

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ЗАМРІЙ МИХАЙЛО АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 631.365(043.3)

ДИСЕРТАЦІЯ

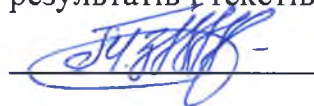
ОБґРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА РЕЖИМІВ РОБОТИ ОБЛАДНАННЯ
ДЛЯ СУШІННЯ НАСІННЄВОЇ МАСИ ЛЮЦЕРНИ

133 – Галузеве машинобудування

13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття ступеня доктора філософії.

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

 - М.А. Замрій

Науковий керівник:

Солоня Олена Василівна,

кандидат технічних наук, доцент.

Вінниця – 2025

АНОТАЦІЯ

Замрій М.А. Обґрунтування параметрів та режимів роботи обладнання для сушіння насіннєвої маси люцерни. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування. Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця, 2025 р.

У дисертаційній роботі вирішено нове наукове завдання підвищення технологічної ефективності процесу сушіння насіннєвої маси люцерни шляхом обґрунтування параметрів та режимів роботи сушильної установки.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та завдання дослідження для її реалізації. Описано наукову новизну, практичне значення отриманих результатів та наведено особистий внесок здобувача у проведених дослідженнях. Наведено відомості щодо апробації та опублікування результатів наукових досліджень, структуру та обсяг дисертаційного дослідження.

Метою дослідження є підвищення ефективності процесу сушіння насіннєвої маси люцерни шляхом обґрунтування параметрів та режимів роботи сушильної установки.

Реалізація цієї мети передбачала наукове розв'язання наступних завдань:

1. На основі аналізу відомих технологій та обладнання для сушіння насіннєвої маси люцерни розроблено схему сушильної установки.

2. На аналітичному рівні досліджено технологічний процес сушіння насіннєвої маси люцерни в багат шаровому просторі:

- розроблено математичні моделі, які описують функціональну зміну постійної та спадаючої швидкості сушіння насіннєвої маси люцерни залежно від параметрів процесу;

- розроблено залежності для визначення часу та питомої витрати повітря в процесі сушіння насіннєвої маси люцерни залежно від параметрів теплоносія;

- досліджено функціональну зміну опору повітря в шарі насінневої маси люцерни залежно від параметрів процесу сушіння.

3. Проведено лабораторні експериментальні дослідження з визначення фізико-механічних характеристик і теплофізичних властивостей насінневої маси люцерни.

4. Розроблено емпіричні моделі, які описують функціональну зміну:

- вологовмісту в шарі насінневої маси люцерни залежно від зміни висоти шару та часу сушіння;

- втрати тиску повітря в шарі насінневої маси люцерни залежно від зміни висоти шару, швидкості повітряного потоку, коефіцієнта пористості шару;

- швидкості сушіння насінневої маси люцерни залежно від зміни висоти шару, швидкості повітряного потоку.

5. Проведено перевірку у виробничих умовах результатів експериментальних досліджень сушильного обладнання та визначено ефективність його застосування.

Об'єкт дослідження – технологічний процес сушіння насінневої маси люцерни в сушильній установці.

Предмет досліджень – закономірності впливу режимів роботи сушильної установки на кінетику сушіння насінневої маси люцерни.

На основі проведеного комплексу наукових досліджень обґрунтовано основні параметри процесу сушіння насінневої маси люцерни в багат шаровому просторі сушильної установки.

Вперше розроблено: детерміновані математичні моделі, які описують функціональну зміну постійної та спадаючої швидкості сушіння насінневої маси люцерни залежно від параметрів процесу; емпіричну модель функціональної зміни вологовмісту в шарі насінневої маси люцерни залежно від зміни висоти шару та часу сушіння.

Набули подальшого розвитку: залежність, яка описує функціональну зміну втрати тиску повітря в шарі насінневої маси люцерни залежно від параметрів процесу; залежності для визначення часу та питомої витрати повітря

в процесі сушіння насіннєвої маси люцерни залежно від параметрів теплоносія.

Уточнено емпіричні моделі, які описують функціональну зміну: втрати тиску повітря в шарі насіннєвої маси люцерни залежно від зміни висоти шару, швидкості повітряного потоку, коефіцієнт пористості шару; швидкості сушіння насіннєвої маси люцерни залежно від зміни висоти шару, швидкості повітряного потоку.

У першому розділі наведено аналіз способів сушіння насіннєвої маси люцерни на стаціонарі, конструкцій робочих органів сушильних установок та наведено аналіз відомих результатів теоретично-експериментальних досліджень процесів сушіння.

У другому розділі наведено опис розробленої сушильної установки та теоретичний аналіз технологічних процесів сушіння насіннєвої маси люцерни.

Принципова схема сушильної установки містить: електрокалорифер, тепловентилятор, зволожувач, змішувальну камеру, горизонтальний нагнітальний повітропровід із вимірювальною діафрагмою та шиберною заслінкою, вертикальний нагнітальний повітропровід, перехідник, вертикальну камеру з контейнерами для розміщення насіннєвої маси люцерни, вимірювальну камеру та заглушку. Контейнери для розміщення зразків насіннєвої маси люцерни встановлені у вертикальній камері та мають форму прямого циліндра. Основа, або дно кожного контейнера, має круглі отвори, діаметр яких становить 3 мм.

На прямолінійних ділянках нагнітальних повітропроводів вмонтовано шиберні заслінки, які дають змогу встановлювати та підтримувати задану витрату повітря у вертикальній камері. Для контролю величини витрати повітря на прямолінійних ділянках повітропроводів є діафрагми і термометри.

Подача повітря у сушильну камеру відбувається шляхом його нагнітання від тепловентилятора зі змішувальної камери через горизонтальний повітропровід.

За результатами теоретичного аналізу розроблено:

- аналітичну математичну модель, яка описує функціональну зміну

середньої швидкості сушіння відносного шару насіннєвої маси люцерни на першому етапі залежно від основних параметрів процесу: швидкості руху повітряного потоку в шарі, висоти шару, термодинамічного критерію Гукмана, питомої витрати повітря, яке продувається через шар, початкового сушильного потенціалу повітря;

- рівняння, що дає змогу проаналізувати процес сушіння насіннєвої маси люцерни у щільному шарі для другого етапу залежно від параметрів шару і теплоносія з урахуванням властивостей матеріалів як агентів сушіння;

- залежності для визначення загального часу та питомої витрати повітря процесу сушіння насіннєвої маси люцерни.

Встановлено, що середня швидкість сушіння насіннєвої маси люцерни на першому етапі змінюється в межах від 0,06 до 1,05 кг вол./кг абс. сух. реч./год за зміни питомої витрати повітря від $5,0 \cdot 10^{-2}$ до $25,0 \cdot 10^{-2}$ м³/с та початкового сушильного потенціалу повітря від $2,0 \cdot 10^{-3}$ до $10,0 \cdot 10^{-3}$ кг вол./кг абс. сух. пов. та змінюється в межах від 0,1 до 2,4 кг вол./кг абс. сух. реч./год за зміни швидкості руху потоку повітря від 0,2 до 1,2 м/с та висоти шару від 0,2 до 1,4 м; аналітична зміна втрати тиску повітря, яке продувається через шар насіннєвої маси люцерни коливається в межах від 0,13 до 11,0 Па залежно від зміни висоти шару від 0,2 до 1,4 м та швидкості повітряного потоку від 0,1 до 1,3 м/с.

У третьому розділі наведено програму, опис експериментальних установок і методику проведення експериментальних досліджень.

1. Спроектовано та виготовлено експериментальні лабораторні установки.

2. Визначено основні характеристики та властивості компонентів насіннєвої маси люцерни як чинники процесу сушіння:

- фізико-механічні характеристики: коефіцієнт пористості насіннєвої маси люцерни, гранично допустиму температуру нагрівання бобів люцерни, щільність бобів люцерни;

- теплофізичні властивості: теплоємність, теплопровідність, температуропровідність.

3. Визначено параметри процесу сушіння насіннєвої маси люцерни:

вологоміст насіннєвої маси люцерни, втрати тиску повітря в шарі насіннєвої маси люцерни, швидкості сушіння насіннєвої маси люцерни.

4. Проведено порівняльні дослідження показників якості роботи сушильної установки у виробничих умовах.

Було розроблено загальну структурну схему проведення експериментальних досліджень як об'єкта моделювання, яку побудовано за методом кібернетичного поняття «чорної скрині».

Реалізацію експериментальних досліджень проведено з застосуванням таких експериментальних установок: для визначення фізико-механічних властивостей насіннєвої маси люцерни застосовували лабораторну установку; для проведення експериментальних досліджень з визначення вологомісту насіннєвої маси люцерни, втрати тиску повітря в шарі насіннєвої маси люцерни, швидкості сушіння насіннєвої маси люцерни та проведення порівняльних досліджень показників якості сушіння насіннєвої маси люцерни у виробничих умовах застосовували розроблену сушильну установку.

У четвертому розділі наведено результати експериментальних досліджень з визначення фізико-механічних і теплофізичних властивостей насіннєвої маси люцерни та з визначення основних показників процесу сушіння насіннєвої маси люцерни в шарі.

Встановлено, що за відповідної зміни густини шару в межах від 140 до 420 кг/м³ та вологомісту в шарі насіннєвої маси люцерни від 0,2 до 1,6 кг вол./кг абс. сух. реч., функціональні апроксимовані значення коефіцієнта пористості насіннєвої маси люцерни знаходяться в діапазоні від 0,09 до 0,78., причому за збільшення вологості коефіцієнт пористості при значенні густини шару 1,6, 0,9 і 0,2 кг/м³, зменшується, відповідно, в 1,9; 2,4 і 7,3 раза.

За зміни часу нагрівання бобів від 10 до 30 хв та початкової вологості бобів люцерни від 30% до 50%, апроксимовані значення гранично допустимої температури нагрівання бобів люцерни знаходяться в діапазоні від 49 до 57 °С, а щільності бобів – від 940,1 до 1086,1 кг/м³.

На функціональну зміну щільності бобів люцерни більш вагомий вплив

має зміна часу нагрівання – збільшення часу нагрівання від 10 до 30 хв призводить до зменшення щільності бобів люцерни в середньому на 112 кг/м³, або в середньому на 10%.

Встановлено, що за зміни часу нагрівання насіння люцерни від 7 до 18 хв та початкової вологості насіння люцерни від 15% до 45%, функціональні апроксимовані значення температури нагрівання насіння люцерни знаходяться в діапазоні від 16,0 °C до 53,8 °C.

За зміни початкової вологості насіння люцерни в межах зміни фактора від 15% до 45% температури нагрівання насіння люцерни збільшується за часу нагрівання насіння люцерни рівного 4, 11, 18 хв, відповідно, 2,1 раза – від 16 °C до 34,8 °C; в 1,4 раза – від 35,4 °C до 49,8 °C; в 1,2 раза – від 44,2 °C до 53,8 °C.

Встановлено, що за відповідної зміни висоти шару від 0,3 до 1,5 м та зміни часу сушіння шару насінневої маси люцерни від 2 до 12 год значення вологовмісту в шарі насінневої маси люцерни знаходяться в діапазоні від 0,15 до 2,39 кг вол./кг абс. сух. реч.

На основі аналізу побудованих поверхонь відгуку та їх двомірних перерізів встановлено, що у межах зміни вхідних факторів, тобто висоти шару від 0,3 до 1,5 м, швидкості руху повітря від 0,2 до 1,2 м/с, коефіцієнта пористості від 0,56 до 0,66 апроксимовані значення втрати тиску повітря під час сушіння насінневої маси люцерни змінюються в межах від 0,8 до 12,1 Па, а розбіжність теоретичних і експериментальних значень становить 12...18%.

Зі збільшенням висота шару від 0,3 до 1,5 м швидкість сушіння шару насінневої маси люцерни зменшується приблизно в 7 та 3,5 раза, а збільшення швидкості руху повітря від 0,2 до 1,2 м/с призводить до збільшення середньої швидкості сушіння шару насінневої маси люцерни приблизно в 2 та 4 рази, Розбіжність теоретичних і експериментальних значень становить 5...15%.

За результатами порівняльних досліджень встановлено, що додатковий збір насіння з висушеної насінневої маси люцерни з застосуванням розробленої сушильної установки становить 0,48 ц/га, а з застосуванням базової сушильної установки – 0,23 ц/га, тобто валовий збір чистого насіння люцерни

збільшується приблизно в 2,1 раза.

У п'ятому розділі запропоновані рекомендації виробництву для вибору раціональних параметрів і режимів роботи сушильного обладнання і розрахований економічний ефект від застосування розробленої сушильної установки.

Розраховані показники економічної ефективності підтверджують доцільність використання розробленої сушильної установки в виробничих умовах – економічний ефект на 1 кг висушеної насіннєвої маси 2,46 грн/кг.

Ключові слова: насіння люцерни, люцерна, сушіння, активне вентилявання, параметри, сушарка, вологовміст, тепло і масообмін, теплоємність, теплопровідність, щільність, вологість зерна, показники якості, енергетичні параметри.

ABSTRACT

Zamrii M.A. Justification of the Parameters and Operating Modes of Equipment for Drying Alfalfa Seed Material. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript. Qualification scientific work with the manuscript copyright.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 13 Mechanical Engineering, specialty 133 Industrial Machinery Engineering. Vinnytsia National Agrarian University, Vinnytsia, 2025.

The dissertation solves a new scientific problem of increasing the technological efficiency of the process of drying alfalfa seed mass without separating the leaf-stem mass by developing a design and substantiating of rational parameters and operating modes of the drying equipment.

The introduction substantiates the relevance of the topic, formulates the goal and objectives of the research for its implementation. The scientific novelty, practical significance of the obtained results are described and the personal contribution of the applicant to the conducted research is given. Information on the testing and publication of the results of the scientific research, the structure and scope of the

dissertation research are provided.

The purpose of the research is to increase the efficiency of the drying process of alfalfa seed mass by substantiating the parameters and operating modes of the drying unit.

The implementation of this goal involves the scientific solution of the following tasks:

1. To develop a diagram of a drying plant, based on the analysis of the known technologies and equipment for drying alfalfa seed mass,

2. At the analytical level, to investigate the technological process of drying alfalfa seed mass in a multilayer space without separating the leaf-stem mass:

- to develop mathematical models that describe the functional change in the constant and decreasing drying rate of alfalfa seed mass depending on the process parameters;

- to develop dependencies for determining the time and specific air flow rate in the drying process of alfalfa seed mass depending on the parameters of the coolant;

- to investigate the functional change in air resistance in the layer of alfalfa seed mass depending on the parameters of the drying process.

3. To conduct laboratory experimental studies to determine the physical and mechanical characteristics and thermophysical properties of alfalfa seed mass.

4. To develop empirical models that describe the functional change in:

- moisture content in the alfalfa seed mass layer depending on the change in layer height and drying time;

- air pressure losses in the alfalfa seed mass layer depending on the change in layer height, air flow velocity, layer porosity coefficient;

- drying rate of alfalfa seed mass depending on the change in layer height, air flow velocity.

5. To verify in production conditions the results of the experimental research on drying equipment and determine the effectiveness of its use.

The object of the research is the technological process of drying alfalfa seed mass in a drying unit.

The subject of the research is the regularities of the influence of the operating modes of the drying unit on the kinetics of drying of alfalfa seed mass.

Based on the conducted complex of scientific research, the main parameters of the process of drying alfalfa seed mass in the multilayer space of the drying unit without separation of the leaf-stem mass were substantiated.

For the first time, the following tasks were developed: deterministic mathematical models that describe the functional change in the constant and decreasing drying rate of alfalfa seed mass depending on the process parameters; an empirical model of the functional change in moisture content in the alfalfa seed mass layer without separation of the leaf-stem mass depending on the change in the layer height and drying time.

Further development was made in the direction of: a dependence that describes the functional change in the air pressure loss in the alfalfa seed mass layer depending on the process parameters; dependencies for determining the time and specific air flow rate in the drying process of alfalfa seed mass depending on the coolant parameters.

Empirical models describing the functional change are specified: air pressure losses in the alfalfa seed mass layer depending on the change in layer height, air flow velocity, layer porosity coefficient; alfalfa seed mass drying rate depending on the change in layer height, air flow velocity.

The first section provides an analysis of the methods of drying alfalfa seed mass in a stationary facility, the designs of the working bodies of drying plants, and an analysis of the known results of theoretical and experimental studies of drying processes.

The second section provides a description of the developed drying plant and a theoretical analysis of the technological processes of drying alfalfa seed mass without separating the leaf-stem mass.

The schematic diagram of the drying plant contains: an electric heater, a heat fan, a humidifier, a mixing chamber, a horizontal supply air duct with a measuring diaphragm and a gate valve, a vertical supply air duct, an adapter, a vertical chamber

with containers 11 for placing alfalfa seed mass, a measuring chamber and a plug. The sieves for placing alfalfa seed mass samples are installed in a vertical chamber and have the shape of a straight cylinder. The base, or bottom, of the each container has round holes, the diameter of which is 3 mm.

On the straight sections of the supply air ducts, slide valves are installed, which allow you to set and maintain a given air flow rate in the vertical chamber. In order to control the air flow rate on the straight sections of the air ducts, there are diaphragms and thermometers.

Air is supplied to the drying chamber by being forced by the heat of the fan from the mixing chamber through a horizontal air duct.

Based on the results of theoretical analysis, the following tasks were developed:

- an analytical mathematical model that describes the functional change in the average drying rate of the relative layer of alfalfa seed mass at the first stage, depending on the main process parameters: the speed of the air flow in the layer, the height of the layer, the thermodynamic Hookman criterion, the specific flow rate of air blown through the layer, the initial drying potential of the air;
- an equation that allows to analyze the drying process of alfalfa seed mass in a dense layer for the second stage depending on the parameters of the layer and the coolant, taking into account the properties of materials as drying agents;
- dependencies for determining the total time and specific air flow rate of the drying process of alfalfa seed mass without separation of the leaf-stem mass.

It was established that the average drying rate of alfalfa seed mass at the first stage varies from 0.06 to 1.05 (kg vol./kg abs. dry matters) with changes in the specific air flow rate from $5.0 \cdot 10^{-2}$ to $25.0 \cdot 10^{-2}$ m³/s and the initial air drying potential from $2.0 \cdot 10^{-3}$ to $10.0 \cdot 10^{-3}$ kg vol./kg abs. dry matters and varies from 0.1 to 2.4 (kg vol./kg abs. dry matters) with changes in the air flow velocity from 0.2 to 1.2 m/s and the layer height from 0.2 to 1.4 m. The analytical change in the pressure loss of air blown through a layer of alfalfa seed mass ranges from 0.13 to 11.0 Pa depending on the change in layer height from 0.2 to 1.4 m and air flow velocity from 0.1 to 1.3 m/s.

The third section provides a program, a description of the experimental setups and the methodology for conducting experimental research.

1. Design and manufacture experimental laboratory setups.
2. Determine the main characteristics and properties of the components of alfalfa seed mass as factors in the drying process without separation of the leaf-stem mass:
 - physical and mechanical characteristics: porosity coefficient of alfalfa seed mass; maximum permissible heating temperature of alfalfa beans; density of alfalfa beans;
 - thermophysical properties: heat capacity; thermal conductivity; thermal diffusivity.
3. Determine the parameters of the drying process of alfalfa seed mass: moisture content of alfalfa seed mass; air pressure loss in the layer of alfalfa seed mass; drying speed of alfalfa seed mass.
4. Conduct comparative studies of the quality indicators of the drying plant in production conditions.

A general structural scheme for conducting experimental research as a modeling object was developed, which was built using the method of the cybernetic concept of a "black box".

The implementation of experimental research was carried out using the following experimental setups: a laboratory setup was used to determine the physical and mechanical properties of alfalfa seed mass; a drying setup was used to conduct experimental research to determine the moisture content of alfalfa seed mass, air pressure loss in the alfalfa seed mass layer, the drying rate of alfalfa seed mass, and to conduct comparative studies of the quality indicators of alfalfa seed mass drying in production conditions.

The fourth section presents the results of experimental studies on determining the physical and mechanical characteristics and thermophysical properties of alfalfa seed mass and on determining the main indicators of the drying process of alfalfa seed mass in a layer without separation of the leaf-stem mass.

It was established that with a corresponding change in the layer density within the range from 140 to 420 kg/m³ and the moisture content in the layer of alfalfa seed mass

from 0.2 to 1.6 kg vol./kg abs. dry matter, the functional approximated values of the porosity coefficient of alfalfa seed mass without separation of the leaf-stem mass from it are in the range from 0.09 to 0.78., and with an increase in humidity, the porosity coefficient at a layer density of 1.6, 0.9 and 0.2 kg/m³ decreases, respectively, by 1.9; 2.4 and 7.3 times.

With changes in the heating time of beans from 10 to 30 min and the initial humidity of alfalfa beans from 30% to 50%., the approximate values of the maximum permissible heating temperature of alfalfa beans are in the range from 49 to 57°C, and the density of beans - from 940.1 to 1086.1 kg/m³.

The functional change in the density of alfalfa beans is more significantly affected by the change in the heating time - an increase in the heating time from 10 to 30 min leads to a decrease in the density of alfalfa beans by an average of 112 kg/m³, or by an average of 10%.

It was found that when the heating time of alfalfa seeds changes from 7 to 18 min and the initial moisture content of alfalfa seeds from 15% to 45%, the functional approximated values of the heating temperature of alfalfa seeds are in the range from 16.0 °C to 53.8 °C.

When the initial moisture content of alfalfa seeds changes within the range of a factor change from 15% to 45%, the heating temperature of alfalfa seeds increases with a heating time of alfalfa seeds equal to 4, 11, 18 min, respectively, by 2.1 times - from 16 °C to 34.8 °C; by 1.4 times - from 35.4 °C to 49.8 °C; by 1.2 times - from 44.2 °C to 53.8 °C.

It was established that with a corresponding change in the height of the layer from 0.3 to 1.5 m and a change in the drying time of the alfalfa seed mass layer from 2 to 12 h, the values of the moisture content in the alfalfa seed mass layer, provided that the leaf-stem mass is separated from it, are in the range from 0.15 to 2.39 kg vol./kg abs. dry sum.

Based on the analysis of the constructed response surfaces and their two-dimensional cross-sections, it was established that within the limits of changing the input factors, i.e., the layer height from 0.3 to 1.5 m, the air velocity from 0.2 to 1.2 m/s, the porosity coefficient from 0.56 to 0.66, the approximate values of air pressure loss during drying of alfalfa seed mass vary within the range from 0.8 to 12.1 Pa, and the discrepancy

between theoretical and experimental values is 12...18%.

With an increase in the layer height from 0.3 to 1.5 m, the drying rate of the alfalfa seed mass layer decreases by approximately 7 and 3.5 times, and an increase in the air velocity from 0.2 to 1.2 m/s leads to an increase in the average drying rate of the alfalfa seed mass layer by approximately 2 and 4 times. The discrepancy between theoretical and experimental values is 5...15%.

According to the results of comparative studies, it was found that the additional collection of seeds from the dried alfalfa seed mass using the developed drying unit is 0.48 c/ha, and using the basic drying unit - 0.23 c/ha, i.e. the gross collection of pure alfalfa seeds increases by approximately 2.1 times.

The fifth section offers recommendations for production for choosing rational parameters and operating modes of drying equipment and calculates the economic effect of using the developed drying unit.

The calculated economic efficiency indicators confirm the feasibility of using the developed drying unit in production conditions - the economic effect per 1 kg of dried seed mass is 2.46 UAH/kg.

Key words: alfalfa seeds, alfalfa, drying, forced-air ventilation, parameters, dryer, moisture content, heat and mass transfer, specific heat capacity, thermal conductivity, density, grain moisture content, quality indicators, energy parameters.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні результати дисертаційної роботи

1. 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. (0,88 друк. арк., особистий внесок: визначено витрати повітря для систем активного вентилявання посівного матеріалу, що враховано в формуванні математичної моделі для інтенсифікації параметрів за даними експериментів – 0,62 друк. арк.) (**Scopus**).
2. 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. (1,26 друк. арк., особистий внесок: визначено властивості основних компонентів насіннєвої маси люцерни та побудовано залежності теплофізичних характеристик. – 1,1 друк. арк.) (**Scopus**).
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 (0,76 друк. арк., особистий внесок: наведено аналіз способів сушіння насіннєвої маси люцерни та запропоновано спосіб модернізації технології для нормалізації вологості пожнивної суміші при обробці на стаціонарі – 0,69 друк. арк.) (**Фахове видання України**).
4. **Замрій М.А.** Визначення швидкості сушіння насіннєвої маси люцерни в нерухомому шарі. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2025. № 2(117). С. 46–50. DOI: 10.37128/2306-8744-2025-2-5. (**Фахове видання України**).

Об'єкти права інтелектуальної власності

5. **Замрій М.А.**, Солоня О.В., Волинець Є.О. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Ескізне креслення «Принципова схема пристрою для сушіння пожнивної суміші люцерни». Свідоцтво № 141367 від 02.12.2025; заяв. № с202508622 від 07.10.2025.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертаційної роботи

6. Солон О.В., **Замрій М.А.** Дослідження оптимальної конструкції обладнання для сушіння поживної суміші насінників трав : матеріали Міжн. наук. інтернет-конф. «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення». м. Тернопіль – м. Переворськ, 6-7 лютого 2023 р. С. 186-190.

7. **Замрій М.А.** Дослідження втрати тиску повітря в шарі насінневої маси люцерни : тези доп. XXVI Міжн. наук. конф. «Сучасні проблеми землеробської механіки». Київ, 17-18 жовтня 2025 р. С. 363–366.

8. **Замрій М.А.**, Солон О.В. Обґрунтування параметрів сушильної установки для насінневої маси люцерни : тези доп. IV Всеукр.ї наук.-практ. конф. молодих вчених «Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва». Дніпро, ДДАЕУ, 21 листопада 2025 р. С. 132–135.

Наукові праці, які додатково доповнюють результати дисертаційної роботи

9. Гончарук І.В., Полевода Ю.А., Токарчук О.А., **Замрій М.А.**, Рева В.Ю. Інфрачервона сушарка. Патент України на корисну модель № 153618, Україна. МПК F26B 3/02 (2006.01) F26B 17/26 (2006.01); заявник та патентовласник Вінницький національний аграрний університет : номер заявки а 2021 01002 (22); дата подання заявки: 01.03.2021. Опубл. 26.07.2023, Бюл. № 30. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1749973/>

10. Купчук І. М., Зубар І. В., Онищук Ю. В., Дідик А. М., **Замрій М. А.** Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Harvesting Cereals Optimization v. 1.2» («Harvesting cereals v. 1.2») : Свідоцтво № 103729 від 05.04.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 64. 2021. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1616550/>

11. Ольшанський В.П., Сліпченко М.В., Спольнік О.І., **Замрій М.А.** Вільні коливання осцилятора за наявності квадратичного в'язкого опору та сухого тертя. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2020. № 2(97). С. 33–40. DOI: 10.37128/2306-8744-2020-2-4. (Здобувачем наведено аналіз властивостей сухої зернової суміші). (Фахове видання України).

12. Омелянов О.М., **Замрій М.А.** Напрямки підвищення роботи вібраційних машин. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2020. № 4(99). С. 49-58. DOI: 10.37128/2306-8744-2020-4-6. (Здобувачем запропоновано метод побудови математичних моделей динамічного стану технологічних машин). **(Фахове видання України).**

13. Komakha V., Tokarchuk O., **Zamrii M.** Investigation of the mechanical and technological properties of fodder crops to determine the parameters of the working bodies of mower conditioners and optimal modes of their operation. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2020. №1(108). С. 14–21. DOI: 10.37128/2520-6168-2020-1-2. (Здобувачем запропоновано метод математичного моделювання виявлення зв'язку довжини стебла люцерни до її стійкості). **(Фахове видання України).**

14. Kupchuk I., Tokarchuk O., Hontar V., **Zamrii M.** The kinematic analysis of a vibration crusher for feed grain. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 1(100). С. 32–38. DOI: 10.37128/2306-8744-2021-1-4. (Здобувачем визначено закономірності зміни лінійної швидкості центрів маси основних вузлів агрегату). **(Фахове видання України).**

15. Спірін А. В., Твердохліб І. В., Замрій М. А. Визначення режиму функціонування відцентрово-гравітаційного сепаратора теркового пристрою. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 3(102). С. 55–62. DOI: 10.37128/2306-8744-2021-3-7. (Здобувачем запропоновано метод визначення траєкторії переміщення насінин повздовж поверхні решета). **(Фахове видання України).**

16. Степаненко С.П., Котов Б.І., Рудь А.В., Замрій М.А. Теоретичні дослідження процесу руху зернового матеріалу на поверхні ступінчастого віброживильника. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. № 2 (105). С. 25–32. DOI: 10.37128/2306-8744-2022-2-3. (Здобувачем побудовано графічні залежності траєкторії руху зернівок на поверхні віброживильника з різним розміром). **(Фахове видання України).**

17. Степаненко С.П., Котов Б.І., Волик Д.А., Замрій М.А. Математичне моделювання процесу переміщення зернового матеріалу на поверхні

безпровального решета вібропневмоімпульсного сепаратора. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 3 (110). С. 22-34. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-3-3. (Здобувачем встановлено, що при поділу зернового матеріалу на фракції для збільшення продуктивності технічного засобу необхідно підвищити силу пульсуючого повітряного потоку, сили тертя та бічний тиск). **(Фахове видання України)**.

18. Slipchenko M., Polievoda Y., Zamrii M., Symonik B. Study of grain flow in a cylindrical vibrating sieve. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2024. № 3 (114). С. 27-33. DOI: 10.37128/2306-8744-2024-3-4. (Здобувачем було розроблено та протестовано наближені формули для розрахунку основних характеристик зернопотоку на вертикальному циліндричному віброрешеті). **(Фахове видання України)**.

ЗМІСТ

ВСТУП	21
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ...	26
1.1. Сучасні технології збирання насінників люцерни	26
1.2. Аналіз конструктивних особливостей обладнання для сушіння насіннєвої маси люцерни	30
1.3. Аналіз теоретично-експериментальних досліджень процесів сушіння насіннєвої маси люцерни	36
1.4. Висновки, мета та завдання дослідження	50
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ СУШІННЯ НАСІННЄВОЇ МАСИ ЛЮЦЕРНИ	53
2.1. Будова та процес роботи розробленої сушильної установки	53
2.2. Математична модель швидкості сушіння насіннєвої маси люцерни	56
2.3. Визначення часу та питомої витрати повітря при сушінні насіннєвої маси люцерни	66
2.4. Дослідження втрати тиску повітря в шарі насіннєвої маси люцерни	69
2.5. Висновки до розділу 2.....	76
РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	79
3.1. Програма, завдання та характеристика експериментальних установок	79
3.2. Методика проведення експериментальних досліджень з визначення фізико-механічних характеристик і теплофізичних властивостей насіннєвої маси люцерни	85
3.3. Методика проведення експериментальних досліджень процесу сушіння насіннєвої маси люцерни	89
3.4. Методика проведення порівняльних досліджень процесу сушіння насіннєвої маси люцерни у виробничих умовах	96

3.5. Висновки до розділу 3.....	97
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ	
ДОСЛІДЖЕНЬ	98
4.1. Результати експериментальних досліджень фізико-механічних характеристик і теплофізичних властивостей насіннєвої маси люцерни ...	98
4.2. Результати експериментальних досліджень процесу сушіння насіннєвої маси люцерни	119
4.2.1. Експериментальні дослідження вологовмісту в шарі насіннєвої маси люцерни	119
4.2.2. Експериментальні дослідження втрати тиску повітря в шарі насіннєвої маси люцерни	125
4.2.3. Експериментальні дослідження швидкості сушіння насіннєвої маси люцерни	134
4.3. Результати порівняльних досліджень процесу сушіння насіннєвої маси люцерни у виробничих умовах	139
4.4. Висновки до розділу 4.....	141
РОЗДІЛ 5. УЗАГАЛЬНЕНІ РЕЗУЛЬТАТИ ЕФЕКТИВНОСТІ	
ПРОЦЕСУ РОБОТИ СУШИЛЬНОЇ УСТАНОВКИ	144
5.1. Напрямки підвищення технологічної ефективності процесів сушіння насіннєвої маси люцерни	144
5.2. Впровадження результатів досліджень	145
5.3. Показники економічної ефективності використання розробленої сушильної установки	147
5.4. Висновки до розділу 5.....	151
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	153
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	155
ДОДАТКИ	169

ВСТУП

Актуальність дослідження. Для успішного вирішення післявоєнної продовольчої безпеки України передбачено в найближчий період значно поліпшити якість та збільшити кормову базу аграрного сектору галузі тваринництва [1].

З цією метою необхідно розширити посіви багаторічних трав насамперед таких як конюшина, тимофіївка та люцерна. Щоб домогтися значного збільшення площ під посівами цих культур, необхідно мати достатню кількість якісного насіння.

Існуючі технології збирання люцерни на насіння не забезпечують необхідних показників якості збирання. Безповоротні втрати насіння люцерни можуть становити до 30 % [2, 3]. Високими залишаються також якісні втрати насіння люцерни [4].

Викликано це тим, що в умовах кліматичної зони насіннєва маса люцерни під час збирання має підвищену вологість, яка навіть за порівняно невеликої вологості 18...20% дуже швидко призводить до її самонагрівання та значного зниження кондиційних показників [5].

Важливим резервом збільшення виробництва насіння люцерни є вдосконалення наявних технологій збирання та післязбиральної доробки насіннєвої маси люцерни на стаціонарі шляхом її сушіння у сушильних установках, що забезпечить додатковий обсяг зібраного насіння [6].

Однак режими сушіння насіннєвої маси люцерни в умовах підвищеної вологості ще недостатньо вивчені, а більшість господарств не забезпечені сушильним обладнанням. Існуючі технології сушіння та сушильне обладнання потребує подальшого вдосконалення [7, 8].

У зв'язку з цим, розробка нових сушильних установок для сушіння насіннєвої маси люцерни та дослідження впливу параметрів і режимів роботи обладнання для підвищення технологічної ефективності збирання люцерни є важливим науковим завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано у Вінницькому національному аграрному університеті, а основну частину одержаних результатів отримано в рамках виконання госпдоговірної та ініціативної науково-дослідних робіт: «Дослідження конструктивно-режимних параметрів енергоефективного обладнання для сушіння сільськогосподарських матеріалів» (№ РК 0122U201558, період виконання 15.11.2022-15.11.2023 рр.) та «Високоєфективне обладнання для здійснення масо- та теплообмінних процесів у харчовій та переробній галузі» (№ РК 0122U002098, період виконання 2022-2026 рр.).

Метою дослідження є підвищення ефективності процесу сушіння насінневої маси люцерни шляхом обґрунтування параметрів та режимів роботи сушильної установки.

Реалізація цієї мети передбачає наукове розв'язання таких **завдань**:

1. На основі аналізу відомих технологій та обладнання для сушіння насінневої маси люцерни розробити схему сушильної установки.

2. На аналітичному рівні дослідити технологічний процес сушіння насінневої маси люцерни в багат шаровому просторі:

- розробити математичні моделі, які описують функціональну зміну постійної та спадаючої швидкості сушіння насінневої маси люцерни залежно від параметрів процесу;

- розробити залежності для визначення часу та питомої витрати повітря в процесі сушіння насінневої маси люцерни залежно від параметрів теплоносія;

- дослідити функціональну зміну опору повітря в шарі насінневої маси люцерни залежно від параметрів процесу сушіння.

3. Провести лабораторні експериментальні дослідження з визначення фізико-механічних характеристик і теплофізичних властивостей насінневої маси люцерни.

4. Розробити емпіричні моделі, які описують функціональну зміну:

- вологовмісту в шарі насінневої маси люцерни залежно від зміни висоти шару та часу сушіння;

- втрати тиску повітря в шарі насінневої маси люцерни залежно від зміни

висоти шару, швидкості повітряного потоку, коефіцієнт пористості шару;

- швидкості сушіння насінневої маси люцерни залежно від зміни висоти шару, швидкості повітряного потоку.

5. Провести перевірку у виробничих умовах результатів експериментальних досліджень сушильного обладнання та визначити ефективність його застосування.

Об'єкт дослідження – технологічний процес сушіння насінневої маси люцерни в сушильній установці.

Предмет досліджень – закономірності впливу режимів роботи сушильної установки на кінетику сушіння насінневої маси люцерни.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження процесу сушіння насінневої маси люцерни в нерухомого шару базувалися на основі математичного моделювання технологічного процесу роботи сушильної установки з використанням основних положень теорії тепло- і масопереносу, теоретичної пневматики та вищої математики. Експериментальні дослідження макетного зразка сушильної установки проводили в лабораторних умовах, які реалізовано на основі застосування відомих положень методики планування та обробки факторних експериментів. Теоретичні розрахунки, статистичну обробку експериментального масиву даних та аналіз отриманих результатів проводили з застосуванням прикладного програмного забезпечення для персонального комп'ютера.

Наукова новизна отриманих результатів. На основі проведеного комплексу наукових досліджень обґрунтовано основні параметри процесу сушіння насінневої маси люцерни в багатошаровому просторі сушильної установки.

Уперше розроблено:

- детерміновані математичні моделі, які описують функціональну зміну постійної та спадаючої швидкості сушіння насінневої маси люцерни залежно від параметрів процесу сушіння;

- емпіричну модель функціональної зміни вологовмісту в шарі насінневої маси люцерни залежно від зміни висоти шару та часу сушіння.

Набули подальшого розвитку:

- залежність, яка описує функціональну зміну втрати тиску повітря в шарі насінневої маси люцерни залежно від параметрів процесу сушіння;

- залежності для визначення часу та питомої витрати повітря в процесі сушіння насіннєвої маси люцерни залежно від параметрів теплоносія.

Уточнено емпіричні моделі, які описують функціональну зміну:

- втрати тиску повітря в шарі насіннєвої маси люцерни залежно від зміни висоти шару, швидкості руху повітряного потоку, коефіцієнт пористості шару;
- швидкості сушіння насіннєвої маси люцерни залежно від зміни висоти шару, швидкості руху повітряного потоку.

Практичне значення отриманих результатів. Результати експериментальних та теоретичних досліджень процесу сушіння насіннєвої маси люцерни використовуються у навчальному процесі Вінницького національного аграрного університету при викладанні навчальної дисципліни «Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів». Виробничі випробування були проведені на базі ФГ «Бухнівське» (с. Бухни Вінницький район, Вінницька область). Розроблено та виготовлено експериментальний зразок розробленої сушильної установки та обґрунтовано основні параметри та режими процесу сушіння насіннєвої маси люцерни в багатошаровому просторі. Дослідження процесу сушіння насіннєвої маси люцерни проведено з застосуванням сушильної установки з метою виявлення закономірностей, які визначають функціональний характер зміни основних показників, які регламентують даний процес. Результати порівняльних досліджень підтвердили технологічну ефективність застосування розробленої сушильної установки в виробничих умовах під час сушіння насіннєвої маси люцерни, при цьому додатковий збір насіння з висушеної насіннєвої маси люцерни з застосуванням розробленої сушильної установки порівняно з базовою збільшився у 2,1 рази. Підприємство ТОВ «Агромаш-Калина» (м. Калинівка, Вінницька область) отримало конструкторську і технологічну документацію на виготовлення дослідних зразків сушильного обладнання для виробничих випробувань і серійного виробництва.

Особистий внесок здобувача. Автор самостійно отримав результати теоретичних і експериментальних досліджень, що подаються на захист. Формулювання мети, завдань та аналіз одержаних результатів були виконані спільно

з науковим керівником та частково за участю співавторів публікацій.

Апробація роботи. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та отримали позитивну оцінку на: Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інноваційні процеси агропромислової інженерії в умовах сталого розвитку: проблеми та перспективи» (20-21 жовтня 2022 р., ВНАУ, м. Вінниця, Україна); Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» (6-7 лютого 2023 р., м. Тернопіль, Україна); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інноваційні підходи агропромислової інженерії в контексті євроінтеграції» (19-20 жовтня 2023 р., ВНАУ, м. Вінниця, Україна); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інноваційні підходи агропромислової інженерії в контексті глобальних викликів» (17-18 жовтня 2024 р., ВНАУ, м. Вінниця, Україна); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сталий розвиток України в умовах європейської інтеграції: сучасний стан, шлях відновлення та перспективи» (15-16 травня 2025 р., ВНАУ, м. Вінниця, Україна); XXVI Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (17–18 жовтня 2025 р., НУБіП, м. Київ, Україна); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інноваційні підходи агропромислової інженерії: проблеми та перспективи» (30-31 жовтня 2025 р., ВНАУ, м. Вінниця, Україна); IV Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених «Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва» (21 листопада 2025 р., ДДАЕУ, м. Дніпро, Україна).

Публікації. Основні результати досліджень за темою дисертації опубліковано в 8 наукових працях, у тому числі 2 статті, які опубліковані у Scopus, 2 статті наукових фахових виданнях України (категорії Б); 1 свідоцтво про реєстрацію авторських прав на твір, 3 тези у збірнику доповідей наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаної літератури із 122 найменувань на 14 сторінках, 23 додатків на 19 сторінках. Основні результати роботи викладено на 154 сторінках, де містяться 54 рисунки і 14 таблиць. Загальний обсяг дисертації складає 197 сторінок.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Сучасні технології збирання насіння люцерни

Сучасні технології збирання насіння люцерни можна об'єднати в дві основні групи (рис. 1.1):

- збирання з обмолотом та сепарацією насіння в полі;
- збирання насіння з наступним обробітком урожаю на стаціонарному пункті.

У кожному конкретному випадку спосіб збирання насіння визначається природно-кліматичними умовами та наявністю відповідної збиральної техніки. При виборі способу збирання слід керуватись необхідністю забезпечення максимального збору вирощеного урожаю насіння при мінімальних затратах праці та паливно-мастильних матеріалів.



Рисунок 1.1 – Класифікація технологій збирання люцерни на насіння

Всі сучасні технології збирання насінників трав базуються на використанні зернозбиральних комбайнів. Найбільш розповсюджені технології збирання насіння люцерни передбачають пряме комбайнування, роздільне збирання і збирання з подвійним комбайнуванням [9-11].

Але всі комбайнові технології не забезпечують збирання насіння без

вtrat. Агробіологічні особливості насінників, строки їх збирання вимагають застосування доробки обмолоченої комбайном маси. Але і це не гарантує збирання без великих втрат насіння (які можуть сягати 30...40% врожаю) [12].

Практично єдиним способом здійснити збирання з мінімальними втратами, особливо при несприятливих умовах, є збирання всієї біологічної маси (або її насіннєвої частини) і обробка її на стаціонарі [13, 14].

Перша технологія, схема якої представлена на рис. 1.2 передбачає збирання всієї біологічної маси в полі, транспортування та обробка її на стаціонарі. Якщо погодні умови не дозволяють підсушити насінєву масу до необхідної вологості у валках, її підбирають і підсушують також на стаціонарі.

Головним недоліком такого варіанту технології є великі транспортні затрати.

Одним з варіантів реалізації стаціонарного способу може слугувати технологія з обробкою біологічної маси на стаціонарі (рис. 1.2).

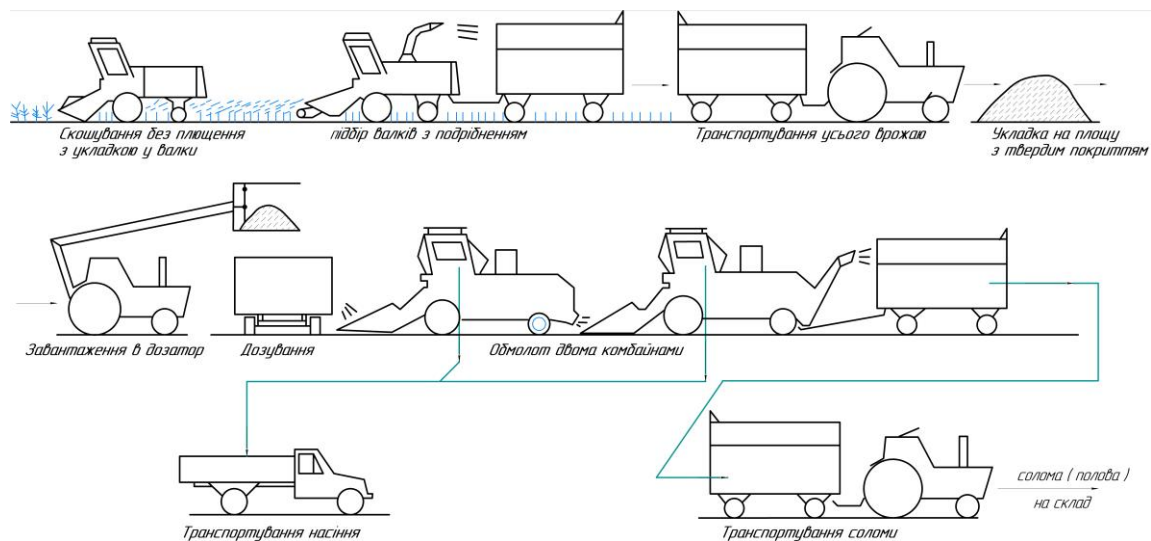


Рисунок 1.2 – Технологічна схема збирання насінників люцерни з обробкою біологічного врожаю на стаціонарі

Подальший розвиток технологій був направлений на розробку польової машини для збирання тільки насіннєвої частини врожаю та на створення спеціалізованих машин для витирання і сепарації насіннєвої суміші люцерни на стаціонарі [15, 16].

Для вирішення першої проблеми в Україні були створені декілька варіантів очісувальних машин. На жаль, вони не пішли в серійне виробництво

через невисоку надійність [17].

Що стосується машин для обробки насіннєвої маси люцерни на стаціонарі, так званих терково-сепарувальних блоків, то було розроблено декілька конструкцій, які успішно пройшли виробничі випробовування. Для отримання насіннєвої маси люцерни пропонується застосовувати зернозбиральний комбайн відрегульований таким чином, щоб у бункері були необмолочені головки люцерни.

Вся інша маса збирається в транспортні засоби і після перевірки на вміст насіння при необхідності теж пропускається через терково-сепарувальний блок, або безпосередньо використовується як корм.

Технологічна схема такого способу показана на рис. 1.3.



Рисунок. 1.3 – Технологічна схема роздільного збирання насінників люцерни з обробкою на стаціонарі

Суттєві недоліки комбайнових технологій збирання насіння люцерни зумовили необхідність пошуку принципово нових рішень цієї проблеми.

Один із шляхів зниження втрат насіння в процесі збирання полягає в перенесенні складних і енергонасичених операцій обмолоту та сепарації зібраного урожаю в стаціонарні умови [18, 19].

В цьому випадку, в полі скошують і транспортують на стаціонарний

пункт всю рослинну масу або її насіннєву частину. При підвищеній вологості рослинну масу перед обмолотом підсушують. При наявності приміщень для зберігання обмолот та сепарація насіння в стаціонарних умовах не обмежені часом і погодними умовами, що дозволяє виконувати ці операції з високою якістю.

Існує декілька варіантів схем технологій збирання насіння люцерни з обробітком урожаю на стаціонарному пункті (рис. 1.4).

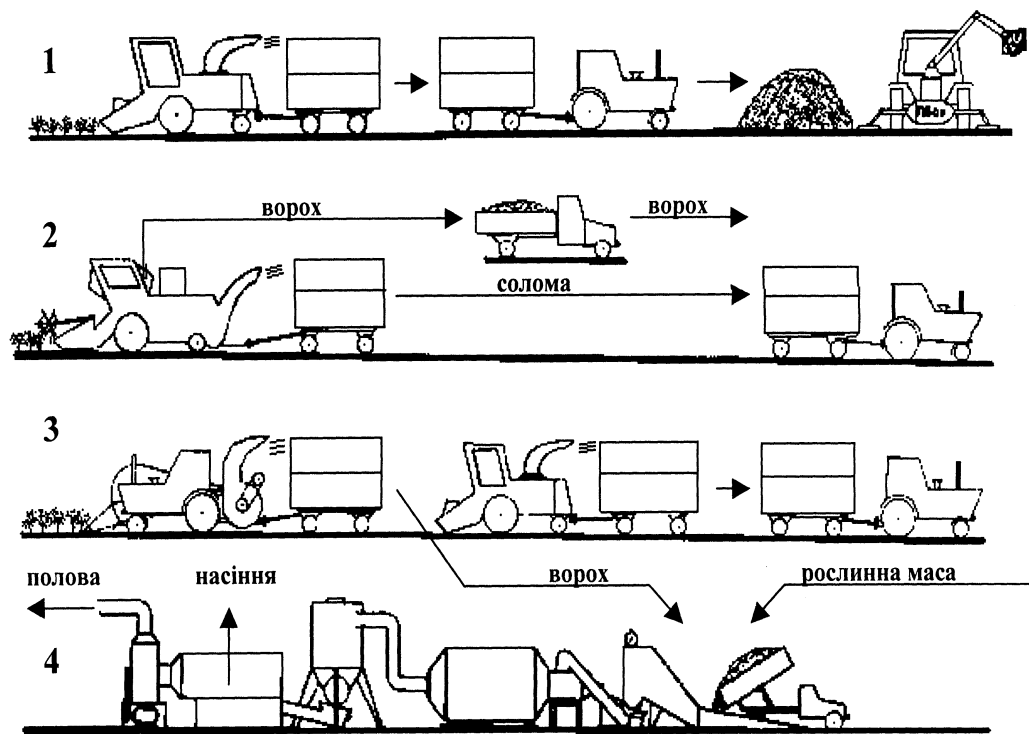


Рисунок 1.4 – Технологічна схема збирання насіння люцерни з обробітком урожаю на стаціонарному пункті

Технологія, яка передбачає скошування в полі і завантаження в транспортні засоби всієї рослинної маси люцерни з подальшим її обробітком на стаціонарному пункті (поз. 1 рис. 1.4), дозволяє виконувати збиральні роботи практично при будь-яких погодних умовах.

Скошування рослинної маси здійснюють з одночасним її подрібненням або без нього. При цьому, подрібнення рослинної маси полегшує процес її завантаження, зменшує потребу в транспортних засобах.

Це особливо важливо при значних відстанях перевезення.

Застосування такої технології збирання порівняно з комбайновою забезпечує зменшення втрат насіння в межах 15...35 % [20].

З точки зору скорочення енерговитрат та зниження втрат насіння доцільно застосовувати технології, що передбачають збирання в полі не всієї рослинної маси, а тільки її насіннєвої частини, яку ще називають “насіннєвим ворохом” або насіннєвою масою люцерни (поз. 2 рис. 1.4).

