), 154–157. <https://doi.org/10.15199/48.2022.07.25>
- Baranovskyi, V. M., Burlaka, S. A., Kupchuk, I. M., & Boretska, T. Y. (2025). Vplyv ultrafioletovykh lamp na mikrobiolohichnu chystotu kormiv pid chas sushinnia. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*, 2(117), 110–116. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2025-2-13>
- Lomach, S. M. (2020). *Teoriia planuvannia eksperymentiv. Vykonnannia rozrakhunkovo-hrafichnoi roboty*. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho.
- Matviienko, S. M. (2019).



Vdoskonalennia metodu vyznachennia skladu rehovyny za yikh teploprovodnistiu [Abstract of PhD dissertation]. Kyiv.

21. Solona, O., Spirin, A., Zamrii, M., Tverdokhlib, I., Polievoda, Y., & Kovalova, K. (2025). Determination of the dependence of the physico-mechanical properties of alfalfa seed pods on moisture content. *Technology Audit and Production Reserves*, 3/3(83), 84–90. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.331286>

INVESTIGATION OF THE PHYSICO-MECHANICAL AND THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF ALFALFA SEED MATERIAL

The paper presents the results of theoretical and experimental studies aimed at improving the efficiency of the drying process of alfalfa seed mass at the stationary stage of post-harvest processing. It has been established that, to ensure high-quality threshing and separation operations, the seed mixture must be dried to a moisture content of 19-21%, whereas it arrives from the field with a moisture content of 35-55%, which determines the necessity and high energy intensity of the drying operation. Alfalfa pods containing seeds were identified as the main object of research, as the key component of the seed mass that has the greatest influence on the preservation of sowing qualities.

As a result of experimental investigations, relationships between the density of alfalfa pods and their moisture content were obtained, which made it possible to refine the initial data for heat and mass transfer calculations. The maximum permissible heating temperatures of alfalfa pods

were determined depending on their initial moisture content and drying exposure time. It was established that an increase in material moisture content significantly reduces the allowable heating temperature, while the effect of moisture content is much more pronounced than that of thermal exposure duration. An analytical dependence was obtained that can be used for the practical selection of drying regimes in order to prevent a decrease in seed germination.

The thermophysical characteristics of alfalfa pods-specific heat capacity, thermal conductivity, and thermal diffusivity-were experimentally determined, and their variation as a function of material moisture content was established. It was shown that with increasing moisture content, the specific heat capacity and thermal conductivity of the pods increase, whereas thermal diffusivity exhibits a characteristic inflection in the moisture range of 30–35%, which is associated with a change in the form of moisture binding within the material. The obtained results confirm the expediency of considering moisture content as a determining parameter in the mathematical modeling of drying processes.

The practical significance of the study lies in the fact that the established experimental relationships and limiting temperature regimes can be used to substantiate dryer design parameters and to optimize technological drying regimes for alfalfa seed mass, ensuring reduced energy consumption and preservation of high sowing qualities of seeds.

Keywords: alfalfa seed mass, thermal conductivity, specific heat capacity, thermal diffusivity, density, convective drying.

Відомості про автора

Замрій Михайло Анатолійович – доктор філософії з галузевого машинобудування, старший викладач кафедри охорони праці та біотехнічних систем у тваринництві Вінницького національного аграрного університету. Службова адреса: м. Вінниця, вул. Сонячна 3, ВНАУ 21008, <https://orcid.org/0000-0002-9433-6714>).

Zamrii Mykhailo – Doctor of Philosophy in Industrial Mechanical Engineering, Senior Lecturer at the Department of Labor Protection and Biotechnical Systems in Animal Husbandry of Vinnytsia National Agrarian University. Office address: Vinnytsia, Sonyachna St. 3, VNAU 21008, <https://orcid.org/0000-0002-9433-6714>).

Стаття надійшла 10.02.2026

Стаття прийнята 19.02.2026

Опубліковано 17.04.2026