Це знижує потребу в значній кількості герметизованих транспортних засобів, накопичувальних майданчиків та приміщень для зберігання зібраного урожаю, підвищує продуктивність роботи обладнання стаціонарних пунктів.

Але широке розповсюдження таких технологій стримується відсутністю спеціалізованих технічних засобів для збирання насіннєвого вороху люцерни при будь-яких погодних умовах.

1.2. Аналіз конструктивних особливостей обладнання для сушіння насіннєвої маси люцерни

Аналіз літературних джерел, присвячених технологіям збирання насінників люцерни показує, що для мінімізації втрат насіння необхідно проводити додаткові стаціонарні операції з насіннєвою масою люцерни, в якій знаходиться ще значна кількість насіння як чистого, так і того, що знаходиться в бобах.

Ці необмолочені боби мають вологість вищу, ніж потрібно для проведення операції витирання. Як було визначено попередніми дослідженнями, раціональною вологістю для витирання бобів люцерни є значення 19-21% [21-23]. Для приведення насіннєвої маси люцерни до оптимальної вологості необхідно обґрунтувати конструкцію та раціональні режимні параметри сушильного обладнання.

На першому етапі виконання даної роботи потрібно зробити огляд можливих варіантів використання для цього сушарок сільськогосподарського призначення.

При виборі обладнання та визначення раціональних режимних параметрів для сушіння насіннєвої маси люцерни потрібно враховувати особливості цього

матеріалу [24].

Основними з них є неоднорідність суміші, яка складається з багатьох компонентів, що відрізняються між собою фізико-механічними властивостями, висока відносна вологість матеріалу, підвищені фрикційні властивості самої суміші та її компонентів [25].

Також є певні обмеження такого важливого фактору як температура сушильного агенту. Адже температура нагріву насіння не повинна перевищувати гранично допустиму для збереження їх посівних якостей.

Все це накладає певні обмеження на номенклатуру сушарок для реалізації процесу сушки насіннєвої маси люцерни [26, 27].

Сушіння насіннєвої маси люцерни може бути здійснене різними способами. Вибір способу залежить від об'єму і якості партій матеріалу, які поступають на обробіток, наявності і характеристики сушарок, а також погодних умов [27].

Фізична суть процесу сушіння полягає в передачі насінинам теплоти, випаровуванні з них вологи і переміщенні її в навколишнє середовище.

З метою прискорення процесу сушіння і підвищення продуктивності праці процес сушіння повинен бути повністю механізований [28].

При цьому якість висушеного насіння повинна бути високою.

Найбільшого поширення в сільському господарстві набули сушарки конвективної дії, які можуть бути застосовані і для сушіння насіннєвої маси люцерни [29, 30].

Класифікація сушарок конвективної дії представлена на рис. 1.5.

Серед сушарок сільськогосподарського призначення найбільш поширеними є:

- барабанні сушарки, встановлені на комплексах КЗС (СЗСБ-4, СЗСБ-8);
- напільні сушарки, які комплектуються з повітрянагрівачами ВПТ-400, ВПТ-600 або з теплогенераторами ТБ-0,75.

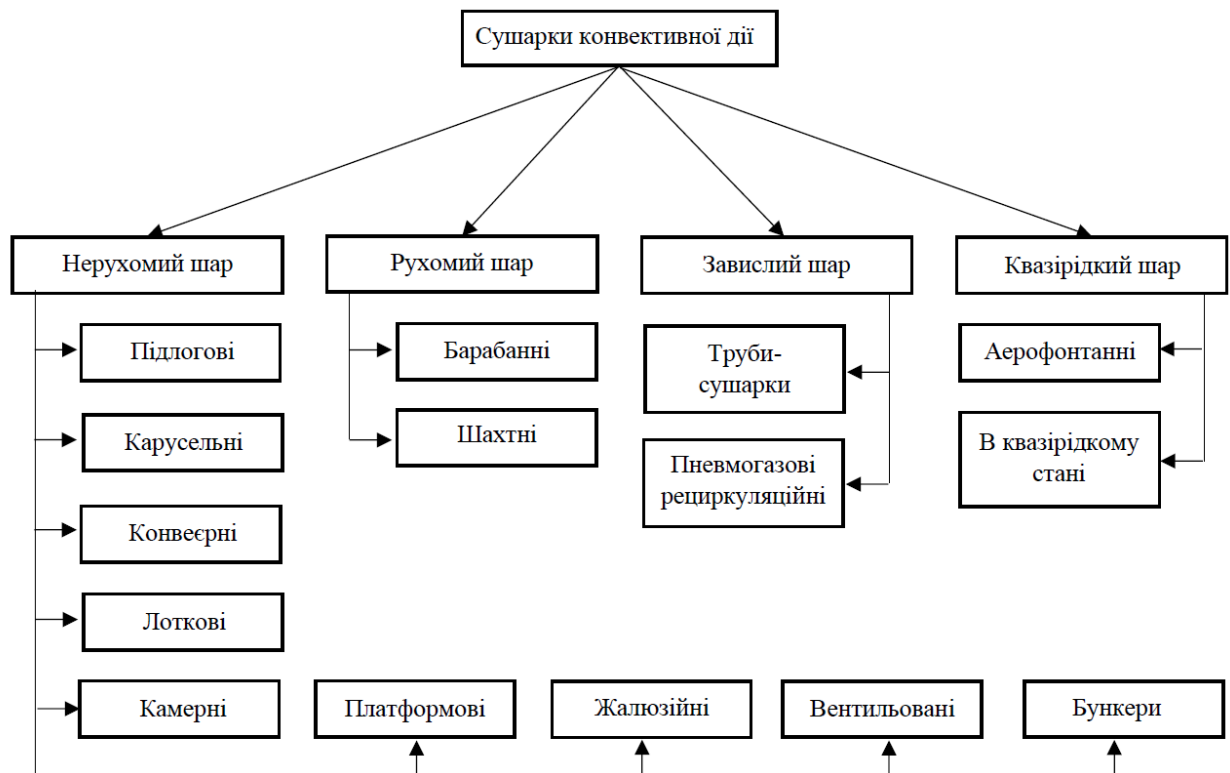


Рисунок 1.5 – Класифікація сушарок сільськогосподарського призначення

В барабанних сушарках сушіння проходить під дією сушильного агента у циліндричному барабані, що обертається, характерним недоліком є те, що в них не можливо контролювати час сушіння. При тривалості сушіння 15...20 хв, вологість насіння знижується на 3...5 %, що вимагає повторювати процес сушіння на даній сушарці 2...3 рази, або встановлювати лінію з декількох машин [31]. Це є одним із основних недоліків барабанних сушарок.

Схема однієї з барабанних сушарок, а саме СЗПБ-8, показана на рис. 1.6.

Але головною перешкодою до використання даного типу сушарок, а також широко розповсюджених шахтних та інших сушарок з рухомим, завислим і квазірідженим станом для роботи з насіннєвою масою люцерни, є її підвищені фрикційні властивості, тобто мала сипучість даного матеріалу [32].

Тому для даного виду матеріалу доцільно використовувати конвективні сушарки з нерухомим шаром матеріалу.

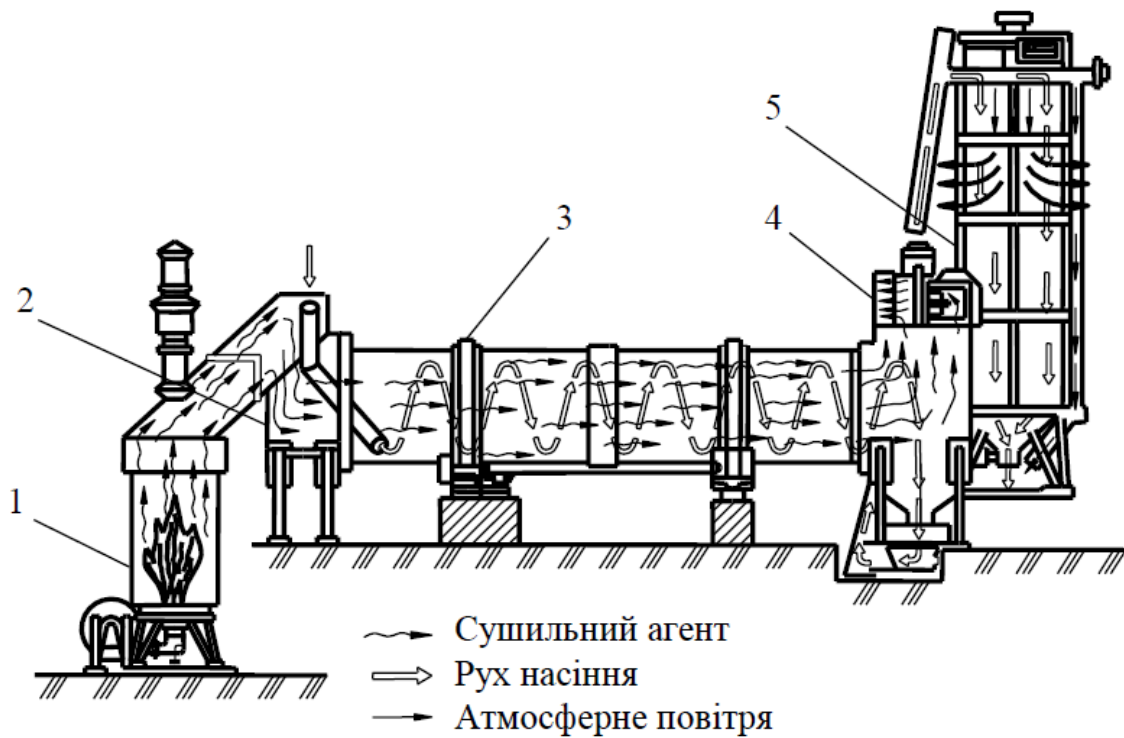


Рисунок 1.6 – Схема технологічного процесу сушарки СЗСБ-8: 1-теплогенератор (нагрівач повітря), 2.- змішувальна камера / повітропровід з регулювальним вузлом, 3 - сушильний канал (горизонтальна сушильна камера), 4 - розвантажувальний та регулювальний вузол, 5 - витяжна (аспіраційна) шахта з вентилятором

У сушарках підлогового типу температура теплоносія складає $45...75\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вони мають переваги перед барабанными у тому, що температура нагріву насіння на вході в сушарку через деякий час стає рівною температурі теплоносія, в результаті чого виключається можливість перегріву, а значить зберігаються посівні якості насіння [33].

Крім цього, умови роботи сушарки дозволяють контролювати температуру нагріву насіння.

Схема підлогової сушарки приведена на рис. 1.7.

Конструкція сушарки включає в себе паливний агрегат 1 і сушильну камеру 2. Завантаження насіння в сушильну камеру проводять з допомогою самоскидів або навантажувачів. Висоту шару насінневої суміші встановлюють в залежності від її вологості.

За технологічним процесом конвеєрні сушарки аналогічні підлоговим. Вони універсальні по своєму призначенню, для них не має особливих обмежень по вологості, чистоті і сипучості вихідного матеріалу.

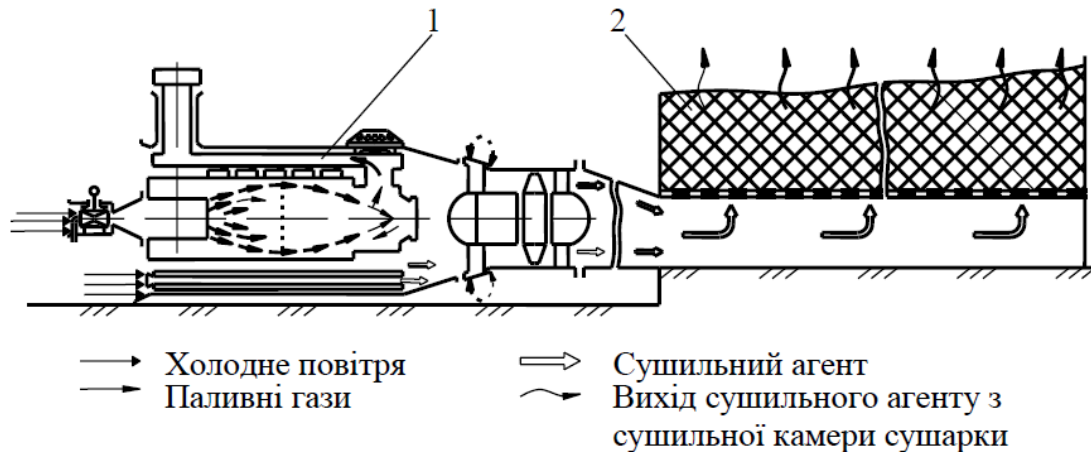


Рисунок 1.7 – Схема сушіння вороху насіння на підлоговій сушарці:
1 – паливний агрегат, 2 – сушильна камера

На відміну від підлогових сушарок в конвеєрних процес завантаження і вивантаження насіння є механізованим.

Лоткові та платформові сушарки конструктивно близькі до вентиляційних установок підлогового типу, прості у будові і використовуються як в Україні, так і за кордоном для сушіння невеликих партій насіння трав [34].

Лоткові сушарки ЛС-2, 2ЛСТ-400 (рис. 1.8) та інші складаються з однієї або декількох лотків (камер) 1, на які насипають ворох насіння трав. Сушильний агент подається вентилятором 2 повітропроводом під лотки, проходить крізь шар насіння, просушуючи його та виходить назовні.

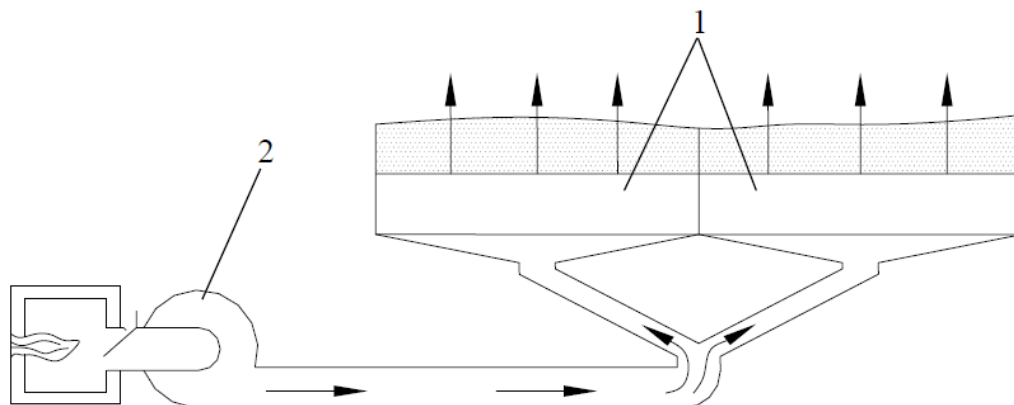


Рисунок 1.8 – Схема лоткової сушарки: 1 – лотки, 2 - вентилятор

Платформові сушарки (рис. 1.9) широко використовуються для сушіння зерна і насіння кормових трав у мішках [35].

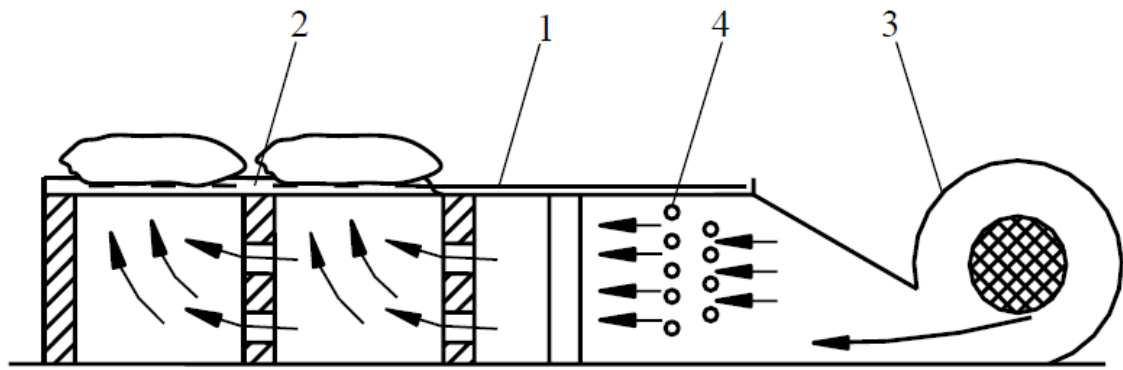


Рисунок 1.9 – Схема платформової сушарки: 1 – платформа, 2 – повітропровід, 3 – вентилятор, 4 – теплогенератор

Вони складаються із платформи 1, під якою розміщені повітропроводи 2, і металічних решіток, на які кладуть мішки з насінням, а також вентилятора 3 і теплогенератора 4 (калорифера).

Переваги лоткових і платформових сушарок полягають в тому, що насіння не перегрівається під час сушіння.

Недоліком є низький рівень механізації завантаження і вивантаження; насіння потрібно періодично перемішувати, а мішки перекладати.

Наслідки – велика енергоємність процесу та низька продуктивність.

В якості сушильного обладнання для нормалізації вологості насіннєвої маси люцерни можуть також використовуватись бункери активного вентилявання [36].

Вони досить широко застосовуються при сушінні зернових культур, тому що в них повністю механізовані процеси завантаження та вивантаження, що дозволяє забезпечити високу економічну ефективність.

Схема бункера активного вентилявання представлена на рис. 1.10.

Він складається з електрокалорифера 1 і циліндричного бункера для насіння 2, який виготовлений з перфорованого матеріалу.

У верхній частині бункера встановлено завантажувальний пристрій, а в нижній – вивантажувальний.

Перфорація на зовнішній циліндричній поверхні дозволяє рівномірно висушувати всю партію матеріалу за висотою.

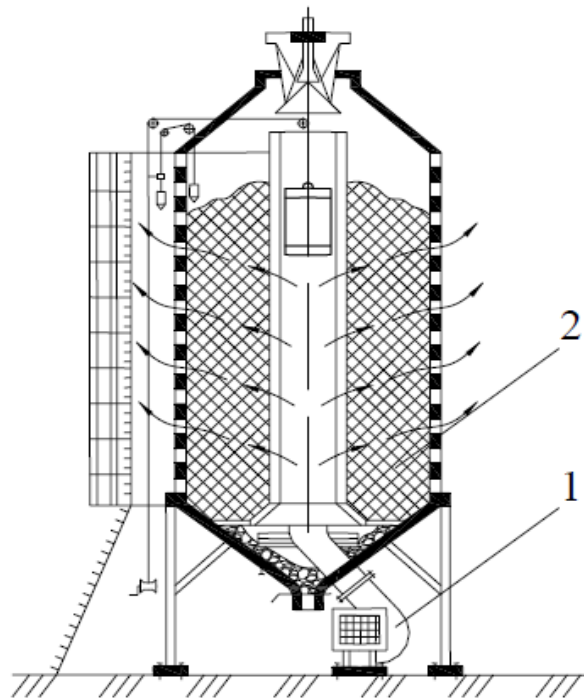


Рисунок 1.10 – Схема бункера активного вентилявання: 1 -електрокалорифера, 2 - циліндричного бункера для насіння

Але при сушінні насіннєвої маси трав, в тому числі люцерни, основна перевага бункерів активного вентилявання, а саме механізовані процеси завантаження і розвантаження, не можуть бути використані в повній мірі через низьку сипку здатність суміші.

Окрім того, бункери активного вентилявання мають високу металоємність, що понижує економічну та енергетичну ефективність їх використання.

1.3. Аналіз теоретично-експериментальних досліджень процесів сушіння насіннєвої маси люцерни

Залежно від прийнятої технології збирання насінників трав, погодних умов у період збирання та інших чинників, виникає потреба досушувати насіння трав разом із листостебловою масою, насіннєву масу люцерни після

комбайнового збирання зі збором насіннєвої маси в бункер або тракторний причіп, насіння трав з різним ступенем чистоти.

Насіннєва маса люцернитрав, за своїми фізико-механічними і теплофізичними характеристиками відповідає стебловим матеріалам, зокрема сіну, та характеризується високою вологістю, малою облиствленістю, поганою сипучістю, високою питомою поверхнею, що омивається повітрям.

Для шару чистого насіння характерні малі розміри частинок, висока вологість, підвищений опір шару повітряному потоку, велика питома поверхня, що омивається повітрям, а для насіння тимофіївки, крім того, погана сипучість. Шорсткість насіння коливається в досить широких межах. Різноманітна за властивостями і поживна суміш трав при комбайновому збиранні.

Наприклад, насіннєва маса люцерни, зібрана за технологією зі збиранням в бункер комбайна або в тракторний причіп, складається з низки компонентів: обмолочене насіння, насіння в бобах і суцвіттях, листя, частинки стебел, насіння бур'янів. Така насіннєва маса відрізняється низькою об'ємною масою, поганою сипучістю і поверхнею, що змінюється в широких межах та омивається повітрям. Зазначені особливості названих матеріалів, зумовлюють необхідність обґрунтування технологій і технічних засобів для їхнього сушіння.

Для проектування сушильного обладнання та його експлуатації важливе значення має правильність оцінки втрат тиску повітря в шарі. Від точності цієї оцінки залежить конструктивна схема сушильного обладнання і правильність вибору вентиляторів, двигунів, параметрів повітророзподільних каналів.

Вивченню втрат тиску газів у шарі зернистих і стеблових матеріалів присвячено низку експериментальних і теоретичних досліджень, які наведені в працях [37-50].

При теоретичному дослідженні процесу проходження повітря через шар використано метод побудови спрощених моделей.

Оскільки в кожному конкретному випадку шар досліджуваного матеріалу являє собою складну систему, що складається з частинок, які мають різні розміри та форму, розглянуто моделі у вигляді:

- шару матеріалу пористих тіл із капілярами круглого перерізу [49];
- упакованого пучка трубок із розташуванням кожного наступного шару під певним кутом до попереднього [42];
- у вигляді сукупності твердих частинок, занурених у рідину [47, 51, 52].

Однак більшість моделей не пояснюють причин відмінності величин втрат тиску залежно від напрямку руху повітря в шарі.

Тим часом у напрямку природного ущільнення шару матеріалів, до яких належить і насіннева маса люцерни під час збирання (відділення листостеблової маси без обмолоту), втрати тиску повітря, що продувається через шар (у 2,0...2,5 рази вищі, ніж у перпендикулярному напрямку).

Інші моделі [53, 54] включають у себе величини, які важко або навіть узагалі неможливо визначити.

У зв'язку з цим під час знаходження залежності між величинами, що характеризують процес руху повітря через шар зернистих стеблових матеріалів, до яких можна зарахувати і насіннову масу люцерни, багато авторів йшли експериментальним шляхом.

На підставі дослідних даних отримано рівняння, які є окремими і можуть бути використані для розрахунку втрат тиску повітря в шарі кожного окремого виду матеріалу [45, 48, 52, 55]:

$$\Delta P = A H_{ш} \mathcal{G}_n^{\gamma_1} \rho_{ш}^{\gamma_2}, \quad (1.1)$$

де ΔP – втрати тиску повітря, Н/м².

A , γ_1 , γ_2 – постійні коефіцієнти, що залежать від умов проведення експериментального дослідження;

$H_{ш}$ – висота шару, м;

$\mathcal{G}_n$ – швидкість повітря у вільному перерізі, м/с;

$\rho_{ш}$ – щільність шару, кг/м³.

У роботі [49] рекомендовано знаходити втрати тиску в шарі стеблових матеріалів, використовуючи емпіричну залежність, що враховує більшу кількість чинників:

$$\Delta P = A H_{\text{ш}} g_n^{\gamma_1} \rho_n^{\gamma_2} g^{(\gamma_2-1)} \mu^{(2-\gamma_2)} \rho_n^{(\gamma_2-1)}, \quad (1.2)$$

де g – прискорення вільного падіння, м/с²;

μ – динамічна в'язкість повітря;

ρ_n – густина повітря, кг/м³.

У роботі [47], розглядаючи шар стеблових матеріалів, як сукупність твердих частинок, занурених у рухому рідину (зовнішня задача гідродинаміки) та вважаючи величини g , μ та ρ_n постійними, вираз (1.2) записано у вигляді

$$\Delta P = A H_{\text{ш}} P_c^3 g_n^{1,5}, \quad (1.3)$$

де P_c – маса матеріалу на одиницю площі сушарки за відносної вологості 20%, кг/м².

Залежності (1.1)-(1.3) не відображають відмінності в значеннях втрат тиску повітря під час продування шару стеблових матеріалів у напрямі ущільнення і перпендикулярному йому, а також не враховують вплив вологості матеріалу на величину втрат тиску.

Прийнявши шар стеблових матеріалів у вигляді перехресних пучків стрижнів круглого перерізу, у роботі [52] отримано такі рівняння:

$$\Delta P = 0,118 R_e^{1,6} (18,4 - \rho_{\text{ш}}) \rho_{\text{ш}}^{4,1} (278,9 - \rho_{\text{ш}})^{-1} e^{(2,95 \cdot 10^{-3}) \rho_{\text{ш}}}; \quad (1.4)$$

$$\Delta P_2 = 0,054 R_e^{1,6} (22,3 - \rho_{\text{ш}}) \rho_{\text{ш}}^{4,1} (278,9 - \rho_{\text{ш}})^{-1} e^{(2,95 \cdot 10^{-3}) \rho_{\text{ш}}}, \quad (1.5)$$

де R_e – еквівалентний критерій Рейнольдса.

Для шару матеріалів наведені залежності для визначення втрат тиску, залежно від зміни вологості матеріалу і напрямку продування [43]:

- у напрямку природного ущільнення:

$$\Delta P_1 = (1,15 \dots 2,1) 10^{-2} K_w \rho_{\text{ш}}^{(2,2 \dots 2,35)} g_n^{(1,22 \dots 1,56)}; \quad (1.6)$$

- у напрямку, перпендикулярному ущільненню

$$\Delta P_2 = (3,2 \dots 4,7) 10^{-2} K_w \rho_{\text{ш}}^{(2,2 \dots 2,35)} g_n^{(1,22 \dots 1,56)}, \quad (1.7)$$

де K_w – коефіцієнт, що враховує вологість матеріалу.

Рівняння (1.6) і (1.7) не враховують впливу вологості матеріалу на величину втрат тиску в шарі.

При виведенні аналітичної залежності втрати тиску в щільному шарі стеблових матеріалів у роботах [43, 49] розглядаючи, відповідно, шар стеблових матеріалів у вигляді капілярної моделі з перехресними каналами з порами та у вигляді пористого тіла з паралельними каналами, отримано відповідні рівняння, які мають вигляд:

$$\Delta P = \frac{G \mu_e^2 \rho_w g_n^2}{m d_e} \left(\frac{96 C_n}{R_e} + \frac{1,5 \lambda}{m} \right) H_w, \quad (1.8)$$

де G – коефіцієнт, що характеризує ступінь впливу режимів течії на величину втрат тиску;

μ_e – звивистість порових каналів;

m – коефіцієнт пористості;

d_e – еквівалентний діаметр порових каналів, м;

C_n – коефіцієнт, що збільшує перетинання порових каналів;

λ – коефіцієнт опору шару;

$$\Delta P = \lambda H \frac{\rho_w g_n^2}{2 d_e} \left(\frac{(1-m)}{m} \Phi \right)^{3-C_1}, \quad (1.9)$$

де Φ – фактор форми матеріалу шару сушіння;

C_1 – коефіцієнт, що залежить від напрямку продування шару.

При цьому було встановлено, що під час продування шару в напрямку перпендикулярно ущільненню $C_1 = 1,55 \dots 1,65$, а в напрямку ущільнення $C_1 = 1,7 \dots 1,8$, а коефіцієнт опору λ залежить від напрямку продування шару.

У разі вентилювання шару в напрямку ущільнення

$$\lambda_1 = \frac{1220}{\left(\frac{d_e}{d'_e} \right)^{0,33} \left(\frac{\rho_n}{100} \right)^{\frac{1}{1,5}} R_e^{0,28}}, \quad (1.10)$$

а в перпендикулярному напрямку

$$\lambda_2 = \frac{1350}{\left(\frac{d_e}{d'_e}\right)^{0,33} \left(\frac{\rho_{np}}{100}\right)^{\frac{1}{2,44}} R_e^{0,4}}, \quad (1.11)$$

де d'_e – еквівалентний діаметр каналів у шарі (м) при щільності шару 100 кг/м^3 ;

ρ_{np} – щільність пресування, кг/м^3 ;

Рівняння (1.10) і (1.11) емпіричні й застосовані для конкретного виду матеріалу: пресованого сіна з люцерни.

Фактор форми матеріалу шару сушіння, що входить до рівняння (1.9), враховує той факт, наскільки форма стебел відрізняється від форми кулі. Такий підхід не пояснює сутності явищ, що відбуваються під час руху повітря через шар. Оскільки в шарі матеріалу втрати тиску в напрямку ущільнення і в перпендикулярному напрямку приблизно однакові.

Запропонована [56] модель стеблових матеріалів у вигляді каналу змінного перерізу більш повно відображає фізичну сутність явищ, що мають місце під час руху повітря в шарі стеблових матеріалів. У його моделі у двох взаємно перпендикулярних напрямках звивистість каналів неоднакова:

$$\Delta P_1 = 22,8 C_p H \rho_n g_n^{1,53} \nu^{0,47} d_e^{-1,47}; \quad (1.12)$$

$$\Delta P_2 = 9,9 C_p H \rho_n g_n^{1,53} \nu^{0,47} d_e^{-1,47}, \quad (1.13)$$

де C_p – коефіцієнт, що враховує зміну структурного фактора зі зміною щільності шару.

Цілком природно, що особливості аеродинамічних характеристик насінневої маси трав під час збирання за різними технологіями не дають змоги використовувати для розрахунків жодну з наведених вище залежностей (1.1)-(1.13), що мають обмежене застосування.

Першу роботу з визначенням втрат тиску повітря в шарі сипучих матеріалів, до яких можна віднести і шар насіння люцерни, було виконано у роботі [57]. На основі дослідів із зерном кукурудзи, пшениці та насінням маку було отримано емпіричну залежність аналогічну рівнянню (1.1).

Продовженням цієї роботи можна назвати роботу [46], де уперше введено у формули поняття про "еквівалентний діаметр частинок" і "фактор форми" з метою врахування розмаїтості форми частинок. На основі законів гідродинамічної подібності узагальнено досліди щодо визначення опору в шарі сипких матеріалів [58]. При цьому для ламінарного режиму течії втрати опору вони визначали за формулою:

$$\Delta P = \lambda_1 \frac{H_u \nu \mu}{2md}, \quad (1.14)$$

а для турбулентного потоку за формулою:

$$\Delta P = \lambda_2 \frac{H \rho_e V^2}{2md}, \quad (1.15)$$

де d – діаметр частинок, м.

Рух повітря через шар сипких матеріалів розглядається як внутрішню задачу гідродинаміки рух через низку паралельних каналів зі змінним перерізом [59].

Падіння напору для моделі процесу можна пояснити тертям повітря об поверхню частинок, розширенням та зниженням потоку в звивистих каналах змінного перерізу.

Отримані рівняння для визначення коефіцієнта опору, відповідно, ламінарного і турбулентного режимів мають вигляд:

$$\lambda_1 = \frac{16\mu}{F_a d \rho_e V}; \quad \lambda_2 = \frac{0,06}{F_a} \left(\frac{\mu}{d \rho_e V} \right)^{0,2}, \quad (1.16)$$

де F_a – ефективний "живий" перетин шару, м².

У джерелі [60] запропоновано рух повітря в шарі сипучих матеріалів розглядати як зовнішнє завдання гідродинаміки.

Грунтуючись на еквідистантності кривих опору шару сипучих матеріалів і кривої опору окремих куль, занурених у рідину, одержано таке рівняння:

$$\Delta P = W_u N f_1(m) f_2(C_2 C_3), \quad (1.17)$$

де $W_{ш}$ – опір одиничного шару;

N – число частинок у шарі;

C_2, C_3 – коефіцієнти, що залежать від форми та розташування зерен, а опір одиничного шару $W_{ш}$ визначається як:

$$W_{ш} = 0,5C_5F_2\rho_6V_H^2, \quad (1.18)$$

де C_5 – коефіцієнт опору одиничного шару;

F_2 – лобова поверхня;

V_n – швидкість набігаючого потоку, віднесена до перерізу труби.

Цей метод розрахунку як і попередні, є емпіричними, а коефіцієнти C_2, C_3 необхідно визначити в кожному конкретному випадку.

Еквілістантність кривих опору шару матеріалу і одиничної кулі є зовнішньою формальною ознакою, яка не дає змоги запропонувати обґрунтовану фізичну схему руху повітря в шарі.

У роботах [61, 62, 63] під час аналітичного дослідження аеродинамічних характеристик шару сипких матеріалів застосовували модель, що представляє собою систему паралельних шорстких каналів, що дорівнюють по висоті шару.

Ними вперше було знайдено співвідношення між діаметрами еквівалентного каналу і частинок:

$$d_e = d_2 \sqrt{\frac{32}{C(m)m}}, \quad (1.19)$$

де $C(m)$ – постійна, що залежить від пористості шару.

Усі дослідні дані названих авторів узагальнювалися в координатах $\lambda_{кан} = F(R_{е.кан})$, $\lambda_{кан} = \lambda_{ш} \frac{m^3}{1-m}$, $R_{е.кан} = R_{е.ш} \frac{\Phi}{1-m}$, де $\lambda_{кан}$ – опір шорсткого каналу; $R_{е.кан}$ – критерії Рейнольдса для шорсткого каналу; $\lambda_{ш}$ – загальний коефіцієнт опору.

Такий метод дав змогу отримати загальне рівняння для визначення втрат тиску в шарі кускових і сипучих матеріалів. Для стеблових матеріалів воно

неприродне.

Аналогічний метод узагальнення дослідних даних для сипучих матеріалів запропоновано у роботі [64]. Цей метод є напівемпіричним і являє собою один із численних варіантів так званої "теорії каналу". Він пропонував, що рух потоку повітря в шарі відбуваються паралельними звивистими каналами. Втрати напору повітря складається в цьому випадку з місцевих втрат, зумовлених стисненням і розширенням повітряного струменя, тертям об стінки каналу і обчислюється за формулою:

$$\Delta P = \frac{2\lambda_w \rho_g V_n^2}{g d_e F^2}. \quad (1.20)$$

Вперше узагальнити досліди щодо втрат тиску повітря в шарі зернових культур виконано в роботі [65]. Була отримана емпіричну залежність, в якій опір шару складається з двох доданків – динамічного і статистичного напору:

$$\Delta P = A \frac{V_n}{d_k^2 m} \rho \lambda_a \eta_a \psi_a + \frac{2V_n^2}{m \Delta l} \rho \lambda_g \eta_g \psi_g, \quad (1.21)$$

де d_k – діаметр міжзернового каналу або трубки струму, м;

Δl – шлях між двома умовними ударами частинок повітря під час руху в шарі, м;

$\lambda_a, \eta_a, \psi_a, \lambda_g, \eta_g, \psi_g$, – безрозмірні поправочні коефіцієнти на відхилення складу і стану насипу від стандартного за ознаками: λ, η, ψ – відповідно: за ущільненням шару, що характеризується відношенням фактичної густини шару до густини насипу, яка визначається в бункері; за крупністю зерна, що характеризується масою 1000 зерен; за вологістю зерен.

У роботі [66] була спроба узагальнити результати дослідів для основних зернових культур.

Однак це рівняння може бути застосовано тільки для тих зернових культур, для яких було визначено емпіричні коефіцієнти λ, η, ψ : пшениця, ячмінь, жито, кукурудза, просо, овес. Користуватися таким рівнянням незручно, тому що за кожною культурою необхідно мати безліч коефіцієнтів, які

визначаються експериментально.

У результаті досліджень [67] для визначення опору в шарі насіння конюшини червоної, костриці, тимофіївки лугової, отримано формули, які аналогічні за структурою формулам (1.4), (1.5):

- для конюшини:

$$\Delta P = (6,5 - 0,11W) HV_{um}^{1,2}; \quad (1.22)$$

- для вівсяниці лугової

$$\Delta P = 1,82 HV_{um}^{1,23}; \quad (1.23)$$

- для тимофіївки за вологості 15...24%

$$\Delta P = (7,28 - 0,21W) HV_{um}; \quad (1.24)$$

- за більш високої вологості для тимофіївки

$$\Delta P = 2,42 HV_{um}. \quad (1.25)$$

Однак ці формули мають обмежене застосування і справедливі тільки для насіння з чистотою вороху 97...98% за висоти шару до 0,5 мм вологості від 15 до 32%. Вони не враховують вплив на втрати тиску таких чинників, як щільність шару, крупність зерен, засміченість вороху тощо.

Під час обґрунтування технології сушіння насіння трав і вибору технологічного обладнання, крім правильної оцінки опору шару потоку теплоносія, важливо правильно вибрати режими сушіння, питому витрату та гранично допустиму температуру теплоносія, тривалість сушіння, товщину шару та інші параметри.

Важливим режимним параметром процесу сушіння є гранично допустима температура нагріву насіння, що залежить від його початкової вологості та часу перебування в нагрітому стані.

У цьому напрямку виконано низку досліджень. Ще в 30-х роках вказувалося на можливість інтенсифікації процесу сушіння насіння трав [68]. Зазначено, що під час сушіння вологого насіння в сушильних апаратах, воно витримувало температуру газу до 343 °K.

У лабораторії сушіння зерна проведено експерименти з обґрунтування режимів сушіння насіння трав нагрітим повітрям [68]. Встановлено, що після сушіння насіння з початковою вологістю 5,2 % при температурі сушильного агента 339...343 °К якість насіння не знижувалася. Під час сушіння насіння люцерни з початковою вологістю 20...30 % за швидкості теплоносія 0,2...0,3 м/с, його гранично допустима температура становить 323...328 °С, кількість перемішувань шару 1...2.

При дослідженні режимів сушіння насіння [69, 70] встановлено, що схожість насіння конюшини та люцерни з початковою вологістю 27,3...31,6 % не знижуються за температури повітря до 353°К. Під час сушіння насіння конюшини в шарі завтовшки 0,05...0,1 м виявлено значну нерівномірність нагрівання сушки матеріалу по висоті шару. За температури теплоносія 323°К нерівномірність нагріву насіння по висоті становила 19 градусів, а різниця у вологості нижніх і верхніх шарів перевищила 14,9%. Очищене насіння конюшини та люцерни запропоновано сушити в шахтних сушарках у суміші з вівсом і ячменем, що дає змогу збільшити загопроникність шару. Даний спосіб сушіння був рекомендований для практичного застосування [71]. Проте, через складність технологічної схеми та велику трудомісткість, він не набув широкого розповсюдження.

У праці [72] для сушіння свіжозібраної насінневої маси люцерни, що містить 17% вільного насіння, 45% насіння в бобах і 38% різних дрібних домішок, рекомендовано барабанну сушарку типу СЕПВ-2, обладнану спеціальним пристроєм, який виділяє до 70% вільного насіння. Це дало змогу підвищити температуру теплоносія до 408...413 °К без зниження якості висушеного насіння.

Однак через низьку продуктивність сушарки на майданчику накопичується значна кількість насінневої маси люцерни. Зберігання вороху з вологістю 25...30% не допускається, оскільки, зважаючи на інтенсивне самозігрівання за 6...10 годин, його температура сягає понад 313 °К.

З цієї причини сушіння насінневої маси люцерни на барабанних сушарках

типу СЗПБ-2 не знайшло широкого застосування.

Встановлено [73], що гранично допустима температура нагріву насіння люцерни в бобах може бути розрахована за формулою С.А. Птіцина [74]:

$$T_{n.o} = \frac{2350}{0,37(100 - W) + W'} + 20 - 10l_o\tau, \quad (1.26)$$

де W' – відносна вологість насіння, %;

τ – час теплової дії, хв.

Для чистого насіння ця температура, за його даними, має бути на 10 градусів нижчою. Такого ж висновку дійшли також інші дослідники [75, 76].

Однак дослідження з виявлення можливості розрахунку гранично допустимої температури нагріву насіння люцерни за формулою С. А. Птіцина проведені в межах зміни температури всього лише від 300 до 330 °К і тривалості теплового впливу від 0,5 до 2,5 годин. Співробітниками наукових установ [77-79] узагальнено результати виробничих дослідів, а також дані щодо сушіння насіння трав на барабанних зерносушарках, установках активного вентилявання і подано пропозиції щодо режимів роботи обладнання.

Із зарубіжних робіт становлять інтерес роботи Дрезденського інституту сільськогосподарської техніки, де було вивчено можливості застосування наявних зерносушарок для сушіння насіння трав [80]. Найприйнятнішими для цих цілей виявилися стрічкові шарові сушарки та сушарки в киплячому шарі. Для цього розроблено потокова лінія з обробки насіння трав для спеціалізованих насінницьких господарств КОС-0,5, у складі обладнання якої є стрічкова сушарка Т-685 Фірни "Пектус".

У результаті випробувань цієї сушарки встановлено, що за температури агента сушіння 315...319 °К, зниження схожості насіння не спостерігалось [81]. Однак сушарку Т-635 доцільно використовувати для сушіння очищеного насіння трав.

У праці [82] вивчено процес конвективної сушарки чистого насіння люцерни в щільному шарі. Рекомендовано сушити таке насіння за товщини

шару 0,10...0,14 м і температури 333⁰К.

За даними [83] за тривалості доби чистого насіння люцерни одна година температура теплоносія не повинна перевищувати 330 ⁰К.

У низці робіт [72, 73, 84], присвячених дослідженню процесу сушіння насіння трав наводяться залежності, які дають змогу розрахувати тривалість процесу сушіння або питому витрату повітря та сушіння в щільному шарі. Так, у роботі [85] запропоновано таку формулу для визначення загальної тривалості сушіння насіння люцерни:

$$\tau_{\text{заг}} = \frac{W_0 - W_{\text{кр}}}{N_1} + \frac{2,3}{x_1 N_1} \lg \frac{W_{\text{кр}} - W_p}{W_2 - W_p}, \quad (1.27)$$

де N_1 – швидкість сушіння в першому періоді, кг вологи/кг сух. речовини год (у подальшому – кг вол./кг сух. реч./год);

W_0 , $W_{\text{кр}}$, W_p – початковий, критичний, кінцевий і рівноважний вологовміст вороху насіння, кг вол./кг сух. реч.;

x_1 – відносний коефіцієнт сушіння.

Критичний вологовміст шару насіння люцерни визначається за формулою:

$$W_{\text{кр}} = 39 - 0,24h_{\text{ш}}, \quad (1.28)$$

де $h_{\text{ш}}$ – товщина шару, м.

Однак, дана формула справедлива тільки для визначення тривалості сушіння шару чистого насіння люцерни товщиною не більше 0,075 м.

Вона не враховує вплив на тривалість прогрівання товщини шару й не придатна для шару насіннєвої маси люцерни без відділення листостеблової маси.

Для насіннєвої маси люцерни М. Aghbashlo пропонує використовувати наступну залежність [86]:

$$\tau_{\text{заг}} = \frac{G_{\text{с}}}{\Delta d_1} V_n' F, \quad (1.29)$$

де G_{ϵ} – кількість вологи, що підлягає видаленню;

Δd_1 – приріст вологовмісту повітря;

V_n – питома витрата повітря;

F – площа сушарки.

Подібна залежність була запропонована у роботі [87]:

$$\tau_{\text{заг}} = \frac{G_{\epsilon} r}{(Q_{\epsilon} + Q_{\delta}) \eta_c}, \quad (1.30)$$

де r – прихована теплота випаровування, кДж/кг;

Q_{ϵ} – тепло, що вноситься в шар повітрям, кДж/кг год;

Q_{δ} – тепло самозігрівання, кДж/кг год;

η_c – к.к.д. сушарки.

Залежності (1.27), (1.30) прості для практичних розрахунків, проте вони не дають повного уявлення про вплив на процес сушіння швидкості руху повітря в шарі, його температури і вологості, товщини шару, не враховують властивостей матеріалу як об'єкта сушіння.

У роботі [88] для розрахунку необхідної кількості повітря, що продувається через щільний шар стеблових матеріалів, запропоновано таку емпіричну формулу:

$$V_0 = \frac{1000 G_1 (W_H - W_2)}{\Delta d_1 \eta_c \tau (100 - W_p)}, \quad (1.31)$$

де G_1 – початкова маса висушеного матеріалу, кг;

$\Delta d_1 = d_2 - d_1 - d_{\delta}$, де d_2 , d_1 , d_{δ} – відповідно: вологовміст повітря, що подається; вологовміст повітря, що виходить із шару; кількість вологи, що видаляється за рахунок тепла самозігрівання, кг/м³.

Формула не враховує властивостей матеріалу, товщини шару, його пористості. Величину необхідно визначати експериментально в кожному конкретному випадку.

Для визначення питомої витрати повітря, що продувається через шар стеблових матеріалів, запропоновано [89] найпростішу формулу, що має такий вигляд:

$$\Delta d_1 = a - bV'_n, \quad (1.33)$$

де a і b постійні, що визначаються експериментально.

Ця формула ґрунтується на експериментальному визначенні приросту вологовмісту повітря в конкретних метеорологічних умовах і не враховує вплив на процес вологовіддачі властивостей матеріалу, як об'єкта сушіння, не дає уявлення про вплив на процес товщини шару.

1.4. Висновки, мета та завдання досліджень

Всі сучасні технології збирання насіннєвої маси люцерни потребують обробки насіннєвої маси люцерни на стаціонарі. Однією з цих операцій є сушіння яке проводиться з метою доведення вологості матеріалу до значення, необхідного для успішного проведення наступної технологічної операції витирання або обмолоту суміші. Проведення цих операцій дозволяє суттєво зменшити втрати насіння при збиранні.

Аналіз сушарок сільськогосподарського призначення дозволяє зробити висновок, що для сушіння насіннєвої маси люцерни, враховуючи їх агротехнологічні властивості, найбільше пристосовані сушарки з нерухомим шаром матеріалу, а саме - лоткові і підлогові різної конфігурації та комплектації.

Таким чином, на підставі наведеного огляду робіт можна констатувати:

1. Останнім часом ширше застосовують також сушіння на барабанних зерносушарках, але вони не можуть бути рекомендовані для широкого використання, оскільки травмують до 30% насіння люцерни. Крім того, відзначено велику нерівномірність перебування окремого насіння в сушильній камері, знімання вологи на барабанній сушарці не перевищує 3...4% за пропуск.

2. Застосування зернових шахтних сушарок для сушіння насіннєвої маси люцерни, ускладнюється через низьку газопроникність шару.

3. Особливості фізико-механічних характеристик насіннєвої маси люцерни зумовили застосування для їхнього сушіння підлогових сушарок із примусовим переміщенням матеріалу та поперечним потоком теплоносія, а також установок для активного вентилявання стебловологих матеріалів.

4. Кількість повітря, що продувається через щільний шар насіннєвої маси після комбайнового збирання люцерни не може бути обрана довільно, а визначається зважаючи на енергетичні та наведені витрати на досушування з одного боку, а також на якість одержаного насіння з іншого.

5. У літературі відсутнє загальне аналітичне рівняння для визначення оптимальної питомої витрати повітря залежно від обраної температури теплоносія, експозиції сушіння, товщини шару, вихідної вологості матеріалу, його фізико-механічних і теплофізичних характеристик як об'єкта сушіння.

6. Втрати тиску повітря в шарі є найважливішими фактором, що визначає вибір вентиляторів і розрахунок параметрів та режимів роботи сушильного обладнання.

Метою дослідження є підвищення ефективності процесу сушіння насіннєвої маси люцерни шляхом обґрунтування параметрів та режимів роботи сушильної установки.

Реалізація цієї мети передбачає наукове розв'язання таких завдань:

1. На основі аналізу відомих технологій та обладнання для сушіння насіннєвої маси люцерни розробити схему сушильної установки.

2. На аналітичному рівні дослідити технологічний процес сушіння насіннєвої маси люцерни в багат шаровому просторі:

- розробити математичні моделі, які описують функціональну зміну постійної та спадаючої швидкості сушіння насіннєвої маси люцерни залежно від параметрів процесу;

- розробити залежності для визначення часу та питомої витрати повітря в процесі сушіння насіннєвої маси люцерни залежно від параметрів теплоносія;

- дослідити функціональну зміну опору повітря в шарі насіннєвої маси люцерни залежно від параметрів процесу сушіння.

3. Провести лабораторні експериментальні дослідження з визначення фізико-

механічних характеристик і теплофізичних властивостей насінневої маси люцерни.

4. Розробити емпіричні моделі, які описують функціональну зміну:

- вологовмісту в шарі насінневої маси люцерни залежно від зміни висоти шару та часу сушіння;

- втрати тиску повітря в шарі насінневої маси люцерни залежно від зміни висоти шару, швидкості повітряного потоку, коефіцієнт пористості шару;

- швидкості сушіння насінневої маси люцерни залежно від зміни висоти шару, швидкості повітряного потоку.

5. Провести перевірку у виробничих умовах результатів експериментальних досліджень сушильного обладнання та визначити ефективність його застосування.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях [107, 108].

1. Солон О.В., Замрій М.А. Дослідження процесу сушіння насінників трав. Вібращії в техніці та технологіях. 2022. № 3(106). С. 78–87. DOI: 10.37128/2306-8744-2022-3-11

2. Солон О.В., Замрій М.А. Дослідження оптимальної конструкції обладнання для сушіння пожнивної суміші насінників трав. *Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення* : матеріали Міжн. наук. інтернет-конф. (м. Тернопіль, 6-7 лютого 2023 р.). Тернопіль, 2023. С. 186-190.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ СУШІННЯ НАСІННЕВОЇ МАСИ ЛЮЦЕРНИ

2.1. Будова та процес роботи розробленої сушильної установки

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, унеможливорює накопичення вологого матеріалу. Адже при накопиченні значної кількості вологої насінневої маси люцерни може розпочатись небажаний процес його самозігрівання.

Виділення значної кількості теплоти відбувається в результаті протікання різноманітних мікробіологічних процесів і недостатньої теплопровідності насінневої маси люцерни. Кількість виділеної теплоти в насінневій масі залежить від її початкової вологості і температури навколишнього середовища.

Аналіз конструкцій та технологічних процесів сільськогосподарських сушарок дозволяє зробити висновок, що для такого матеріалу як насіннева маса люцерни, в тому числі і насіння люцерни, найбільш придатними будуть сушильні установки лоткового, платформового та підлогового типу, які застосовуються на даному етапі.

Вони забезпечать ефективне сушіння невеликих партій насінневої маси люцерни не потребуючи великих капітальних вкладень та значних виробничих площ.

Для моделювання процесу сушіння насіннєвої маси люцерни в нерухомому шарі нами запропонована сушильна установка для сушіння насіннєвої маси люцерни в нерухомому шарі.

Схема сушильної установки представлена на рис. 2.1.

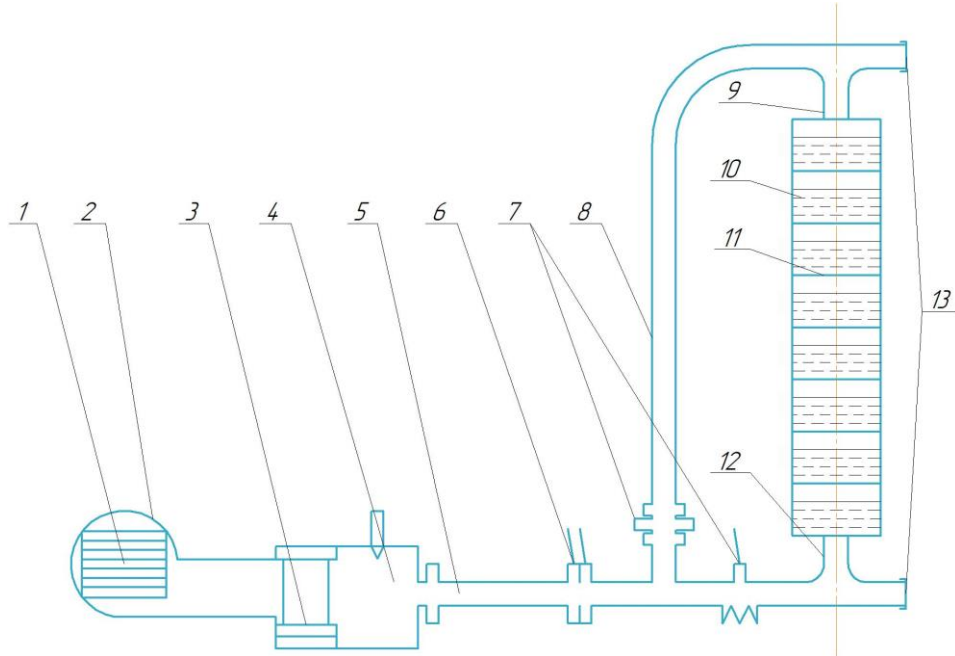


Рисунок 2.1 – Схема сушильної установки для дослідження процесу сушіння насіннєвої маси люцерни в нерухомому шарі: 1 – електрокалорифер; 2 – тепловентилятор; 3 – зволожувач; 4 – змішувальна камера; 5 – повітропровід горизонтальний нагнітальний; 6 – діафрагма вимірювальна; 7 – заслінка шиберна; 8 – повітропровід вертикальний нагнітальний; 9 – перехідник; 10 – камера вертикальна сушильна; 11 – контейнер; 12 – вимірювальна камера; 13 – заглушка

Розроблена принципова схема сушильної установки містить: електрокалорифер 1, тепло вентилятор 2, зволожувач 3, змішувальну камеру 4, горизонтальний нагнітальний повітропровід 5 з вимірювальною діафрагмою 6 та шиберною заслінкою 7, вертикальний нагнітальний повітропровід 8, перехідник 9, вертикальну камеру 10 з контейнерами 11 для розміщення насіннєвої маси люцерни, вимірювальну камеру 12 та заглушку 13 [90].

Контейнери для розміщення зразків насіннєвої маси люцерни встановлені у вертикальній камері та мають форму прямого циліндра. Основа або дно

кожного контейнера мають круглі отвори, діаметр яких становить 3 мм.

На прямолінійних ділянках нагнітальних повітропроводів вмонтовано шиберні заслінки 7, які дають змогу встановлювати та підтримувати задану витрату повітря у вертикальній камері. Для контролю величини витрати повітря на прямолінійних ділянках повітропроводів є діафрагма 6.

Подача повітря у сушильну камеру відбувається шляхом його нагнітання від тепловентилятора зі змішувальної камери через горизонтальний повітропровід 5.

Принцип роботи сушильної установки такий.

Повітря, яке створює тепловентилятор 2 подається в електрокалорифер 1, де воно нагрівається, після чого надходить у зволожувач 3 (за потреби регулювання вологості) і потрапляє в змішувальну камеру 4. Далі потоки розподіляються по горизонтальних 5 і вертикальних 8 повітропроводах до сушильних камер 10. Шиберні заслінки 7 дозволяють змінювати витрату повітря окремо для кожної камери, а діафрагми 6 – контролювати її величину.

У результаті створюються умови для рівномірного пропускання теплоносія крізь шар матеріалу в контейнерах 11, що забезпечує стабільний процес сушіння. Відсутність рециркуляції теплоносія дає змогу підтримувати постійну температуру та вологість повітря на вході в шар упродовж усього процесу сушіння насінневої маси люцерни.

Установка працює без повторного використання теплоносія, що дає змогу забезпечити його постійний сушильний потенціал на вході в шар насінневої маси люцерни упродовж усього дослідження, оскільки тепло вентилятор висмоктує повітря з приміщення, де відносна вологість повітря підтримується постійною.

Конструкція установки дає змогу варіювати товщину шару матеріалу та основні параметри сушильного агенту. Особливістю установки є можливість реалізувати схему інверсійної сушарки. Застосування інверсії сушильного агенту є одним з шляхів підвищення ефективності процесу сушіння [90].

Експериментальні дослідження, проведені на експериментальній установці дозволять визначити раціональні конструктивні та режимні параметри процесу сушіння насінневої маси люцерни.

2.2. Математична модель швидкості сушіння насіннєвої маси люцерни

Енергія проростання насіння люцерни, його схожість залежать головним чином від технології сушіння та параметрів і режимів роботи сушильної установки насіннєвої маси люцерни, мають бути науково обґрунтовані.

Тому для одержання насіння високої якості та з мінімальними енерговитратами, або відповідно з мінімальними витратами коштів необхідно вивчити закономірності зміни процесу сушіння насіння залежно від параметрів і режимів роботи сушильної установки, параметрів насіннєвої маси люцерни та теплоносія.

Крім того, знання зазначених закономірностей дасть можливість обґрунтувати технологію сушіння, керувати цим складним механізмом, визначити шляхи інтенсифікації процесу сушіння насіннєвої маси люцерни.

Науковою базою сучасної теорії сушіння є теорія тепло- і масообміну [91], за якою, залежно від співвідношення вологи різних форм зв'язку усі вологі матеріали поділено на три групи: капілярно-пористі, колоїдні та капілярно-пористі-колоїдні тіла.

Насіннєва маса люцерни володіє властивостями як капілярно-пористих, так і колоїдних матеріалів і відносяться до групи капілярно-пористо-колоїдних матеріалів, крива сушіння яких має яскраво виражені два етапи: перший – постійної, а другий – спадаючої швидкості сушіння.

Відомо, що на першому етапі швидкість сушіння насіння не залежить від властивостей шару матеріалу, який завантажується у сушильну камеру установки [92, 93].

Це зумовлено тим, що випаровування вологи з поверхні частинок матеріалу в такому випадку відбувається як із вільної поверхні води.

Вивчення процесу руху повітря через шар насіннєвої маси люцерни, є складним процесом, яка зумовлюється складною структурою різноманітності форми частинок і їх взаємного розташування.

Потік повітря, що потрапляє в шар, розбивається на велику кількість

струменів, що рухаються дуже складними траєкторіями в проміжках між частинками. Ці проміжки є звивистими каналами неправильної форми та змінного перерізу, багато з яких перетинаються. Окремі струмені повітря, протікаючи такими каналами, омивають поверхню частинок, інтенсивно впливають одна на одну. У сталому режимі, коли потік повністю заповнює вільний простір між частинками, можна вважати, що повітря одночасно обтікає окремі елементи шару і рухається всередині каналів неправильної форми, утворених порожнечами між елементами.

Незважаючи на те, що рухаючись через шар, потік повітря проходить по дуже складних траєкторіях, обтікаючи поверхні окремих частинок. У шарі ж можна намітити головний напрямок руху, по відношенню до якого обтікання поверхні частинок можна вважати явищем другорядним.

Таким чином, передбачається змішану задачу гідродинаміки звести до розв'язання внутрішньої задачі, аналогічної випадку руху прямими шорсткими трубами. Перша з наведених характеристик визначається коефіцієнтом пористості шару. Питому поверхню частинок, що обдувається повітрям, для очищених від домішок насінин трав можна знайти розрахунковим шляхом, виходячи з поверхні зерен та їхньої кількості в одиниці об'єму.

Рівняння кривої швидкості сушіння на першому етапі має вигляд:

$$-\frac{dW}{d\tau} = g_{1c} = \text{const}, \quad (2.1)$$

де W – вологовміст матеріалу, кг вол./кг абс. сух. реч.

τ – час сушіння, год;

g_{1c} – швидкість сушіння матеріалу на першому етапі, кг вол./кг абс. сух. реч./год.)

Починаючи з деякого вологовмісту, званого критичним $W_{кр}$, швидкість сушіння поступово падає і залежить як від умов теплообміну між повітряним потоком і ефективною поверхнею шару (поверхнею, що омивається повітрям), так і від умов просування вологи усередині окремих частинок матеріалу.

На умови просування вологи всередині частинок впливають співвідношення кількості вологи різних форм зв'язку. За рівноважної вологості

(W_p) , процес сушіння припиняється.

При визначенні швидкості сушіння автори [92, 93] обмежувалися простими емпіричними рівняннями.

Експериментальні дослідження процесу сушіння насіннєвої маси люцерни, показали, що крива сушіння цього матеріалу на другому етапі описується математичною моделлю:

$$-\frac{dW}{d\tau} = g_{1c} k_c (W - W_p)^n, \quad (2.2)$$

де k_c – відносний коефіцієнт сушіння;

n – постійна, що характеризує властивості шару матеріалу;

W_p – рівноважний вологовміст матеріалу, кг вол./кг абс. сух. реч.

Рівняння (2.2) містить два коефіцієнти k_c і n , що визначаються експериментально.

Критичний вологовміст $W_{кр}$ шару можна обчислити за формулою:

$$W_{кр} = \left(\frac{1}{k_c} \right)^{\frac{1}{n}} + W_p. \quad (2.3)$$

Швидкість сушіння на першому етапі залежить від параметрів шару насіннєвої маси люцерни та нагрітого повітря, яке проходить через шар висотою $H_{ш}$.

Для розроблення математичної моделі, яка функціонально описує зміну швидкості сушіння від параметрів і режимів роботи сушильної установки, змодельємо шар насіннєвої маси люцерни та завантажено у контейнер 11 (рис. 2.1) вертикальної сушильної камери 10 у вигляді тісного пучка еквівалентних тонких трубок середнього діаметра, який позначимо індексом d_r (рис. 2.2).

При цьому процес сушіння відбувається за подачі нагрітого повітря, яке нагнітається тепловентилятором 2 через повітропроводи 5, 7 і перехідник 9 у вертикальну сушильну камеру [94].

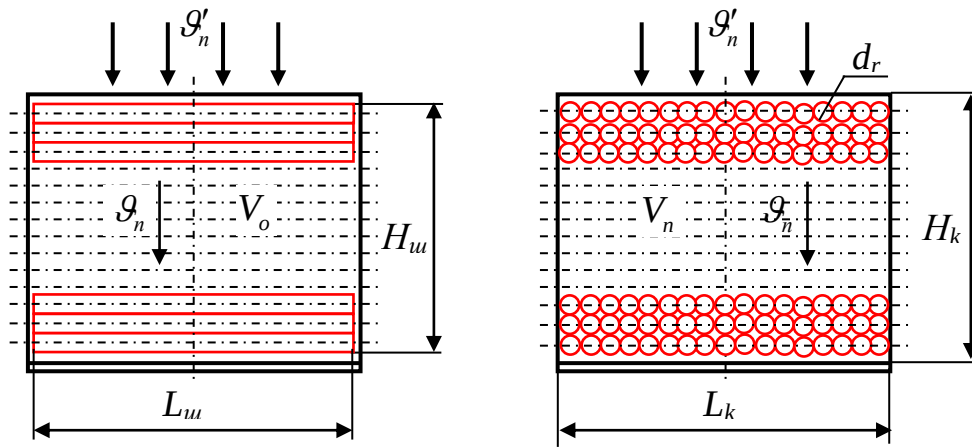


Рисунок 2.2 – Схема до розрахунку швидкості сушіння насіннєвої маси люцерни

Така схема руху повітря звивистими каналами реального шару зручна з погляду вибору основних структурних характеристик, спільних як для чистого насіння, так і насіннєвої маси люцерни під час збирання насінників без відокремлення листостеблової маси.

Такими характеристиками є: пористість шару; питома поверхня частинок шару, шорсткість поверхні частинок.

Для розрахунку коефіцієнта теплообміну α_g між нагрітим повітрям і матеріалом запишемо відоме критеріальне рівняння, яке має вигляд [95]:

$$N_u = A(R_e)^{K_1}, \quad (2.4)$$

де N_u – критерій Нусельта;

A , K_1 – коефіцієнти, що визначаються дослідним шляхом.

У зв'язку з ускладненим масообміном, який характерний для процесу сушіння насіннєвої маси люцерни у рівняння теплообміну (2.4) введемо термодинамічний критерій Гукмана G_u [95], який записано у вигляді:

$$G_u = \frac{t_0 - t_M}{t_0}, \quad (2.5)$$

де t_0 – температура повітря біля входу в шар, $^{\circ}\text{C}$;

t_M – температура мокрого термометра, $^{\circ}\text{C}$.

Експериментальні дослідження з сушіння зразків досліджуваних матеріалів

засвідчили, що зона сушіння вологої насінневої маси люцерни перебуває в межах товщини шару від 0 до 0,04 м, а під час руху через шар меншої зони сушіння теплоносії не встигає насичуватися до вологості 100%.

У такому разі, за інших рівних умов, об'ємний коефіцієнт теплообміну змінюється зі зміною пористості шару. Викликано це тим, що зі зменшенням або збільшенням пористості відповідно збільшується або зменшується ефективна поверхня шару, отже, у критеріальному рівнянні (2.4) необхідно ввести безрозмірну величину у вигляді відношення об'єму порожнеч V_n (м³) до всього об'єму V_o (м³) шару:

$$m_{n.c} = V_n / V_{ui}, \quad (2.6)$$

де $m_{n.c}$ – коефіцієнт пористості шару.

У шарі товщиною більшою за зону сушіння, незалежно від коефіцієнта пористості $m_{n.ui}$ та висоти шару H_{ui} (м), температура за сухим і мокрим термометром теплоносія, що залишає шар, не змінюється, а відносна вологість повітря становить 97...98%.

Звідки випливає, що об'ємний коефіцієнт теплообміну залежить від висоти шару. Тому в критеріальне рівняння (2.4) необхідно ввести симплекс у вигляді відношення H_{ui} / l , де l – визначальний розмір шару. За визначальний розмір шару l прийнято довжину обтікання, що дорівнює половині довжини кола перерізу частинки матеріалу, або:

$$l = 0,5\pi d_r, \quad (2.7)$$

де d_r – середній діаметр перерізу частинки матеріалу, м.

Таким чином, критеріальне рівняння для визначення об'ємного коефіцієнта теплообміну α_v середнього по шару на першому етапі сушіння має вигляд:

$$N_{uVm} = \frac{\alpha_v l^2}{\lambda_n} = AR_e^{K_1} G_u^{K_2} m_{n.c}^{K_3}, \quad (2.8)$$

де N_{uVm} – видозмінений критерій Нусельта для об'ємного коефіцієнта теплообміну;

λ_n – коефіцієнт теплопровідності повітря, кДж/(м·год·град);

K_2, K_3 – постійні, які визначаються експериментально.

За аналогією рівняння для визначення середнього по шару об'ємного коефіцієнта масообміну β_v на першому етапі сушіння матиме вигляд:

$$N_{uV_M} = \frac{\beta_v l^2}{\lambda_c} = BR_{ek}^{K_1} G_u^{K_2} \left(\frac{H_{uu}}{l} \right)^{K_3}, \quad (2.9)$$

де N_{uV_M} – видозмінений критерій Нусельта для об'ємного коефіцієнта масообміну;

λ_c – коефіцієнт масопровідності повітря, кг вол./ (м·год·Па);

β_v – середній по шару коефіцієнт масообміну на першому етапі сушіння, кг вол./ (м³·год·Па);

B – коефіцієнт, який визначається експериментально.

Коефіцієнт масообміну, віднесений до різниці парціальних тисків, можна визначити зі співвідношення згідно з положеннями, які наведено в [96]:

$$\beta_v = \frac{\rho_n^2}{\Delta P_{n.m}} \mathcal{G}_{1c}, \quad (2.10)$$

де $\Delta P_{n.m}$ – середня різниця парціальних тисків пари біля поверхні матеріалу і в повітрі, Н/м²;

$$\Delta P_m = \frac{\Delta P_{1n.m} - \Delta P_{2n.m}}{2,3 \lg(\Delta P_{1n.m} / \Delta P_{2n.m})}, \quad (2.11)$$

де $\Delta P_{1n.m}$ – початкова різниця парціальних тисків, Н/м².

$\Delta P_{2n.m}$ – кінцева різниця парціальних тисків, Н/м².

У період постійної швидкості сушіння початкова різниця парціальних тисків $\Delta P_{1n.m}$ дорівнює різниці парціальних тисків адіабатично насиченого повітря $P_{n.n}$ та повітря $P_{n.uu}$, що надходить у шар:

$$\Delta P_{1n.m} = P_{n.n} - P_{n.uu}. \quad (2.12)$$

Кінцева $\Delta P_{2n.m}$ різниця дорівнює різниці парціальних тисків адіабатично

насиченого повітря $P_{n.n}$ та повітря $P_{o.u}$, що обдуває шар:

$$\Delta P_{2n.m} = P_{n.n} - P_{o.u}. \quad (2.13)$$

Еквівалентний критерій Рейнольдса R_{ek} визначається за відомим співвідношенням:

$$R_{ek} = \frac{\mathcal{G}_n l}{\gamma_n}, \quad (2.14)$$

де γ_n – кінематична в'язкість повітря, м²/с,

при цьому швидкість повітряного потоку $\mathcal{G}_n$ в шарі дорівнює:

$$\mathcal{G}_n = \frac{\mathcal{G}'_n \rho'_n}{\rho_n}, \quad (2.15)$$

де $\mathcal{G}'_n$ – швидкість повітряного потоку на початку шару, м/с;

ρ'_n , ρ_n – відповідно, початкова та поточна густина повітря, кг/м³,

а кінематична в'язкість повітря γ_n визначається за формулою:

$$\gamma_n = \frac{\mu_n g}{\rho_n}, \quad (2.15^*)$$

де μ_n – динамічна в'язкість повітря, кг с/м²;

g – гравітаційне прискорення, м/с².

Підставивши в (2.14) замість $\mathcal{G}_n$ і γ_n їхнє значення з (2.15) і (2.15*), отримаємо:

$$R_{ek} = \frac{\mathcal{G}'_n l \rho_n}{\mu_n g}. \quad (2.16)$$

Розв'язуючи спільно рівняння (2.9) і (2.10) та підставивши замість R_{ek} його значення з (2.16), отримаємо математичну модель, яка функціонально описує зміну швидкості сушіння $\mathcal{G}_{1c}$ насіннєвої маси люцерни на першому етапі відносного шару висотою H_u :

$$\mathcal{G}_{1c} = A \left(\frac{\mathcal{G}'_n \rho_n l}{\mu_n g} \right)^{K_1} G_u^{K_2} \left(\frac{H_u}{l} \right)^{K_3} \frac{\lambda_n \Delta P_{n.m}}{\rho_n l^2}, \quad (2.17)$$

Визначаємо складову $\Delta P_{n.m}$ виразу (2.17) таким чином:

- визначаємо початковий сушильний потенціал повітря ΔW_n (кг вол./кг абс. сух. пов.), що характеризується різницею сушильного потенціалу вологовмісту $W_{n.n}$ (кг вол./кг абс. сух. пов.) адіабатично насиченого повітря та сушильного потенціалу повітря $W_{n.u}$ (кг вол./кг абс. сух. пов.), що надходить у шар:

$$\Delta W_n = W_{n.n} - W_{n.u}; \quad (2.18)$$

- визначаємо парціальний тиск пари вологого повітря за формулою [96]:

$$P = \frac{P_\phi W_{n.u}}{0,622 + W_{n.u}}, \quad (2.19)$$

де P_ϕ – тиск барометричний, Па;

- у нашому випадку можна прийняти припущення, що при незначному значенню $W_{n.u}$, порівняно з числовим значенням 0,622, парціальний тиск пари вологого повітря визначається за спрощеною формулою:

$$P \approx \frac{P_\phi W_{n.u}}{0,622}. \quad (2.20)$$

- тоді за аналогією ΔP визначається за формулою:

$$\Delta P \approx \frac{P_\phi \Delta W_{n.u}}{0,622}, \quad (2.21)$$

де $\Delta W_{n.u}$ – середній сушильний потенціал повітря, кг вол./кг абс. сух. пов.;

- оскільки швидкість сушіння шару насіннєвої маси люцерни на першому етапі, за рівних інших умов є постійною, то середній сушильний потенціал повітря $\Delta W_{n.u}$ по висоті шару H_u пропорційний початковому сушильному потенціалу повітря ΔW_n .

Тоді

$$\Delta W_{n.u} = Z_1 \Delta W_n, \quad (2.22)$$

де Z_1 – коефіцієнт пропорційності.

Висота шару $\Delta W_{n.u}$ насіннєвої маси люцерни за всіх інших рівних умов, пропорційна питомому навантаженню шару та становить:

$$H_u = Z_2 P_c, \quad (2.23)$$

де P_c – питома навантаження матеріалу на сітку сушильної установки, Н/м²;

Z_2 – коефіцієнт пропорційності, м³/Н.

Підставивши в рівняння (2.17) данні $\Delta W_{n.u}$ і $\Delta W_{n.u}$ з (2.22), (2.23) та після перетворення та спрощення, отримаємо:

$$g_{1c} = C Q_{num}^{K_1} G_u^{K_2} P_c^{K_3} \Delta W_n^{K_4}; \quad (2.24)$$

де C – коефіцієнти, що визначаються дослідним шляхом

Q_{num} – питома витрата повітря, яке продувається через шар, м³/год.

При цьому питому витрату повітря Q_{num} (м³/с), яке продувається через шар насіннєвої маси люцерни можна визначити за формулою:

$$Q_{num} = \frac{3600 g_n \rho_n}{m_n H_u}, \quad (2.25)$$

де m_n – маса продутого повітря, кг.

Тоді згідно з (2.24) та (2.25) для першого етапу отримаємо залежність, яка функціонально описує зміну швидкості сушіння g_{1c} кг вол./ (кг абс. сух. реч./год) шару насіннєвої маси люцерни висотою H_u :

$$g_{1c} = C \left(\frac{3600 g_n \rho_n}{m_n H_u} \right)^{K_1} G_u^{K_2} P_c^{K_3} \Delta W_n^{K_4}. \quad (2.26)$$

З урахуванням (2.24), (2.25) та рівняння (2.2), отримаємо математичну модель, яка функціонально описує процес сушіння насіннєвої маси люцерни на другому етапі, яка набуде такого вигляду:

$$-\frac{dW}{d\tau} = C Q_{num}^{K_1} G_u^{K_2} P_c^{K_3} \Delta W_n^{K_4} k_c (W - W_p)^n, \quad (2.27)$$

де коефіцієнти C , K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , k_c і n визначаються експериментально.

Рівняння (2.27) дає змогу проаналізувати процес досушування насіннєвої маси люцерни у щільному шарі залежно від швидкості, температури і вологості

теплоносія, питомого навантаження шару з урахуванням властивостей матеріалу як об'єкта сушіння, визначити оптимальний режим сушіння матеріалу.

Згідно з аналітичною залежністю (2.24) та (2.26) побудовано графічну інтерпретацію зміни швидкості сушіння $\mathcal{G}_{1c}$ насіннєвої маси люцерни на першому етапі, відповідно: як функції $\mathcal{G}_{1c} = f_g(Q_{num}; \Delta W_n)$, рис 2.3; $\mathcal{G}_{1c} = f_g(\mathcal{G}_n; H_{ui})$, рис 2.4.

Встановлено, що:

- швидкість сушіння $\mathcal{G}_{1c}$ насіннєвої маси люцерни на першому етапі може становити від 0,06 до 1,05 кг вол./кг абс. сух. реч./год) за відповідної зміни питомої витрати повітря Q_{num} яке продувається через шар від $5,0 \cdot 10^{-2}$ до $25,0 \cdot 10^{-2}$ м³/с та зміни початкового сушильного потенціалу ΔW_n повітря від $2,0 \cdot 10^{-3}$ до $10,0 \cdot 10^{-3}$ кг вол./кг абс. сух. пов., рис. 2.3;

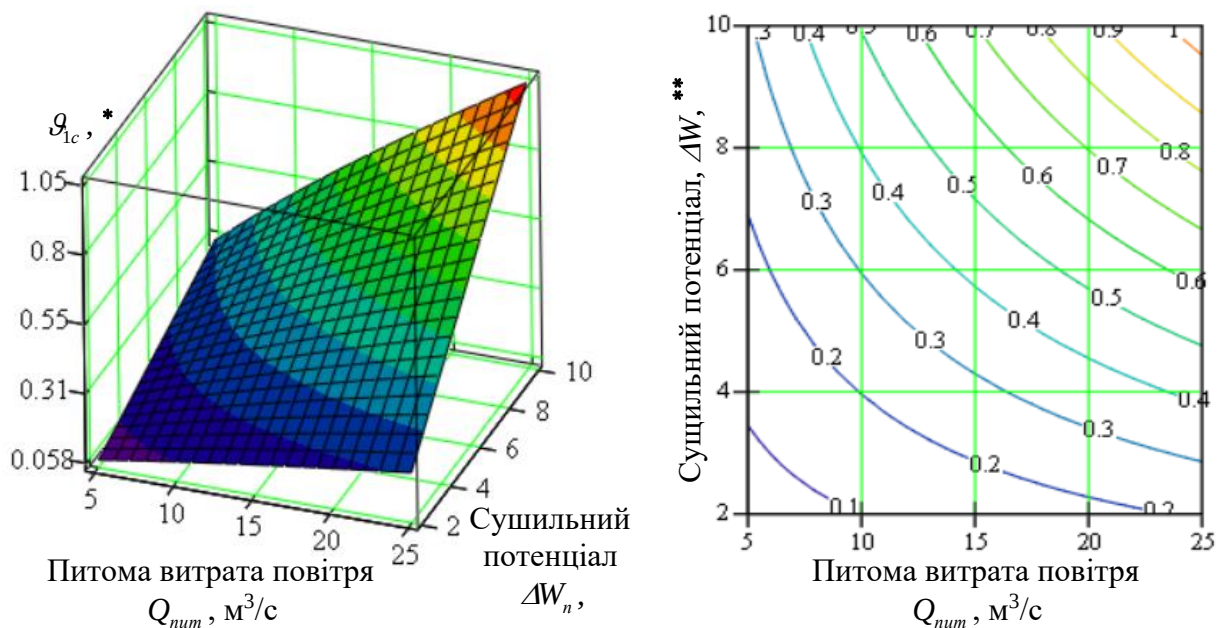


Рисунок 2.3 – Залежність зміни швидкості сушіння $\mathcal{G}_{1c}$ насіннєвої маси люцерни на першому етапі як функція $\mathcal{G}_{1c} = f_g(Q_{num}; \Delta W_n)$

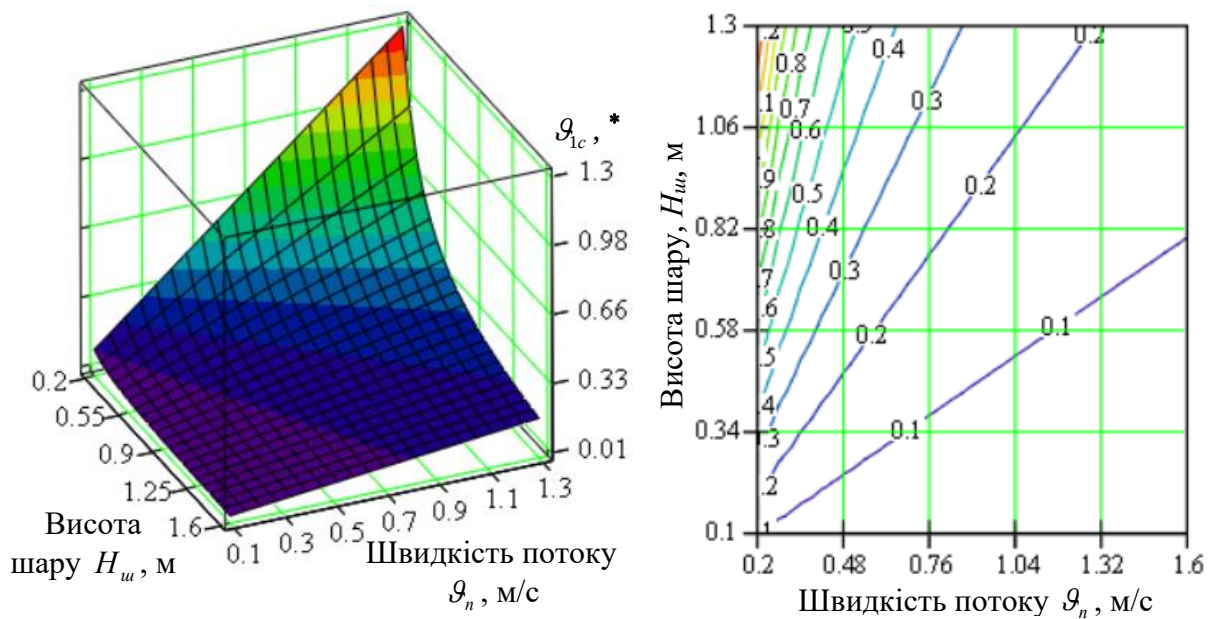


Рисунок 2.4 – Залежність зміни швидкості сушіння G_{1c} насіннєвої маси люцерни на першому етапі як функція $G_{1c} = f_g(G_n; H_w)$

- швидкість сушіння G_{1c} насіннєвої маси люцерни на першому етапі змінюється в межах від 0,01 до 1,3 кг вол./кг абс. сух. реч./год) за відповідної зміни швидкості руху потоку повітря G_n , яке продувається через шар від 0,1 до 1,3 м/с та зміни висоти шару H_w від 0,2 до 1,6 м, рис. 2.4.

2.3. Визначення часу та питомої витрати повітря при сушінні насіннєвої маси люцерни

Одним з основних режимних параметрів сушіння насіннєвої маси люцерни є питома витрата повітря, яка продувається через шар насіннєвої маси люцерни.

Для визначення питомої витрати повітря Q_{nut} , яке продувається через шар насіннєвої маси люцерни скористаємося залежностями (2.11) і (2.26).

Загальний час τ (год), який необхідний для зменшення вологовмісту шару від початкового до кінцевого значень, складається з часу сушіння на першому τ_1 (год) та на другому τ_2 (год) етапах, або $\tau = \tau_1 + \tau_2$.

Для знаходження часу τ_1 запишемо рівняння (2.1) у вигляді

($-dW = g_{1c} d\tau$) та про інтегруємо вираз в межах від від W_0 до $W_{кр}$ та часу τ від $\tau_0 = 0$ до τ_1 . При цьому з урахуванням (2.26), отримаємо вираз для визначення часу τ_1 сушіння шару насіннєвої маси люцерни на першому етапі:

$$\tau_1 = \frac{W_0 - W_{кр}}{CQ_{num}^{K_1} G_u^{K_2} P_c^{K_3} \Delta W_n^{K_4}}. \quad (2.28)$$

де W_0 – початковий вологовміст матеріалу, кг вол./кг абс. сух. реч.

Для знаходження часу τ_2 запишемо рівняння (2.27) у вигляді ($-\frac{dW}{(W - W_p)^n} = CQ_{num}^{K_1} G_u^{K_2} P_c^{K_3} \Delta W_n^{K_4} k_c d\tau$) та проінтегруємо вираз в межах від $W_{кр}$

до W_2 та часу τ від τ_1 до τ_2 за умови, коли $n \neq 1$ та умови, коли $n = 1$

Після інтегрування рівняння (2.27) за умови, коли $n \neq 1$, отримаємо залежність для визначення часу τ_2 сушіння шару насіннєвої маси люцерни на другому етапі, при цьому:

$$\tau_2 = \frac{(W_{кр} - W_p)^{1-n} - (W_2 - W_p)^{n-1}}{(n-1)k_c CQ_{num}^{K_1} G_u^{K_2} P_c^{K_3} \Delta W_n^{K_4}}, \quad (2.29)$$

де W_2 – кінцевий вологовміст шару насіннєвої маси люцерни після сушіння на другому етапі, кг вол./кг абс. сух. реч.

У разі, якщо $n = 1$, залежність для визначення часу τ_2 сушіння шару насіннєвої маси люцерни на другому етапі набуде вигляду:

$$\tau_2 = \frac{2,3 \lg(W_{кр} - W_p)}{(W_2 - W_p)k_c CQ_{num}^{K_1} G_u^{K_2} P_c^{K_3} \Delta W_n^{K_4}}. \quad (2.30)$$

Тоді:

- за $n \neq 1$ загальний час τ сушіння становитиме:

$$\tau = \frac{(1-n)x(W_0 - W_{кр}) + (W_{кр} - W_p)^{1-n} - (W_2 - W_p)^{n-1}}{(1-n)k_c CQ_{num}^{K_1} G_u^{K_2} P_c^{K_3} \Delta W_n^{K_4}}. \quad (2.31)$$

- за $n = 1$ залежність для визначення загального часу τ сушіння

насіннєвої маси люцерни набуде такого вигляду:

$$\tau = \frac{(W_0 - W_{kp}) + 2,3 \lg \left(\frac{W_{kp} - W_p}{W_2 - W_p} \right)}{k_c C Q_{num}^{K_1} G_u^{K_2} P_c^{K_3} \Delta W_n^{K_4}}. \quad (2.32)$$

Виразивши швидкість повітряного потоку в шарі через питому витрату, з виразів (2.31) і (2.32) отримаємо кінцеві залежності для визначення питомої витрати повітря, яке проходить через шар насіннєвої маси люцерни за умови:

- при $n \neq 1$

$$Q_{num}^{K_1} = \frac{(1-n)k_c(W_0 - W_{kp}) + (W_{kp} - W_p)^{1-n} - (W_2 - W_p)^{n-1}}{\tau(1-n)k_c C G_u^{K_2} P_c^{K_3} \Delta W_n^{K_4}}; \quad (2.33)$$

- при $n = 1$

$$Q_{num}^{K_1} = \frac{(W_0 - W_{kp}) + 2,3 \lg \left(\frac{W_{kp} - W_p}{W_2 - W_p} \right)}{\tau k_c C G_u^{K_2} P_c^{K_3} \Delta W_n^{K_4}}. \quad (2.34)$$

Для визначення оптимальної питомої витрати повітря необхідно знати:

- початковий, критичний і рівноважний вологовміст матеріалів;
- питома навантаження на сітку сушильної установки;
- гранично-допустимий початковий сушильний потенціал повітря $\Delta W_{n,0}$

та загальний час сушіння τ .

У роботі [114] встановлено, що насіннєву масу люцерни необхідно сушити до вологості 20-21 %, оскільки при такій вологості досягається найбільший ступінь витирання насіння із бобів. Гранично-допустимий початковий сушильний потенціал можна визначити за $I-d$ діаграмою [97], виходячи з гранично-допустимої температури нагріву насіння і вологості атмосферного повітря стосовно умов зони сушіння. Критичний вологовміст визначаємо за рівнянням (2.3). Гранично-допустима температура нагріву, рівноважний вологовміст насіннєвої маси люцерни після збирання насінників будуть знайдені експериментально.

2.4. Дослідження втрати тиску повітря в шарі насінневої маси люцерни

Для визначення втрати тиску повітря ΔP (Па), яке проходить через шар насінневої маси люцерни висотою $H_{ш}$ складено схему, рис. 2.3.

Приймаємо умову, що через вологий шар насінневої маси люцерни висотою $H_{ш}$, яку завантажено у контейнер 11 (рис. 2.1) вертикальної камери 10 сушильної установки у напрямку осі x проходить нагріте повітря, швидкістю руху якого в шарі становить $g_{ш}$ (м/с).

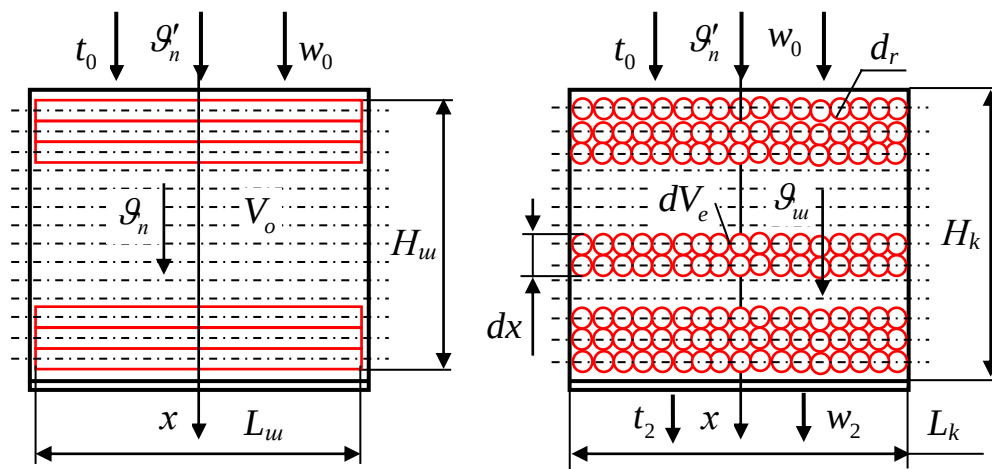


Рисунок 2.5 – Схема до розрахунку втрати тиску повітря ΔP , яке проходить через шар насінневої маси люцерни

При цьому початкові температура і вологість шару насінневої маси люцерни, відповідно, дорівнюють t_0 і W_0 . Проходячи через шар, повітря насичується вологою, підсушуючи насінневу масу люцерни. Температура і вологість повітря, яке виходить назовні через шар насінневої маси люцерни, відповідно, дорівнюють t_2 і w_2 .

Виділимо в шарі насінневої маси люцерни елементарний об'єм dV_e (м³) висотою dx (м) і складемо рівняння теплового балансу для повітря за час τ .

При цьому маємо:

$$C_n \rho_n dx S_c m_{n.c} \frac{dt}{d\tau} = C_n \rho_n g_u S_c m_{n.c} t(x, \tau) d\tau - \alpha_s - \\ - \alpha_s F_l (t_0 - t_M) d\tau - C_n \rho_n g_u S_c m_{n.c} t(x + dx, \tau) d\tau \quad (2.35)$$

де C_n – теплоємність повітря, Дж/кг·град;

α_s – коефіцієнт теплообміну, віднесений до одиниці поверхні матеріалу, кДж/м²·год. °С;

S_c – корисна площа сушарки, м²;

F_l – площа поверхні насінневої маси люцерни, яка обдувається повітрям, м².

З рівняння (2.35) випливає, що зміна кількості тепла повітря, пройденого в одиниці об'єму шару насінневої маси люцерни (ліва частина рівності), дорівнює кількості тепла, що пройдено повітрям під час входу в шар (перший доданок правої частини рівності), мінус тепло, яке передане повітрям шару та яке витікає з шару за час τ (другий доданок першої частини рівності).

Після деяких перетворень рівняння (2.35) теплового балансу для повітря за час τ матиме такий вигляд:

$$\frac{dt}{d\tau} + g_n \frac{dt}{dx} = - \frac{\alpha_s F_l}{m_{n.c} C_n \rho_n dV_e} (t - t_M). \quad (2.36)$$

На першому етапі сушіння, коли на поверхні шару частинок насінневої маси люцерни перебуває вільна волога, температура повітря t в заданому перетині шару в часі не змінюється

Тоді рівняння (2.36) можна спростити до такого вигляду:

$$g_n \frac{dt}{t - t_M} = - \frac{\alpha_s F_l dx}{m_{n.c} C_n \rho_n dV_e}. \quad (2.37)$$

Проінтегрувавши рівняння (2.37) в межах від t_0 до t_2 та від 0 до H_u , отримаємо:

$$\ln \frac{t_0 - t_M}{t_2 - t_M} = \frac{\alpha_s F_l H_u}{m_{n.c} C_n \rho_n g_n dV_e}, \quad (2.38)$$

де $t_0 - t_M$, $t_2 - t_M$ – психрометрична різниця, відповідно, повітря яке входить в шар і яке виходить з шару насінневої маси люцерни, °С.

Розв'язуючи рівняння (2.38) відносно відношення F'_l / dV_e , отримаємо:

$$F'_l = \frac{F'_l}{dV_e} = \frac{m_{n.c} C_n \rho_n g_{uu}}{\alpha_s H_{uu}} \ln \frac{t_0 - t_M}{t_2 - t_M} \quad (1/\text{м}). \quad (2.39)$$

У результаті численних дослідів із тепло- і масообміну у роботі [98] встановлено, що в разі випаровування вологи з вільної поверхні та значення коефіцієнта $R_e \leq 200$, коефіцієнт теплообміну з розрахунку на одиницю площі, що обдувається повітрям, можна визначити за наступною формулою:

$$\alpha_s = \frac{\lambda_n}{l} \left(2 + 1,07 k_{II}^{0,3} G_u^{0,175} R_e^{0,48} \right), \quad (2.40)$$

де k_{II} – критерій Прандтля.

При цьому:

$$\lambda_n = \lambda_0 + 0,0172 w_{c.n}; \quad w_{c.n} = \frac{(w_1 - w_2)}{2,3 \lg(w_1 / w_2)}, \quad (2.41)$$

де λ_0 – коефіцієнт теплопровідності сухого повітря, кДж/(град·м/с);

$w_{c.n}$ – середня відносна вологість повітря, в долях одиниці;

w_1 , w_2 – відповідно, вологість повітря, яке надходить в шар та яке виходить з шару насінневої маси люцерни, %;

$$k_{II} = \mu C_n / \lambda_n; \quad R_e = l g_{uu} / m_{n.c} \gamma_n, \quad (2.42)$$

де μ – динамічна в'язкість повітря, Н·с/м².

Підставивши значення G_u з (2.5), λ_n з (2.41), k_{II} , R_e з (2.42) в рівняння (2.40), отримаємо:

$$\alpha_s = \left[2 + 1,07 \left(\frac{\mu C_n}{\lambda_0 + 0,0172 w_{c.n}} \right)^{0,33} \left(\frac{l g_{uu}}{\gamma_n m_{n.c}} \right)^{0,48} \left(\frac{t_0 - t_M}{t_0} \right) \right] \left(\frac{\lambda_0 + 0,0172 w_{c.n}}{l} \right). \quad (2.43)$$

Після підстановки значення λ_s із (2.43) в рівняння (2.39), отримаємо залежність для визначення питомої ефективної площі поверхні насінневої маси

люцерни, яка обдувається повітрям:

$$F_l = \frac{m_{n.c} C_n \rho_n g_u \ln \frac{t_0 - t_M}{t_2 - t_M}}{\left[2 + 1,07 \left(\frac{\mu C_n}{\lambda_0 + 0,0172 w_{c.n}} \right)^{0,33} \left(\frac{l g_u}{\gamma_n m} \right)^{0,48} \left(\frac{t_0 - t_M}{t_0} \right) \right] \left(\frac{\lambda_0 + 0,0172 w_{c.n}}{l} \right)}. \quad (2.44)$$

Для побудови моделі процесу, приймаємо положення, що рух повітря в шарі насіннєвої маси люцерни (висота H_u , пористість $m_{n.c}$, швидкість повітря на вільний перетин g_u) замінюється рухом у шорсткій циліндричній трубі довжиною L_m (м) та діаметром d_m (м), середню швидкість руху якого позначимо символом g_m (м/с).

Для розрахунку втрати тиску повітря в шарі насіннєвої маси люцерни, застосуємо відому залежність [99]:

$$\Delta P = \frac{\lambda_m L_m \rho_n g_m^2}{2 d_m}, \quad (2.45)$$

де λ_m – коефіцієнт тертя повітря, яке продувається по поверхні шорсткої еквівалентної труби.

Еквівалентний діаметр каналів у реальному шарі визначали з врахуванням рівності (2.6) для еквівалентної труби і реального шару:

$$\frac{0,25 \pi d_m^2 H_u}{\pi d_m H_u} = \frac{V_n / V_u}{F_l / V_n} = \frac{m_{n.c}}{F_l}, \quad (2.46)$$

де V_u – об'єм шару насіннєвої маси люцерни, м³.

Зі співвідношення (2.46) отримаємо, що еквівалентний діаметр каналів d_m і середня швидкість руху g_m повітря у каналі визначається за залежністю:

$$d_m = \frac{4 m_{n.c}}{F_l}; \quad g_m = \frac{g_u}{m_{n.c}}. \quad (2.47)$$

Але залежність (2.45) не враховує вплив шорсткості поверхні, яка обдувається повітрям і звивистість каналів неправильної форми та змінного

перерізу, на величину опору шару насінневої маси люцерни.

Приймаємо припущення, що ці структурні характеристики враховуємо загальним коефіцієнтом опору $\lambda_{ш}$ шару насінневої маси люцерни, при цьому коефіцієнт тертя повітря по поверхні шорсткої еквівалентної труби λ_m дорівнює загальному коефіцієнту $\lambda_{ш}$ опору шару, а довжина труби L_m рівна висоті шару $H_{ш}$ насінневої маси люцерни $L_m = H_{ш}$.

Загальний коефіцієнт опору $\lambda_{ш}$ шару насінневої маси люцерни враховує не тільки вплив опору, а й місцевих опорів, що виникають під час руху повітря викривленими каналами шару й обтікання ним окремих частинок шару насінневої маси люцерни.

Тоді, враховуючи (2.47) і (2.47) залежність (2.45) для визначення втрати тиску повітря в шарі насінневої маси люцерни матиме вигляд:

$$\frac{\Delta P}{H_{ш}} = \frac{\lambda_{ш} F_{л}}{8m_{n.c}^3} \rho_n g_n^2. \quad (2.48)$$

Для зернистих матеріалів, зокрема й для очищеного насіння люцерни, питома ефективна площа поверхні $F_{л}$ насінневої маси люцерни може бути виражена через середній розмір часток за формулою [100]:

$$F_{л} = EF_r, \quad (2.49)$$

де E – коефіцієнт нескладності частини;

F_r – площа поверхні частинок, m^2 .

При цьому:

$$F_r = \frac{6(1 - m_{n.c})}{\Phi d_r}; \quad \Phi = \frac{F_k}{F_r}; \quad d_r = \sqrt{\frac{6M}{Tn' \rho_{ш}}}, \quad (2.50)$$

де F_k – площа поверхні кулі, об'єм якої дорівнює об'єму частинки насінневої маси люцерни, площа поверхні якого дорівнює $F_{ш}$, m^2 ;

d_r – середній діаметр насінин люцерни, m ;

M – маса одиниці об'єму шару, kg/m^3 ;

n' – кількість частинок в одиниці об'єму, $1/\text{м}^3$;

$\rho_{ш}$ – щільність частинок шару, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Приймаємо, що для насінневої маси люцерни питома геометрична F_r й ефективна поверхня шару F_{λ} є рівними, або адекватними, а F_{λ} визначається за формулою (2.44).

Для визначення втрати тиску повітря ΔP в шарі насінневої маси люцерни, помножимо і розділимо праву частину рівняння (2.48) на спільний добуток $\lambda_0 F_0 m_0^3$.

При цьому отримаємо загальне спрощене рівняння, яке дає змогу визначити втрати тиску ΔP повітря у шарі насінневої маси люцерни:

$$\frac{\Delta P}{H_{ш}} = \Theta \varepsilon \lambda_0 \rho_{ш} g_n^2, \quad (2.51)$$

де Θ – постійна базового шару;

ε – відносний коефіцієнт газопроникності базового шару;

λ_0 – загальний коефіцієнт опору базового шару.

Як базовий шар насінневої маси люцерни доцільно вибирати матеріал, коефіцієнт несферичності зерен якого дорівнює одиниці, а коефіцієнт пористості шару для наймовірнішого укладання ромбоподібної форми зерен $m_0 = \text{const}$.

При цьому:

$$\Theta = F_{\lambda} / 8m_0^3; \quad \varepsilon = \frac{\lambda_{ш}}{\lambda_0} \frac{F_0}{F_{\lambda}} \frac{m_0^3}{m_{н.с}^3}, \quad (2.52)$$

де m_0 – коефіцієнт пористості базового шару;

F_0 – питома ефективна площа поверхні базового шару, м^2 .

Відносний коефіцієнт газопроникності шару ε є фізичною величиною, яка показує у скільки разів опір шару даного матеріалу більший, або менший за опір шару базового матеріалу для якого $\varepsilon = 1$.

У загальному випадку втрати тиску повітря ΔP , яке продувається через шар насінневої маси люцерни можна визначити з формули (2.48), записавши її таким чином:

$$\Delta P = \frac{H_u \lambda_u F_l}{8m_{n.c}^3} \rho_n \mathcal{G}_n^2. \quad (2.53)$$

Згідно з формулою (2.53) побудовано залежність зміни втрати тиску ΔP повітря, яке продувається через шар насіннєвої маси люцерни як функція $\Delta P = f_{\Delta P}(H_u; \mathcal{G}_n)$ та як функція $\Delta P = f_{\Delta P}(H_u)$, які наведено на рис. 2.6, 2.7.

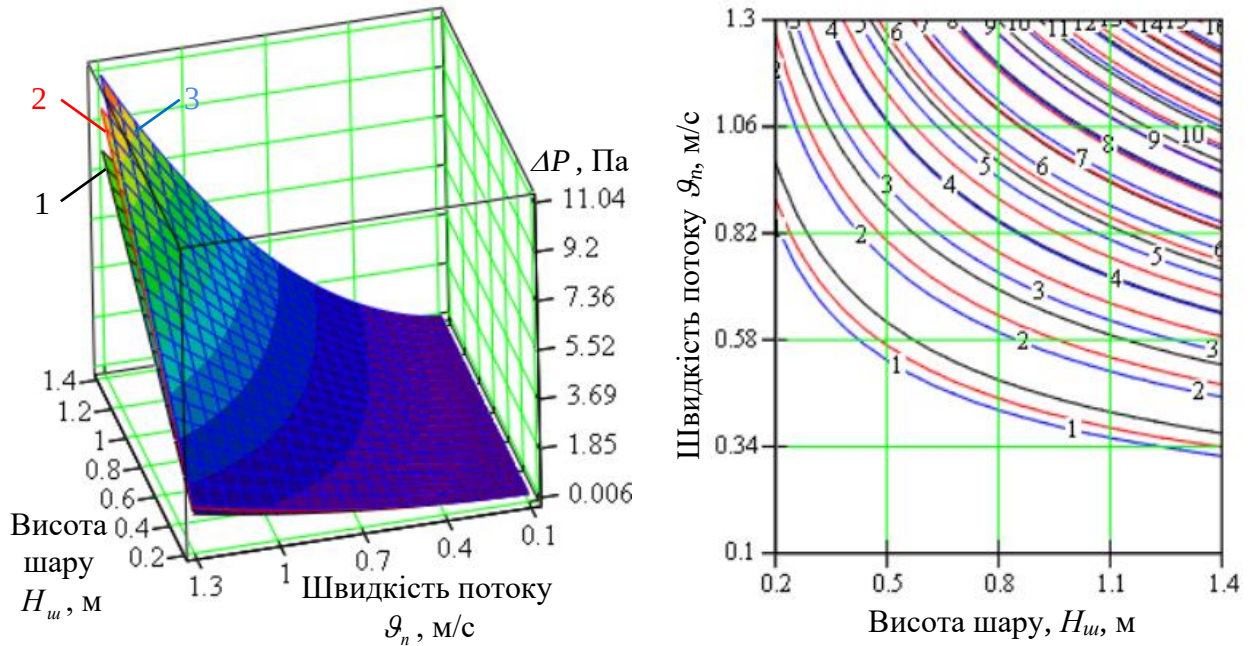


Рисунок 2.6 – Залежність функціональної зміни втрати тиску повітря ΔP , яке продувається через шар насіннєвої маси люцерни як функція $\Delta P = f_{\Delta P}(H_u; \mathcal{G}_n)$

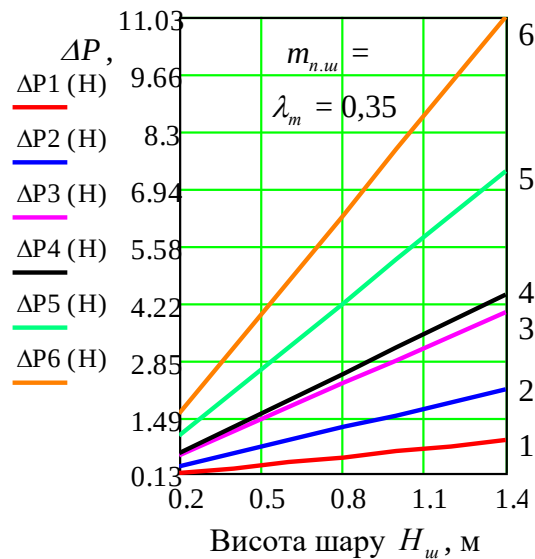


Рисунок 2.7 – Залежність функціональної зміни втрати тиску повітря ΔP , яке продувається через шар насіннєвої маси люцерни як функція $\Delta P = f_{\Delta P}(H_u)$: 1, 2, 3, 4, 5, 6 – відповідно, $\mathcal{G}_n = 0,1; 0,4; 0,6; 0,7; 1,0; 1,3$ м/с

За результати аналізу графічної інтерпретації рис. 2.6 було встановлено, що аналітична зміна втрати тиску повітря ΔP , яке продувається через шар насінневої маси люцерни коливається в межах від 0,13 до 11,0 Па залежно від зміни висоти шару $H_{ш}$ від 0,2 до 1,4 м та зміни швидкості повітряного потоку $\mathcal{Q}_n$ від 0,05 до 0,15 м/с.

Значне зростання втрати тиску повітря ΔP , яке продувається через шар насінневої маси люцерни, відбувається за зміни висоти шару більшою за 0,5 м та швидкості руху повітряного потоку $\mathcal{Q}_n$ більшою за 0,11 м/с (прямі лінії 4, 5, 6, рис. 2.6), при цьому втрати тиску повітря ΔP збільшуються в середньому в 2,4...2,6 рази.

2.5. Висновки до розділу 2

2.5.1. Розроблено аналітичну математичну модель (2.17), яка описує функціональну зміну середньої швидкості сушіння $\mathcal{Q}_{1c}$ відносного шару насінневої маси люцерни на першому етапі залежно від основних параметрів процесу: швидкості повітряного потоку $\mathcal{Q}_n$ в шарі, висоти шару $H_{ш}$, термодинамічного критерію Гукмана G_u , питомої витрати повітря, яке продувається через шар Q_{nut} , початкового сушильного потенціалу повітря ΔW_n .

2.5.2. Встановлено, що:

- швидкість сушіння $\mathcal{Q}_{1c}$ насінневої маси люцерни на першому етапі змінюється в межах від 0,06 до 1,05 кг вол./кг абс. сух. реч./год за відповідної зміни питомої витрати повітря Q_{nut} , яке продувається через шар від $5,0 \cdot 10^{-2}$ до $25,0 \cdot 10^{-2}$ м³/с та зміни початкового сушильного потенціалу ΔW_n повітря від 2,0 10^{-3} до $10,0 \cdot 10^{-3}$ кг вол./кг абс. сух. пов.;

- швидкість сушіння $\mathcal{Q}_{1c}$ насінневої маси люцерни на першому етапі змінюється в межах від 0,1 до 2,4 кг вол./кг абс. сух. реч./год за відповідної зміни швидкості потоку повітря $\mathcal{Q}_n$, яке продувається через шар від 0,2 до 1,2

м/с та зміни висоти шару $H_{ш}$ від 0,2 до 1,4 м.

2.5.3. У результаті теоретичних досліджень отримано рівняння (2.27), що дає змогу проаналізувати процес сушіння насіннєвої маси люцерни у щільному шарі для другого етапу залежно від параметрів шару і теплоносія з урахуванням властивостей матеріалів, як агентів сушіння.

2.5.4. Розроблено залежності (2.31)-(2.34) для визначення загального часу τ та питомої витрати повітря Q_{nut} процесу сушіння насіннєвої маси люцерни.

2.5.6. За результатами аналізу графічної інтерпретації було встановлено, що аналітична зміна втрати тиску повітря ΔP , яке продувається через шар насіннєвої маси люцерни, коливається в межах від 0,13 до 11,0 Па залежно від зміни висоти шару $H_{ш}$ від 0,2 до 1,4 м та зміни швидкості повітряного потоку G_n від 0,1 до 1,3 м/с.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях [10, 90, 102, 106, 109, 110].

1. Замрій М.А. Визначення швидкості сушіння насіннєвої маси люцерни в нерухомому шарі. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2025. № 2(117). С. 46–50. DOI: 10.37128/2306-8744-2025-2-5.

2. 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.

3. Замрій М.А., Солоня О.В., Волинець Є.О. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Ескізне креслення «Принципова схема пристрою для сушіння пожнивної суміші люцерни». Свідоцтво № 141367 від 02.12.2025; заяв. № с202508622 від 07.10.2025.

4. Замрій М.А., Солоня О.В. Обґрунтування параметрів сушильної установки для насіннєвої маси люцерни : тези доп. IV Всеукр.ї наук.-практ. конф. молодих вчених «Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва». Дніпро, ДДАЕУ, 21 листопада 2025 р. С. 132–135.

5. Степаненко С.П., Котов Б.І., Волик Д.А., Замрій М.А. Математичне моделювання процесу переміщення зернового матеріалу на поверхні безпровального решета вібропневмоімпульсного сепаратора. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 3 (110). С. 22-34. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-3-3

6. Slipchenko M., Polievoda Y., Zamrii M., Symonik B. Study of grain flow in a cylindrical vibrating sieve. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2024. № 3 (114). С. 27-33. DOI: 10.37128/2306-8744-2024-3-4.

РОЗДІЛ 3.

ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Програма, завдання та характеристика експериментальних установок

У загальному контексті ступінь науково-практичної значущості розроблених аналітичних моделей, які описують будь-який технологічний процес визначається або регламентується значенням критерію адекватності, або ступеня відповідності її теоретичних результатів реальним практичним показникам [101].

Згідно з поставленими завданнями дисертаційного дослідження програма проведення експериментальних досліджень процесу сушіння насіннєвої маси люцерни, яка зібрана із рослин зображених на рисунку 3.1 передбачає:

- перевірку адекватності розроблених теоретичних моделей;
- пошук нових, або доповнення існуючих положень процесу.

Дані критерії адекватності встановлюються у результаті проведення експериментальних досліджень, реалізація яких відбувається за відповідними розробленими методиками та планами [102, 103].



Рисунок 3.1 – Загальний вигляд посівів і бобів люцерни

При цьому програма проведення експериментальних досліджень процесу сушіння насіннєвої маси люцерни була такою:

1. Спроекувати та виготовити експериментальні лабораторні установки.
2. Визначити основні характеристики та властивості компонентів насіннєвої маси люцерни, як чинників процесу сушіння:
 - фізико-механічні характеристики: коефіцієнт пористості насіннєвої маси люцерни, гранично-допустиму температуру нагрівання бобів люцерни, щільність бобів люцерни;
 - теплофізичні властивості: теплоємність, теплопровідність, температуропровідність.
3. Визначити параметри процесу сушіння насіннєвої маси люцерни: вологовмісту насіннєвої маси люцерни, втрати тиску повітря в шарі насіннєвої маси люцерни, швидкості сушіння насіннєвої маси люцерни.
4. Провести порівняльні дослідження показників якості роботи сушильної установки у виробничих умовах.

При цьому:

- об'єктом експериментальних досліджень, або об'єктом моделювання технічної системи є насіннєва маса люцерни та технологічний процес сушіння насіннєвої маси люцерни;
- предметом експериментальних досліджень є фізико-механічні характеристики та теплофізичні властивості й параметри процесу роботи сушильної установки та їх взаємозв'язок впливу на показники процесу сушіння насіннєвої маси люцерни.

Загальну структурну схему проведення експериментальних досліджень як об'єкта моделювання, наведено на рис. 3.2, яку розроблено за методом кібернетичного поняття «чорної скрині [104].

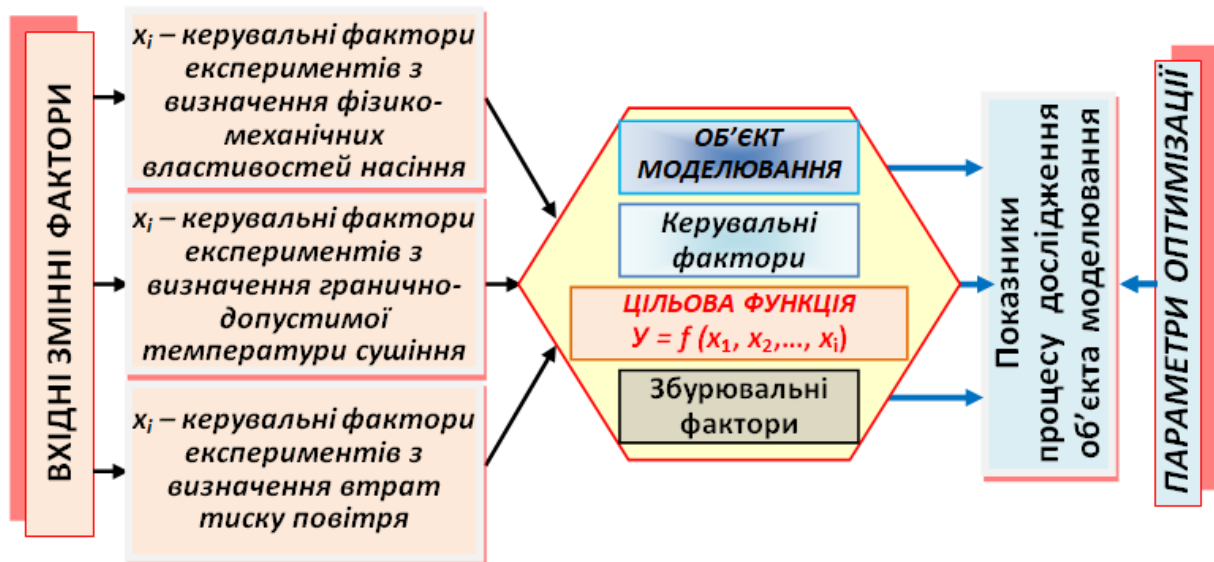


Рисунок 3.2 – Загальна структурна схема реалізації експериментальних досліджень

Можливий стан «чорної скрині», або моделі об'єкта експериментального дослідження, визначається сукупністю різних значень її входів, тобто змінних вхідних факторів і значень їх рівнів варіювання або їх зміни.

При цьому кількість різновидів, які визначають стани об'єкта дослідження регламентує технічно-технологічну складність станів технічної системи та формують шляхи реалізації одного експерименту, результати якого визначають емпіричну модель досліджуваного процесу, або процесу сушіння насіннєвої маси люцерни [105, 106].

Реалізацію експериментальних досліджень проведено з застосуванням таких експериментальних установок:

- для визначення фізико-механічних і теплофізичних властивостей насіннєвої маси люцерни застосовували лабораторну установку, загальний вигляд якої наведено, відповідно, на рис. 3.3 [107];

- для проведення експериментальних досліджень з визначення втрат тиску повітря в шарі насіннєвої маси люцерни, швидкості сушіння насіннєвої маси люцерни та проведення порівняльних досліджень показників якості сушіння насіннєвої маси люцерни у виробничих умовах застосовували сушильну установку, конструктивну схему якої наведено на рис. 2.1, а загальний вигляд – на рис. 3.4.



Рисунок 3.3 – Загальний вигляд лабораторної установки для визначення фізико-механічних та теплофізичних властивостей насіннєвої маси люцерни: 1 – теплоізовованні паралелепіеди; 2 – плоский електричний нагрівач; 3, – диференційні термометри

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

Основні теплофізичні характеристики матеріалу зв'язані між собою співвідношенням:

$$C = \frac{\lambda}{\alpha \gamma},$$

де γ – щільність матеріалу.

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 насіннєвої маси люцерни, зменшується. Окрім того, теплоємність залежить і від температури матеріалу – при збільшенні температури вона збільшується.

При зменшенні вологості в процесі сушіння матеріалу теплопровідність його зменшується. Теплопровідність насіннєвої 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 [108].

В роботі [109] для визначення теплофізичних характеристик насіннєвої маси був використаний метод, який 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.

Інтенсифікацію процесу сушіння можна проводити двома шляхами - збільшуючи різницю температур між сушильним агентом та матеріалом, а також збільшуючи коефіцієнт теплообміну. При сушінні термолабільних матеріалів, таких, наприклад як боби люцерни, різницю температур можна підвищити тільки до визначених меж, при цьому не погіршуючи якість сушильного матеріалу. Коефіцієнт теплообміну залежить від фізичних властивостей матеріалу і сушильного агента, від характеру взаємодії, аеродинаміки потоку сушильного агента і т.д.

При визначенні теплофізичних характеристик насіннєвої маси люцерни в теплоізолюванні паралелепіпеди 1, які мають розміри 35·36·60 мм щільно укладався дослідний зразок - боби люцерни. Між паралелепіпедами встановлювався плоский електричний нагрівач 2, який має поверхню 34·34 мм². Потужність нагрівача регулювалась латром в межах 20...50 Вт. Грані паралелепіпедів, повернуті до нагрівача не теплоізолювані. Температури Δt_n та Δt_x вимірюються відповідно диференційними термометрами 3 і 4, холодні кінці яких розміщені на значній відстані від гарячих кінців, так щоб в місці розташування холодних кінців, температура в процесі досліду не змінюється. Відстань X варіювалася в межах 5...15 мм. Значення температур Δt_n та Δt_x реєструвалася мехатронною системою по типу Х9С104.

Досліджуваний матеріал, боби люцерни, засипалися в паралелепіпеди та включався нагрівач 2. Одночасно з нагрівачем вмикався потенціометр для реєстрації

температур Δt_n та Δt_x , та знімалася проба матеріалу для визначення його вологості. В процесі одного досліді потужність нагрівача залишалася постійною.

Для матеріалу однієї вологості дослідження проводилися при $X=5$ мм, 10 мм та 15 мм і потужності нагрівача $P=20$ Вт і 50 Вт. Час одного досліді становив 7 хвилин.

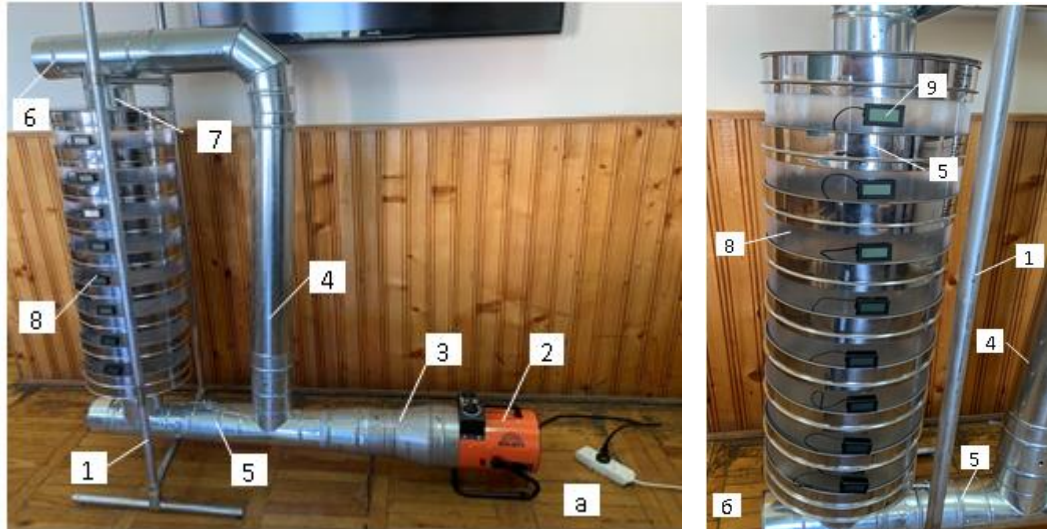


Рисунок 3.4 – Загальний вигляд: а – сушильної установки, вигляд спереди; б, – вертикальної сушильної камери спереди ; 1 – рама установки; 2 – тепловентилятор; 3 – калорифер; 4, 5, 6 – вертикальний і горизонтальний повітропроводи; 7 – сушильна камера; 8 – контейнери; 9 – датчик; 10 – заглушка

Будову та принцип роботи сушильної установки наведено у п. 2.1 другого розділу дисертаційного дослідження.

Проведення експериментальних досліджень з визначення фізико-механічних характеристик і теплофізичних властивостей та процесу сушіння насіннєвої маси люцерни реалізовано в два основні етапи:

- на першому етапі виконували підготовчі роботи з формування заданого структурного та фракційного складу насіннєвої маси люцерни;
- на другому етапі безпосередньо проводили відповідні експериментальні дослідження з застосуванням відповідних лабораторних установок.

Формування заданого структурного та фракційного складу насіннєвої маси люцерни проводили після польової операції збирання люцерни комбайном Case IH Axial-Flow.

3.2. Методика проведення експериментальних досліджень з визначення фізико-механічних характеристик і теплофізичних властивостей насіннєвої маси люцерни

Кожний об'єкт дослідження, яким є бункерна насіннєва маса люцерни після комбайнового збирання, яка має тільки свої властиві їй фізико-механічні характеристики та теплофізичні властивості, які до того ж змінюються в процесі сушіння.

У процесі проведення експериментальних досліджень з визначення фізико-механічних і теплофізичних властивостей насіннєвої маси люцерни визначали:

- фізико-механічні характеристики: коефіцієнт пористості $m_{n.c}$ насіннєвої маси люцерни; гранично допустиму температуру $t_{o.б}$ нагрівання бобів люцерни; щільність бобів ρ_b люцерни;
- теплофізичні властивості: теплоємність C_l ; теплопровідність α ; температуропровідність λ .

Підготовку насіннєвої маси люцерни для проведення експериментальних досліджень з визначення фізико-механічних характеристик і теплофізичних властивостей насіннєвої маси люцерни проводили в такій послідовності:

- з зібраної бункерної насіннєвої маси люцерни довільно відбирали зразки масою не менше 0,5 кг, зважування проводили на вагах ВЛКТ-500;
- зважені зразки насіннєвої маси люцерни розподіляли на складові компоненти, при цьому визначали відсотковий склад:
 - частинок довжиною 0-30 мм, 30-50 мм, 50-100 мм, 100-150 мм і т.д.;
 - вмісту вільного насіння люцерни;
 - вмісту насіння люцерни в бобах;
 - вмісту частинок стебел і листя.

Експерименти провели в трикратній повторності.

Під час проведення експериментів з визначення фізико-механічних характеристик насіннєвої маси люцерни вхідними факторами приймали:

- при дослідженні коефіцієнта пористості $m_{n.l}$ насіннєвої маси люцерни:

густину шару насіннєвої маси люцерни $\rho_{ш}$, кг/м³; вологість шару насіннєвої маси люцерни $W_{ш}$, кг вол./кг абс. сух. реч.;

- при дослідженні гранично допустимої температури $t_{д.б}$ нагрівання бобів люцерни та щільності бобів $\rho_{б}$ люцерни: час нагрівання бобів $\tau_{н.б}$; хв початкову вологість бобів $W_{б}$, %.

Найменування входних факторів і рівнів їх варіювання наведено в табл. 3.1, 3.2.

Таблиця 3.1 – Вхідні фактори та рівні їх варіювання при дослідженні коефіцієнта пористості $m_{п.с}$ насіннєвої маси люцерни

Найменування фактора	Інтервал варіювання	Рівні варіювання факторами		
		Нижній (-1)	Нульовий (0)	Верхній (+1)
Густина шару насіннєвої маси люцерни $\rho_{ш}$, кг/м ³	140	140	280	420
Вологість шару насіннєвої маси люцерни $W_{ш}$, *кг вол./кг абс. сух. реч.	0,7	0,2	0,9	1,6

* – кілограм води / кілограм абсолютно сухої речовини

Таблиця 3.2 – Вхідні фактори та рівні їх варіювання при дослідженні гранично допустимої температури $t_{д.б}$ самозігрівання та щільності бобів $\rho_{б}$ люцерни

Найменування фактора	Інтервал варіювання	Рівні варіювання факторами		
		Нижній (-1)	Нульовий (0)	Верхній (+1)
Час самозігрівання бобів $\tau_{н.б}$, хв	10	10	20	30
Початкова вологість насіннєвої маси $W_{б}$, %	10	30	40	50

Під час проведення експериментів з визначення фізико-механічних характеристик насіннєвої маси люцерни (теплоємність $C_{л}$, теплопровідність α , температуропровідність λ) входним фактором приймали початкову вологість

бобів W_{δ} (%) люцерни, яку змінювали в межах від 5% до 40%. Вологість насіннєвої маси люцерни визначалася експрес-вологоміром "ULTRA-X".

Коефіцієнт пористості $m_{n.l}$ шару насіннєвої маси люцерни визначали за формулою:

$$m_{n.c} = 1 - \frac{\rho_{ш}}{\rho_M}, \quad (3.1)$$

де $\rho_{ш}$ – щільність шару, кг/м³.

Визначення щільності бобів люцерни з насінням проводилося за такою методикою.

Щільність бобів з насінням визначилася при вологості 30%, 40% та 50%. Боби заданої вологості отримували шляхом штучного зволоження бобів і витримки протягом 50 годин. За цей час волога рівномірно розподіляється по всьому об'єму та поверхні бобів.

Відбиралися не менше 200 бобів, зважувалися на вагах ВЛК-500 і поміщалися в мірну склянку з бензолом. Різниця між об'ємом бензолу з бобами та бензолу без бобів дорівнює обсягу бобів.

Щільність бобів визначалася за формулою:

$$\rho_{\delta} = \frac{m_{\delta i}}{V_2 - V_1}, \quad (3.2)$$

де $m_{\delta i}$ – маса бобів певної вологості, кг;

V_2, V_1 – відповідно об'єм бензолу з бобами та без бобів, м³.

Для дослідів із визначення гранично-допустимої температури $t_{\delta, \delta}$ нагріву бобів люцерни використовували обладнання, що забезпечує рівномірність нагріву, сталість температури та вологості бобів протягом усього часу обробки: тонкостінні скляні посудини діаметром 0,02 м і висотою 0,05 м, вентильований термостат Lp-320/1 (WSU-4200 (Угорщина)).

Процес сушіння досліджуваних матеріалів у щільному шарі буде тим ефективнішим, чим вищою буде температура теплоносія, проте її величина не повинна перевищувати тих значень, за яких може знизитися якість насіння.

Гранично-допустимою температурою нагрівання насіння за заданої експозиції сушіння є температура, за якої не знижується його схожість, енергія проростання, яка залежить від його початкової вологості та часу перебування матеріалу в нагрітому стані.

Для встановлення експозиції нагріву насіння відібрані боби поміщали в тонкостінні скляні посудини, щільно закривали їх гумовими пробками, забезпеченими капілярними трубками і поміщали в термостат. Для контролю температури в шарі насіння однієї з посудин встановлювали психрометричний термометр.

Методика визначення теплоємності $C_{\text{л}}$ насінневої маси люцерни полягала в такому. Порожнисті циліндри мікрокалорифера заповнювали матеріалом, зважували і поміщали в термостат.

Після нагрівання зразків до температури 310...315⁰K їх поміщали в камеру нерухомого повітря для охолодження, де підтримували температуру 293⁰K. Зміну температури зразків фіксували термометром із точністю поділок 0,1 градуса. Одночасно в камеру спокійного повітря поміщали циліндр, заповнений матеріалом, теплоємність якого відома (сіль кам'яна, цукор, парафін). Визначали температуру охолодження еталонного зразка за тих самих температур.

Теплоємність матеріалів визначали за формулою:

$$C_{\text{л}} = C_{\text{е}} \frac{\rho_{\text{е}} \Delta t_{\text{е}}}{\rho_{\text{м}} \Delta t_{\text{м}}}, \quad (3.3)$$

де $C_{\text{е}}$ – теплоємність еталонного зразка, кДж/кг град;

$\rho_{\text{е}}$ – густина еталонного матеріалів, кг/м³;

$\Delta t_{\text{е}}$, $\Delta t_{\text{м}}$ – темп охолодження, град.

Теплопровідність α зразків досліджуваних матеріалів визначали за допомогою спеціального приладу-мікрокалориметра. Мікрокалориметр містить повний алюмінієвий циліндр, камеру спокійного повітря і корпус. У корпусі є два відведення для подачі і відведення води з простору між стінками корпусу і камери спокійного повітря.

Температуру води, що омиває камеру спокійного повітря, підтримували постійною і контролювали за допомогою психрометричного термометра з ціною поділки 0,2 градуса.

3.3. Методика проведення експериментальних досліджень процесу сушіння насіннєвої маси люцерни

Об'єктом дослідження є бункерна насіннєва маса люцерни після збирання.

Для проведення експериментальних досліджень процесу сушіння насіннєвої маси люцерни застосовували сушильну установку, рис. 2.1, 3.4.

Будову, принцип роботи та загальний вигляд сушильної установки наведено, відповідно, в п. 2.1 другого розділу та в п. 3.1 третього розділу дисертаційного дослідження.

Процес сушіння насіннєвої маси люцерни відбувався таким чином. Послідовність процесу роботи має три етапи:

- підготовчий;
- виведення обладнання на робочий режим;
- безпосередньо процес сушіння.

Під час підготовчого етапу сушарка складається та перевіряється робота керуючого обладнання, усіх приладів і датчиків. Контейнери заповнюються підготовленим для відповідної партії матеріалом та складаються і фіксуються.

Відібрані та підготовлені зразки насіннєвої маси люцерни завантажували в контейнери сушильної установки (рис. 3.5а, б) та лінійкою визначали висоту шару завантаженого зразка в контейнері, рис. 3.5в.



Рисунок 3.5 – Загальний вигляд завантаженого зразка насіннєвої маси люцерни

Повітря з приміщення подається за допомогою тепловентилятора 2 крізь електрокалорифер 1, де за необхідності воно прогрівається до необхідної температури, та через камеру зволоження 3, в якій за потреби вологість підвищується.

У процесі виведення установки в робочий режим виконується налаштування необхідних теплових та аеродинамічних параметрів теплоносія, які залежать від поточних характеристик і кількості сировини в контейнері, що суттєво впливає на визначення оптимального, для забезпечення швидкого висушування, режиму подачі теплоносія.

Варіанти схеми руху теплоносія за різних режимів у процесі сушіння насіннєвої маси люцерни в дослідно-експериментальному зразку сушильної установки представлено на рис. 3.6.

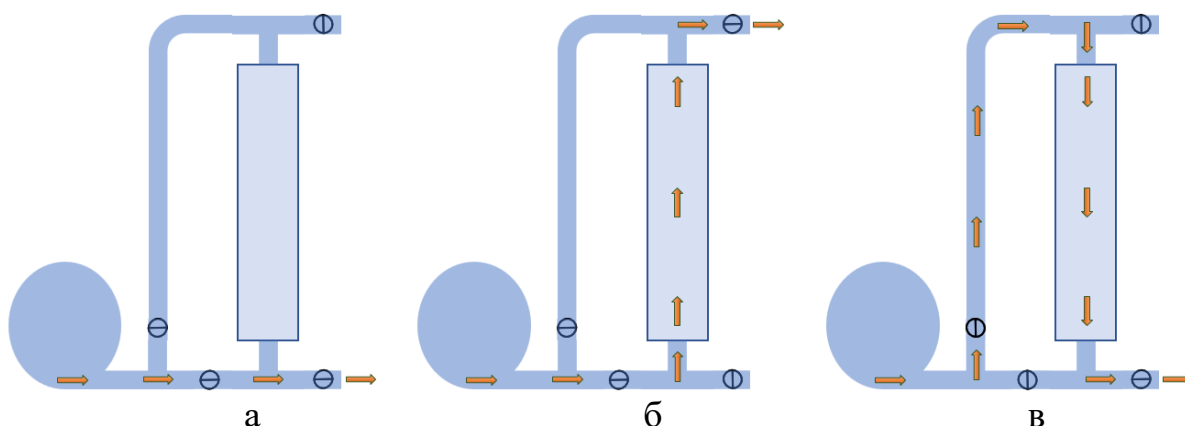


Рисунок 3.6 – Варіанти схеми руху теплоносія за різних режимів роботи сушильної установки: а) – підготовчий етап; б) – початкове сушіння; в) – досушування

Дослідження виконували за такою методикою: при увімкненому тепловентиляторі за допомогою заслінки, розміщеної на всмоктувальному каналі, та перемикачів калорифера встановлювали задані значення температури і швидкості потоку з якою подається сушильний агент. Для стабілізації сталих значень параметрів роботи в такому режимі дослідна установка працює протягом 10-15 хв без навантаження, після чого вентилятор вимикали.

Перед початком дослідів у контейнери засипали насіннєву масу люцерни висотою 5-7 см. Заповнені й пронумеровані контейнери вертикально встановлювали одна на одну в сушильній камері та запускали процес сушіння.

Зважування контейнерів разом із насіннєвою масою люцерни проводили через кожну годину упродовж усього часу сушіння, після чого контейнери з матеріалом знову встановлювали в експериментальну установку і продовжували процес. Маса насіннєвої маси визначалася за різницею між масою контейнера з матеріалом і масою порожнього контейнера.

Сушіння насіннєвої маси люцерни здійснювали за двома варіантами.

За першим варіантом матеріал вентиліювали лише сушильним агентом з температурою 50-55°C протягом усього періоду сушіння, який для всіх варіантів становив 60 хв;

За другим варіантом до сушильної камери подавали атмосферне повітря з температурою 19-23°C;

Предметом дослідження процесу сушіння насіннєвої маси люцерни були: вологовміст $W_{в.ш}$ (кг вол./кг абс. сух. реч.) шару насіннєвої маси люцерни; втрати тиску повітря ΔP (Па) в шарі насіннєвої маси люцерни; швидкість сушіння $\mathcal{Q}_c$ (м/с) насіннєвої маси люцерни.

Змінними вхідними факторами під час реалізації експериментів приймали:

- з визначення вологовмісту $W_{в.ш}$ в шарі насіннєвої маси люцерни: висоту шару насіннєвої маси люцерни $H_{ш}$, м; час сушіння насіннєвої маси люцерни $\tau_{с.ш}$, год;

- з визначення втрат тиску ΔP повітря в шарі насіннєвої маси люцерни: висота шару $H_{ш}$, м; швидкість повітря $\mathcal{Q}_n$, м/с; коефіцієнт пористості $m_{н.л}$;

- з визначення швидкості сушіння $\mathcal{Q}_c$ (м/с) насіннєвої маси люцерни: висоту шару насіннєвої маси люцерни $H_{ш}$, м; швидкість повітряного потоку $\mathcal{Q}_n$, м/с.

Найменування факторів і їх рівні варіювання наведено, відповідно, в табл. 3.3, 3.4, 3.5.

Таблиця 3.3 – Вхідні фактори та рівні їх варіювання з визначення вологовмісту $W_{в.ш}$ в шарі насіннєвої маси люцерни

Найменування фактора	Інтервал варіювання	Рівні варіювання факторами		
		Нижній (-1)	Нульовий (0)	Верхній (+1)
Висота шару насіннєвої маси люцерни $H_{ш}$, м	0,6	0,3	0,9	1,5
Час сушіння насіннєвої маси люцерни $\tau_{с.ш}$, год	5,0	2,0	7,0	12

Таблиця 3.4 – Вхідні фактори та рівні їх варіювання з визначення втрати тиску повітря ΔP (Па) в шарі насіннєвої маси люцерни

Найменування фактора	Інтервал варіювання	Рівні варіювання факторами		
		Нижній (-1)	Нульовий (0)	Верхній (+1)
Висота шару $H_{ш}$, м	0,6	0,3	0,9	1,5
Швидкість повітря Q_n , м/с	0,5	0,2	0,7	1,2
Коефіцієнт пористості $m_{н.с}$	0,05	0,56	0,61	0,66

Таблиця 3.5 – Вхідні фактори та рівні їх варіювання з визначення швидкості сушіння $Q_{1с}$ кг вол./ (кг абс. сух. реч./год) насіннєвої маси люцерни.

Найменування фактора	Інтервал варіювання	Рівні варіювання факторами		
		Нижній (-1)	Нульовий (0)	Верхній (+1)
Висота шару $H_{ш}$, м	0,6	0,3	0,9	1,5
Швидкість повітря Q_n , м/с	0,5	0,2	0,7	1,2

Для вимірювання характеристик сушильного агента, таких як температура, вологість та швидкості потоку (витрати) застосовували багатофункціональний вимірювальний прилад Solomat MPM500e, загальний вигляд якого наведено на рис. 3.6.



Рисунок 3.7 – Загальний вигляд приладу для вимірювання параметрів середовища Solomat MPM500e: 1 – основний блок приладу Solomat MPM500e; 2 – анемометричний зонд; 3 – температурний зонд; 4 – зонд відносної вологості повітря.

Підготовка приладу до вимірювань включає: візуальну перевірку справності приладу, цілісність кабелів та вимірювальних зондів й підключення відповідних зондів до вимірювальних роз'ємів приладу: температурного зонду; анемометричного зонду для вимірювання швидкості потоку; зонду відносної вологості повітря.

За інструкцією прилад потребує завчасного увімкнення за 3-5 хв. до початку вимірювань для прогріву та стабілізації. Далі обирається відповідний режим та одиниці вимірювання.

Вимірювання температури сушильного агента здійснювали за допомогою температурного зонду, який розміщували у контрольних точках повітропроводу, зокрема перед входом сушильного агента в шар насінневої маси та після проходження повітряного потоку крізь шар матеріалу. Зонд орієнтували вздовж напрямку руху повітряного потоку, забезпечуючи мінімальний контакт із стінками повітропроводу з метою зменшення похибки вимірювання. Після стабілізації показів приладом протягом 20 с фіксували значення температури сушильного

агента. Вимірювання виконували у трикратній повторності для кожної контрольної точки, після чого визначали середнє значення температури.

Для наглядності процесу також використовувалися окремі температурні цифрові термометри ТРМ-10 (рисунок 3.8, а), датчики яких безпосередньо були розмішені у кожному контейнері сушильної камери (рисунок 3.8, б).

Швидкість повітряного потоку сушильного агента визначали за допомогою анемометричного зонду приладу Solomat MPM500e (рисунок 3.7, 2) типу «гарячий дріт», який вводили в поперечний переріз повітропроводу або сушильної камери. Вимірювання проводили в кількох характерних точках перерізу, зокрема в центральній зоні та периферійних ділянках, з метою врахування можливих нерівномірностей швидкісного поля повітряного потоку. Зонд орієнтували паралельно до напрямку руху сушильного агента. Після стабілізації показів приладу реєстрували миттєві значення швидкості повітряного потоку, а середню швидкість сушильного агента визначали як середньоарифметичне значення результатів вимірювань, отриманих у всіх контрольних точках перерізу.

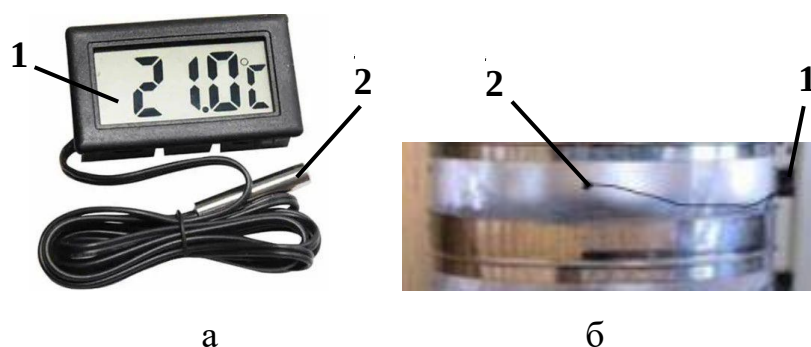


Рисунок 3.8 – Загальний вигляд цифрового термометра ТРМ-10 (а) та місця розташування датчиків термометра у лотку сушильної камери (б): 1 - цифровий індикатор температури; 2 – виносний температурний датчик.

Під час укладання зразків особливу увагу звертали на рівномірність ущільнення маси, щоб уникнути місцевих витоків повітря.

Заповнені масою контейнери поміщаються в камеру установки.

Для кожного досліду заміряли температуру і витрату повітря, що

продувається через шар, статичний тиск у шарі.

Під час дослідів вимірювали температуру і відносну вологість теплоносія біля всмоктувального вікна вентилятора, а також температуру біля входу в шар. Одночасно контролювали витрату теплоносія (повітря), а також реєстрували кількість випаруваної води з кожного контейнера і в середньому шарі.

Для отримання первинних кривих сушіння досліди проводили в 3-х повторностях. Параметри матеріалу і теплоносія під час проведення дослідів обирали в таких межах: середню температуру повітря, що подається, - 200...350 К, середню відносну вологість повітря 7,0...70%; швидкість повітряного потоку в шарі 0,05...0,6 м/сек; початкову вологість матеріалу - 30...65%.

Загальну висоту шару в межах 0,3...1,5 м змінювали шляхом збільшення або зменшення кількості одночасно заповнених і встановлених сит у вертикальній сушильній камері.

Визначення рівномірного вологовмісту досліджуваних матеріалів проводять за методикою Н.В.Пестова [111]. У п'яти ексикаторах створювали відносну вологість повітря в межах від 10 до 90% з інтервалом 15...20%.

Для цього в кожен із них наливали по 1 кг водного розчину сірчаної кислоти відповідних концентрацій. В ексикатори укладали по три зразки матеріалу вагою 0,02...0,04 кг, закривали кришками і встановлювали в термостаті, в якому підтримували постійну температуру. Витримували зразки в ексикаторах, приблизно, 6...8 годин. Кількість видаленої зі зразків води визначали зважуванням.

3.4. Методика проведення порівняльних досліджень процесу сушіння насіннєвої маси люцерни у виробничих умовах

Виробничі порівняльні дослідження процесу сушіння насіннєвої маси люцерни під час її збирання проводили у господарстві ФГ «Бухнівське» с. Бухни, Вінницького району Вінницької області.

Скошування насінників люцерни у валки проводили за побуріння 75...80%

головок. Для цього використовували жатки MacDon FlexDraper FD 2. Через 3 дні, коли вологість стебел сягнула 22...25%, валки підбирали з одночасним обмолотом комбайном Case IH Axial-Flow. Обмолочену соломку укладали у валки, насіннєву масу люцерни збирали в "герметизований" тракторний причіп ПБН-20

Зібрану насіннєву масу люцерни із бункера комбайна подавали на машини первинного очищення з подальшим її досушуванням на стаціонарі.

Порівняльні дослідження процесу сушіння насіннєвої маси люцерни проводили одночасно з застосуванням розробленої сушильної установки та з застосуванням підлогової сушарки насипного типу.

Укладання маси на досушування проводили за допомогою грейзерних навантажувачів П2-0,8 і стогометальників СНУ-О,5.

У процесі досушування матеріалів вимірювали температуру і відносну вологість атмосферного повітря, температуру повітря, що продувається через шар.

Через кожні 2 години відбирали зразки для визначення вологості на різній висоті штабеля. Температуру і вологість повітря, що продувається через шар, фіксували безперервно за допомогою термографа М-16 і гігрографа М-21 на рівні всмоктувального вікна вентилятора.

Після сушіння відбирали зразки для визначення вологості насіннєвої маси та схожості насіння.

3.5. Висновки до розділу 3

3.5.1. Спроековано та виготовлено експериментальну сушильну установку для сушіння насіннєвої маси люцерни на стаціонарі.

3.5.2. Розроблено часткові методики проведення експериментальних досліджень з визначення фізико-механічних характеристик і теплофізичних властивостей й процесу сушіння насіннєвої маси люцерни.

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1. Результати експериментальних досліджень фізико-механічних і теплофізичних властивостей насіннєвої маси люцерни

Експериментальні дослідження з визначення коефіцієнта пористості насіннєвої маси люцерни провели на основі реалізації планованих двофакторних експериментів [110] на трьох рівнях варіювання входними факторами з трикратною повторністю кожного експерименту.

Найменування входних факторів і рівнів їх варіювання та методику реалізації експериментів наведено, відповідно, в табл. 3.2 та п. 3.2 третього розділу дисертації.

За результатами реалізації експериментів згідно з нумерованим порядком рандомізованої план-матриці отримано експериментальний масив даних коефіцієнта пористості насіннєвої маси люцерни $m_{n,c}$ (додаток А 1.1).

Середні значення коефіцієнта пористості насіннєвої маси люцерни $m_{n,c}$ наведено у додатку А 2.1 та табл. 4.1.

За результатами статистичної обробки експериментального масиву даних (додаток А 2.1, табл. 4.1) коефіцієнта пористості насіннєвої маси люцерни $m_{n,c}$, значення якого проілюстровано наведеною діаграмою (рис. 4.1) та аналізу отриманих статистичних показників (додаток А 3.1) встановлено, що найбільше значення коефіцієнта чисельної детермінації $D = 0,984$ за рівня його вірогідності $P = 0,973$ відповідає апроксимуючій математичній моделі повного полінома другої степені за рівня значимості 0,95, яку записано у вигляді:

$$M_n = b_0 + b_1\rho_{uu} + b_2W_{uu} + b_{12}\rho_{uu}W_{uu} + b_{11}\rho_{uu}^2 + b_{22}W_{uu}^2, \quad (4.1)$$

де b_0 – вільний член рівняння регресії;

$b_1, b_2, b_{12}, b_{11}, b_{22}$ – коефіцієнти рівняння регресії відповідних факторів і їх взаємодії.

Таблиця 4.1 – Результати експериментальних досліджень коефіцієнта пористості насінневої маси люцерни

№	Значення фактора		Середні значення коефіцієнта пористості $m_{n.c}$ насінневої маси люцерни
	ρ_w , кг/м ³	W_w , кг вол./кг абс. сух. реч.	
1	140	0,2	0,68
2	140	0,9	0,74
3	140	1,6	0,81
4	280	0,2	0,38
5	280	0,9	0,61
6	280	1,6	0,66
7	420	0,2	0,18
8	420	0,9	0,45
9	420	1,6	0,52

Також визначено числові значення вільного члена b_0 та коефіцієнтів рівняння регресії (4.1) відповідних факторів і їх взаємодії b_1 , b_2 , b_{12} , b_{11} , b_{22} , які наведено у табл. 4.2.

За результатами перевірки значимості розрахованих коефіцієнтів b_1 , b_2 , b_{12} , b_{11} , b_{22} (табл. 4.2) емпіричної моделі (4.1) за t -альфа критерієм Стюдента (t -альфа критерій = 2,305) встановлено, що (додаток А 3.1):

- коефіцієнти b_1 , b_2 , b_{12} , b_{11} , b_{22} рівняння регресії (4.1) є значущими;
- коефіцієнт $b_{11} = 6,8 \cdot 10^{-7}$, який характеризує квадратичний вплив фактора ρ_w на значення зміни коефіцієнта пористості насінневої маси люцерни $m_{n.c}$, є незначущим або таким, яким можна знехтувати.

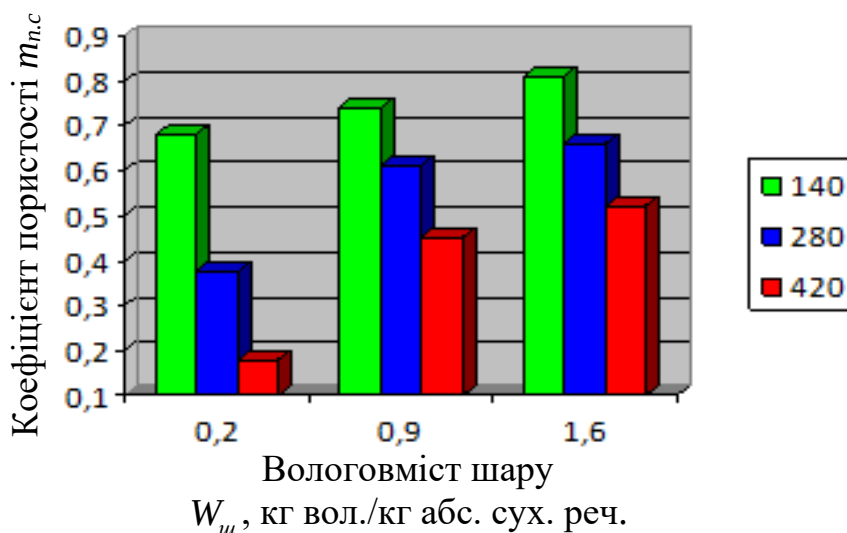


Рисунок 4.1 – Діаграма зміни експериментальних середніх значень коефіцієнта пористості насіннєвої маси люцерни $m_{n.c}$: 140, 280, 420 – густина шару насіннєвої маси люцерни ρ_u , кг/м³

Таблиця 4.2 – Коефіцієнти рівняння регресії при натуральних значеннях факторів

Функціональна залежність	Значення коефіцієнтів					
	b_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}
$m_{n.c} = f(\rho_u; W_u)$	0,88	$-2,1 \cdot 10^{-3}$	0,26	$5 \cdot 10^{-4}$	$6,8 \cdot 10^{-7}$	-0,13

Після підтвердження адекватності моделі (4.1) за F -критерієм Фішера, який дорівнює F -критерій = 135,785 (додаток А 3.1), отримано математичну модель при натуральних значеннях факторів, яка описує функціональний характер зміни коефіцієнта пористості насіннєвої маси люцерни $m_{n.c}$ залежно від зміни густини ρ_u та вологості W_u шару насіннєвої маси люцерни:

$$m_{n.c} = 0,88 - 2,1 \cdot 10^{-3} \rho_u + 0,26 W_u + 5 \cdot 10^{-4} \rho_u W_u - 0,13 W_u^2. \quad (4.2)$$

На основі аналізу побудованих поверхні відгуку (рис. 4.2) та двовірного перерізу поверхні відгуку (рис. 4.3) встановлено, що за відповідної зміни густини ρ_u шару насіннєвої маси люцерни в межах $140 \leq \rho_u \leq 420$ кг/м³ та зміни вологовмісту W_u шару насіннєвої маси люцерни в межах $0,2 \leq W_u \leq 1,6$

кг вол./кг абс. сух. реч. (табл. 3.1, 4.1), функціональні апроксимовані значення коефіцієнта пористості насіннєвої маси люцерни $m_{n.c}$ знаходяться в діапазоні від 0,09 до 0,78.

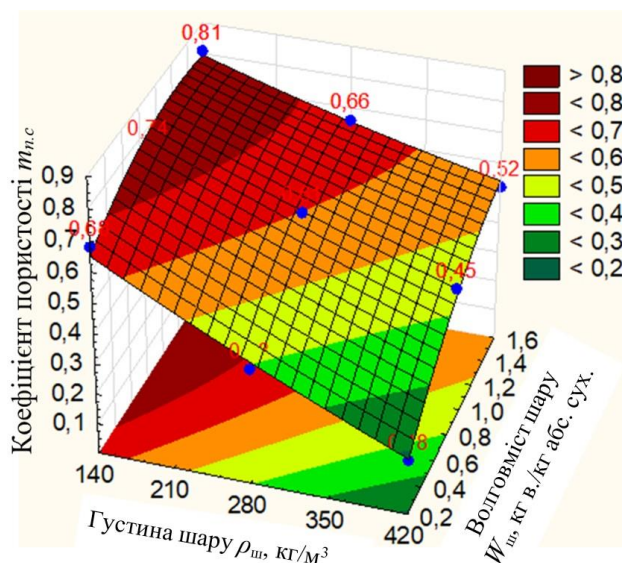


Рисунок 4.2 – Поверхня відгуку зміни коефіцієнта пористості насіннєвої маси люцерни $m_{n.c}$ залежно від зміни її густини $\rho_{ш}$ та вологовмісту $W_{ш}$ шару, як функція $m_{n.c} = f(\rho_{ш}; W_{ш})$

Такі значення зміни діапазону коефіцієнта пористості насіннєвої маси люцерни $m_{n.c}$ також характерні або адекватні значенням $m_{n.c}$, які визначаються за залежностями, що наведені на рис. 4.4.

Двомірний переріз поверхні відгуку функціональної зміни коефіцієнта пористості насіннєвої маси люцерни $m_{n.c} = f(\rho_{ш}; W_{ш})$ представлений на рис. 4.3.

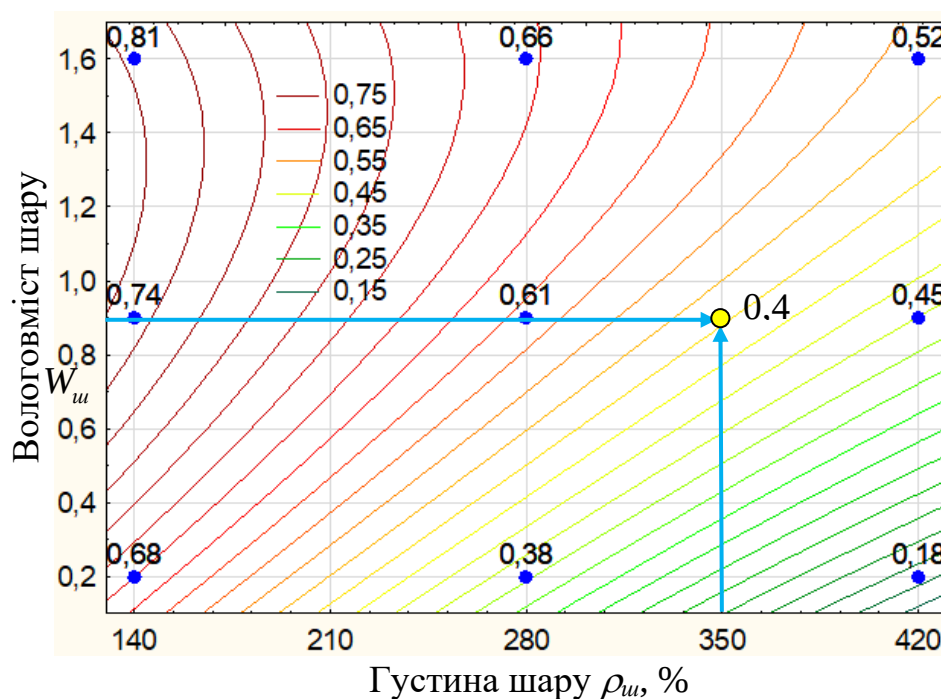


Рисунок 4.3 – Двомірний переріз поверхні відгуку функціональної зміни коефіцієнта пористості насіннєвої маси люцерни $m_{n.c}$ від зміни її густини $\rho_{ш}$ та вологовмісту $W_{ш}$ шару.

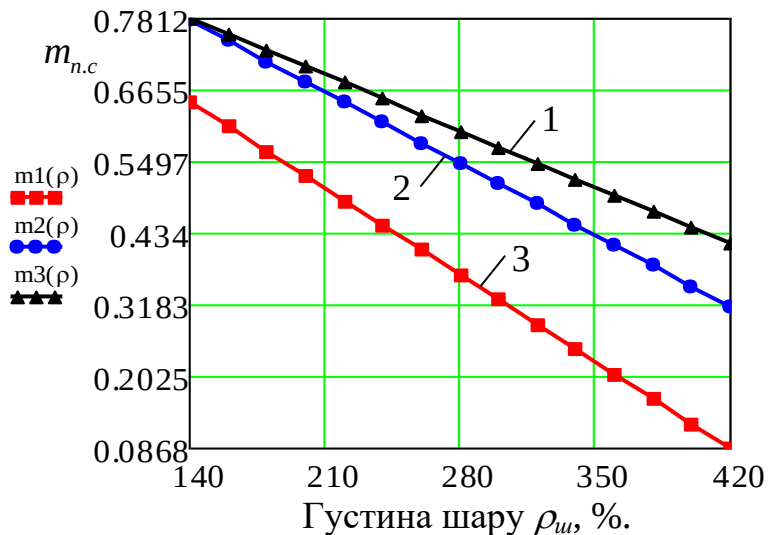


Рисунок 4.4 – Залежність коефіцієнта пористості насіннєвої маси люцерни $m_{n.c}$ залежно від зміни її густини $\rho_{ш}$ де 1, 2, 3 – вологовміст маси відповідно 1,6; 0,9; 0,2 кг вол./кг абс. сух. реч.

За збільшення густини шару насіннєвої маси люцерни значення коефіцієнта пористості $m_{n.c}$ зменшується в таких межах:

- від 0,78 до 0,42 при вологовмісту шару насіннєвої маси люцерни $W_{ш} = 1,6$ кг вол./кг абс. сух. реч., тобто зменшується приблизно в 1,9 рази;
- від 0,78 до 0,32 при вологовмісту шару насіннєвої маси люцерни $W_{ш} = 0,9$ кг вол./кг абс. сух. реч., тобто зменшується приблизно в 2,4 рази;
- від 0,66 до 0,09 при вологовмісту шару насіннєвої маси люцерни $W_{ш} = 0,2$ кг вол./кг абс. сух. реч., тобто зменшується приблизно в 7,3 рази

За збільшення вологовмісту $W_{ш}$ шару насіннєвої маси люцерни числове значення коефіцієнта пористості $m_{n.c}$ збільшується:

- від значення 0,66 до значення 0,78 при значенні густини шару насіннєвої маси люцерни $\rho_{ш} = 140$ кг/м³, тобто збільшується приблизно в 1,2 рази;
- від значення 0,36 до значення 0,59 при значенні густини шару насіннєвої маси люцерни $\rho_{ш} = 280$ кг/м³, тобто збільшується приблизно в 1,6 рази;
- від значення 0,08 до значення 0,42 при значенні густини шару насіннєвої маси люцерни $\rho_{ш} = 420$ кг/м³, тобто збільшується приблизно в 4,7 рази.

Графічна інтерпретація двовірного перерізу поверхні відгуку функціональної зміни коефіцієнта пористості насіннєвої маси люцерни $m_{n.c}$ як функція $m_{n.c} = f(\rho_{ш}; W_{ш})$ (рис. 4.3) є номограмою, за якою можна визначити або прогнозувати числове значення $m_{n.c}$ – наприклад:

- за значень густини $\rho_{ш} = 350$ кг/м³ та вологовмісту шару $W_{ш} = 0,9$ кг вол./кг абс. сух. реч. насіннєвої маси люцерни коефіцієнт пористості насіннєвої маси люцерни $m_{n.c}$ дорівнює 0,43.

Для отримання математичної моделі, яка описує функціональну зміну гранично допустимої температури $t_{d.b}$ нагрівання та щільності бобів ρ_b люцерни було застосовано методику математичного планування двофакторних експериментів на трьох рівнях варіювання факторами з трикратною повторністю кожного експерименту [110].

Найменування факторів і їх рівні варіювання та методику проведення під час реалізації експериментальних досліджень з визначення функціональної зміни

гранично допустимої температури нагрівання $t_{\partial,\delta}$ та щільності ρ_δ бобів люцерни наведено, відповідно, в табл. 3.2 та п. 3.3 третього розділу дисертації.

За результатами реалізації експериментів як функції $t_{\partial,\delta} = f(\tau_{н,\delta}; W_\delta)$ та $\rho_\delta = f(\tau_{н,\delta}; W_\delta)$ згідно з нумерованим порядком рандомізованої план-матриці отримано експериментальний масив даних гранично допустимої температури $t_{\partial,\delta}$ нагріву бобів люцерни та щільності бобів ρ_δ люцерни (додаток А 4.1), середні значення яких наведено у додатку А 2.1 та табл. 4.3.

За результатами статистичної обробки отриманого експериментального масиву даних (додаток А 2.1, табл. 4.3) гранично допустимої температури $t_{\partial,\delta}$ нагріву бобів люцерни та щільності бобів ρ_δ люцерни, який проілюстровано наведеною діаграмою (рис. 4.5 та рис. 4.6) та аналізу отриманих статистичних показників (додаток А 5.1) встановлено, що найбільше значення коефіцієнта чисельної детермінації, відповідно, $D_{\partial,\delta} = 1,000$ та $D_\delta = 0,997$ за рівня їх вірогідності $P_{\partial,\delta} = 1,000$ та $P_\delta = 0,997$ відповідає апроксимуючій математичній моделі у вигляді повного полінома другої степені за рівня значимості 0,95:

$$t_{\partial,\delta}; \rho_\delta = b_0 + b_1 \tau_{н,\delta} + b_2 W_\delta + b_{12} \tau_{н,\delta} W_\delta + b_{11} \tau_{н,\delta}^2 + b_{22} W_\delta^2, \quad (4.3)$$

де $b_0, b_1, b_2, b_{12}, b_{11}, b_{22}$ – вільний член і коефіцієнти рівняння регресії.

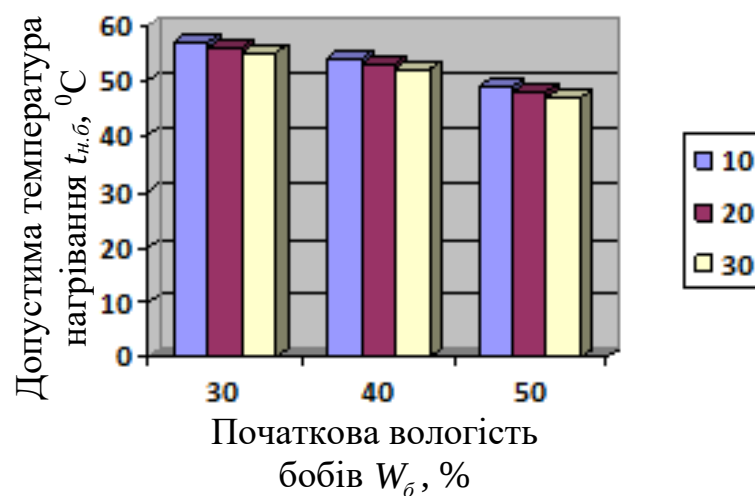


Рисунок 4.5 – Діаграма зміни експериментальних середніх значень гранично допустимої температури $t_{\partial,\delta}$ нагрівання бобів люцерни: 10, 20, 30 – час нагрівання бобів $\tau_{н,\delta}$, хв

Також визначено числові значення вільного члена b_0 та коефіцієнтів рівняння регресії (4.3) відповідних факторів і їх взаємодії $b_1, b_2, b_{12}, b_{11}, b_{22}$, які наведено у табл. 4.4.

За результатами перевірки значимості розрахованих коефіцієнтів $b_1, b_2, b_{12}, b_{11}, b_{22}$ (табл. 4.4) функцій $t_{d,\bar{\theta}} = f(\tau_{n,\bar{\theta}}; W_{\bar{\theta}})$ і $\rho_{\bar{\theta}} = f(\tau_{n,\bar{\theta}}; W_{\bar{\theta}})$ математичної емпіричної моделі (4.3) за t-альфа критерієм Стюдента (t-альфа критерій = 2,305) встановлено, що (додаток А 5.1):

Таблиця 4.3 – Результати експериментальних досліджень гранично допустимої температури нагрівання бобів люцерни

№	Значення фактора		Середні значення $t_{d,\bar{\theta}}, ^\circ\text{C}$	Середні значення $\rho_{\bar{\theta}}, \text{кг/м}^3$
	$\tau_{n,\bar{\theta}}, \text{хв}$	$W_{\bar{\theta}}, \%$		
1	10	30	57	1050
2	10	40	54	1075
3	10	50	49	1095
4	20	30	56	1005
5	20	40	53	1030
6	20	50	48	1040
7	30	30	55	940
8	30	40	52	970
9	30	50	47	980

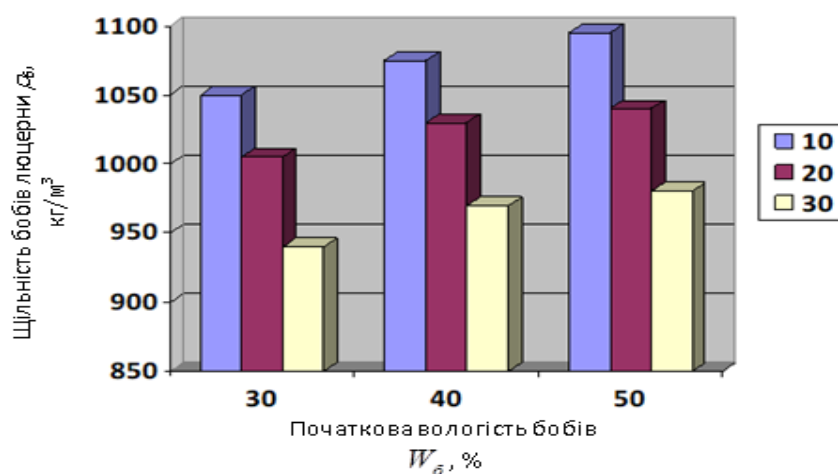


Рисунок 4.6 – Діаграма зміни експериментальних середніх значень щільності бобів $\rho_{\bar{\theta}}$ люцерни: 10, 20, 30 – час нагрівання бобів $\tau_{n,\bar{\theta}}, \text{хв}$

Таблиця 4.4 – Коефіцієнти рівняння регресії зміни температури нагрівання і щільності бобів при натуральних значеннях коефіцієнтів

Функціональна залежність	Значення коефіцієнтів					
	b_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}
$t_{\partial,\partial} = f(\tau_{н,\partial}; W_{\partial})$	55,0	-0,1	0,4	$3,3 \cdot 10^{-16}$	$-8,0 \cdot 10^{-16}$	-0,01
$\rho_{\partial} = f(\tau_{н,\partial}; W_{\partial})$	916,1	-2,3	7,6	-0,01	-0,07	-0,7

- коефіцієнти b_1, b_2, b_{22} функції $t_{\partial,\partial} = f(\tau_{н,\partial}; W_{\partial})$ та коефіцієнти $b_1, b_2, b_{12}, b_{11}, b_{22}$ функції $\rho_{\partial} = f(\tau_{н,\partial}; W_{\partial})$ рівняння регресії (4.3) є значущими;

- коефіцієнти $b_{12} = 3,3 \cdot 10^{-16}, b_{11} = -8,0 \cdot 10^{-16}$, які характеризують, відповідно, вплив взаємодії факторів $\tau_{н,\partial}$ і W_{∂} і квадратичний вплив фактора $\tau_{н,\partial}$ функції $t_{\partial,\partial} = f(\tau_{н,\partial}; W_{\partial})$ на значення зміни гранично допустимої температури $t_{\partial,\partial}$ нагрівання бобів люцерни, є незначущими або такими, якими можна знехтувати.

Після підтвердження адекватності емпіричної моделі (4.3) за F-критерієм Фішера, $F = 35,7$ (додаток А 5.1), отримано математичну модель у натуральних факторах, яка описує функціональний характер:

- гранично допустимої температури $t_{\partial,\partial}$ нагріву бобів люцерни залежно від зміни часу нагрівання бобів $\tau_{н,\partial}$ та початкової вологості бобів W_{∂} :

$$t_{\partial,\partial} = 55,0 - 0,1\tau_{н,\partial} + 0,4W_{\partial} - 0,013W_{\partial}^2; \quad (4.4)$$

- щільності бобів ρ_{∂} люцерни

$$\rho_{\partial} = 916,1 - 2,3\tau_{н,\partial} + 7,6W_{\partial} - 0,01\tau_{н,\partial}W_{\partial} - 0,07\tau_{н,\partial}^2 - 0,07W_{\partial}^2. \quad (4.5)$$

На основі аналізу побудованих:

- поверхні відгуку (рис. 4.7) та двомірного перерізу поверхні відгуку (рис. 4.8) встановлено, що за відповідної зміни часу нагрівання бобів $\tau_{н,\partial}$ в межах $10 \leq \tau_{н,\partial} \leq 30$ хв та зміни початкової вологості бобів W_{∂} люцерни в межах $30\% \leq W_{\partial} \leq 50\%$. (табл. 3.2, 4.3), функціональні апроксимовані значення гранично допустимої температури $t_{\partial,\partial}$ нагрівання бобів люцерни знаходяться в діапазоні від 49 до 57°C;

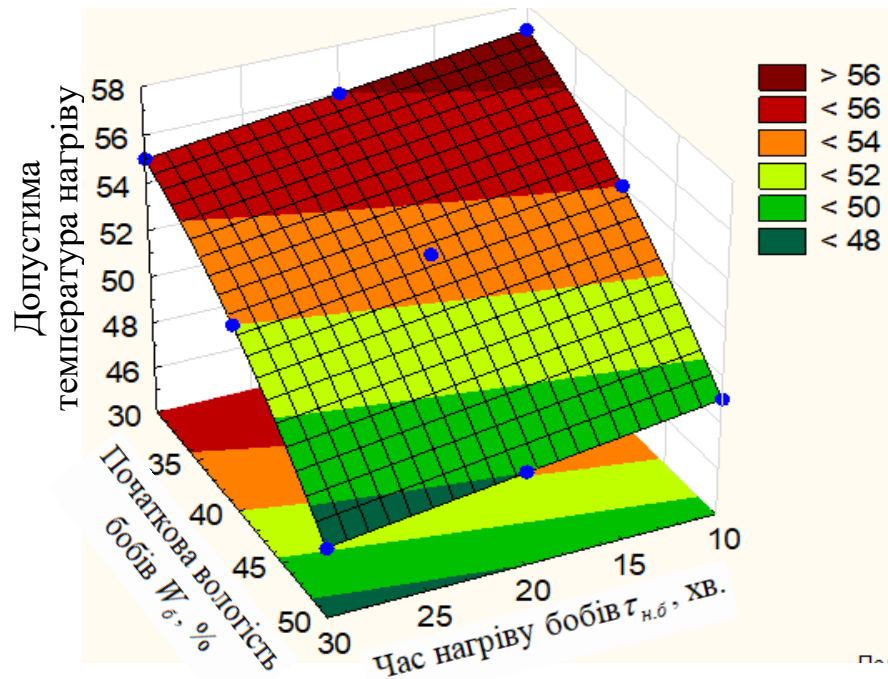


Рисунок 4.7 – Поверхня відгуку функціональної зміни гранично допустимої температури $t_{d,б}$ нагрівання бобів люцерни залежно від зміни часу нагрівання $\tau_{н,б}$ та початкової вологості $W_б$ бобів люцерни як функція $t_{d,б} = f(\tau_{н,б}; W_б)$

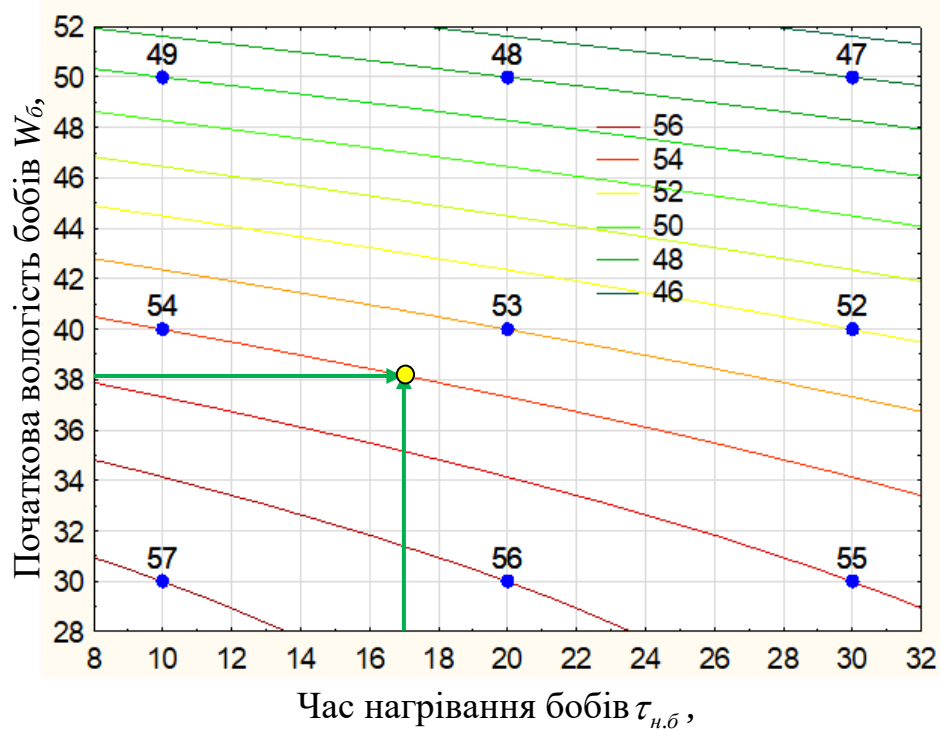


Рисунок 4.8 – Двовірний переріз поверхні відгуку функціональної зміни гранично допустимої температури $t_{d,б}$ нагрівання бобів люцерни як функція $t_{d,б} = f(\tau_{н,б}; W_б)$

- поверхні відгуку (рис. 4.9) та двомірного перерізу поверхні відгуку (рис. 4.10) встановлено, що за відповідної зміни часу нагрівання бобів $\tau_{н.б}$ в межах $10 \leq \tau_{н.б} \leq 30$ хв та зміни початкової вологості бобів $W_б$ люцерни в межах $30 \% \leq W_б \leq 50 \%$. (табл. 3.2, 4.3), функціональні апроксимовані значення щільності бобів $\rho_б$ люцерни знаходяться в діапазоні від 940,1 до 1086,1 кг/м³.

Такі значення зміни діапазону гранично допустимої температури $t_{д.б}$ нагрівання бобів люцерни та щільності бобів $\rho_б$ люцерни також характерні або адекватні значенням $t_{д.б}$ та $\rho_б$, які визначаються за залежностями, що наведені на рис. 4.11, 4.12.

Домінантним фактором, який має суттєвий вплив на функціональну зміну показника гранично допустимої температури $t_{д.б}$ нагрівання бобів люцерни є початкова вологість $W_б$ бобів люцерни – зі збільшенням початкової вологості $W_б$ від 30 % до 50 % гранично допустима температури $t_{д.б}$ нагрівання бобів люцерни зменшується приблизно в 1,2...1,3 раза за часу нагрівання бобів люцерни в діапазоні $\tau_{н.б} = 10...30$ хв., рис. 4.7–4.11.

При цьому, збільшення або зменшення початкової вологості $W_б$ бобів люцерни, наприклад, на $\pm 10 \%$ призводить до відповідної зміни (збільшення або зменшення) гранично допустимої температури $t_{д.б}$ нагрівання бобів люцерни, відповідно, на величину $\pm 3^0\text{C}$.

У той же час, аналогічна зміна часу нагрівання $\tau_{н.б}$ бобів люцерни за кожної незмінної початкової вологості $W_б$ бобів люцерни викликає відповідну зміну гранично допустимої температури $t_{д.б}$ в середньому лише на 0,07 %.

На функціональну зміну щільності бобів $\rho_б$ люцерни більш вагомий вплив має зміна часу нагрівання $\tau_{н.б}$ – збільшення часу нагрівання $\tau_{н.б}$ в межах $10 \leq \tau_{н.б} \leq 30$ хв призводить до зменшення щільності бобів $\rho_б$ люцерни в середньому на 112 кг/м³, або в середньому на 10 %, рис. 4.12.

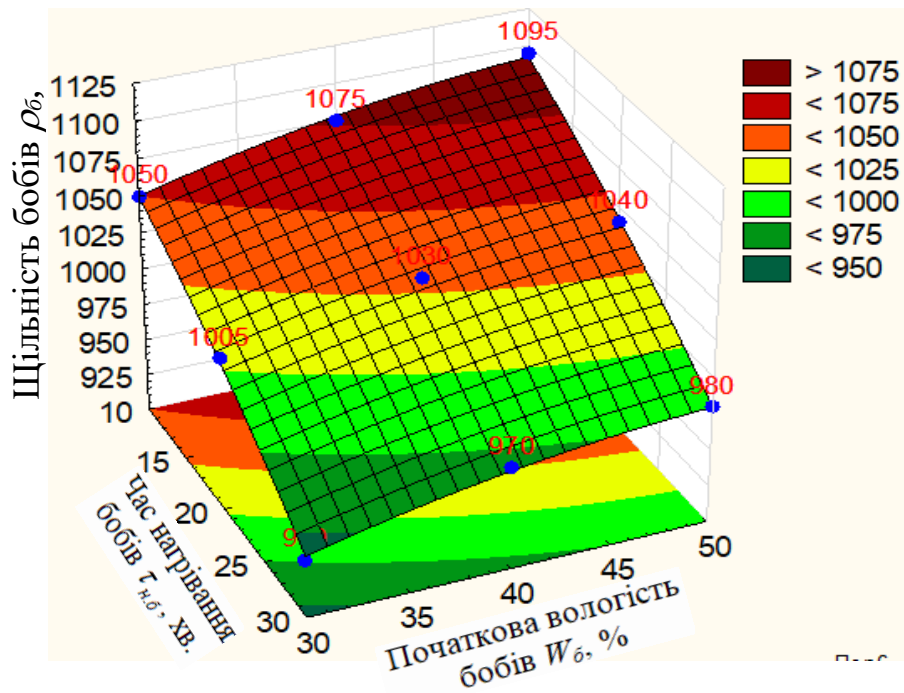


Рисунок 4.9 – Поверхня відгуку функціональної зміни щільності бобів ρ_{δ} люцерни залежно від зміни часу нагрівання $\tau_{н.б}$ та початкової вологості W_{δ} бобів люцерни як функція $\rho_{\delta} = f(\tau_{н.б}; W_{\delta})$

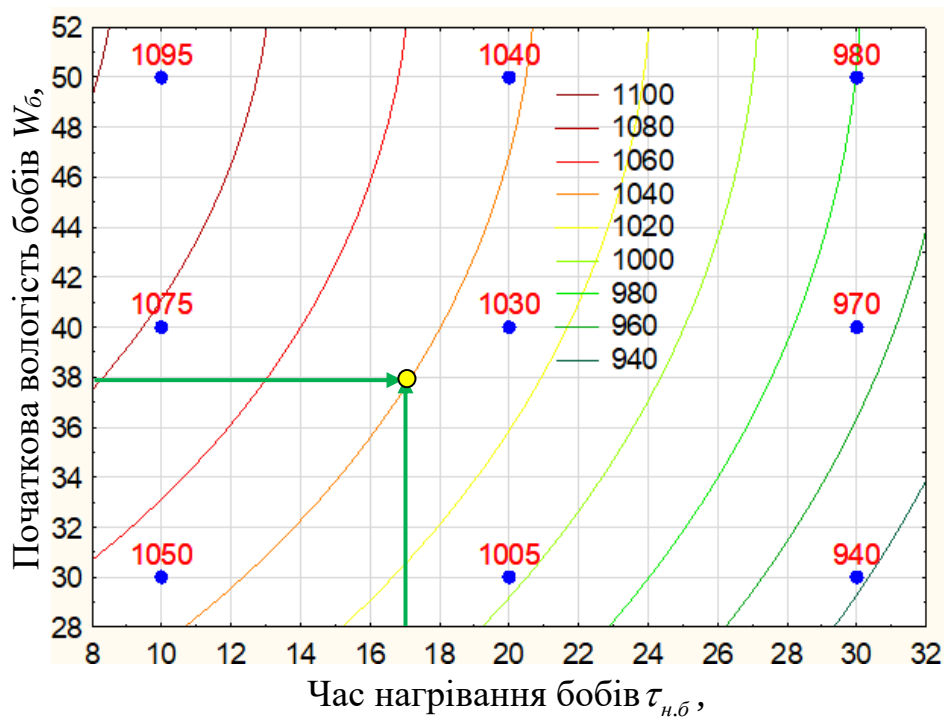


Рисунок 4.10 – Двомірний переріз поверхні відгуку функціональної зміни щільності бобів ρ_{δ} люцерни залежно від зміни часу нагрівання $\tau_{н.б}$ та початкової вологості W_{δ} бобів люцерни як функція $\rho_{\delta} = f(\tau_{н.б}; W_{\delta})$

За збільшення початкової вологості W_{δ} бобів люцерни в межах дії фактора, або в межах $30\% \leq W_{\delta} \leq 50\%$, щільність бобів ρ_{δ} люцерни зростає, але приріст W_{δ} незначний – середнє значення приросту W_{δ} становить 20 кг, або в середньому на 2%, рис. 4.12.

Графічна інтерпретація двомірного перерізу поверхні відгуку функціональної зміни гранично допустимої температури $t_{\delta, \delta}$ нагрівання (рис. 4.8) та щільності ρ_{δ} (рис. 4.10) бобів люцерни є номограмами, за якими визначають або прогнозують числове значення $t_{\delta, \delta}$ або ρ_{δ} – наприклад: за значень вологості бобів люцерни $W_{\delta} = 38\%$ та часу нагрівання бобів люцерни $\tau_{n, \delta} = 17$ хв гранично допустима температура $t_{\delta, \delta}$ нагрівання бобів люцерни повинна бути в межах 54°C ; за значень вологості бобів люцерни $W_{\delta} = 38\%$ та часу нагрівання бобів люцерни $\tau_{n, \delta} = 17$ хв щільність бобів ρ_{δ} люцерни повинна бути в межах 1040 кг/м^3 .

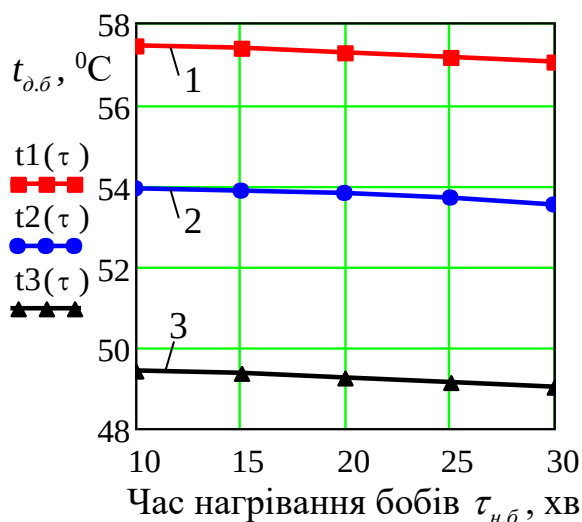


Рисунок 4.11 – Залежність зміни гранично допустимої температури $t_{\delta, \delta}$ нагрівання бобів люцерни від зміни часу нагрівання бобів $\tau_{n, \delta}$ люцерни як функція $t_{\delta, \delta} = f(\tau_{n, \delta})$: 1, 2, 3 – відповідно, початкова вологість бобів люцерни дорівнює $W_{\delta} = 30\%$; 40% ; 50%

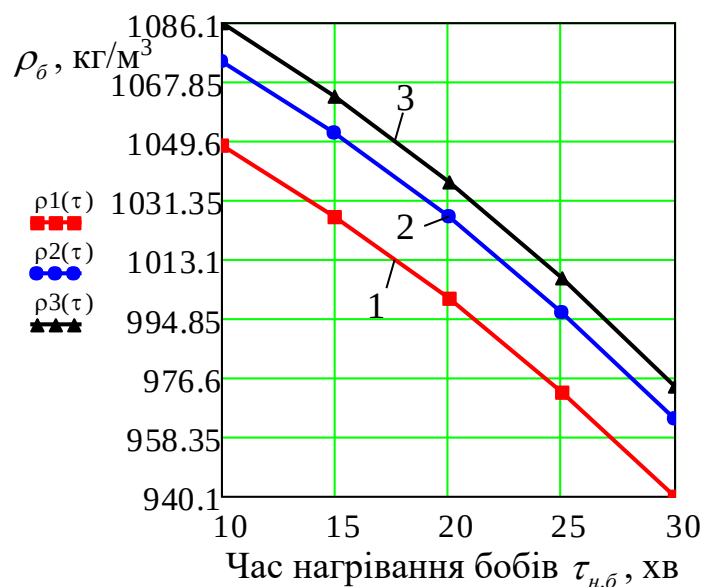


Рисунок 4.12 – Залежність зміни щільності бобів люцерни від зміни часу нагрівання $\tau_{н.б}$ бобів люцерни як функція $t_{д.б} = f(\tau_{н.б})$: 1, 2, 3 – відповідно, початкова вологість бобів люцерни дорівнює $W_{\delta} = 30\%; 40\%; 50\%$

Для практичного використання можна зробити рекомендації що при надходженні на сушіння матеріалу з більшою початковою вологістю потрібно зменшувати експозицію або час сушіння, зменшуючи, наприклад, питоме 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 насіннєвої маси люцерни.

Всі критерії які використовуються при дослідженні процесів сушіння, включають в себе наступні теплофізичні характеристики і теплоємність C (Дж/кг $^{\circ}\text{C}$), теплопровідність α ($\text{м}^2/\text{с}$) і теплопровідність λ (Вт/м $^{\circ}\text{C}$).

Для успішного виділення задач сушіння потрібно знати їх залежність від початкової вологості насіннєвої маси.

Основні теплофізичні характеристики матеріалу зв'язані між собою співвідношенням:

$$C = \lambda / \alpha \gamma', \quad (4.6)$$

де γ' – щільність матеріалу, кг/м^3 .

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 нагріванні або охолодженні бобів люцерни вирівнювати температуру в окремих його місцях.

Коефіцієнт температуропровідності залежить від інтенсивності переносу вологи всередині і характерні зв'язку вологи з матеріалом [111].

В результаті проведення досліджень та обробки експериментальних даних отримано залежності зміни теплофізичних характеристик бобів люцерни від початкової вологості бобів W_6 люцерни, які наведені на рис. 4.13.

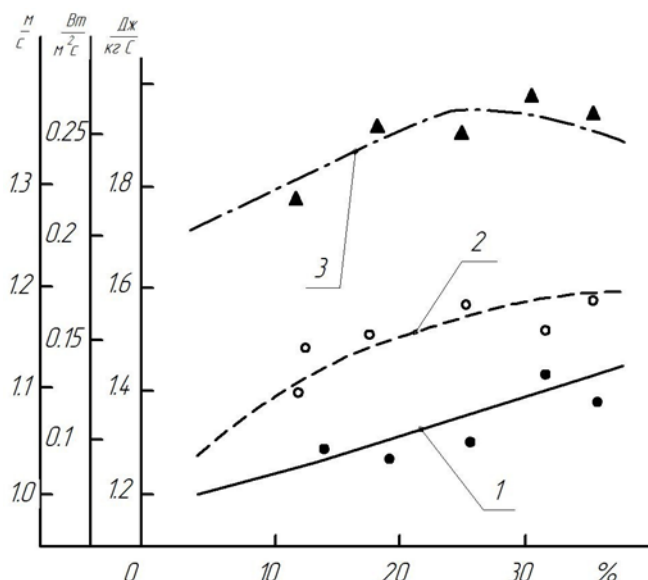


Рисунок 4.13 – Залежність зміни теплофізичних характеристик бобів люцерни від початкової вологості бобів W_0 люцерни: 1 – теплоємність; 2 – теплопровідність; 3 – температуропровідність

Аналіз наведених графіків засвідчує що теплоємність і теплопровідність бобів люцерни збільшується зі збільшенням вологості матеріалу.

Температуропровідність має точку перегину в межах зміни вологості від 30% до 35%.

Цей перетин можна пояснити переходом води із вільного стану в зв'язаний стан.

Для отримання математичної емпіричної моделі, яка описує функціональну зміну температури $t_{н.н}$ ($^{\circ}\text{C}$) самозігрівання насіння люцерни була застосована стандартна методика математичного планування реалізації двофакторних експериментів на трьох рівнях варіювання факторами з трикратною повторністю кожного експерименту [110].

Найменування факторів і їх рівні варіювання наведено в табл. 3.2 третього розділу дисертаційної роботи.

При дослідженні процесу самозігрівання насіннєвої маси люцерни її поміщали в металеву ємність циліндричної форми діаметром 0,7 м і висотою 1,5 м.

Температуру самонагрівання насіннєвої маси $t_{н.л}$ ($^{\circ}\text{C}$) люцерни виміряли в точках ємності за трьох значень радіуса $R = 0$, $R = 0,175$ м, $R = 0,35$ м і трьох

значень висоти $H = 0,25$ м, $H = 0,75$ м, $H = 1,25$ м металевої ємності, тобто отримували дев'ять комбінацій точок.

За результатами реалізації експериментів згідно з нумерованим порядком рандомізованої план-матриці отримано експериментальний масив даних температури самозігрівання насіннєвої маси $t_{н.л}$ люцерни, середні значення якої наведено у додатку А 6.1 та табл. 4.5.

За результатами статистичної обробки отриманого експериментального масиву даних (додаток А 6.1, табл. 4.5) температури нагрівання $t_{н.л}$ насіннєвої маси люцерни, який проілюстровано наведеною діаграмою (рис. 4.14) та аналізу отриманих статистичних показників встановлено, що найбільше значення коефіцієнта чисельної детермінації $D = 0,996$ за рівня його достовірності $P = 0,994$ (додаток А 7.1) відповідає апроксимуючій математичній моделі повного полінома другої степені за рівня значимості 0,95, яку записано у вигляді:

$$t_{н.л} = b_0 + b_1\tau_{н.н} + b_2W_{н.л} + b_{12}\tau_{н.н}W_{н.л} + b_{11}\tau_{н.н}^2 + b_{22}W_{н.л}^2, \quad (4.7)$$

де $b_0, b_1, b_2, b_{12}, b_{11}, b_{22}$ – вільний член і коефіцієнти рівняння регресії.

Таблиця 4.5 – Результати експериментальних досліджень гранично допустимої температури самозігрівання бобів люцерни

№	Значення фактора		Середні значення температури самозігрівання $t_{н.л}$ насіннєвої маси люцерни, °С
	$\tau_{н.н}$, хв	$W_{н.л}$, %	
1	4	15	15
2	4	30	26
3	4	45	33
4	11	15	38
5	11	30	42
6	11	45	48
7	18	15	44
8	18	30	47
9	18	45	50

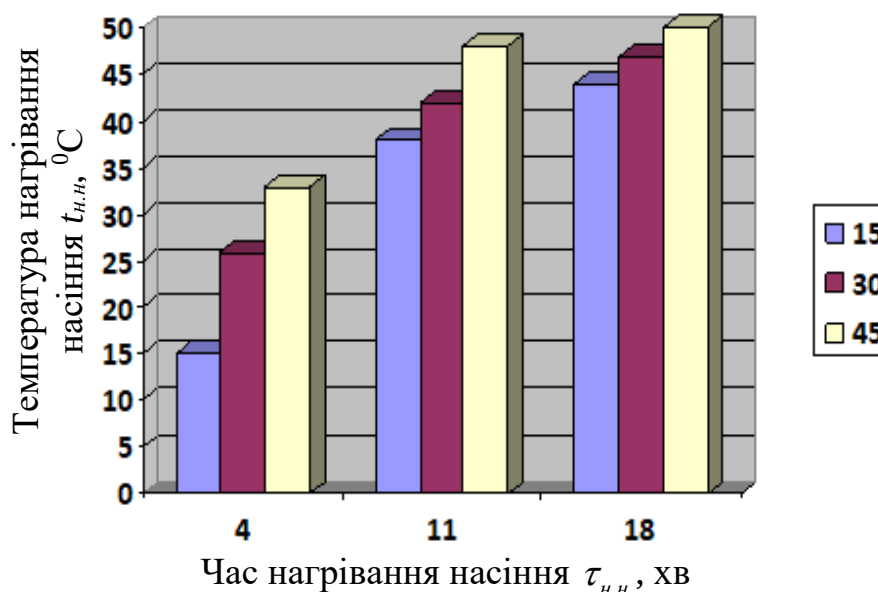


Рисунок 4.14 – Діаграма зміни експериментальних середніх значень температури самонагрівання $t_{н.л}$ насіннєвої маси люцерни: 15, 30, 45 – початкова вологість насіння люцерни $W_{н.л}$, %

Також визначено числові значення вільного члена b_0 рівняння регресії (4.7) та коефіцієнтів b_1 , b_2 , b_{12} , b_{11} , b_{22} рівняння регресії (4.5) при відповідних одиночних факторах, їх взаємодії та квадратичної взаємодії одиничних факторів, які наведено у табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Натуральні значення коефіцієнтів рівняння регресії функціональної зміни температури нагрівання $t_{н.л}$ насіння люцерни

Функціональна залежність	Натуральні значення коефіцієнтів					
	b_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}
$t_{н.л} = f(\tau_{н.н}; W_{н.л})$	-13,6	5,5	0,8	-0,03	-0,1	$-1,5 \cdot 10^{-3}$

За результатами перевірки значимості розрахованих коефіцієнтів b_1 , b_2 , b_{12} , b_{11} , b_{22} (табл. 4.9) емпіричної моделі (4.7) за t-альфа критерієм Стюдента встановлено (t-альфа критерій = 2,305), що всі коефіцієнти b_1 , b_2 , b_{12} , b_{11} , b_{22} рівняння регресії (4.7) є значущими (додаток А 7.1).

Після підтвердження адекватності емпіричної моделі (4.7) за F-критерієм

Фішера, розрахункове значення якого дорівнює F -критерій = 144,545 (додаток А 7.1), отримано математичну модель у натуральних факторах, яка описує функціональний характер зміни температури нагрівання $t_{н.л}$ насіннєвої маси люцерни залежно від зміни часу нагрівання $\tau_{н.н}$ та початкової вологості $W_{н.л}$ насіння люцерни:

$$t_{н.л} = -13,6 + 5,5\tau_{н.н} + 0,8W_{н.л} - 0,03\tau_{н.н} W_{н.л} - 0,1\tau_{н.н}^2 - 1,5 \cdot 10^{-3}W_{н.л}^2. \quad (4.8)$$

На основі аналізу побудованих поверхні відгуку (рис. 4.15) та двовірного перерізу поверхні відгуку (рис. 4.16) встановлено, що за відповідної зміни часу нагрівання насіння люцерни $\tau_{н.н}$ в межах $7 \leq \tau_{н.н} \leq 18$ хв та зміни початкової вологості насіння люцерни $W_{н.л}$ в межах $15\% \leq W_{н.л} \leq 45\%$ (табл. 3.3, 4.5), функціональні апроксимовані значення температури нагрівання $t_{н.л}$ насіння люцерни знаходяться в діапазоні від 16,0 °С до 53,8 °С.

Такі значення зміни діапазону температури нагрівання $t_{н.л}$ насіння люцерни також характерні або адекватні значенням температури нагрівання $t_{н.л}$ насіння люцерни, які визначаються за графічними залежностями, що наведені на рис. 4.17.

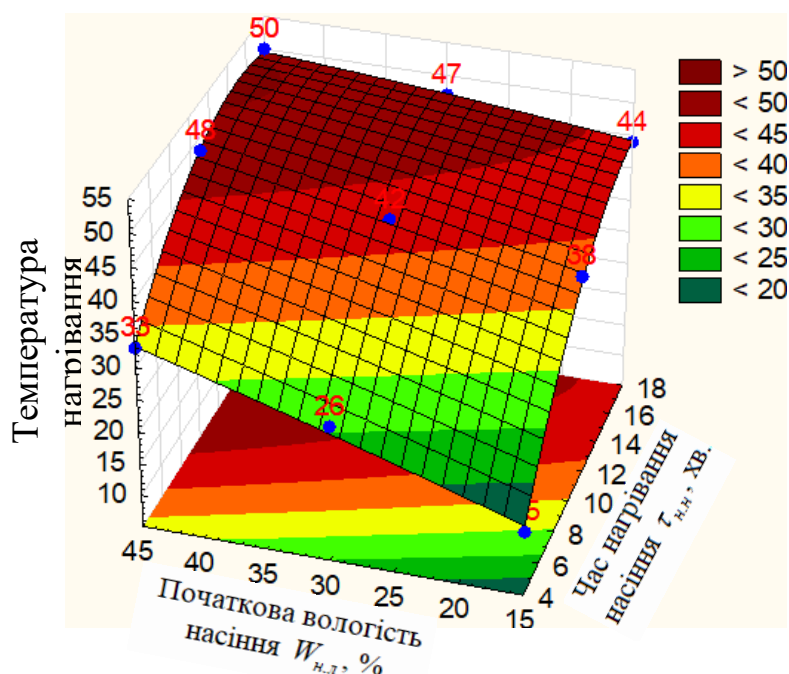


Рисунок 4.15 – Поверхня відгуку функціональної зміни температури нагрівання $t_{н.л}$ насіння люцерни залежно від зміни часу нагрівання $\tau_{н.н}$ та початкової вологості $W_{н.л}$ насіння люцерни як функція $t_{н.л} = f(\tau_{н.н}; W_{н.л})$

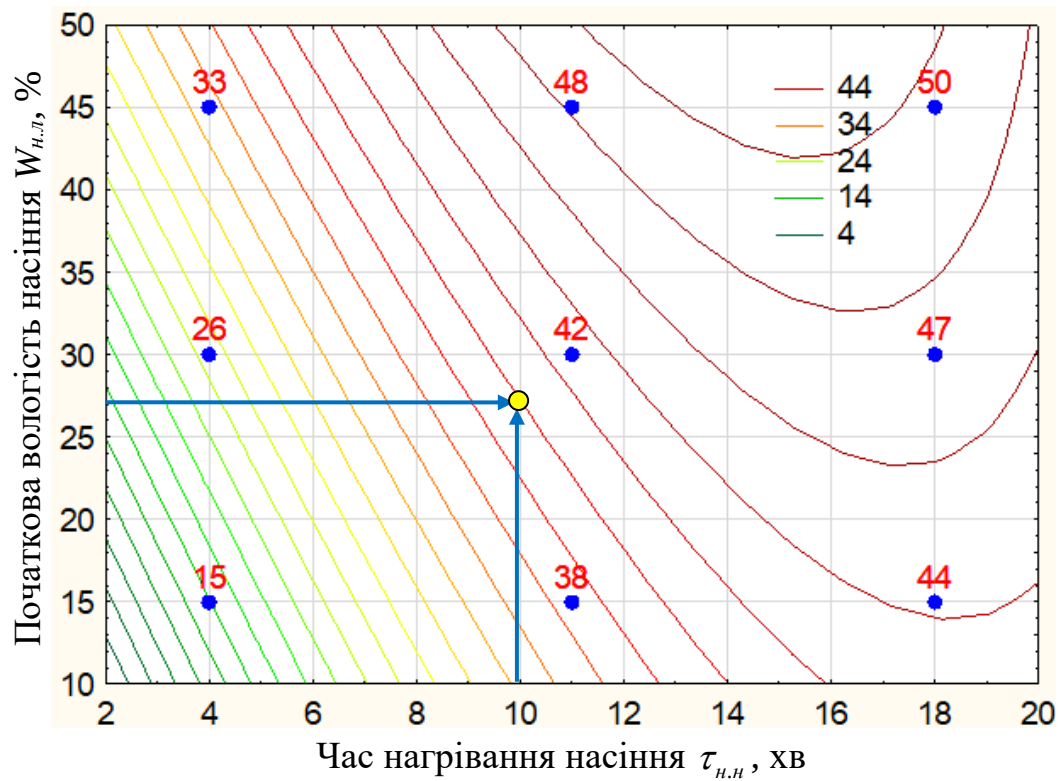


Рисунок 4.16 – Двовірний переріз поверхні відгуку функціональної зміни температури нагрівання $t_{н.л}$ насіння люцерни як функція $t_{н.л} = f(\tau_{н.н}; W_{н.л})$

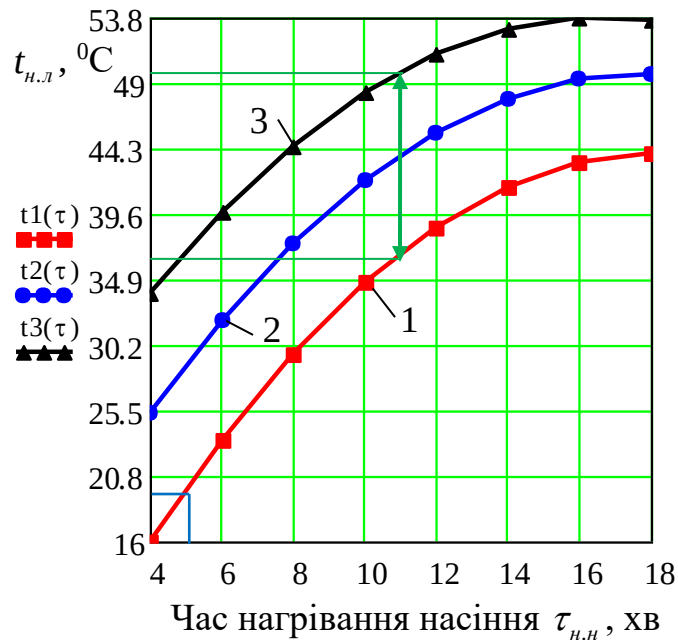


Рисунок 4.17 – Залежність зміни температури нагрівання $t_{н.л}$ насіння люцерни від зміни часу нагрівання $\tau_{н.н}$, як функція $t_{н.л} = f(\tau_{н.н})$: 1, 2, 3 – відповідно, початкова вологість насіння люцерни дорівнює $W_{н.л} = 15\%; 30\%; 45\%$

Встановлено, що функціональна зміна температури нагрівання $t_{н.л}$ насіння люцерни залежно від зміни часу нагрівання $\tau_{н.н}$ та початкової вологості $W_{н.л}$ має однозначний прямий характер – зі збільшенням $\tau_{н.н}$ та $W_{н.л}$ числові значення температури нагрівання $t_{н.л}$ насіння люцерни зростають.

За зміни початкової вологості насіння $W_{н.л}$ люцерни в межах зміни фактора від 15% до 45% температури нагрівання $t_{н.л}$ насіння люцерни збільшується, рис. 4.17:

- приблизно в 2,1 раза за часу нагрівання насіння люцерни $\tau_{н.б} = 4$ хв – від 16°C до $34,8^{\circ}\text{C}$;

- приблизно в 1,4 раза за часу нагрівання насіння люцерни $\tau_{н.б} = 11$ хв – від $35,4^{\circ}\text{C}$ до $49,8^{\circ}\text{C}$;

- приблизно в 1,2 раза за часу нагрівання насіння люцерни $\tau_{н.б} = 18$ хв – від $44,2^{\circ}\text{C}$ до $53,8^{\circ}\text{C}$.

При цьому, збільшення або зменшення початкової вологості $W_{н.л}$ та часу нагрівання $\tau_{н.н}$ насіння люцерни, наприклад, на 10% (відповідно, на $\pm 3\%$ та на $\pm 1,1$ хв) призводить до відповідної зміни температури нагрівання $t_{н.л}$ насіння люцерни, відповідно, в середньому на $\pm 3^{\circ}\text{C}$ та на $\pm 4^{\circ}\text{C}$.

Графічна інтерпретація двовірного перерізу поверхні відгуку функціональної зміни температури нагрівання $t_{н.л}$ насіння люцерни (рис. 4.16) є номограмою, за якою визначають або прогнозують числове значення $t_{н.л}$ – наприклад, за значень вологості насіння люцерни $W_{н.л} = 27\%$ та часу нагрівання насіння люцерни $\tau_{н.б} = 10$ хв температура нагрівання $t_{н.л}$ насіння люцерни повинна бути 44°C .

Отримані показники фізико-механічних характеристик насіннєвої маси люцерни є початковими положеннями для подальшого аналізу процесу сушіння насіннєвої маси люцерни.

4.2. Результати експериментальних досліджень процесу сушіння насіннєвої маси люцерни

4.2.1. Експериментальні дослідження вологовмісту в шарі насіннєвої маси люцерни

Експериментальні дослідження процесу сушіння насіннєвої маси люцерни проведено з застосуванням сушильної установки (рис. 2.1, 3.5) з метою виявлення закономірностей, які визначають функціональний характер зміни основних показників, які регламентують даний процес.

Експериментальні дослідження з визначення вологовмісту $W_{в.ш}$ (кг вол./кг абс. сух. реч.) в шарі насіннєвої маси люцерни провели на основі реалізації планованих двофакторних експериментів [110] на трьох рівнях варіювання вхідними факторами з трикратною повторністю кожного експерименту, рис. 4.18.

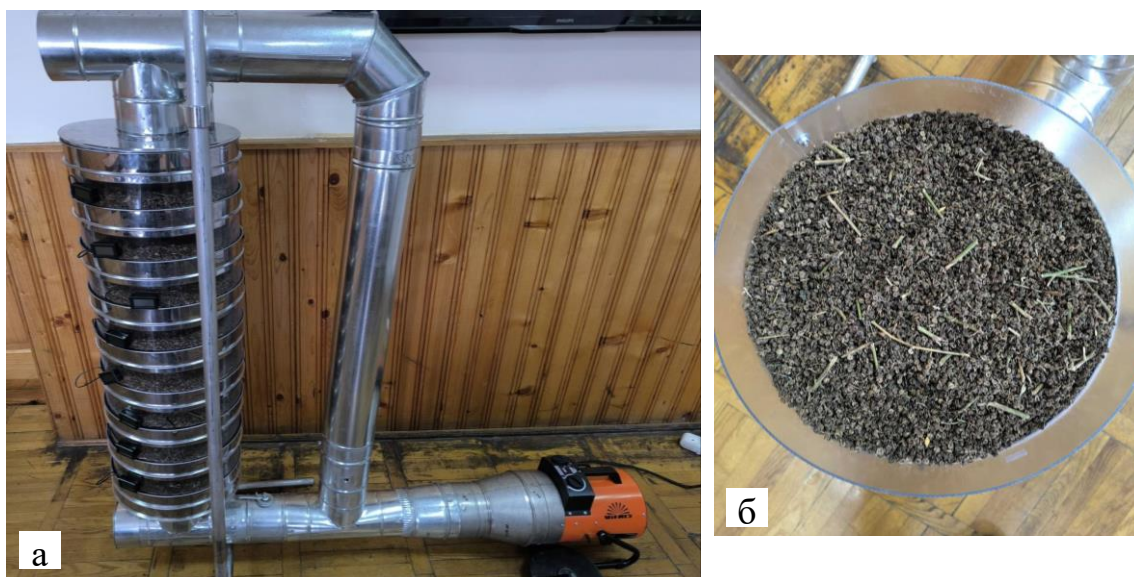


Рисунок 4.18 – Загальний вигляд: а – сушильної установки в роботі; б – висушеної насіннєвої маси люцерни.

Найменування факторів і їх рівні варіювання та методику реалізації експериментальних досліджень з визначення вологовмісту $W_{в.ш}$ (кг вол./кг абс. сух. реч.) в шарі насіннєвої маси люцерни наведено, відповідно, в табл. 3.3 та п. 3.3 третього розділу дисертації.

За результатами реалізації експериментів згідно з нумерованим порядком рандомізованої план-матриці отримано експериментальний масив даних вологовмісту $W_{в.ш}$ в шарі насінневої маси люцерни (додаток А 8.2), середні значення якого наведено у додатку А 9.2 та табл. 4.7.

За результатами статистичної обробки експериментального масиву середніх даних вологовмісту $W_{в.ш}$ в шарі насінневої маси люцерни (додаток А 9.2, табл. 4.7) та аналізу отриманих статистичних показників (додаток А 10.2) встановлено, що найбільше значення коефіцієнта чисельної детермінації $D = 0,912$ за рівня його вірогідності $P = 0,856$ відповідає апроксимуючій математичній моделі, яку визначено за методом найменших квадратів [112] за рівня достовірності 0,95 та яку записано у загальному вигляді:

$$W_{в.ш} = b_0 + b_1 H_{ш} + b_2 \tau_{с.ш} + b_{12} H_{ш} \tau_{с.ш} + b_{11} H_{ш}^2 + b_{22} \tau_{с.ш}^2, \quad (4.9)$$

де b_0 – вільний член рівняння регресії;

$b_1, b_2, b_{12}, b_{11}, b_{22}$ – коефіцієнти рівняння регресії відповідних факторів і їх взаємодії.

Таблиця 4.7 – Результати експериментальних досліджень вологовмісту в шарі насінневої маси люцерни

№	Значення фактора		Середні значення вологовмісту в шарі насінневої маси люцерни $W_{в.ш}$ (кг вол./кг абс. сух. реч.)
	$H_{ш}$, м	$\tau_{с.ш}$, год	
1	0,3	2	1,55
2	0,3	7	0,35
3	0,3	12	0,15
4	0,9	2	2,25
5	0,9	7	0,85
6	0,9	12	0,25
7	1,5	2	2,35
8	1,5	7	2,05
9	1,5	12	0,45

Також за методом найменших квадратів [112], або за формулами (3.5)-(3.8) додатку А. 1.1. визначено натуральні числові значення вільного члена b_0 та коефіцієнтів рівняння регресії (4.9) відповідних факторів і їх взаємодії b_1 , b_2 , b_{12} , b_{11} , b_{22} , які наведено у табл. 4.8.

Таблиця 4.8 – Натуральні значення коефіцієнтів рівняння регресії з визначення вологовмісту $W_{в.ш}$ в шарі насіннєвої маси люцерни

Функціональна залежність	Натуральні значення коефіцієнтів					
	b_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}
$W_{в.ш} = f(H_{ш}; \tau_{с.ш})$	1,57	0,9	-0,19	-0,04	0,09	$0,33 \cdot 10^{-2}$

За результатами перевірки значимості розрахованих коефіцієнтів b_1 , b_2 , b_{12} , b_{11} , b_{22} (табл. 4.11) емпіричної моделі (4.9) за t -альфа критерієм Стюдента встановлено (t -альфа критерій = 2,305), що всі коефіцієнти b_1 , b_2 , b_{12} , b_{11} , b_{22} рівняння регресії (4.9) є значущими (додаток А 10.2).

Після підтвердження адекватності емпіричної моделі (4.9) за F -критерієм Фішера, розрахункове значення якого дорівнює F -критерій = 6,255 (додаток А 10.2), отримано математичну модель у натуральних факторах, яка описує функціональний характер зміни вологовмісту $W_{в.ш}$ в шарі насіннєвої маси люцерни залежно від зміни висоти $H_{ш}$ та часу сушіння $\tau_{с.ш}$ шару насіннєвої маси люцерни:

$$W_{в.ш} = 1,57 + 0,9H_{ш} - 0,19\tau_{с.ш} - 0,04H_{ш}\tau_{с.ш} + 0,09\tau_{с.ш}^2 + 0,33 \cdot 10^{-2} H_{ш}^2. \quad (4.10)$$

На основі аналізу побудованих поверхні відгуку (рис. 4.19) та двомірного перерізу поверхні відгуку (рис. 4.20) встановлено, що за відповідної зміни висоти $H_{ш}$ шару насіннєвої маси люцерни в межах $0,3 \leq H_{ш} \leq 1,5$ м та зміни часу сушіння $\tau_{с.ш}$ шару насіннєвої маси люцерни в межах $2 \leq \tau_{с.ш} \leq 12$ год (табл. 3.4, 4.7), функціональні апроксимовані значення вологовмісту $W_{в.ш}$ в шарі насіннєвої маси люцерни знаходяться в діапазоні від 0,15 до 2,39 кг вол./кг абс. сух. реч., що також характерно або адекватно значенням $W_{в.ш}$, які визначаються за графічними

залежностями, що наведені на рис. 4.21.

Аналізуючи окремий вплив зміни кожного конкретного фактора на зміну показника вологовмісту $W_{в.ш}$ в шарі насінневої маси люцерни необхідно констатувати, що домінантним фактором, який має зворотній характер вплив на зміну вологовмісту $W_{в.ш}$ в шарі насінневої маси люцерни, є час сушіння $\tau_{с.ш}$ шару насінневої маси люцерни (рис. 4.19, 4.20) – за збільшення часу сушіння $\tau_{с.ш}$ шару насінневої маси люцерни від 2 до 12 год вологовміст $W_{в.ш}$ в шарі насінневої маси люцерни зменшується, при цьому встановлено, що (рис. 4.21a):

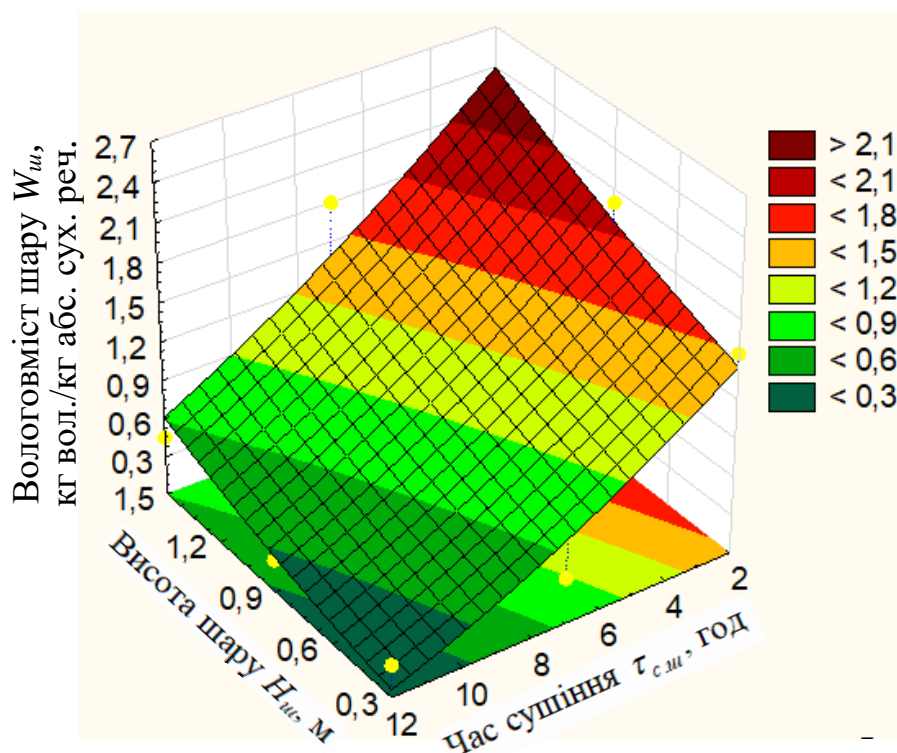


Рисунок 4.19 – Поверхня відгуку функціональної зміни вологовмісту $W_{в.ш}$ в шарі насінневої маси люцерни залежно від зміни висоти $H_{ш}$ та часу $\tau_{с.ш}$ сушіння насінневої маси люцерни як функція $W_{ш} = f(H_{ш}; \tau_{с.ш})$

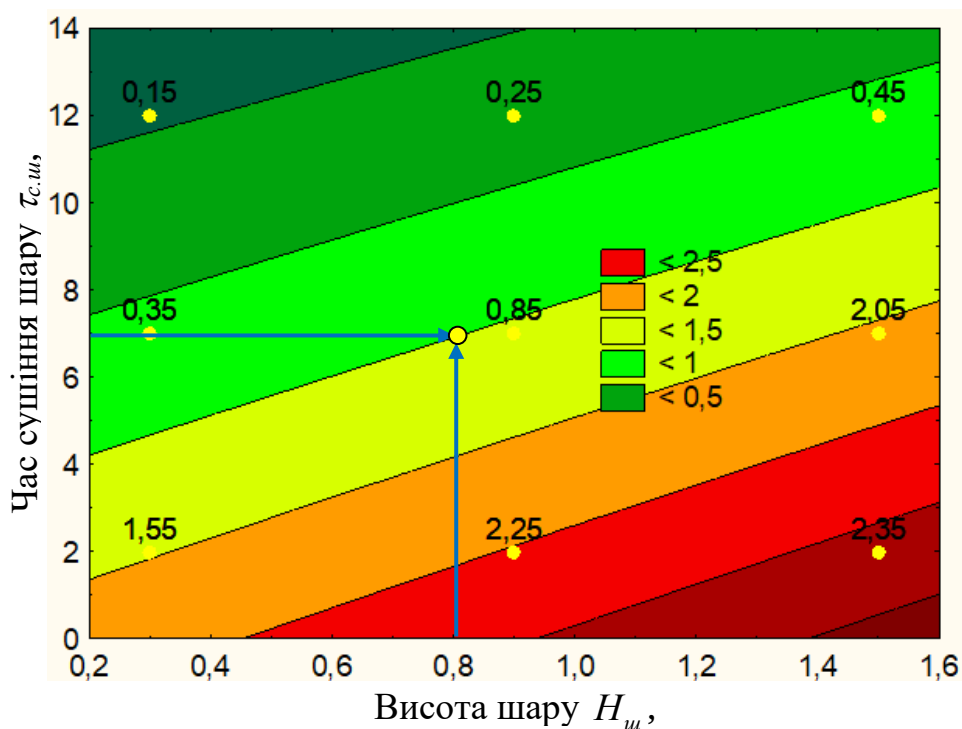


Рисунок 4.20 – Двомірний переріз поверхні відгуку функціональної зміни вологовмісту $W_{в.ш}$ в шарі насіннєвої маси люцерни як функція $W_{в.ш} = f(H_{ш}; \tau_{с.ш})$

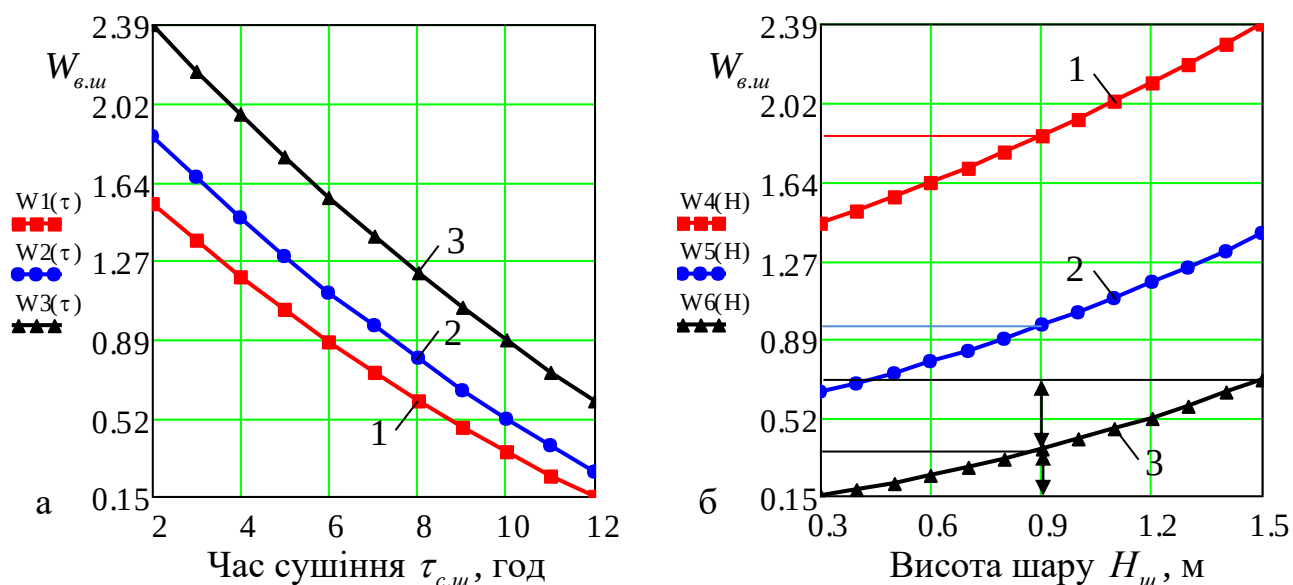


Рисунок 4.21 – Залежність зміни вологовмісту $W_{в.ш}$ в шарі насіннєвої маси люцерни як функція: а – $W_{в.ш} = f(\tau_{с.ш})$, 1, 2, 3 – відповідно, висота шару дорівнює $H_{ш} = 0,3; 0,9; 1,5$ м; б – $W_{в.ш} = f(H_{ш})$, 1, 2, 3 – відповідно, час сушіння дорівнює $\tau_{с.ш} = 2; 7; 12$ год

- за значення висоти шару $H_{ш} = 0,3$ м показник вологовмісту $W_{в.ш}$ в шарі

насіннєвої маси люцерни зменшується від 1,53 до 0,15 кг вол./кг абс. сух. реч., або приблизно в 10 раз (крива 1);

- за значення висоти шару $H_{ш} = 0,9$ м показник вологовмісту $W_{в.ш}$ в шарі насіннєвої маси люцерни зменшується від 1,86 до 0,26 кг вол./кг абс. сух. реч., або приблизно в 7 раз (крива 2);

- за значення висоти шару $H_{ш} = 1,5$ м показник вологовмісту $W_{в.ш}$ в шарі насіннєвої маси люцерни зменшується від 2,39 до 0,61 кг вол./кг абс. сух. реч., або приблизно в 4 рази (крива 3).

Відповідно, за збільшення висоти шару $H_{ш}$ насіннєвої маси люцерни від 0,3 до 1,5 м вологовміст $W_{в.ш}$ в шарі насіннєвої маси люцерни зростає, при цьому встановлено, що (рис. 4.21б):

- за значення часу сушіння $\tau_{с.ш} = 12$ год показник вологовмісту $W_{в.ш}$ в шарі насіннєвої маси люцерни зростає від 0,15 до 0,71 кг вол./кг абс. сух. реч., або приблизно в 4,7 раза (крива 3);

- за значення часу сушіння $\tau_{с.ш} = 7$ год показник вологовмісту $W_{в.ш}$ в шарі насіннєвої маси люцерни зростає від 0,65 до 1,41 кг вол./кг абс. сух. реч., або приблизно в 2,2 раза (крива 2);

- за значення часу сушіння $\tau_{с.ш} = 2$ год показник вологовмісту $W_{в.ш}$ в шарі насіннєвої маси люцерни зростає від 1,45 до 2,39 кг вол./кг абс. сух. реч., або в 1,7 раза (крива 3).

Також необхідно зазначити, що інтенсивність просушування нижніх шарів насіннєвої маси люцерни в межах зони висоти шару від 0,3 до 0,9 м, є значно меншою за інтенсивність просушування верхніх шарів насіннєвої маси люцерни в межах їх зміни від 0,9 до 1,5 м.

Так:

- в першому випадку за зменшення висоти шару $H_{ш}$ від 0,9 до 0,3 м за часу його сушіння рівного $\tau_{с.ш} = 2$ год вологовміст $W_{в.ш}$ в шарі насіннєвої маси люцерни зменшується від 0,37 до 0,15 кг в./кг абс. сух. реч., тобто на 0,22 кг вол./кг абс. сух. реч.;

- в другому випадку за зменшення висоти шару $H_{ш}$ від 1,5 до 0,9 м вологовміст $W_{в.ш}$ в шарі насіннєвої маси люцерни зменшується від 0,71 до 0,37 кг вол./кг абс. сух. реч., або на 0,34 кг вол./кг абс. сух. реч., рис. 4.21б, крива 3.

Відповідно:

- за часу сушіння $\tau_{с.ш}$ насіннєвої маси люцерни рівного $\tau_{с.ш} = 7$ год вологовміст $W_{в.ш}$ в шарі насіннєвої маси люцерни в першому випадку зменшується від 0,95 до 0,64 кг вол./кг абс. сух. реч., тобто на 0,31 кг вол./кг абс. сух. реч., а другому випадку зменшується від 1,41 до 0,64 кг вол./кг абс. сух. реч., тобто на 0,76 кг вол./кг абс. сух. реч., рис. 4.21б, крива 2.

- за часу сушіння $\tau_{с.ш}$ насіннєвої маси люцерни рівного $\tau_{с.ш} = 12$ год вологовміст $W_{в.ш}$ в шарі насіннєвої маси люцерни в першому випадку зменшується від 1,87 до 1,44 кг вол./кг абс. сух. реч., тобто на 0,43 кг вол./кг абс. сух. реч., а другому випадку зменшується від 2,39 до 1,87 кг вол./кг абс. сух. реч., тобто на 0,52 кг вол./кг абс. сух. реч., рис. 4.21б, крива 1.

Графічна інтерпретація двомірного перерізу поверхні відгуку функціональної зміни вологовмісту $W_{в.ш}$ в шарі насіннєвої маси люцерни (рис. 4.20) є номограмою, за якою визначають, або прогнозують числове значення $W_{в.ш}$ – наприклад, за значень висоти шару $H_{ш} = 0,8$ м та часу сушіння шару $\tau_{с.ш} = 7$ год вологовміст $W_{в.ш}$ в шарі насіннєвої маси люцерни повинен бути 1,07 кг вол./кг абс. сух. реч.

Таким чином можна стверджувати, що для насіннєвої маси люцерни, доцільно застосувати технологічний процес сушіння в нерухомому шарі з використанням сушарок підлогового типу, чи установок для досушування матеріалу активним вентиляванням.

4.2.2. Експериментальні дослідження втрати тиску повітря в шарі насіннєвої маси люцерни

Для отримання математичної емпіричної моделі, яка описує функціональну зміну втрат тиску ΔP (Па) повітря під час сушіння насіннєвої маси

люцерни було застосовано методику планування трифакторних експериментів на трьох рівнях варіювання факторами з трикратною повторністю кожного експерименту [110].

Найменування факторів і їх рівні варіювання під час реалізації експериментальних досліджень з визначення функціональної зміни втрат тиску ΔP (Па) повітря та методику проведення експериментів наведено, відповідно, в табл. 3.4 та п. 3.3 третього розділу дисертації.

За результатами реалізації експериментів як функції $\Delta P = f(H_{ш}, g_n, m_{н.л})$ згідно з нумерованим порядком рандомізованої план-матриці отримано експериментальний масив даних втрат тиску ΔP (Па) повітря під час сушіння насінневої маси люцерни (додаток А 11.2).

Середні значення функціональної зміни втрат тиску ΔP повітря наведено у додатку А 12.2 та табл. 4.9.

Таблиця 4.9 – Результати експериментальних досліджень втрат тиску повітря під час сушіння насінневої маси люцерни

№	Значення фактора			Середні значення ΔP , Па
	$H_{ш}$, м	g_n , м/с	$m_{н.л}$	
1	0,3	0,2	0,56	0,5
2	0,9	0,2	0,56	0,9
3	1,5	0,2	0,56	1,4
4	0,3	0,7	0,56	1,0
5	0,9	0,7	0,56	1,5
6	1,5	0,7	0,56	2,2
7	0,3	1,2	0,56	2
8	0,9	1,2	0,56	2,9
9	1,5	1,2	0,56	3,8
10	0,3	0,2	0,61	1,1
11	0,9	0,2	0,61	1,7
12	1,5	0,2	0,61	2,3
13	0,3	0,7	0,61	1,9

14	0,9	0,7	0,61	2,8
15	1,5	0,7	0,61	4,1
16	0,3	1,2	0,61	2,7
17	0,9	1,2	0,61	4,5
18	1,5	1,2	0,61	5,9
19	0,3	0,2	0,66	2,4,
20	0,9	0,2	0,66	3,2
21	1,5	0,2	0,66	4,3
22	0,3	0,7	0,66	3,5
23	0,9	0,7	0,66	5,3
24	1,5	0,7	0,66	7,8
25	0,3	1,2	0,66	5,5
26	0,9	1,2	0,66	7,4
27	1,5	1,2	0,66	10,7

За результатами статистичної обробки отриманого експериментального масиву даних (додаток А 12.2, табл. 4.9) втрат тиску ΔP (Па) повітря під час сушіння насіннєвої маси люцерни та аналізу отриманих статистичних показників (додаток А 13.2) встановлено, що найбільше значення коефіцієнта чисельної детермінації $D = 0,986$ за рівня його вірогідності $P = 1,000$ відповідає апроксимуючій математичній моделі у вигляді повного полінома другої степені за рівня достовірності 0,95, яку записано у вигляді:

$$\Delta P = b_0 + b_1 H_{\text{ш}} + b_2 \mathcal{G}_n + b_3 m_{\text{н.л}} + b_{12} H_{\text{ш}} \mathcal{G}_n + b_{13} H_{\text{ш}} m_{\text{н.л}} + b_{23} \mathcal{G}_n m_{\text{н.л}} + b_{11} H_{\text{ш}}^2 + b_{22} \mathcal{G}_n^2 + b_{33} m_{\text{н.л}}^2, \quad (4.11)$$

де $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$ – вільний член і коефіцієнти рівняння відповідних факторів і їх взаємодії.

Також визначено числові значення вільного члена b_0 та коефіцієнтів рівняння (4.10) відповідних факторів і їх взаємодії $b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$, які наведено у табл. 4.10.

Таблиця 4.10 – Натуральні значення коефіцієнтів рівняння регресії

Функціональна залежність	Натуральні значення коефіцієнтів				
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}
$\Delta P = f(H_{ш}; g_n; m_{н.л})$	93,7	-12,6	-15,3	-305,8	1,7
	b_{13}	b_{23}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
	20,8	26,0	0,4	0,7	251,3

За результатами перевірки значимості розрахованих коефіцієнтів b_1 , b_2 , b_3 , b_{12} , b_{13} , b_{23} , b_{11} , b_{22} , b_{33} (табл. 4.15) функцій $\Delta P = f(H_{ш}; g_n; m_{н.л})$ математичної емпіричної моделі (4.1) за t -альфа критерієм Стюдента встановлено (t -альфа критерій = 2,053), що (додаток А 13.2) всі коефіцієнти b_1 , b_2 , b_3 , b_{12} , b_{13} , b_{23} , b_{11} , b_{22} , b_{33} функції $\Delta P = f(H_{ш}; g_n; m_{н.л})$ рівняння регресії (4.11) є значущими.

Після підтвердження адекватності емпіричної моделі (4.11) за F -критерієм Фішера, розрахункове значення якого дорівнює F -критерій = 135,785 (додаток А 13.2), отримано математичну модель (рівняння регресії) у натуральних факторах, яка описує функціональний характер зміни втрат тиску ΔP повітря під час сушіння насіннєвої маси люцерни:

$$\begin{aligned} \Delta P = & 93,7 - 12,6H_{ш} - 15,3g_n - 305,8m_{н.л} + 1,7H_{ш}g_n + \\ & + 20,8H_{ш}m_{н.л} + 26,0g_nm_{н.л} + 0,4H_{ш}^2 + 0,7g_n^2 + 251,3m_{н.л}^2. \end{aligned} \quad (4.12)$$

На основі аналізу побудованих поверхонь відгуку (рис. 4.22) та їх двовірних перерізів (рис. 4.23) функціональної зміни втрати тиску ΔP повітря під час сушіння насіннєвої маси люцерни встановлено, що у межах зміни вхідних факторів, тобто висоти шару $0,3 \leq H_{ш} \leq 1,5$ м, швидкості повітря $0,2 \leq g_n \leq 1,2$ м/с (табл. 3.5, 4.9), коефіцієнта пористості $0,56 \leq m_{н.л} \leq 0,66$ апроксимовані значення функціональної зміни втрати тиску ΔP повітря під час сушіння насіннєвої маси люцерни змінюються в межах від 0,8 до 12,1 Па, що також характерно та підтверджується залежностями зміни ΔP , які наведено на рис. 4.24, 4.25.

За результатами регресійного аналізу та графічних побудов впливу зміни кожного конкретного діючого фактора на зміну показника втрати тиску ΔP повітря в шарі насіннєвої маси люцерни (рис. 4.22-4.25) встановлено, що домінантними факторами, які суттєво впливають на характер процесу сушіння є всі три діючі фактори: висота шару $H_{ш}$, швидкість повітря $\mathcal{Q}_n$, коефіцієнт пористості $m_{n.c}$, причому за збільшення значень висоти шару $H_{ш}$, швидкості повітря $\mathcal{Q}_n$, яке продувається через шар насіннєвої маси люцерни та коефіцієнта пористості $0,56 m_{n.c}$ в межах їх варіювання (табл. 3.5, 4.9) апроксимовані значення втрати тиску ΔP повітря в шарі насіннєвої маси люцерни також зростають, тобто наявний прямий кореляційний зв'язок.

При цьому:

- за збільшення висоти шару $H_{ш}$ насіннєвої маси люцерни від 0,3 до 1,5 м апроксимовані значення втрати тиску ΔP повітря в шарі збільшуються в межах від 0,9 до 12,1 Па, рис. 4.24а;

- за збільшення швидкості повітря $\mathcal{Q}_n$ від 0,2 до 1,2 м/с, яке продувається через шар насіннєвої маси люцерни, апроксимовані значення втрати тиску ΔP повітря в шарі збільшуються в межах від 0,98 до 10,2 Па, рис. 4.24б;

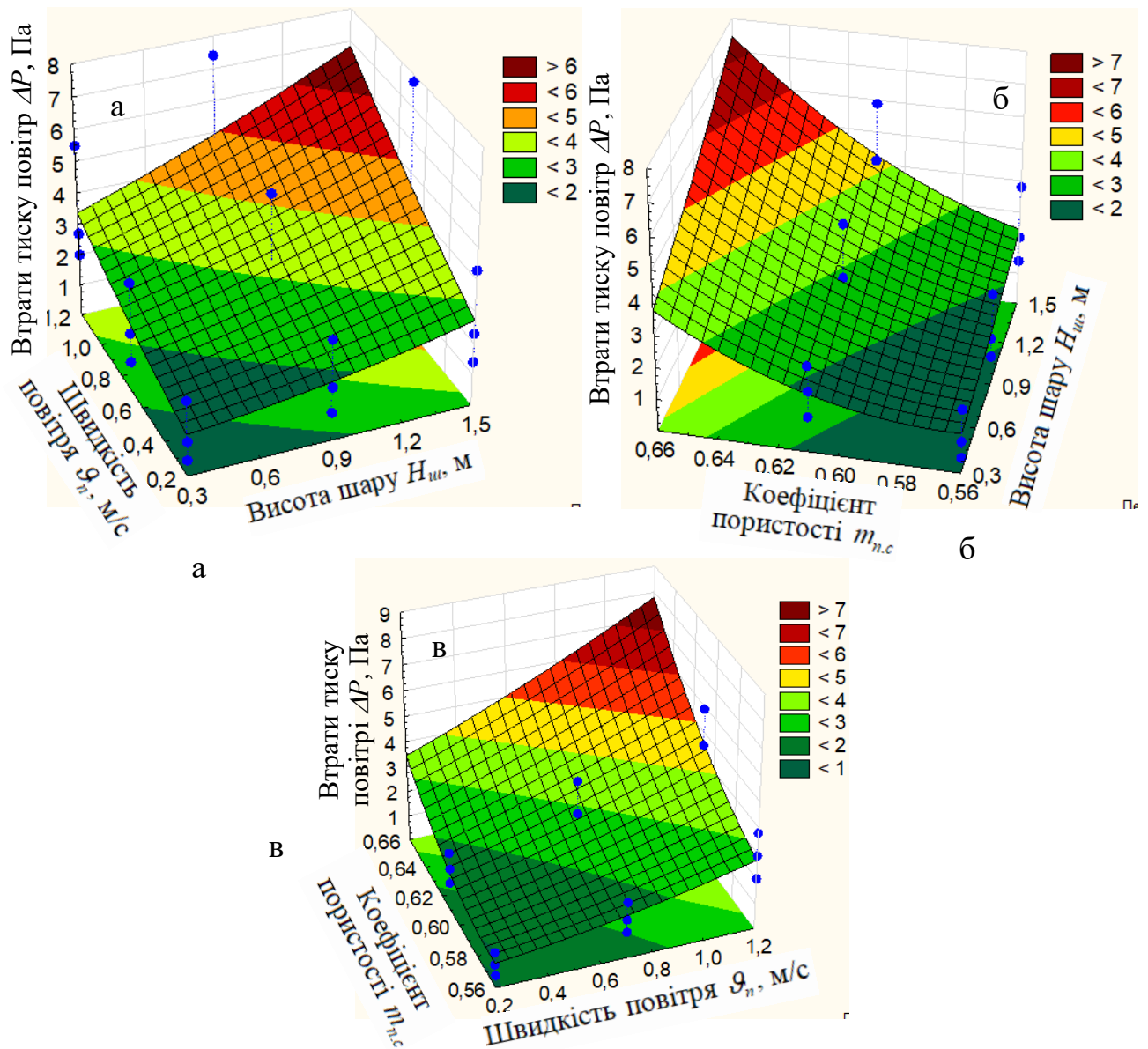


Рисунок 4.22 – Поверхня відгуку функціональної зміни втрати тиску ΔP повітря під час сушіння насіннєвої маси люцерни залежно від зміни висоти $H_{ш}$, швидкості повітря Q_n та коефіцієнта пористості $m_{n,c}$ насіннєвої маси люцерни як функція: а – $\Delta P = f(H_{ш}; Q_n)$; б – $\Delta P = f(H_{ш}; m_{n,c})$; в – $\Delta P = f(Q_n; m_{n,c})$

- за збільшення коефіцієнт пористості $m_{n,c}$ насіннєвої маси люцерни від 0,56 до 0,66 апроксимовані значення втрати тиску ΔP повітря в шарі збільшуються в межах від 0,8 до 10,2 Па, рис. 4.25.

Результати досліджень показали, що одним із основних впливів на величину втрати тиску ΔP повітря в шарі чинить швидкість повітряного потоку Q_n , що проходить через шар.

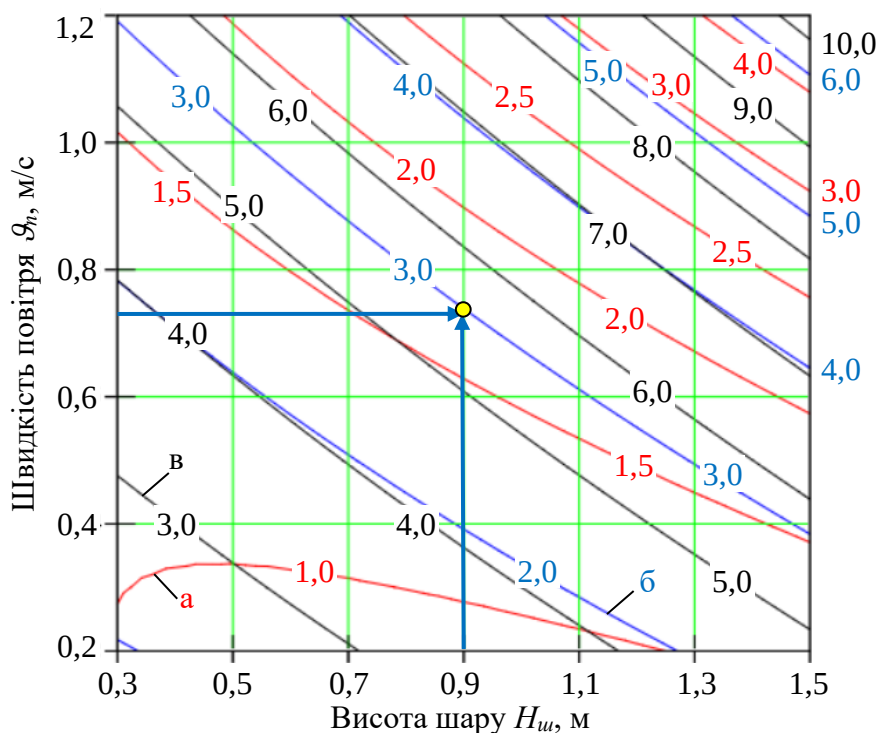


Рисунок 4.23 – Двомірний переріз поверхні відгуку функціональної зміни втрати тиску ΔP повітря під час сушіння насіннєвої маси люцерни залежно від зміни висоти шару H_w , швидкості руху повітря v_n в шарі як функція: а – $\Delta P = f(H_w; v_n)$: а, б, в – відповідно, коефіцієнт пористості $m_{c.n} = 0,56; 0, 0,61; 0,66$

Так за швидкості руху повітря v_n в шарі насіннєвої маси люцерни, що змінюється в межах від 0,2 до 0,7 м/с втрати тиску значно збільшуються зі збільшенням коефіцієнта пористості шару в межах $0,61 \leq m_{c.n} \leq 0,66$ та висоти шару H_w більшою за значення 0,3 м, наприклад, з 1,65 до 4,5 Па, тобто збільшуються в 2,7 раза.

У разі збільшення швидкості руху повітря v_n до 1,0 м/с, яке проходить через шар насіннєвої маси люцерни, товщину шару H_w необхідно зменшити до 0,3 м, а для швидкостей повітря в шарі в межах 0,25...0,5 м/с максимальна товщина шару не повинна перевищувати 0,4...0,6 м.

Так, за швидкості повітряного потоку 0,5 м/с максимальні втрати тиску в шарі становлять 6,1 Па, у той час як для швидкості повітряного потоку 1,2 м/с – 10,2 Па, тобто збільшуються в 8,5 раза.

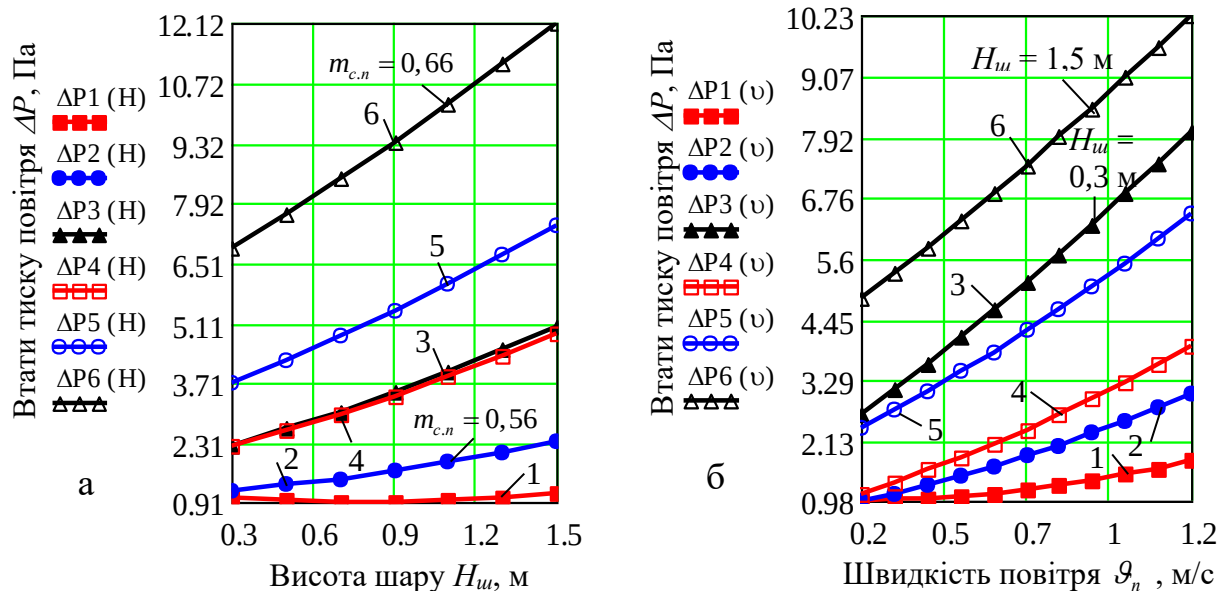


Рисунок 4.24 – Залежність функціональної зміни втрати тиску ΔP повітря під час сушіння насіннєвої маси люцерни як функція: а – $\Delta P = f_{\Delta}(H_u)$, 1, 4 – швидкість руху повітря $v_n = 0,2$ м/с; 2, 5 – швидкість руху повітря $v_n = 0,7$ м/с; 3, 6 – швидкість руху повітря $v_n = 1,2$ м/с; б – $\Delta P = f_{\Delta}(v_n)$, 1, 4 – коефіцієнт пористості $m_{c,n} = 0,56$; 2, 5 – коефіцієнт пористості $m_{c,n} = 0,61$; 3, 6 – коефіцієнт пористості $m_{c,n} = 0,66$

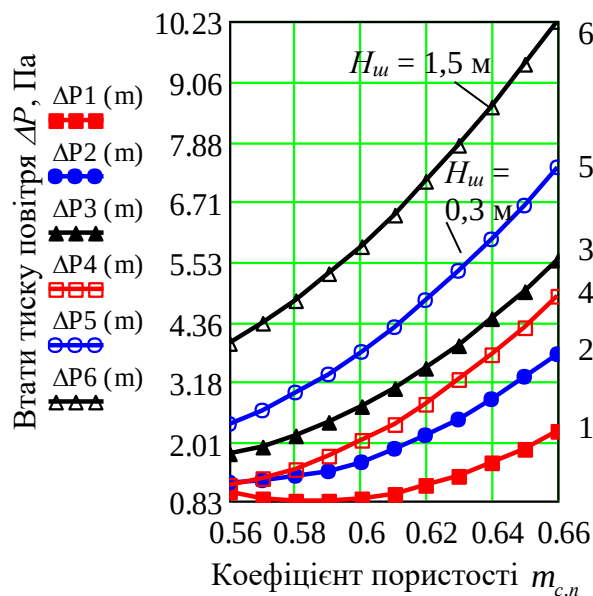


Рисунок 4.25 – Залежність функціональної зміни втрати тиску ΔP повітря під час сушіння насіннєвої маси люцерни як функція $\Delta P = f_{\Delta}(m_{c,n})$: 1, 4 – швидкість руху повітря $v_n = 0,2$ м/с; 2, 5 – швидкість руху повітря $v_n = 0,7$ м/с; 3, 6 – швидкість руху повітря $v_n = 1,2$ м/с

За монограмою визначають, або прогнозують числове значення зміни втрати тиску ΔP повітря в шарі насіннєвої маси люцерни – наприклад, за значення коефіцієнта пористості $m_{c.n} = 0,61$ (рис. 4.23, криві синього кольору) та значень висоти шару $H_{ш} = 0,9$ м та швидкості руху повітря $\mathcal{G}_n = 0,75$ м/с втрати тиску ΔP повітря в шарі дорівнюють, або будуть становити 3,0 Па.

Для перевірки адекватності розробленої аналітичної моделі (2.53), яка характеризує функціональну зміну опору повітря ΔP , яке продувається через шар насіннєвої маси люцерни побудовано графічну інтерпретацію, яку наведено на рис. 4.26.

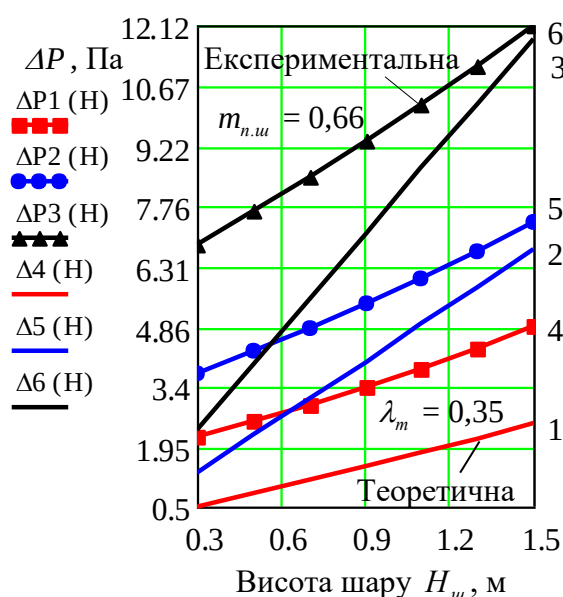


Рисунок 4.26 – Залежність функціональної зміни втрати тиску ΔP повітря під час сушіння насіннєвої маси люцерни як функція $\Delta P = f_{\Delta}(H_{ш})$: 1, 2, 3 – відповідно, швидкість руху повітря $\mathcal{G}_n = 0,2; 0,7; 1,2$ м/с

Встановлено, що розбіжність теоретичних значень втрати тиску ΔP повітря під час сушіння насіннєвої маси люцерни, які отримано згідно з залежності (2.53) та експериментальних значень, які описуються емпіричною моделлю (4.12) становить в середньому від 12% до 18%.

Таким чином можна констатувати, що розроблена аналітична модель (2.53), яка функціонально на теоретичному рівні описує зміну втрати тиску ΔP повітря під час сушіння насіннєвої маси люцерни є адекватною емпіричній моделі (4.12), яку отримано за результатами експериментальних досліджень.

4.2.3. Експериментальні дослідження швидкості сушіння насіннєвої маси люцерни

Експериментальні дослідження з визначення швидкості сушіння $\mathcal{G}_{1c}$ насіннєвої маси люцерни на першому етапі провели на основі реалізації планованих двофакторних експериментів [110] на трьох рівнях варіювання вхідними факторами з трикратною повторністю кожного експерименту.

Найменування вхідних факторів і рівнів їх варіювання та методику реалізації експериментів наведено, відповідно, в табл. 3.6 та п. 3.3 третього розділу дисертації.

За результатами реалізації експериментів згідно з нумерованим порядком рандомізованої план-матриці отримано експериментальний масив даних швидкості сушіння насіннєвої маси люцерни на першому етапі (додаток А 14.2).

Середні значення швидкості сушіння $\mathcal{G}_{1c}$ насіннєвої маси люцерни на першому етапі наведено у додатку А 15.2 та табл. 4.11.

За результатами статистичної обробки експериментального масиву даних швидкості сушіння $\mathcal{G}_{1c}$ насіннєвої маси люцерни на першому етапі, (додаток А 15.2, табл. 4.11) та аналізу отриманих статистичних показників (додаток А 16.2) встановлено, що найбільше значення коефіцієнта чисельної детермінації $D = 0,993$ за рівня його вірогідності $P = 0,985$ відповідає апроксимуючій математичній моделі повного полінома другої степені за рівня значимості 0,95, яку записано у вигляді:

$$M_n = b_0 + b_1 H_{1u} + b_2 \mathcal{G}_n + b_{12} H_{1u} \mathcal{G}_n + b_{11} H_{1u}^2 + b_{22} \mathcal{G}_n^2, \quad (4.13)$$

де b_0 – вільний член рівняння регресії; b_1 , b_2 , b_{12} , b_{11} , b_{22} – коефіцієнти рівняння регресії відповідних факторів і їх взаємодії.

Таблиця 4.11 – Результати експериментальних досліджень швидкості сушіння $\mathcal{G}_{1c}$ насіннєвої маси люцерни на першому етапі

№	Значення фактора		Середні значення швидкості сушіння $\mathcal{G}_{1c}$ насіннєвої маси люцерни на першому етапі, кг вол./ (кг абс. сух. реч./год)
	$H_{ш}$, м	$\mathcal{G}_n$, м/с	
1	0,3	0,2	0,7
2	0,3	0,7	1.4
3	0,3	1,2	2,3
4	0,9	0,2	0.2
5	0,9	0,7	0.4
6	0,9	1,2	0.6
7	1,5	0,2	0,1
8	1,5	0,7	0.2
9	1,5	1,2	0,4

Також визначено числові значення вільного члена b_0 та коефіцієнтів рівняння регресії (4.13) відповідних факторів і їх взаємодії b_1 , b_2 , b_{12} , b_{11} , b_{22} , які наведено у табл. 4.12.

Таблиця 4.12 – Натуральні значення коефіцієнтів рівняння регресії з визначення швидкості сушіння $\mathcal{G}_{1c}$ насіннєвої маси люцерни на першому етапі

Функціональна залежність	Натуральні значення коефіцієнтів					
	b_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}
$\mathcal{G}_{1c} = f_{\mathcal{G}}(H_{ш}; \mathcal{G}_n)$	1,03	-1,6	0,58	0,33	0,65	0,13

За результатами перевірки значимості розрахованих коефіцієнтів b_1 , b_2 , b_{12} , b_{11} , b_{22} (табл. 4.12) емпіричної моделі (4.13) за t -альфа критерієм Стюдента (t -альфа критерій = 2,3) встановлено, що всі коефіцієнти рівняння регресії є значущими (додаток А 16.2).

Після підтвердження адекватності емпіричної моделі (4.13) за F -критерієм Фішера, розрахункове значення якого дорівнює F -критерій = 6,78

(додаток А 16.2), отримано математичну модель (рівняння регресії) у натуральних факторах, яка описує функціональний характер зміни швидкості сушіння $\mathcal{Q}_{1c}$ насіннєвої маси люцерни на першому етапі:

$$\mathcal{Q}_{1c} = 1,03 - 1,6H_{uu} + 0,58\mathcal{Q}_n + 0,33H_{uu}\mathcal{Q}_n + 0,65H_{uu}^2 + 0,13\mathcal{Q}_n^2. \quad (4.14)$$

Згідно з рівнянням регресії (4.14) побудовано поверхню відгуку та її двомірний переріз, які характеризують поведінку функціональної зміни швидкості сушіння $\mathcal{Q}_{1c}$ насіннєвої маси люцерни на першому етапі залежно від меж зміни вхідних факторів: висоти шару $0,3 \leq H_{uu} \leq 1,5$ м; швидкості руху повітря, яке продувається через шар $0,2 \leq \mathcal{Q}_n \leq 1,2$ м/с, які наведено, відповідно, на рис. 4.27, 4.28.

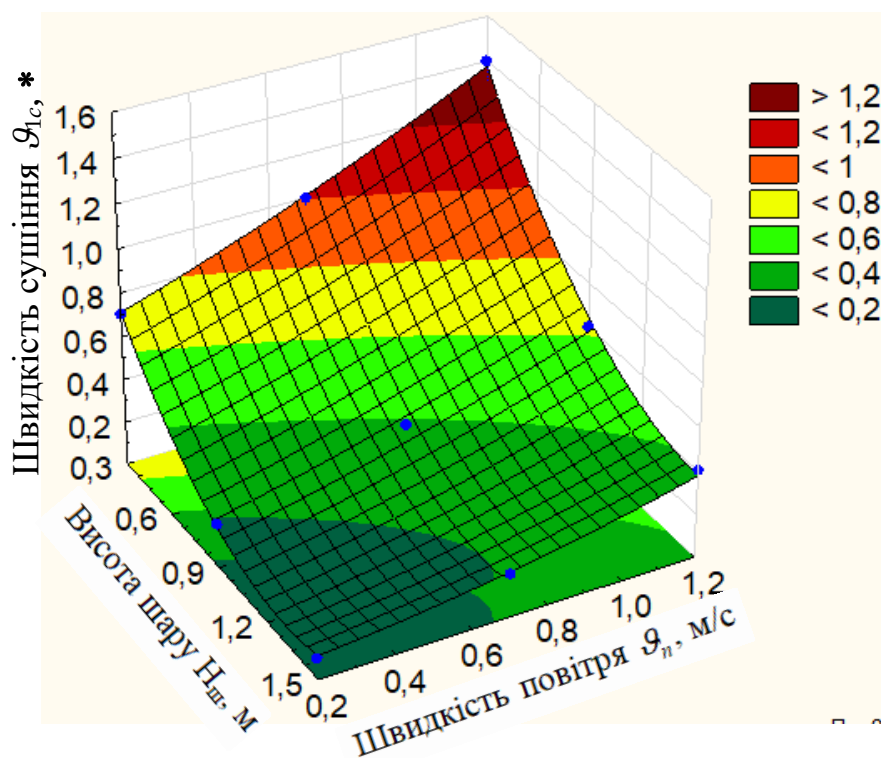


Рисунок 4.27 – Поверхня відгуку функціональної зміни швидкості сушіння $\mathcal{Q}_{1c}$ насіннєвої маси люцерни на першому етапі залежно від зміни висоти H_{uu} шару та швидкості повітря $\mathcal{Q}_n$ як функція $\mathcal{Q}_{1c} = f_g(H_{uu}; \mathcal{Q}_n)$, * – кг вол./кг абс. сух. реч./год

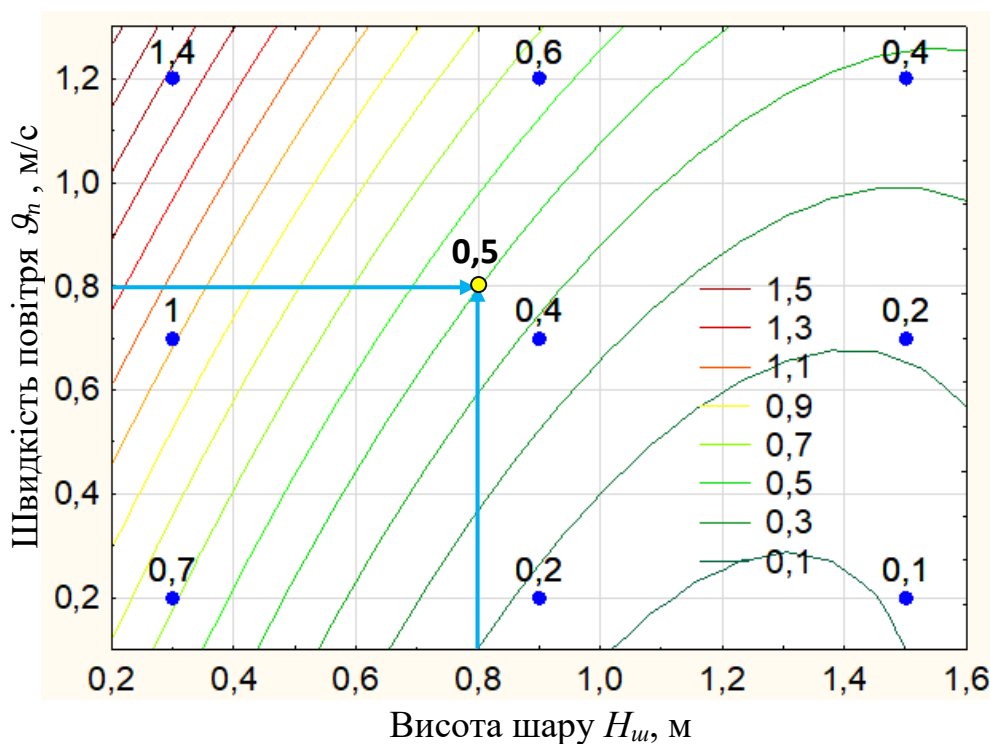


Рисунок 4.28 – Двомірний переріз поверхні відгуку функціональної зміни швидкості сушіння G_{1c} насіннєвої маси люцерни на пешому етапі залежно від зміни висоти H_u шару та швидкості повітря G_n як функція $G_{1c} = f_g(H_u; G_n)$

Встановлено, що в межах зміни вхідних факторів, висоти шару H_u насіннєвої маси люцерни від 0,3 до 1,5 м, швидкості руху повітря, яке продувається через шар від 0,2 до 1,2 м/с, швидкість сушіння G_{1c} насіннєвої маси люцерни на першому етапі знаходиться в межах 0,1...1,4 кг вол./кг абс. сух. реч./год), при цьому зі збільшенням обох факторів, або H_u та G_n зміна швидкості сушіння G_{1c} насіннєвої маси люцерни має різний характер – за збільшення H_u швидкість сушіння G_{1c} насіннєвої маси люцерни зменшується та зростає зі збільшенням швидкості руху G_n повітря, яке продувається через шар, рис. 4.27, 4.28, що також характерно рис. 4.29.

Визначальним фактором, який має домінуючий вплив на значну зміну параметра оптимізації, або G_{1c} є висота шару H_u насіннєвої маси люцерни.

Наприклад, зі збільшенням висота шару H_u від 0,3 до 1,5 м швидкість сушіння G_{1c} шару насіннєвої маси люцерни зменшується приблизно в 7 та 3,5 рази, відповідно, за швидкості руху G_n повітря 0,2 та 1,2 м/с.

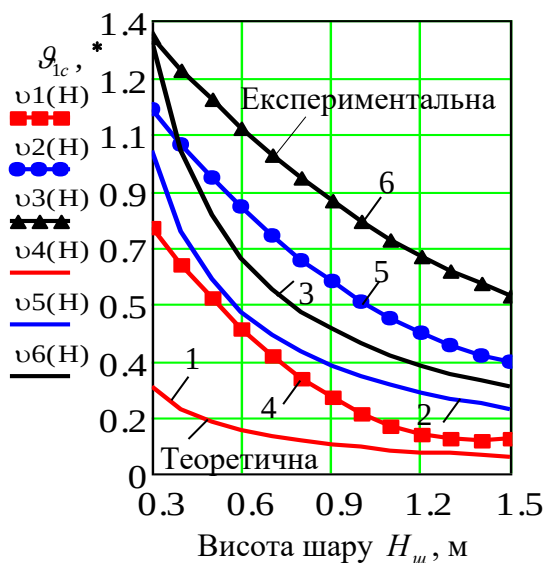


Рисунок 4.29 – Залежність функціональної зміни швидкості сушіння G_{1c} насінневої маси люцерни на пешому етапі залежно від зміни висоти H_u шару як функція $G_{1c} = f_g(H_u)$, * – кг вол./ (кг абс. сух. реч./год)

Збільшенням швидкості руху G_n повітря від 0,2 до 1,2 м/с призводить до збільшення середньої швидкості сушіння G_{1c} шару насінневої маси люцерни приблизно в 2 та 4 рази, відповідно, за висоти шару H_u 0,3 та 1,5 м.

За номограмою (рис. 4.29) визначають, або прогнозують числове значення зміни швидкості сушіння G_{1c} насінневої маси люцерни на пешому етапі – наприклад, за значення висоти шару $H_u = 0,8$ м та швидкості руху повітря $G_n = 0,8$ м/с швидкість сушіння G_{1c} насінневої маси люцерни на пешому етапі буде становити 0,5 кг вол./ (кг абс. сух. реч./год)

Розбіжність теоретичних значень швидкості сушіння G_{1c} насінневої маси люцерни на пешому етапі, які отримано згідно аналітичної моделі (2.26) та експериментальних значень швидкості сушіння G_{1c} насінневої маси люцерни на пешому етапі, які отримано згідно емпіричної моделі (4.14) знаходиться в межах 5...15%, рис. 4.30. Таким чином можна стверджувати, що аналітична модель (2.26) є адекватною емпіричній моделі (4.14) та на задовільному рівні описує функціональний характер зміни експериментальних значень швидкості сушіння G_{1c}

насіннєвої маси люцерни на пешому етапі.

4.3. Результати порівняльних досліджень процесу сушіння насіннєвої маси люцерни у виробничих умовах

Практика досушування насіннєвої маси люцерни на впроваджених сушильних установках призводить до значних витрат праці та коштів і не гарантує збереження якості насіння, при цьому втрати насіння люцерни під час збирання сягають 20-30 % урожаю [116].

Це спричинено не тільки незадовільною підготовкою й регулюванням комбайнів, розтягуванням строків збирання, а й недосконалістю застосовуваних технологій збирання [117].

Для визначення технологічної ефективності застосування розробленої сушильної установки проведено виробничі порівняльні дослідження технології збирання насінників люцерни зі збиранням усієї насіннєвої маси люцерни та подальшим її доопрацюванням на стаціонарі.

Порівняльні виробничі дослідження процесів досушування насіннєвої маси люцерни з застосуванням розробленої сушильної установки та базової сушильної установки Bulk Dryer провели у господарстві ФГ «Бухнівське» с. Бухни Вінницького району Вінницької області на посівах люцерни, додаток Б 4.1.

Методика проведення порівняльних досліджень процесу сушіння насіннєвої маси люцерни на стаціонарі розробленою сушильною установкою та базовою сушильною насипного типу наведена в п. 3.3 третього розділу дисертації.

Умови проведення порівняльних досліджень були однакові для обох сушильних установок – зразки насіннєвої маси люцерни однакової початкової вологості та фракційного складу одночасно завантажували у відповідні контейнери розробленої сушарки та контейнери сушарки Bulk Dryer.

Результати порівняльних досліджень розробленої сушильної установки та базової сушильної установки Bulk Dryer наведено в табл. 4. 13.

Таблиця 4.13 – Результати порівняльних досліджень розробленої сушильної установки та базової сушильної установки Bulk Dryer

Тип сушильної установки	Розроблена сушильна установка	Базова сушарка насипного типу Bulk Dryer
Урожайність насіння, ц/га	3,5	3,5
Додатковий збір насіння, ц/га	0,48	0,23
Вологовміст насіння, кг вол./кг абс. сух. реч.	0,95	1,5
Втрати насіння, %	12,1	19,3
Пошкодження насіння, %	7,8	13,9

На основі аналізу таблиці 4.11 встановлено, що:

- додатковий збір насіння з висушеної насінневої маси люцерни з застосуванням розробленої сушильної установки становить 0,48 ц/га, а з застосуванням базової сушильної установки – 0,23 ц/га, тобто валовий збір чистого насіння люцерни збільшується приблизно в 2,1 раза;

- вологовміст висушеного насіння люцерни з застосуванням розробленої сушильної установки становить 0,95 кг вол./кг абс. сух. реч., а з застосуванням базової сушильної установки – 1,5 кг вол./кг абс. сух. реч., тобто зменшується приблизно в 1,6 раза;

- втрати висушеного насіння люцерни з застосуванням розробленої сушильної установки становлять 12,1 %, а з застосуванням базової сушильної установки – 19,3 %, тобто зменшується приблизно в 1,6 раза;

- пошкодження висушеного насіння люцерни з застосуванням розробленої сушильної установки становить 7,8%, а з застосуванням базової сушильної установки – 13,9 %, тобто зменшується приблизно в 1,8 раза.

Таким чином отримані вищі показники процесу сушіння насінневої маси люцерни на стаціонарі, які отримано в процесі застосування розробленої сушильної установки порівняно з отриманими показниками базової сушильної установки підтверджують практичну доцільність її використання у виробничих умовах аграрних підприємств.

4.4. Висновки до розділу 4

4.4.1. Встановлено, що за відповідної зміни густини $\rho_{ш}$ шару в межах $140 \leq \rho_{ш} \leq 420 \text{ кг/м}^3$ та зміни вологості $W_{ш}$ шару насінневої маси люцерни в межах $0,2 \leq W_{ш} \leq 1,6 \text{ кг в./кг абс. сух. реч.}$, функціональні апроксимовані значення коефіцієнта пористості насінневої маси люцерни $m_{н.с}$ знаходяться в діапазоні від 0,09 до 0,78., причому за збільшення вологості коефіцієнт пористості при значенні густини шару 1,6, 0,9 і 0,2 кг/м^3 , зменшується, відповідно, в 1,9; 2,4 і 7,3 рази.

4.4.2. Встановлено, що за зміни часу нагрівання бобів $\tau_{н.б}$ в межах $10 \leq \tau_{н.б} \leq 30 \text{ хв}$ та зміни початкової вологості бобів $W_{б}$ люцерни в межах $30\% \leq W_{б} \leq 50\%$, апроксимовані значення гранично допустимої температури $t_{д.б}$ нагрівання бобів люцерни знаходяться в діапазоні від 49 до 57°C , а щільності бобів $\rho_{б}$ – від 940,1 до 1086,1 кг/м^3 .

4.4.3. На функціональну зміну щільності бобів $\rho_{б}$ люцерни більш вагомий вплив має зміна часу нагрівання $\tau_{н.б}$ – збільшення часу нагрівання $\tau_{н.б}$ в межах $10 \leq \tau_{н.б} \leq 30 \text{ хв}$ призводить до зменшення щільності бобів $\rho_{б}$ люцерни в середньому на 112 кг/м^3 , або в середньому на 10%.

4.4.4. Встановлено, що за відповідної зміни часу нагрівання насіння люцерни $\tau_{н.н}$ в межах $7 \leq \tau_{н.б} \leq 18 \text{ хв}$ та зміни початкової вологості насіння люцерни $W_{н.л}$ в межах $15\% \leq W_{б} \leq 45\%$ (табл. 3.3, 4.5), функціональні апроксимовані значення температури нагрівання $t_{н.л}$ насіння люцерни знаходяться в діапазоні від $16,0^{\circ}\text{C}$ до $53,8^{\circ}\text{C}$.

4.4.5. За зміни початкової вологості насіння $W_{н.л}$ люцерни в межах зміни фактора від 15% до 45% температури нагрівання $t_{н.л}$ насіння люцерни збільшується за часу нагрівання насіння люцерни $\tau_{н.б} = 4, 11, 18 \text{ хв}$, відповідно, 2,1 рази – від 16°C до $34,8^{\circ}\text{C}$; в 1,4 рази – від $35,4^{\circ}\text{C}$ до $49,8^{\circ}\text{C}$; в 1,2 рази – від $44,2^{\circ}\text{C}$ до $53,8^{\circ}\text{C}$.

4.4.6. Встановлено, що за відповідної зміни висоти $H_{ш}$ шару в межах 0,3

$\leq H_{ш} \leq 1,5$ м та зміни часу сушіння $\tau_{с.ш}$ шару насіннєвої маси люцерни в межах $2 \leq \tau_{с.ш} \leq 12$ год значення вологовмісту $W_{в.ш}$ в шарі насіннєвої маси люцерни знаходяться в діапазоні від 0,15 до 2,39 кг вол./кг абс. сух. реч.

4.4.7. На основі аналізу побудованих поверхонь відгуку та їх двовірних перерізів встановлено, що у межах зміни входних факторів, тобто висоти шару $0,3 \leq H_{ш} \leq 1,5$ м, швидкості повітря $0,2 \leq \mathcal{Q}_n \leq 1,2$ м/с, коефіцієнта пористості $0,56 \leq m_{n.c} \leq 0,66$ апроксимовані значення втрати тиску ΔP повітря під час сушіння насіннєвої маси люцерни змінюються в межах від 0,8 до 12,1 Па, а розбіжність теоретичних і експериментальних значень становить 12...18%.

4.4.8. Зі збільшенням висота шару $H_{ш}$ від 0,3 до 1,5 м швидкість сушіння $\mathcal{Q}_{1c}$ шару насіннєвої маси люцерни зменшується приблизно в 7 та 3,5 раза, відповідно, за швидкості руху $\mathcal{Q}_n$ повітря 0,2 та 1,2 м/с. За збільшення швидкості руху $\mathcal{Q}_n$ повітря від 0,2 до 1,2 м/с призводить до збільшення середньої швидкості сушіння сушіння $\mathcal{Q}_{1c}$ шару насіннєвої маси люцерни приблизно в 2 та 4 рази, відповідно, за висоти шару $H_{ш}$ 0,3 та 1,5 м. Розбіжність теоретичних і експериментальних значень становить 5...15%.

4.4.9. За результатами порівняльних досліджень встановлено, що додатковий збір насіння з висушеної насіннєвої маси люцерни з застосуванням розробленої сушильної установки становить 0,48 ц/га, а з застосуванням базової сушильної установки – 0,23 ц/га, тобто валовий збір чистого насіння люцерни збільшується приблизно в 2,1 раза.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях [65, 93, 94, 102].

1. 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/

2. 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). Р. 54-60. DOI: 10.15587/2706-5448.2024.318480.

3. Замрій М.А. Дослідження втрати тиску повітря в шарі насінневої маси люцерни : тези доп. XXVI Міжн. наук. конф. «Сучасні проблеми землеробської механіки». Київ, 17-18 жовтня 2025 р. С. 363–366.

4. Степаненко С.П., Котов Б.І., Рудь А.В., Замрій М.А. Теоретичні дослідження процесу руху зернового матеріалу на поверхні ступінчастого віброживильника. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. № 2 (105). С. 25–32. DOI: 10.37128/2306-8744-2022-2-3.

РОЗДІЛ 5

УЗАГАЛЬНЕНІ РЕЗУЛЬТАТИ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ РОБОТИ СУШИЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

5.1. Напрямки підвищення технологічної ефективності процесів сушіння насіннєвої маси люцерни

Однією з найважливіших технологічних операцій післязбирального доопрацювання насіннєвої маси люцерни є її сушіння, тому що волога насіннєва маса самозігрівається, що призводить до зниження якості насіння.

У зв'язку з цим, щоб зменшити втрати насіння, поліпшити його якість, необхідно забезпечити впровадження у виробництво науково обґрунтованої технології та режимних параметрів сушіння насіннєвої маси люцерни в процесі його первинного доопрацювання.

Використання науково обґрунтованих даних дасть змогу на стадії проектування сушильного устаткування задовольнити вимоги щодо його компактності та економічної доцільності, а у разі використання наявного сушильного устаткування обрати оптимальні та раціональні режими роботи, які забезпечують мінімальні енерговитрати процесу сушіння.

Дисертаційну роботу виконано на основі госпдоговірної науково-дослідної роботи «Дослідження конструктивно-режимних параметрів енергоефективного обладнання для сушіння сільськогосподарських матеріалів» (№ державної реєстрації 0122U201558), яка виконувалася в Вінницькому національному аграрному університеті згідно з державною програмою наукових робіт та експериментальних розробок молодих вчених «Програма діяльності КМУ «Україна-2020».

Довідка, яка підтверджує апробацію результатів наукових досліджень на Міжнародних та Всеукраїнських науково-практичних конференціях наведена в додатках Б.1.1 та Б.5.1. В повному обсязі робота доповідалася на міжкафедральному семінарі інженерно технологічного факультету ВНАУ.

За результатами досліджень рекомендовано такі основні параметри та режими сушіння насіннєвої маси люцерни на стаціонарі, які наведено у табл. 5.1.

Таблиця 5.1. Рекомендовані параметри параметри та режими сушіння насіннєвої маси люцерни

Найменування параметра	Значення параметрів
Густина шару матеріалу, кг/м ³	140...420
Висота шару, м	0,3...1,5
Час сушіння, год	2...12
Коефіцієнт пористості мареріалу	0,56...0,66
Швидкість подачі теплоносія, м/с	0,2...1,2

5.2 Впровадження результатів досліджень

Результати еспериментальних та теоретичних досліджень процесу сушіння насіннєвої маси люцерни впроваджено у навчальний процес у Вінницькому національному аграрному університеті при викладанні навчальної дисципліни «Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів» (Додаток Б 3.1).

Виробничі випробування були проведені на базі ФГ «Бухнівське» (ЄДРПОУ 03731253, Вінницька обл., Вінницький р.-н., с. Бухни, вул. Центральна, 6) (Додаток Б 4.1). Експериментальні дослідження процесу сушіння насіннєвої маси люцерни проведено з застосуванням сушильної установки з метою виявлення закономірностей, які визначають функціональний характер зміни основних показників, які регламентують даний процес.

Експериментальні дослідження з визначення вологовмісту $W_{в.ш}$ (кг вол./кг абс. сух. реч.) в шарі насіннєвої маси люцерни провели на основі реалізації планованих двофакторних експериментів на трьох рівнях варіювання вхідними факторами з трикратною повторністю кожного експерименту.

На основі проведеного аналізу встановлено, що за зміни висоти шару насіннєвої маси люцерни в межах 0,3–1,5 м та тривалості сушіння в межах 2–12 год функціональні апроксимовані значення вологовмісту в шарі суміші знаходяться в діапазоні від 0,15 до 2,39 кг вол./кг абс. сух. реч.. Отримані значення відповідають розрахованим та підтверджують адекватність використаної моделі.

Аналіз окремого впливу факторів показав, що домінантним чинником, який визначає зміну вологовмісту, є тривалість сушіння. При збільшенні часу сушіння від 2 до 12 год спостерігається суттєве зменшення вологовмісту:

- при висоті шару 0,3 м – з 1,53 до 0,15 кг/кг (у 10 разів);
- при висоті шару 0,9 м – з 1,86 до 0,26 кг/кг (у 7 разів);
- при висоті шару 1,5 м – з 2,39 до 0,61 кг/кг (у 4 рази).

У той же час збільшення висоти шару суміші від 0,3 до 1,5 м за сталого часу сушіння призводить до зростання вологовмісту. Зокрема:

- при тривалості сушіння 12 год показник підвищується з 0,15 до 0,71 кг/кг (у 4,7 рази);
- при тривалості сушіння 7 год – з 0,65 до 1,41 кг/кг (у 2,2 рази);
- при тривалості сушіння 2 год – з 1,45 до 2,39 кг/кг (у 1,7 рази).

Встановлено, що інтенсивність просушування нижніх шарів (0,3–0,9 м) є меншою, ніж у верхніх шарах (0,9–1,5 м). Наприклад, за часу сушіння 2 год при зменшенні висоти шару від 0,9 до 0,3 м вологовміст зменшується на 0,22 кг/кг, тоді як при зменшенні висоти шару від 1,5 до 0,9 м – на 0,34 кг/кг. Аналогічні закономірності підтверджуються й за часу сушіння 7 та 12 год, коли різниця зменшення вологовмісту між нижніми та верхніми шарами є ще більш відчутною.

Отримані результати дозволяють прогнозувати значення вологовмісту за будь-якого поєднання висоти шару та часу сушіння. Так, наприклад, при висоті шару 0,8 м та часу сушіння 7 год показник становить 1,07 кг вол./кг абс. сух. реч.

Таким чином, для насіннєвої маси люцерни, доцільним є застосування процесу сушіння в нерухомому шарі з використанням сушарок підлогового типу або установок активного вентилявання.

Впровадження результатів досліджень та методики розрахунку основних конструктивно-технологічних параметрів обладнання для сушіння дало змогу оптимізувати процес обробки насіннєвої маси люцерни. Це забезпечило зниження енергетичних витрат, зменшення нерівномірності сушіння та підвищення якості насіння. Розроблена конструкція обладнання та визначені режими його роботи підтвердили свою конкурентоспроможність і придатність до використання у виробничих умовах, зокрема у технологіях вирощування та переробки насіння багаторічних трав.

Таким чином, результати досліджень впроваджені у виробничий процес ФГ «Бухнівське», що підтверджує ефективність розроблених науково-практичних підходів.

Підприємство ТОВ «Агромаш-Калина» (ЄДРПОУ 32320510, Україна, 22400, Вінницька обл., Хмільницький р.-н., м. Калинівка, вул. Незалежності, 46) отримало конструкторську і технологічну документацію на виготовлення дослідних зразків сушильного обладнання для виробничих випробувань і серійного виробництва (Додаток Б 2.1).

5.3. Показники економічної ефективності використання розробленої сушильної установки

Проведемо порівняння економічних характеристик розробленої та базової сушарки за показником питомих експлуатаційних витрат (П), грн/т. Розрахунки виконуватимемо для умов роботи в одну зміну. Вихідні дані для розрахунку наведено в таблиці 5.2 [118, 119].

Вихідні дані для розрахунку

Показники	Сушарка	
	Базова	Розроблена
Маса завантаження, кг	15	20
Тривалість змін, год.	24	24
Кількість періодів за добу	1,5	2
Тривалість сушіння, год	18	12
Технологічна потужність, кВт.	4,2	2,56
Термін служби, років	10	10
Коефіцієнт амортизаційних відрахувань	0,1	0,1
Коефіцієнт відрахувань на ТО і ремонт	0,08	0,08
Балансова вартість, грн	38500	
Капітальні вкладення, грн		25000

Переваги експериментальної сушарки перед базовою:

- зменшення енерговитрат шляхом зниження технологічної потужності (2,56 кВт проти 4,2 кВт), що свідчить про меншу питому енергоємність процесу сушіння;
- скорочення тривалості сушіння з 18 до 12 год, що забезпечує підвищення продуктивності робочого циклу.

Питомі експлуатаційні витрати [120]:

$$\Pi = \Pi_z + \Pi_e + \Pi_a + \Pi_m, \text{ грн/кг}, \quad (5.1)$$

де Π_z – питомі експлуатаційні витрати на виплату заробітної плати, грн/кг;

Π_e – питомі витрати на електроенергію, грн/кг;

Π_a – питомі амортизаційні відрахування, грн/кг;

Π_m – питомі витрати на ремонт і технічне обслуговування обладнання, грн/т.

Питомі експлуатаційні витрати на виплату заробітної плати:

$$\Pi_z = \frac{n \cdot f \cdot \delta}{q}, \text{ грн/кг}, \quad (5.2)$$

де n – чисельність обслуговуючого персоналу;

f – годинна тарифна ставка одного працівника, грн./год. Мінімальна заробітна плата, з початку 2025 року, складає у місячному розмірі – 8000 грн

[120], у погодинному розмірі – 48 гривень, тому приймаємо $f = 48$ грн/год;

$\delta = 1,22$ – коефіцієнт нарахування на заробітну плату;

Q – продуктивність сушарки, кг/період (табл. 5.2).

За формулою (5.2) знаходимо питомі експлуатаційні на виплату заробітної плати для базової сушарки:

$$П_{з.б} = \frac{1 \cdot 48 \cdot 1,22}{15} = 3,904 \text{ грн/кг},$$

для розробленої сушарки

$$П_{з.б} = \frac{1 \cdot 48 \cdot 1,22}{0,8} = 2,928 \text{ грн/т.}$$

Питомі витрати на електроенергію визначаємо за формулою

$$П_e = \frac{N \cdot c_e}{Q}, \text{ грн/т}, \quad (5.3)$$

де N – потужність сушарки, кВт.

$c_e = 7,98$ грн/кВт·год – вартість електроенергії для II класу для малих побутових споживачів, без ПДВ [122].

За формулою (5.3) знаходимо питомі витрати на електроенергію для базової сушарки:

$$П_{е.б} = \frac{4,2 \cdot 7,98}{15} = 2,23 \text{ грн/кг},$$

для розробленої сушарки

$$П_{е.р} = \frac{2,56 \cdot 7,98}{20} = 1,02 \text{ грн/кг.}$$

Питомі амортизаційні відрахування визначаємо за формулою

$$П_a = \frac{\alpha \cdot B \cdot K}{Q}, \text{ грн/т}, \quad (5.4)$$

де B – балансова вартість сушарки, грн;

α – нормований коефіцієнт відрахувань, %;

K – коефіцієнт використання засобів механізації, розраховується за формулою:

$$K = \frac{t_{\text{фак}}}{t_{\text{фак}} \cdot 365} \quad (5.5)$$

де $t_{\text{фак}}$, $t_{\text{пл}}$ – відповідно річне та планове фактичне навантаження машини;

Приведемо коефіцієнт використання засобів механізації до однієї години при однозмінному режимі роботи протягом сезону:

$$K = \frac{1}{8 \cdot 90} = 0,00139.$$

За формулою (5.4) визначаємо питомі амортизаційні відрахування для базової сушарки:

$$\Pi_{\text{а.б}} = \frac{0,1 \cdot 38500 \cdot 0,00139}{15} = 0,36 \text{ грн/кг},$$

для розробленої сушарки

$$\Pi_{\text{а.р}} = \frac{0,1 \cdot 25000 \cdot 0,00139}{20} = 0,17 \text{ грн/кг}.$$

Питомі витрати на ремонт і технічне обслуговування обладнання визначаються за формулою:

$$\Pi_m = \frac{\beta \cdot B \cdot K}{Q}, \text{ грн/т}, \quad (5.6)$$

де β – нормований коефіцієнт відрахувань на ремонт, %.

Тоді, за формулою (5.6) визначаємо питомі витрати на ремонт і технічне обслуговування для базової сушарки:

$$\Pi_{\text{т.б}} = \frac{0,08 \cdot 38500 \cdot 0,00139}{15} = 0,285 \text{ грн/кг},$$

для розробленої сушарки

$$\Pi_{\text{т.р}} = \frac{0,08 \cdot 25000 \cdot 0,00139}{20} = 0,139 \text{ грн/кг}.$$

За формулою (5.1) визначаємо загальні питомі експлуатаційні витрати для базової сушарки:

$$\Pi_{\text{б}} = 3,904 + 2,23 + 0,36 + 0,285 = 6,78 \text{ грн/кг},$$

для розробленої сушарки

$$\Pi_p = 2,98 + 1,02 + 0,17 + 0,139 = 4,31 \text{ грн/кг},$$

Економія питомих експлуатаційних витрат при впровадженні розробленої сушарки:

$$E_E = \Pi_\epsilon - \Pi_p = 6,78 - 4,31 = 2,46 \text{ грн/кг}, \quad (5.7)$$

Термін окупності розробленої сушарки при її впровадженні:

$$T = \frac{B_\epsilon}{P \cdot E_E}, \text{ років} \quad (5.8)$$

де P – річний об'єм робіт, т.

Визначаємо річний об'єм робіт розробленої сушарки при різному ступені завантаження:

$$P = \frac{Q \cdot k_{вз} \cdot t_{зм} \cdot i_{зав}}{100}, \text{ т} \quad (5.9)$$

де $k_{вз}$ – коефіцієнт використання часу зміни, $k_{вз} = 2$;

$i_{зав}$ – ступінь завантаження сушарки, %.

Тоді, при завантаженні змішувача на 100%

$$P = \frac{20 \cdot 2 \cdot 12 \cdot 90 \cdot 100}{100} = 43200 \text{ кг}$$

$$T = \frac{25000}{43200 \cdot 2,46} = 0,24 \text{ роки}$$

Здійснена техніко-економічна оцінка експериментальної сушарки засвідчила його перевагу над базовою моделлю за рівнем експлуатаційних витрат, що досягнуто завдяки зниженню енергоємності процесу сушіння. За розрахунками термін окупності капіталовкладень – 0,24 роки, або 1 сезон.

5.4. Висновки до розділу 5

5.4.1. Підвищення технологічної ефективності процесів сушіння насіннєвої маси люцерни досягається шляхом подальшого вдосконалення технології сушіння, конструкції сушильного обладнання та більш поглибленого теоретично-експериментального аналізу процесу.

5.4.2. Запропоновані рекомендації виробництву для вибору раціональних параметрів і режимів роботи сушильного обладнання.

5.4.3. Розраховані показники економічної ефективності підтверджують доцільність використання розробленої сушильної установки в виробничих умовах – економічний ефект на 1 кг висушеної насіннєвої маси становить 2,46 грн/кг.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено нове наукове завдання підвищення ефективності процесу сушіння насіннєвої маси люцерни шляхом обґрунтування параметрів та режимів роботи сушильної установки.

1. За результатами аналізу існуючих технологій та обладнання для сушіння насіннєвої маси люцерни розроблено принципову схему сушильної установки, особливостями якої є формування сушильного агенту з керованими температурно-вологісними параметрами, можливість регулювання товщини шару матеріалу та реалізація інверсійної схеми сушіння, що забезпечує стабільні умови тепло- і масообміну та підвищує ефективність процесу.

2. Встановлено, що швидкість сушіння насіннєвої маси люцерни на першому етапі знаходиться в межах:

- за результатами теоретичного аналізу від 0,06 до 1,05 кг вол./кг абс. сух. реч./год) за зміни питомої витрати повітря від $5,0 \cdot 10^{-2}$ до $25,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ та сушильного потенціалу повітря від $2,0 \cdot 10^{-3}$ до $10,0 \cdot 10^{-3} \text{ кг вол./кг абс. сух. пов.}$;

- за результатами теоретично-експериментального аналізу від 0,1 до 1,3 кг вол./кг абс. сух. реч./год) за зміни швидкості руху повітряного потоку від 0,2 до 1,2 м/с та висоти шару від 0,3 до 1,5 м. Розбіжність теоретичних і експериментальних значень становить 5...15%.

3. Зі збільшенням висота шару від 0,3 до 1,5 м швидкість сушіння насіннєвої маси люцерни зменшується приблизно в 7 та 3,5 рази за швидкості руху повітря 0,2 та 1,2 м/с, а збільшення швидкості руху повітря від 0,2 до 1,2 м/с призводить до збільшення швидкості сушіння приблизно в 2 та 4 рази за висоти шару 0,3 та 1,5 м.

4. За результатами теоретично-експериментального аналізу встановлено, що середні значення втрати тиску повітря, яке продувається через шар насіннєвої маси люцерни знаходяться в межах від 0,1 до 11,0 Па залежно від зміни висоти шару від 0,3 до 1,5 м, швидкості руху повітряного потоку від 0,2 до 1,3 м/с та коефіцієнта пористості шару від 0,56 до 0,66.

Розбіжність теоретичних і експериментальних значень становить 12...18%.

5. Обґрунтовано основні фізико-механічні характеристики насіннєвої маси люцерни, при цьому:

- гранично допустима температури нагрівання бобів люцерни знаходяться в діапазоні від 49 до 57⁰С, а щільність бобів – від 940,1 до 1086,1 кг/м³ за зміни часу нагрівання від 10 до 30 хв та зміни початкової вологості бобів люцерни в межах від 30% до 50%, при чому збільшення часу нагрівання від 10 до 30 хв призводить до зменшення щільності бобів люцерни в середньому на 112 кг/м³, або в середньому на 10%.

- коефіцієнт пористості насіннєвої маси люцерни знаходяться в діапазоні від 0,09 до 0,78 за зміни густини шару від 140 до 420 кг/м³ та вологості шару від 0,2 до 1,6 кг вол./кг абс. сух. реч., при чому за значення густини шару 1,6, 0,9 і 0,2 кг/м³ коефіцієнт пористості зменшується, відповідно, в 1,9; 2,4 і 7,3 раза.

- температура нагрівання насіння люцерни знаходяться в діапазоні від 16,0⁰С до 53,8⁰С за зміни часу нагрівання насіння від 7 до 18 хв та початкової вологості насіння від 15% до 45%, при чому температура нагрівання насіння збільшується 2,1 раза – від 16⁰С до 34,8⁰С; в 1,4 раза – від 35,4⁰С до 49,8⁰С; в 1,2 раза – від 44,2⁰С до 53,8⁰С за часу нагрівання насіння люцерни рівного 4, 11, 18 хв, відповідно.

6. Встановлено, що за відповідної зміни висоти шару від 0,3 до 1,5 м та зміни часу сушіння шару насіннєвої маси люцерни від 2 до 12 год значення вологовмісту в шарі насіннєвої маси люцерни знаходяться в діапазоні від 0,15 до 2,39 кг вол./кг абс. сух. реч.

7. За результатами порівняльних досліджень встановлено, що за рахунок зменшення втрат в процесі підготовки насіння до довготривалого зберігання, можливо додатково зібрати до 0,48 ц/га насіння.

8. Економічний ефект від впровадження розробленої сушильної установки у виробничих умовах становить 2,46 грн/кг на 1 кг висушеної насіннєвої маси.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Антонів С.Ф., Рудницький Б.О. Особливості технології вирощування насіння нових та перспективних сортів бобових трав в умовах лісостепу України. *Сільське господарство та лісівництво*. 2017. №7 (49). С. 70–76.
2. Анеляк М.М. Дослідження процесу витирання і сепарації насіння люцерни комбайном «ДОН-1500», обладнаного пристроєм для збирання насінників трав. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2005. № 35. С. 236–239.
3. Анеляк М.М., Кузьмич А.Я., Твердохліб І.В. Обґрунтування режимів роботи молотарки зернозбирального комбайна на насіння багаторічних трав. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки*. 2012. № 10 Т. 2 (59). С. 40–43.
4. Твердохліб І.В., Кузьмич А.Я., Анеляк М.М. Зменшення втрат насіння багаторічних бобових трав при його збиранні. *Сучасні проблеми землеробської механіки* : мат. XIII міжн.-наук. конф. (м. Вінниця, 17-19 жовтня 2012 р.). ВНАУ. С. 46–47.
5. Твердохліб І., Яропуд В., Солоня О., Полєвода Ю., Бабин І. Розробка рекомендацій щодо оптимізації технологічних процесів переробки та використання тепломасообмінного обладнання для сушіння бобових трав. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки*. 2024. Т. 331. № 1. С. 140–144. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-331-23.
6. Дідух В.Ф. Підвищення ефективності сушіння сільськогосподарських матеріалів : монографія. Луцьк: ЛДТУ, 2022. 165 с.
7. Бурдейний В.С., Докуніхін В.В. Обґрунтування роботи сушарок для сушіння пивоварного ячменю та інших сільськогосподарських культур із змінним режимом сушіння агента при різних температурах. *Вісник ДААУ*. 2011. № 1. С. 89–94.
8. Зиков О., Орлова С., Овсяникова Л. Енергоефективні методи термічної обробки зерна. *Аграрний вісник Причорномор'я*. 2019. № 2 (94). С.176–182.
9. Анеляк М.М., Спірін А.В., Кузьмич А.Я., Кустов С.О., Твердохліб І.В.

Основні підходи до обґрунтування технологічних рішень процесу обмолоту, витирання та сепарації насіння бобових трав. *Промислова гідравліка та пневматика*. 2012. № 2 (36). С. 15–18.

10. Slipchenko M., Polievoda Y., Zamrii M., Symonik B. Study of grain flow in a cylindrical vibrating sieve. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2024. № 3 (114). С. 27–33. DOI: 10.37128/2306-8744-2024-3-4.

11. Спірін А.В., Твердохліб І.В. Системний підхід до дослідження технологій збирання насінників люцерни. *Молодь і технічний прогрес в АПК : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*. (м. Вінниця, 04 жовтня 2019 р.). Вінниця, 2019. С. 226–227.

12. Анеляк М.М., Кузьмич А.Я., Кустов С.О., Твердохліб І.В. Дослідження процесу витирання насіння багаторічних бобових трав дисковим терковим пристроєм. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2013. № 97. Т. 1. С. 468–475.

13. Борисюк Д.В., Спірін А.В., Присяжнюк Д.В., Твердохліб І.В. Дослідження процесу віброозонового сушіння зерна та енергетичних параметрів установки для його реалізації. *Наукові праці ВНТУ*. 2023. № 2. С. 56–71. DOI: 10.31649/2307-5376-2023-2-56-71.

14. Бурдо О. Г. Еволюція сушильних установок : монографія. Одеса: «Поліграф», 2010. 368 с.

15. Спірін А.В., Твердохліб І.В. Результати експериментальних досліджень витирання насіння дисково-терковим пристроєм. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2015. № 3 (92). С. 28–36.

16. Зозуляк І.А., Кондратюк Д.Г., Коробко Д.О. Обґрунтування вибору принципової схеми сублімаційного СВЧ-сушіння харчових продуктів. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2024. № 4 (115). С. 60–69. DOI: 10.37128/2306-8744-2024-4-8.

17. Спірін А., Грицун А., Флеш Р. Сушарка для зерна. *Техніка АПК*. 1998. №2. С.19–20.

18. Адамчук В.В., Булгаков В.М., Горобей В.П. Актуальні аспекти

розвитку механізації дослідних робіт в рослинництві. *Вісник аграрної науки*. 2016. № 10. С. 5–12.

19. Каленська С.М., Єрмакова Л.М., Паламарчук В.Д., Поліщук І.С., Поліщук М.П. Системи сучасних інтенсивних технологій у рослинництві : підручник. Вінниця : ФОП Рогальська І.О., 2015. 448 с.

20. Tokarchuk, O., Mytko, M., Burlaka, S., Zozulyak, I., Stadnik, M. Comparison of technological operations in processing alfalufur hay in terms of their impact on forage quality and quantity. *Technology Audit and Production Reserves*. 2025. 2/3 (82). P. 43–51. DOI: 10.15587/2706-5448.2025.326047.

21. Солон О.В., Твердохліб І. В., Котов Б. І., Панцир Ю.І. Використання робочого органу універсального вібратора для сушіння зернового матеріалу. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 2 (109). С. 122–134. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-2-14

22. Дубковецький І.В., Малезик І.Ф., Стрельченко Л.В., Євчук Я. В. Дослідження кінетики конвективно-терморадіаційного сушіння. *Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій*. 2015. № 47 (2). С. 18–22.

23. Жданов І.В. Аеродинаміка сушильної установки з відцентровим киплячим шаром матеріалу. *Обладнання та технології харчових виробництв*. 2013. №. 31. С. 46–54.

24. Солон О.В., Твердохліб І.В., Калініченко Р.А. Дослідження радіаційно-конвективної термообробки зерна у віброкиплячому шарі. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2017. № 2 (85). С. 95–98.

25. Алієв Е.Б., Яропуд В.М. Визначення фракційного складу насіння за фотозображенням. *Вібрації в техніці та технологіях* 2019. 3 (94). С. 102–109.

26. Сорочинський В. Зневоднення зерна за різних схем утилізації сушильного агента й охолоджуючого повітря може бути доволі ефективно. *Зерно і хліб*. 2011. № 3. С. 40–41.

27. Кондратюк Д.Г., Зозуляк І.А., Комаха В.П., Дмитренко В.П. Витрати потужності на плющення трави вальцовим плющильним апаратом.

Вібрації в техніці та технологіях. 2024. № 3 (114). С. 66–73.
DOI: 10.37128/2306-8744-2024-3-8.

28. Калетнік Г.М., Яропуд В.М., Полевода Ю.А., Солона О.В., Твердохліб І.В., Бабин І.А. Свідectво про реєстрацію авторського права на твір. Креслення з описом «Конструктивна схема конвеєрного тепломасообмінного обладнання». № 121571 від 05.12.2023; заяв. № с202305896 від 14.08.2023.

29. Borysiuk D., Ivanov Yu., Ognevyy V., Tverdokhlib I. Analysis of methods and means of drying of agricultural materials. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2025. № 2 (129). С. 54–62. DOI: 10.37128/2520-6168-2025-2-7.

30. Kaletnik H., Yaropud V., Kupchuk I., Aliiev E., Babyn I., Lavreniuk P. Modeling of the technological process of walnut drying in a convective dryer. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2023. Vol. 99, № 12. P. 91–97. DOI: 10.15199/48.2023.12.17.

31. Chen X.D. Moisture diffusivity in food and biological materials. *Drying Technology*. 2007. 25 (7). P. 1203–1213. DOI: 10.1080/07373930701541757.

32. Fantozzi G., Kinell M., Rabal Carrera S., Nilsson J., Kuesters Y. Experimental Study on Pressure Losses in Porous Materials. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2019, 141 (2): 021037. DOI: 10.1115/1.4040868.

33. Yaropud V., Lavreniuk P. Research on the influence of warm air flow on the drying kinetics of walnuts. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2025. № 1 (128). С. 27–36. DOI: 10.37128/2520-6168-2025-1-3.

34. Mujumdar A.S. Handbook of industrial drying (4th ed.). 2014. Boca Raton: CRC Press. 1348 p. DOI: 10.1201/b17208.

35. Murugan P., Dhanushkodi S., Sudhakar K., Wilson V.H. Industrial and small-scale biomass dryers: an overview. *Energy Engineering*. 2021. 118 (3). P. 435–446. DOI: 10.32604/EE.2021.013491.

36. Wang W. et al. Investigation of drying conditions on bioactive compounds, lipid oxidation, and enzyme activity of Oregon hazelnuts. *LWT - Food Science and Technology*. 2018. 90. P. 526–534. DOI: 10.1016/j.lwt.2018.01.002.

37. Kim E.H.J., Dong Chen X., Pearce D. On the mechanisms of surface formation and the surface compositions of industrial milk powders. *Drying Technol.*

2003. № 21 (2). P. 265–278.

38. Ochirov V.D., Altukhov I.V., Bykova S.M., Blokhnin M.A. Interaction analysis of the electrotechnological system «emitter-material» in the process of heating and drying of food plant raw materials. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2020. № 548 (6). 062006. DOI: 10.1088/1755-1315/548/6/062006.

39. 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.

40. Paziuk V.M., Liubin M.V., Yaropud V.M., Tokarchuk O.A., Tokarchuk D.M. Research on the rational regimes of wheat seeds drying. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2018. Vol. 56 (3). P. 39–48.

41. Prysiazniuk D. Determination of the dose of processing grain raw materials with ozone-air mixture during vibration drying. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2022. Т. 305, № 1. С. 224–227. DOI: 10.31891/2307-5732-2022-305-1-224-227.

42. Rucins A., Viesturs D., Kristins A., Bruveris J. Investigations in intensification of grain drying by active ventilation applying ozone. *Engineering for rural development. Jelgava*. 2020. P. 231–237. DOI: 10.22616/ERDev.2020.19.TF057.

43. 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. Vol. 98, № 5. P. 11–15. DOI: 10.15199/48.2022.05.02.

44. Tsurkan O., Prysiazniuk Y., Spirin A., Borysiuk D., Tverdokhlib I., Polievoda Y. Research of the process of vibroozone drying of grain. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2022. Vol. 98, № 12. P. 329–333. DOI: 10.15199/48.2022.12.76.

45. Zhang L., Wang Z., Shi G., Yang H., Wang X., Zhao H., Zhao S. Effects of drying methods on the nutritional aspects, flavor, and processing properties of Chinese chestnuts. *Journal of Food Science and Technology*. 2018. 55 (5). P. 1733–1742. DOI: 10.1007/s13197-018-3227-6.

46. 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

47. Кондратюк Д.Г., Луц П.М., Зозуляк І.А. Дослідження процесів активного вентилявання та сушіння сільськогосподарських культур для подальшого зберігання. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2025. № 4 (153). С.370–377. DOI: 10.32782/1995-0519.2025.4.44.

48. Лісецький В.О. Результати дослідження експериментальної бункер-сушарки. *Науковий вісник НАУ*. 2016. № 33. С. 120–126.

49. Снежкін Ю.Ф., Пазюк В.М., Петрова Ж.О., Чалаєв Д.М. Теплонасосна зерносушарка для насіннєвого зерна : монографія. Київ: видавництво ТОВ «Поліграф-Сервіс», 2012. 154 с.

50. Снежкін Ю.Ф., Шапар Р.О., Чалаєв Д.М., Шаврин В.С., Пазюк В.М. Інтенсифікація процесу сушіння насіннєвого зерна. *Промислова теплотехніка*. 2010. Т. 32. №5. С.42–47.

51. Цизь К.Є., Кірчук Р.В. Дослідження процесу та пошук шляхів інтенсифікації сушіння насіння сої. *Конструювання, експлуатація та виробництво с/г машин*. 2012. № 42. Ч. 2. С.75–78.

52. Цуркан О.В. Обґрунтування раціонального способу та обладнання для сушіння високовологого насіння баштанних культур. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2022. № 1 (305). С. 240–246. DOI: 10.31891/2307-5732-2022-305-1-240-246.

53. Швидя В.О., Анеляк М.М., Степаненко С.П. Експериментальне дослідження режисів сушіння насіння зернових культур із високою вологістю в середовищі низького тиску. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2018. № 8. С.89–96.

54. Chen C., Pan Z. Postharvest technology - recent advances, new perspectives and applications. IntechOpen, 2022. 268 p. DOI: 10.5772/intechopen.102623.

55. Kaletnik H., Adamchuk V., Bulgakov V., Kyurchev V., Nadykto V. Main problems in the field of agricultural mechanization in Ukraine. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2016. № 3. С. 6–12.

56. Kotov B.I., Spirin A.B., Tverdokhlib I.V., Polyevoda Y.A., Hryshchenko V.O., Kalinichenko R.A. Theoretical researches of cooling process regulariy of the grain material. *INMATEH- Agricultural Engineering*. 2018. Vol. 54, № 1. P. 87–94.

57. Котов Б.І. Калініченко Р.А., Спирін А.В. Моделювання режимів сушіння дисперсних матеріалів в безперевних сушарках колонкового типу. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2016. № 6. С. 69–75.

58. Solona O., Polievoda Y., Tverdokhlib I., Kuzemskyi V. Practical recommendations regarding operation of the complex of technical and technological supply of energy and resource-saving production of livestock products at the enterprises of the agricultural complex. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2024. № 2 (113). С.24–32 DOI: 10.37128/2306-8744-2024-2-3.

59. Spirin A., Polievoda Y., Tverdokhlib I. Increasing the reliability of agricultural machinery work. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: Технічні науки*. 2019. № 198. С 86–90.

60. Tsurkan O.V., Gerasimov O.O., Polyevoda Y.A., Tverdokhlib I.V., Rimar T.I., Stanislavchuk O.V. Kinetic features of vibrating and filtration dewatering of fresh-peeled pumpkin seeds. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2017. Vol. 52, No. 2, P. 69–76.

61. Tverdokhlib I.V., Spirin A.V. Theoretical studies on the working capacity of disk devices for grinding agricultural crop seeds. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2016. Vol. 48, № 1. P. 43–52.

62. 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. № 47. Ч. 1. С. 104-114.

63. Мазур В.А., Гончарук І.В., Дідур І.М., Панцирева Г.В., Телекало Н.В., Купчук І.М. Інноваційні аспекти технологій вирощування, зберігання і переробки зернобобових культур. Вінниця: Нілан-ЛТД. 180 с.

64. Ольшанський В. П., Сліпченко М. В., Твердохліб І.В., Купчук І. М. Коливання імпульсно навантаженого осцилятора з квадратичним опором у складі дисипативної сили. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 2 (101). С. 142–151. DOI: 10.37128/2306-8744-2021-2-4.

65. Степаненко С.П., Котов Б.І., Рудь А.В., Замрій М.А. Теоретичні дослідження процесу руху зернового матеріалу на поверхні ступінчастого віброживильника. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. № 2 (105). С. 25–32. DOI: 10.37128/2306-8744-2022-2-3.

66. Полєвода Ю. А., Волинець Є. О. Дослідження віброреологічних моделей шару сипкого середовища. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. № 1 (112). С. 1–10. DOI: 10.37128/2520-6168-2021-1-8.

67. Полєвода Ю.А., Рева В.Ю., Твердохліб І.В. Особливості процесу мікронізації зерна. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 1 (108). С. 94–100. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-1-10.

68. Поперечний А.М. Наукове обґрунтування впливу механічних коливань на інтенсифікацію процесів переробки харчової сировини : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.18.12. Харків, 2004. 47 с.

69. Рудницький Б.О., Спірін А.В., Мамалига В.С. Агроекологічні аспекти ведення насінництва кормових трав та головні напрями безпеки праці при цьому. *Збірник наукових праць ВНАУ*. 2011. № 9 (49). С. 186–196.

70. Ольшанський В.П., Сліпченко М.В., Спольнік О.І., Замрій М.А. Вільні коливання осцилятора за наявності квадратичного в'язкого опору та сухого тертя. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2020. № 2(97). С. 33–40. DOI: 10.37128/2306-8744-2020-2-4.

71. Ярошенко Л.В., Купчук І.М., Замрій М.А. Розробка конструкції та дослідження технологічних параметрів машин для вібраційного відцентрово-

планетарної обробки. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2020. № 2(97). С. 41–50. DOI: 10.37128/2306-8744-2020-2-5.

72. Komakha V., Tokarchuk O., Zamrii M. Investigation of the mechanical and technological properties of fodder crops to determine the parameters of the working bodies of mower conditioners and optimal modes of their operation. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2020. №1 (108). С. 14–21. DOI: 10.37128/2520-6168-2020-1-2.

73. Спірін А.В., Цуркан О.В., Твердохліб І.В., Омелянов О.М. Шляхи інтенсифікації виробництва насіння трав. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 4 (103). С. 110–120. DOI: 10.37128/2306-8744-2021-4-12.

74. Стаднік М.І. Оптимізація функціональної структури системи автоматизації однорідних об'єктів. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2016. № 3. С. 62–65.

75. Твердохліб І. В., Солона О.В., Полєвода Ю. А., Холодюк О.В. Технологія виробництва рослинної білково-вітамінної пасти. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 3 (110). С. 85–92 DOI: 10.37128/2306-8744-2023-3-10.

76. Твердохліб І.В. Динаміка руху частинки в сипкому зерновому середовищі. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2017. № 3 (86). С. 128–135.

77. Спірін А.В., Твердохліб І.В., Лановий М.М. Математична модель продуктивності машини для витирання насіння. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2016. № 3 (95). С. 67–75.

78. Яропуд В.М., Твердохліб І.В., Спірін А.В. Машини та обладнання і їх використання в рослинництві: навч. посіб. Вінниця: ВНАУ, 2020. 401 с.

79. 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.

80. Jin Y., Chen X.D. Numerical study of the drying process of different sized particles in an industrial-scale spray dryer. *Drying Technol.* 2009. 27 (3). P. 371–381.

81. Sahnia E.K., Chaudhuri B. Contact drying: A review of experimental and mechanistic modeling approaches. *International Journal of Pharmaceutics*. 2012. 434 (1–2). P. 334–348. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2012.06.010.

82. Paziuk V.M., Petrova Zh.O., Tokarchuk O.A., Yaropud V.M. Research of rational modes of drying rape seed. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 58 (2). P. 303–310.

83. Paziuk V.M., Petrova Zh.O., Tokarchuk O.A., Yaropud V.M. Research of rational modes of drying rape seed. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 58 (2). P. 303–310. DOI: 10.35633/inmateh-58-33.

84. Калетнік Г.М., Яропуд В.М., Полевода 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.

85. Кірчук Р.В., Забродська Л.Ю., Копець К.Є. Вплив масообмінних факторів на кінетику сушіння зерен бобових культур. *Сільськогосподарські машини*. 2021. №46. С. 30–39. DOI: 0.36910/acm.vi46.500.

86. Aghbashlo M., Kianmehr M.H., Arabhosseini A. Energy and exergy analyses of thin-layer drying of potato slices in a semi-industrial continuous band dryer. *Drying Technology* 2008. № 26. P. 1501–1508.

87. Замрій М.А. Визначення швидкості сушіння поживної суміші люцерни в нерухомому шарі. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2025. № 2(117). С. 46–50. DOI: 10.37128/2306-8744-2025-2-5.

88. Kavak Akpınar E., Midilli A., Bicer Y. Energy and exergy of potato drying process via cyclone type dryer. *Energy Conversion and Management*. 2005. № 46. P. 2530–2552.

89. Котов Б.І., Лісецький В.О. Аналіз впливу режимів сушіння на енергетичні характеристики зерносушарок. *Вісник ХДТУСГ*. 2001. Т.1. № 8. С. 166–170.

90. Замрій М.А., Солоня О.В., Волинець Є.О. Свідectwo про реєстрацію авторського права на твір. Ескізне креслення «Принципова схема пристрою для

сушіння поживної суміші люцерни». Свідоцтво № 141367 від 02.12.2025; заяв. № с202508622 від 07.10.2025.

91. Пазюк В.М. Теплонасосні сушильні установки в процесах сушіння зерна. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2016. №. 2. С. 53–57.

92. Бандура В.М., Фіалковська Л.В., Пахомська О.В. Технологія сушіння зернових культур та олійного насіння. *Наук. Вісник Таврійського держ. Агротехнологічного університету*. 2022. Том 12. №2. 25. DOI: 10.31388/2220-8674-2022-2-25.

93. Замрій М.А. Дослідження втрати тиску повітря в шарі насінневої маси люцерни : тези доп. XXVI Міжн. наук. конф. «Сучасні проблеми землеробської механіки». Київ, 17-18 жовтня 2025 р. С. 363–366.

94. 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.

95. Котов Б.І., Калініченко Р.А., Кіфяк В.В. Моделювання нагріву та охолодження зернопродуктів в режимі пневмотранспортера. *Інженерія природокористування*. 2015. № 1 (3). С. 40–43.

96. Калетнік Г.М., Черниш О.М., Березовий М.Г. Використання сучасних методів механіки для сільського господарства. *Збірник наукових праць ВНАУ*. 2011. Т.1 (65). С.8–18.

97. Панасюк С.Г., Лисик О.В. Дослідження впливу температури та методів попередньої обробки сировини на процес сушіння. *Сільськогосподарські машини*. 2014. № 27. С. 85–89.

98. Zozulyak I. Simulation of the process of vibrating sunflower drying. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. № 3 (122). С. 14–21. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-3-2.

99. Цуркан О.В., Спирін А.В., Твердохліб І. В. Визначення теплофізичних характеристик об'єктів вібраційного сушіння. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 3 (102). С. 100–108. DOI: 10.37128/2306-8744-2021-3-11.

100. Пазюк О.Д. Паламарчук І.П. Вібраційні зерносушарки як спосіб інтенсифікації та підвищення економічності процесу сушіння зерна. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2010. № 4 (60). С.115–122.

101. Aliev E.B., Bandura V.M., Pryshliak V.M., Yaropud V.M., Trukhanska O.O. Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2018. Vol. 54, No 1. P. 95–104.

102. 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.

103. Соломка О.В. Обґрунтування технологічного процесу збирання насіння люцерни методом обчислювання : монографія. Київ: НУБІП України. 2017. 147 с.

104. 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. № 4 (153). С.347–352. DOI: 10.32782/1995-0519.2025.4.40.

105. Котов Б.І., Калініченко Р.А., Степаненко С.П., Швидя В.О., Лісецький В.О. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (сепарація, сушіння, активне вентильовання, охолодження) : монографія. Ніжин: ПП Лисенко М.М., 2017. 552 с.

106. Степаненко С.П., Котов Б.І., Волик Д.А., Замрій М.А. Математичне моделювання процесу переміщення зернового матеріалу на поверхні безпровального решета вібропневмоімпульсного сепаратора. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 3 (110). С. 22–34. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-3-3.

107. Солоня О.В., Замрій М.А. Дослідження оптимальної конструкції обладнання для сушіння пожнивної суміші насінників трав. *Інформаційне*

суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення : матеріали Міжн. наук. інтернет-конф. (м. Тернопіль, 6-7 лютого 2023 р.). Тернопіль, 2023. С. 186-190.

108. Солон 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

109. Замрій М.А. Визначення швидкості сушіння насінневої маси люцерни в нерухомому шарі. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2025. № 2(117). С. 46–50. DOI: 10.37128/2306-8744-2025-2-5.

110. Замрій М.А., Солон О.В. Обґрунтування параметрів сушильної установки для насінневої маси люцерни. *Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва* : тези доп. IV Всеукр.ї наук.-практ. конф. молодих вчених (м. Дніпро, 21 листопада 2025 р.). Дніпро, ДДАЕУ. 2025. С. 132–135.

111. Твердохліб І.В., Спірін А.В. Рівноважний вологовміст продуктів переробки люцерни. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2020. № 1 (96). С. 118–124. DOI: 10.37128/2306-8744-2020-1-13.

112. Калініченко Р.А., Войтюк В.Д. Математичне моделювання тепломасообмінних процесів високотемпературної термообробки зернових матеріалів. *Техніка та енергетика*. 2017. № 275. С. 59–65.

113. Твердохліб І.В. Підвищення ефективності збирання насінників трав. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2017. № 2 (6). С. 158–163.

114. Твердохліб І.В. Обґрунтування технології та конструктивно-режимних параметрів терково-сепаруючого блоку для обробки вороху трав : дис. ... кандидата техн. наук : 05.05.11. Вінниця: ВНАУ, 2016. 170 с.

115. Тимченко А.А. Основи системного проектування та системного аналізу складних об'єктів: підручник для студентів вищих закладів освіти. Київ. Либідь, 2020. 270 с.

116. Тимченко А.А. Основи системного підходу та системного аналізу об'єктів нової техніки: навч. посіб. Київ: Либідь, 2004. 288 с.

117. Задачин В.М., Конюшенко І.Г. Чисельні методи: навчальний посібник. Харків: ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2014. 180 с.

118. Мирончук В.Г. та ін. Розрахунки обладнання підприємств переробної і харчової промисловості. Вінниця: Нова книга, 2004. 288 с.

119. ДСТУ 4397:2005. Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування. [Чинний від 2006-01-01]. Київ, 2005. 16 с. (Державний стандарт України).

120. Погодинна оплата праці: що враховувати в 2025 році : веб-сайт. URL: <https://7eminar.ua/news/3029-pogodinna-oplata-praci-shho-vraxovuvati-v-2025-roci> (дата звернення: 25.02.2025).

121. Енера. Тарифи на послуги постачальника універсальних послуг ПУП : веб-сайт. URL: <https://vin.enera.ua/el/tariff> (дата звернення: 14.02.2025).

122. Гевко Р.Б. та ін. Техніко-економічне обґрунтування застосування машин, обладнання і технологій : навч. посіб. Тернопіль. 2002. 164 с.

ДОДАТКИ

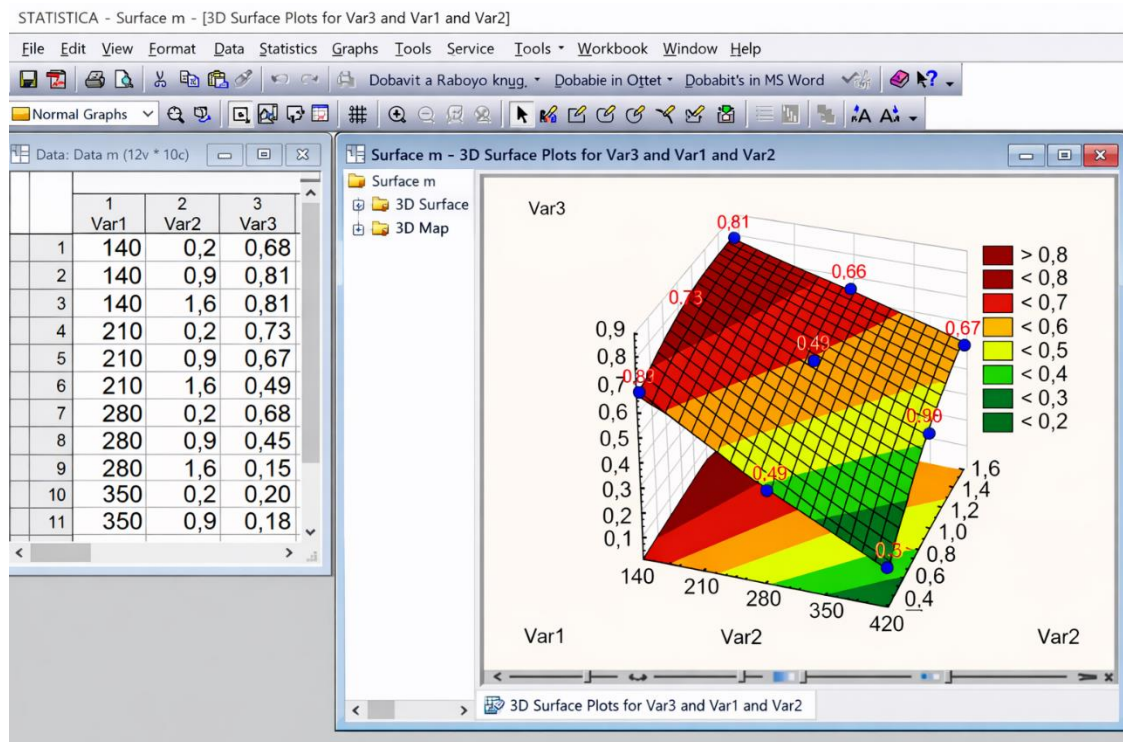
Додаток А1.1

Результати експериментальних досліджень
коефіцієнта пористості $m_{n.c}$ насіннєвої маси люцерни

№	Значення фактора		Значення коефіцієнта пористості $m_{n.c}$			
	ρ_u , кг/м ³	W_u , кг вол./кг абс. сух. реч.	Повторності			Середнє
			1	2	3	
1	140	0,2	0,7	0,68	0,66	0,68
2	140	0,9	0,73	0,75	0,74	0,74
3	140	1,6	0,83	0,81	0,79	0,81
4	280	0,2	0,38	0,37	0,39	0,38
5	280	0,9	0,61	0,63	0,59	0,61
6	280	1,6	0,65	0,67	0,66	0,66
7	420	0,2	0,18	0,17	0,19	0,18
8	420	0,9	0,46	0,45	0,44	0,45
9	420	1,6	0,5	0,54	0,52	0,52

Додаток А2.1

Експериментальний масив даних з визначення
коефіцієнта пористості $m_{n.c}$ насіннєвої маси люцерни



Var₁ – щільність шару насіннєвої маси люцерни $\rho_{ш}$, кг/м³;

Var₂ – вологовміст шару насіннєвої маси люцерни, $W_{ш}$, кг вол./кг абс. сух.
реч.;

Var₃ – коефіцієнта пористості $m_{n.c}$ насіннєвої маси люцерни.

Додаток А.3.1

Результати статистичних розрахунків

з визначення коефіцієнта пористості $m_{n.c}$ насіннєвої маси люцерни

STAT

3-number of variables; quadratic polynomial; dependence 6
Significance level P=0.95 t-alpha crit.= 2.305

N	!Corr. Coef.	!Statistic:	!Statistic:	!t-	!Coef.	!Significance
.	!regression	!Error	!Alpha	!Beta:-	!Coef. of	!Regression
r.	!reg. !V	X	dinerarizos.			

Dependent Variable
0.876796364784

Independent Variables

1	-0.789	-0.002188844069	+0.00087	-2.48	-1.08	significant
2	-0.548	+0.255098789930	+0.12521	+2.04	+0.41	n.s.
3	-0.776	+0.00000680330	+0.00060	+0.46	+0.11	n.s.
1*2	-0.093	+0.00035571636	+0.00021	+2.53	+0.24	significant
2*2	+0.500	-0.12548870142	+0.05980	-2.10	-0.26	n.s.

File name ZAMRIJI.STA

Press any key

STAT

ANOVA Table

Source	Sum of Squares	df	Mean Square
Regression	0.3071	5	0.061
Residual	0.0052	3	0.002
Total	0.3123	8	

Multiple R-Squared = 0.984
Multiple Correlation Coefficient R = 0.992
Standard Error of Estimate s = 0.041
F-Ratio = 35.766
Coef. D significant with P = 0.97374

File name: ZAMRIJI.STA

Press any key

Додаток А4.1

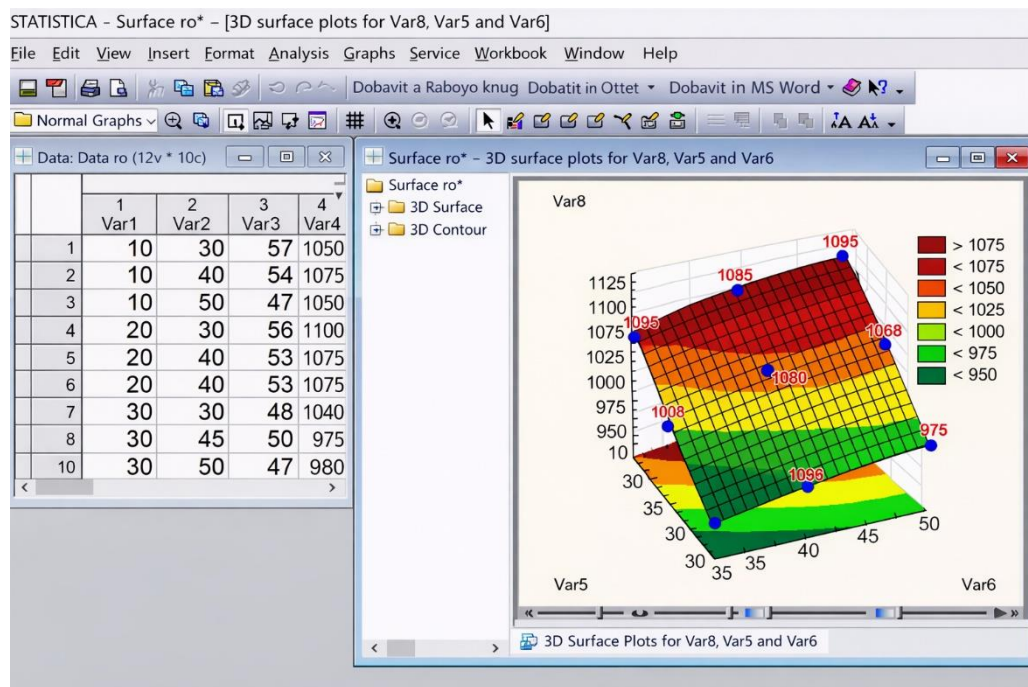
Результати експериментальних досліджень гранично допустимої температури нагрівання $t_{\partial,\bar{o}}$ та щільності $\rho_{\bar{o}}$ бобів люцерни

№	Значення фактора		Значення $t_{\partial,\bar{o}}$, °C				Значення $\rho_{\bar{o}}$, кг/м ³			
	$\tau_{н,\bar{o}}$, хв	$W_{\bar{o}}$, %	1	2	3	C*	1	2	3	C**
1	10	30	59	57	55	57	1058	1042	1050	1050
2	10	40	55	53	54	54	1070	1080	1075	1075
3	10	50	49	50	48	49	1095	1090	1100	1095
4	20	30	54	56	58	56	1005	1005	1005	1005
5	20	40	53	55	51	53	1040	1030	1020	1030
6	20	50	48	45	51	48	1040	1043	1037	1040
7	30	30	54	56	55	55	931	949	940	940
8	30	40	50	52	54	52	970	962	978	970
9	30	50	44	50	47	47	976	984	980	980

C* – середні значення $t_{\partial,\bar{o}}$, °C; C** – середні значення $\rho_{\bar{o}}$, кг/м³

Додаток А5.1

Експериментальний масив даних з визначення гранично допустимої температури нагрівання $t_{d,б}$ та щільності $\rho_б$ бобів люцерни



Var₁ – час нагрівання бобів люцерни $\tau_{н,б}$, хв;

Var₂ – вологість бобів люцерни $W_б$, %;

Var₃ – гранично допустима температура нагрівання $t_{d,б}$ бобів люцерни, °С.

Var₄ – щільності $\rho_б$ бобів люцерни, кг/м³.

Додаток А.6.1

Результати статистичних розрахунків

з визначення гранично допустимої температури нагрівання $t_{0.6}$ та щільності ρ_0 бобів люцерни- температури нагрівання $t_{0.6}$ бобів люцерни

STAT

3-number of variables; quadratic polynomial; dependence 6
Significance level P= 0.95 t-alpha crit.= 2.305

N	Corr.	!Coefficient	!Statistic:	t-	!Coef.	!Significance
:	Regression	Error	!Alpha	!Beta:-	!Coef. of Regression	
-	!teo. of	!Recoerios.				

Dependent Variable
+55.000049591064

Independent Variables:

1	-0.240	-0.10000426173	+0.00208	-48.05	-0.04	significant
2	-0.961	+0.39999705531	+0.00344	+116.40	+0.31	significant
1*1	-0.238	-0.00000000078	+0.00004	-0.00	+0.00	n.s.
1*2	-0.634	-0.00000001755	+0.00003	-0.00	+0.00	n.s.
2*2	-0.968	-0.00999963455	+0.00004	-237.01	-0.32	significant

File name: ZAMRIJ12.STA

Press any key

STAT

ANOVA Table

Source	Sum of Squares	df	Mean Square
Regression	103.9999	5	20.800
Residual	0.0001 0	3	0.000
Total	104.0000	8	

Multiple R-Squared D = 1.000
Multiple Correlation R = 1.000
Standard Error of Estimate s = 0.006
F-Ratio = 584206
Coef. D significant with P = 0.99988

File name: ZAMRIJ12.STA

Press any key

- щільності ρ_o бобів люцерни

STAT

3-number of variables; quadratic polynomial; dependence 6
Significance level P=0.95 t-alpha crit.= 2.305

N	Corr.	!Coefficient	!Statistic: ! t-	!Coef.	!Significance
:	Regression	Error	!Alpha	!Beta:-	!Coef.of Regression
..	!too of	!Recoerios.			

Dependent Variable
+916.112182617188

Independent Variables

1	-0.935	-2.333352088928	+1.24361	-1.88	-0.05	n.s.
2	-0.340	+7.583727888763	+2.05392	+3.69	+0.30	significant
1*1	-0.935	-0.066667963803	+0.02521	-2.64	-0.03	significant
1*2	-0.676	-0.012497113309	+0.01783	-0.70	-0.01	n.s.
2*2	+0.334	-0.066665776074	+0.02521	-2.64	-0.11	significant

File name: ZAMRIJ12.STA

Press any key

ANOVA Table

Source	Sum of Squares	df	Mean Square
Regression	20734.0859375	5	4146.817
Residual	38.1348 0	3	12.712
Total	20772.220703125	8	

Multiple R-Squared D = 0.998
Multiple Correlation R = 0.999
Standard Error of Estimate s = 3.565
F-Ratio = 326.223
Coef. D significant with P = 0.99726

File name: ZAMRIJ12.STA

Press any key

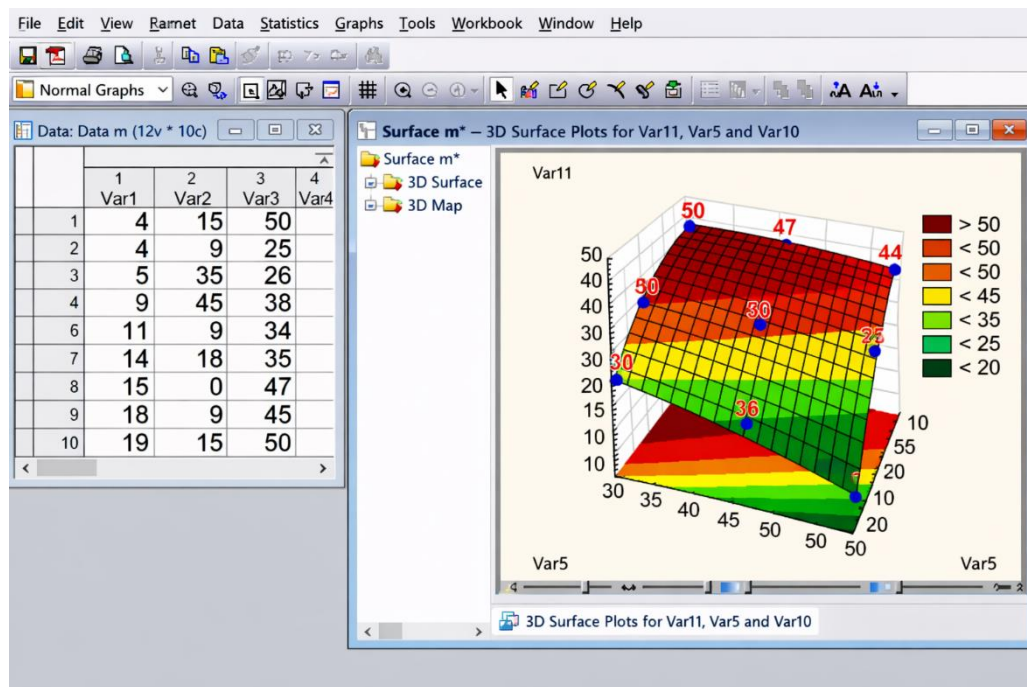
Додаток А7.1

Результати експериментальних досліджень граничної температури
нагрівання $t_{н.л}$ насіння люцерни

№	Значення фактора		Значення температури самозігрівання $t_{н.л}$ насіння люцерни, °С			
	$\tau_{н.н}$, хв	$W_{н.л}$, %	1	2	3	Середнє
1	4	15		15		15
2	4	30	26	25	27	26
3	4	45	31	35	33	33
4	11	15	40	38	36	38
5	11	30	43	41	42	42
6	11	45	49	48	47	48
7	18	15	44	42	46	44
8	18	30	47	46	48	47
9	18	45	48	52	50	50

Додаток А8.1

Експериментальний масив даних з визначення граничної температури
нагрівання $t_{н.л}$ насіння люцерни



Var₁ – час нагрівання насіння люцерни $\tau_{н.н}$, хв;

Var₂ – вологість насіння люцерни $W_{н.л}$, %;

Var₃ – температура нагрівання $t_{н.л}$ насіння люцерни, °C.

Додаток А.9.1

Результати статистичних розрахунків

з визначення граничної температури нагрівання $t_{н.л}$ насіння люцерни

3-number of variables; quadratic polynomial; dependence 6
Significance level P=0.95 t-alpha crit.= 2.305

N	! Corr.	!Coefficient	!Statistic: ! t-	!Coef.	!Significance
—	! Regression	Error	!Alpha	!Beta:-	!Coef.of Regression
—	Fiee of !	Recesrios.			

Dependent Variable:
-12.517059326172

Independent Variables:

1	+0.834	+5.520416255766	+0.38126	+14.48	+1.59 significant
2	+0.423	-0.622044285278	+0.06376	+10.85	+0.54 significant
1*1	-0.767	-0.139456093311	+0.01559	-5.89	-0.56 significant
1*2	+0.818	-0.028571477160	+0.00514	-5.56	-0.25 significant

File name: ZAMRIJ13.STA

Press any key

ANOVA Table

Source	Sum of Squares	df	Mean Square
Regression	1070.4456	5	214.089
Residual	4.4434 0	3	1.481
Total	1074.8889	8	

Multiple R-Squared D = 0.996
Multiple Correlation R = 0.998
Standard Error of Estimate s = 1.217
F-Ratio = 144.545
Coef. D significant with P = 0.99397

File name: ZAMRIJ13.STA

Press any key

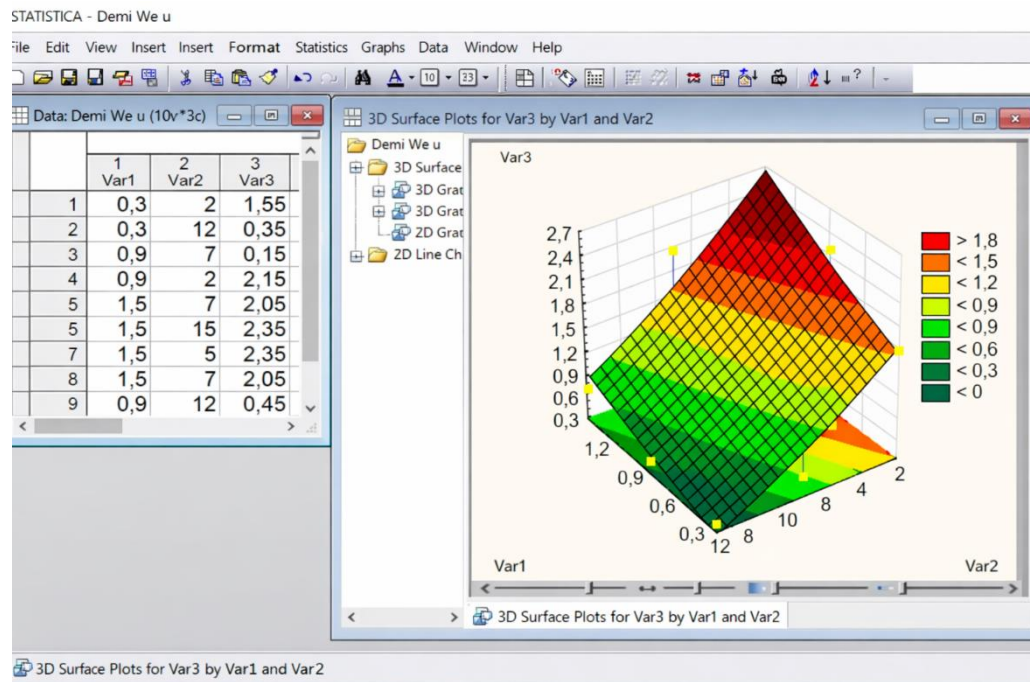
Додаток А10.2

Результати експериментальних досліджень
з визначення вологовмісту $W_{в.ш}$ в шарі насінневої маси люцерни

№	Значення фактора		Значення вологовмісту в шарі насінневої маси люцерни $W_{в.ш}$, кг вол./кг абс. сух. реч.			
	$H_{ш}$, м	$\tau_{с.ш}$, год	1	2	3	Середнє
1	0,3	2	1,65	1,45	1,55	1,55
2	0,3	7	0,3	0,35	0,4	0,35
3	0,3	12	0,15	0,2	0,10	0,15
4	0,9	2	2,2	2,25	2,3	2,25
5	0,9	7	0,85	0,95	0,75	0,85
6	0,9	12	0,2	0,3	0,25	0,25
7	1,5	2	2,35	2,3	2,4	2,35
8	1,5	7	2,0	2,05	2,1	2,05
9	1,5	12	0,55	0,35	0,45	0,45

Додаток А11.2

Експериментальний масив даних середніх значень з визначення вологовмісту

 $W_{в.ш}$ в шарі насінневої маси люцерниVar₁ – висота шару насінневої маси люцерни $H_{ш}$, м;Var₂ – час сушіння насінневої маси люцерни $\tau_{с.ш}$, год;Var₃ – вологовмісту в шарі насінневої маси люцерни, кг вол./кг абс. сух. реч.

Додаток А.12.2

Результати статистичних розрахунків

з визначення вологовмісту $W_{в.ш}$ в шарі насінневої маси люцерни

3-number of variables; quadratic polynomial; dependence 6
Significance level P=0.95 t-alpha crit.= 2.305

N	! Corr.	!Coefficient	!Statistic:	! t-	!Coef.	!Significance
2	! Regression	Error	!Alpha	!Beta:-	!Coef. of Regression	
2	!Oe of	! Recetriss.				

Dependent Variable:
- +1.5736141200483

Independent Variables:

1	+0.443	-0.902771353722	+1.66692	+0.54	+0.71	n.s.
2	-0.839	-0.155833156109	+0.18993	+0.98	-1.14	n.s.
1*1	-0.439	-0.092597592998	+0.86510	-0.09	+0.09	n.s.
1*2	+0.325	-0.041666299500	+0.07341	+0.57	-0.23	n.s.
2*2	-0.813	+0.00333294431	+0.01246	+0.27	+0.19	n.s.

File name: ZAMRIJ14.STA

Press any key

ANOVA Table

Source	! Sum of Squares	! df	! Mean Square
Regression	6.0669	5	1.213
Residual	0.5819	3	0.194
Total	6.6489	8	

Multiple R-Squared D = 0.912
Multiple Correlation R = 0.955
Standard Error of Estimate s = 0.440
F-Ratio = 6.255
Coef. D significant with P = 0.85598

File name: ZAMRIJ14.STA

Press any key

Додаток А13.2

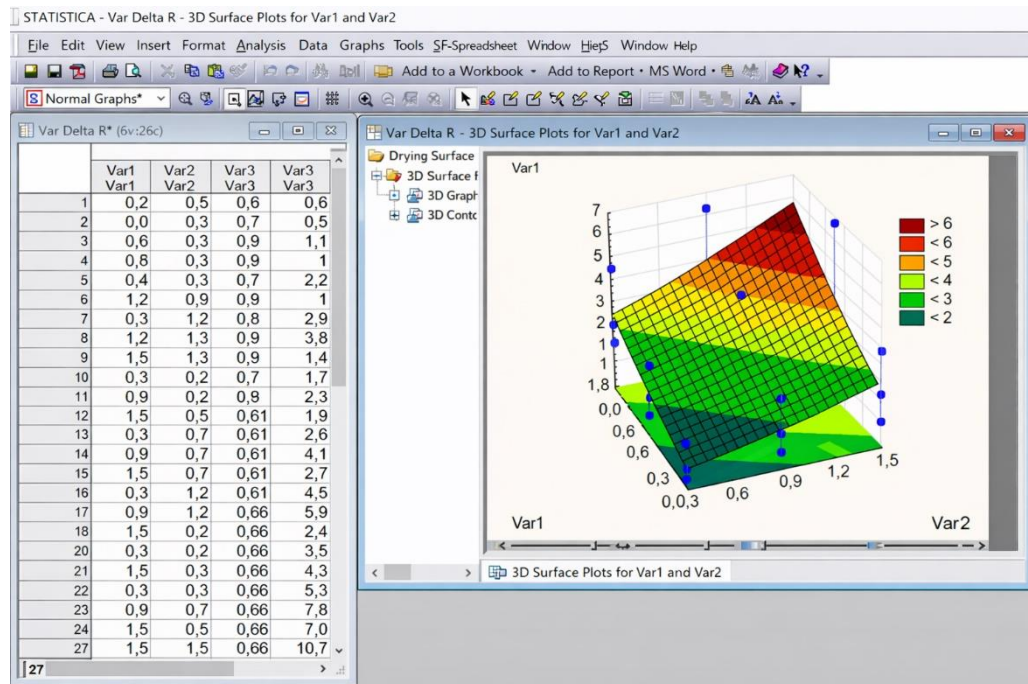
Результати експериментальних досліджень з визначення втрати тиску ΔP
повітря під час сушіння насіннєвої маси люцерни

№	Значення фактора			Середні значення втрати тиску повітря ΔP , Па
	$H_{ш}$, м	g_n , м/с	$m_{н.с}$	
1	0,3	0,2	0,56	0,5
2	0,9	0,2	0,56	0,9
3	1,5	0,2	0,56	1,4
4	0,3	0,7	0,56	1,0
5	0,9	0,7	0,56	1,5
6	1,5	0,7	0,56	2,2
7	0,3	1,2	0,56	2
8	0,9	1,2	0,56	2,9
9	1,5	1,2	0,56	3,8
10	0,3	0,2	0,61	1,1
11	0,9	0,2	0,61	1,7
12	1,5	0,2	0,61	2,3
13	0,3	0,7	0,61	1,9
14	0,9	0,7	0,61	2,8
15	1,5	0,7	0,61	4,1
16	0,3	1,2	0,61	2,7
17	0,9	1,2	0,61	4,5
18	1,5	1,2	0,61	5,9
19	0,3	0,2	0,66	2,4,
20	0,9	0,2	0,66	3,2
21	1,5	0,2	0,66	4,3
22	0,3	0,7	0,66	3,5
23	0,9	0,7	0,66	5,3
24	1,5	0,7	0,66	7,8
25	0,3	1,2	0,66	5,5
26	0,9	1,2	0,66	7,4
27	1,5	1,2	0,66	10,7

Додаток А14.2

Експериментальний масив даних середніх значень з визначення втрати тиску

ΔP повітря під час сушіння насіннєвої маси люцерни



Var₁ – висота шару насіннєвої маси люцерни $H_{ш}$, м;

Var₂ – швидкість руху повітря Q_n , м/с;

Var₃ – коефіцієнт пористості насіннєвої маси люцерни;

Var₄ – втрати тиску ΔP повітря, Па.

Додаток А.15.2

Результати статистичних розрахунків з визначення втрати тиску ΔP повітря
під час сушіння насіннєвої маси люцерни

4-number of variables; quadratic polynomial; dependence 6
Significance level P=0.95 t-alpha crit.= 2.053

N	! Corr.	!Coefficient	!Statistic:	! t-	!Coef.	!Significance
-	! Regression	Error	!Alpha	!Beta:-	!Coef.of Regression	
≥	!0e of	! Recesrios.				

Dependent Variable:
+93.6495666501931

Independent Variables:

1	+0.420	-12.6000500106812	+2.18448	-5.77	-3.28	significant
2	+0.530	-15.274061256677	+2.60595	-5.86	-3.09	significant
3	+0.651	-305.841399111238	+66.46640	-4.60	-53.99	significant
1+1	+0.419	+0.417682945722	+0.39552	+1.06	+0.13	not signif.
1+2	+0.800	+1.722509503365	+0.33561	+5.13	+0.31	significant
1+3	+0.507	+20.77170041031	+3.35609	+6.19	+3.30	significant
2+2	+0.202	+0.660874294381	+0.19338	+1.17	+0.13	not signif.
2+3	+0.611	+25.992353439341	+4.02777	+6.45	+3.21	significant
3+3	+0.654	+251.324059003320	+54.36964	+4.62	+27.18	significant

File name: ZAMRIJ.STA

Press any key

ANOVA Table

Source	! Sum of Squares	! df	! Mean Square
Regression	! 148.6587	! 9	! 16.518
Residual	! 2.0680	! 17	! 0.122
Total	150.7267	26	

Multiple R-Squared D = 0.986
Multiple Correlation R = 0.993
Standard Error of Estimate s = 0.349
F-Ratio = 135.785
Coef. D significant with P = 1.00000

File name: ZAMRIJ.STA

Press any key

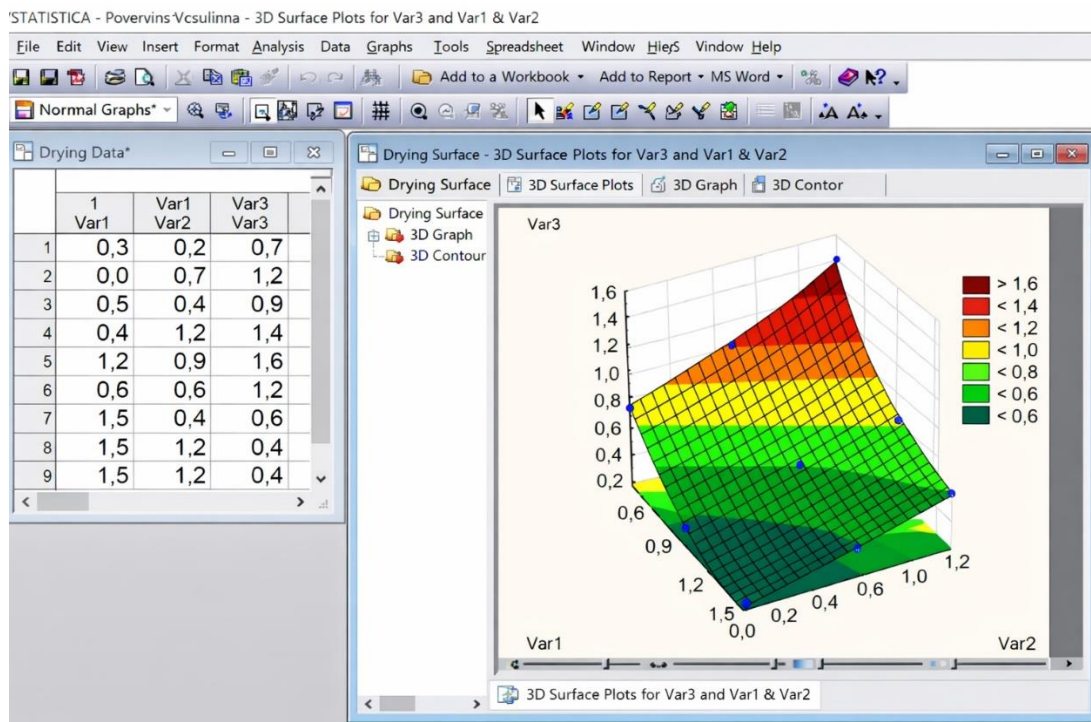
Додаток А16.2

Результати експериментальних досліджень з визначення швидкості сушіння $\mathcal{G}_{1c}$
насіннєвої маси люцерни на першому етапі

№	Значення фактора		Значення швидкості сушіння $\mathcal{G}_{1c}$ насіннєвої маси люцерни на першому етапі, кг вол./ (кг абс. сух. реч./год)			
	$H_{ш}$, м	$\mathcal{G}_n$, м/с	1	2	3	Середнє
1	0,3	0,2	0,7	0,65	0,75	0,7
2	0,3	0,7	1,5	1,3	1,4	1,4
3	0,3	1,2	2,25	2,3	2,35	2,3
4	0,9	0,2	0,2	0,25	0,15	0,2
5	0,9	0,7	0,35	0,4	0,45	0,4
6	0,9	1,2	0,65	0,55	0,6	0,6
7	1,5	0,2	0,1	0,05	0,15	0,1
8	1,5	0,7	0,25	0,2	0,15	0,2
9	1,5	1,2	0,3	0,5	0,4	0,4

Додаток А17.2

Експериментальний масив даних середніх значень з визначення швидкості сушіння $\mathcal{Q}_{1c}$ насінневої маси люцерни на першому етапі



Var₁ – висота шару насінневої маси люцерни $H_{ш}$, м;

Var₂ – швидкість руху повітря $\mathcal{Q}_n$, м/с;

Var₃ – швидкість сушіння $\mathcal{Q}_{1c}$ насінневої маси люцерни, кг вол./ (кг абс. сух. реч. /год.)

Додаток А.18.2

Результати статистичних розрахунків з визначення швидкості сушіння g_{1c}
насіннєвої маси люцерни на першому етапі

Workbook4* - Descriptive Statistics (Drying Data)

Descriptive Statistics (Drying Data)					
Variable	N	Mean	Minimum	Maximum	Std. Dev.
Var1	9	0,900000	0,300000	1,500000	0,519615
Var2	9	0,700000	0,200000	1,200000	0,433013
Var3	9	0,555556	0,100000	1,400000	0,424591

Workbook4* - Descriptive Statistics (Drying Data)

Descriptive Statistics (Drying Data)								
Variable	N	Mean	Conf. -95.000%	Conf. int. 95.000%	Minimum	Maximum	Variane	Std. Error
Var1	9	0.90000	0.600588	1.299412	0.300000	1.50000	0.270000	0.173205
Var2	9	0.70000	0.367157	1.032843	0.200000	1.20000	0.187500	0.144338
Var3	9	0.55556	0.229186	0.881925	0.100000	1.40000	0.180278	0.141350

Workbook4* - Summary Statistics; DV:Var1 (Drying Data)

Statistic	Value
Multiple R	0.815867296
Multiple R ²	0.665639445
Adjusted R ²	0.617873652
F(1,7)	13.9354839
p	0.0073295455
Std. Err. of Estimate	0.321207276

Workbook4* - Regression Summary for Dependent Variable: Var1 (Drying Data)

Regression Summary for Dependent Variable: Var1 (Drying Data)					
Regression Summary for Dependent Variable: Var1 (Drying Data) R= ,81586730 R ² = ,66563945 Adj. R ² = ,61787365 F(1,7)=13,935 p<,00733 Std.Err. of Estimate: .32121					
N=9	BETA	Std. Err. of BETA BETA	B	t(7)	p-level
Constant			1.454700	0.183149	7.94272
Var3	-0,815867	0,218554	-0,998459	0,267466	-3,73303
	-0,815867	0,218554	-0,998459	0,267466	0,007330

Додаток Б.1.1

Довідки про апробацію результатів наукових досліджень

**АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ
НА НАУКОВО-ПРАКТИЧНИХ КОНФЕРЕНЦІЯХ**
За спеціальністю 133 Галузеве машинобудування
Замрія Михайла Анатолійовича

№ п/п	Тема доповіді	Назва конференції, дата, місце проведення
1	2	3
Апробація результатів дисертації на науково-практичних конференціях		
1	Дослідження енергоефективного процесу сушіння насінників трав	Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційні підходи та цифровізація агропромислової інженерії в умовах сталого розвитку: проблеми та перспективи», м. Вінниця, 20-21 жовтня 2022 року
2	Дослідження оптимальної конструкції обладнання для сушіння пожнивної суміші насінників трав	Міжнародна наукова інтернет-конференція «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення», м. Тернопіль – м. Переворськ, 6-7 лютого 2023 р
3	Обґрунтування способу сушіння пожнивної суміші насінників трав	Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційні підходи агропромислової інженерії в контексті євроінтеграції», м. Вінниця, 19-20 жовтня 2023 року
4	Теоретичні дослідження фізико-механічних характеристик пожнивної суміші зернобобових трав, як об'єкта сушіння	Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційні підходи агропромислової інженерії в контексті глобальних викликів», м. Вінниця, 17-18 жовтня 2024 року
5	Моделювання технологічного процесу збирання насінників трав, як елемент сталого розвитку аграрного сектору економіки України в умовах європейської інтеграції	Всеукраїнська науково-практична конференція «Сталий розвиток України в умовах європейської інтеграції: сучасний стан, шлях відновлення та перспективи», м. Вінниця, 15-16 травня 2025 року
6	Дослідження втрати тиску повітря в шарі насінневої маси люцерни	XXVI Міжнародна наукова конференція «Сучасні проблеми землеробської механіки», м. Київ 17–18 жовтня 2025 року

1	2	3
7	Визначення вологовмісту насіннєвої маси люцерни для підвищення ефективності сушильних процесів	Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційні підходи агропромислової інженерії: проблеми та перспективи», м. Вінниця, 30-31 жовтня 2025 року
8	Обґрунтування параметрів сушильної установки для насіннєвої маси люцерни	IV Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених «Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва», м. Дніпро, 21 листопада 2025 року

Автор



Михайло ЗАМРІЙ

Вчений секретар



Тетяна КОРПАНИУК



МП

«12» грудня 2025 р.

Довідка про впровадження результатів наукових досліджень в виробництво

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. ректора Вінницького національного аграрного університету


Віктор МАЗУР
«17» жовтня 2025р.**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Директор ТОВ «Агромаш-Калина»


Юрій БЕЗУГЛИЙ
«17» жовтня 2025р.**А К Т****про впровадження/використання результатів
науково-технічної роботи**

Даним актом стверджується, що результати науково-технічної роботи, які отримані здобувачем третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування» Замрієм Михайлом Анатолійовичем під керівництвом кандидата технічних наук, доцента, декана факультету технології виробництва, переробки та робототехніки у тваринництві Вінницького національного аграрного університету, Солоної Олени Василівни впроваджені та використані на виробництві ТОВ «Агромаш-Калина» (ЄДРПОУ 32320510, Вінницька область, Хмельницький район, місто Калинівка, вул. Незалежності, 46). ТОВ «Агромаш-Калина» в особі директора Безуглого Юрія Миколайовича отримало дослідний зразок і конструкторську документацію удосконаленого сушильного обладнання для сушіння насіннєвої маси люцерни, яке розроблене в межах виконання дисертаційної роботи «Обґрунтування параметрів та режимів роботи обладнання для сушіння насіннєвої маси люцерни» Замрієм М.А. і Солоною О.В.

Підприємство ТОВ «Агромаш-Калина» зацікавлене у виготовленні дослідних зразків сушильного обладнання у кількості 5 штук для виробничих випробувань і серійного виробництва.

Підписаний акт не встановлює фінансових зобов'язань між сторонами. Фінансово-правові умови використання науково-технічної продукції обумовлюються двосторонніми договорами.

Від ВНАУДекан факультету технології
виробництва, переробки та
робототехніки у тваринництві ВНАУ,
к.т.н., доцент
Олена СОЛОНАЗдобувач третього освітньо-наукового
рівня вищої освіти ОНП «Галузеве
машинобудування»
Михайло ЗАМРІЙ

«17» жовтня 2025р.

Від ТОВ «Агромаш-Калина»
директор
Юрій БЕЗУГЛИЙ

«17» жовтня 2025р.

Додаток Б.3.1

Довідка про впровадження результатів дослідження в навчальний процес



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, тел. (0432) 46-00-03,
 email: office@vsau.org, rector@vsau.org, код ЄДРПОУ 00497236

10 грудня 2025 р. № Д1.1-60-1591
 на № _____ від _____

ДОВІДКА

про провадження результатів наукових досліджень
 дисертаційної роботи Замрія Михайла Анатолійовича
 на тему: «Обґрунтування параметрів та режимів роботи обладнання для
 сушіння насінневої маси люцерни»

Повідомляємо, що наукові розробки Замрія Михайла Анатолійовича за вказаною темою дисертації мають практичну цінність, що зумовило їх впровадження у навчально-методичний процес та наукову роботу кафедри агроінженерії та технічного сервісу інженерно-технологічного факультету.

Положення дисертаційної роботи використовуються при викладанні навчальної дисципліни «Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів».

Довідка видана Замрію М.А. для представлення у спеціалізовану вчену раду за місцем захисту його дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Розглянуто та затверджено на засіданні науково-методичної комісії Вінницького національного аграрного університету від 30 жовтня 2025 року, протокол № 5.

В.о. ректора



Віктор МАЗУР

Додаток Б.4.1

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. ректора Вінницького
національного аграрного
університетуВіктор МАЗУР
«*Віктор Мазур*» 2025 р.

КОД 00497238

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора

ФГ «Бухнівське»

Микола ТИМОЩУК
«*Микола Тимошук*» 2025 р.

АКТ

про виробничу перевірку

Ми, що нижче підписалися, представники Вінницького національного аграрного університету, здобувач третього освітньо-наукового рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування» Замрій Михайло Анатолійович під керівництвом к.т.н., доцента, декана факультету технології виробництва, переробки та робототехніки у тваринництві ВНАУ Солоної Олени Василівни, з однієї сторони, і представник ФГ «Бухнівське» (ЄДРПОУ 03731253, Вінницька обл., Вінницький р-н., село Бухни, вул. Центральна, буд. 6) заступник директора Тимошук Микола Павлович, з другої сторони, склали цей акт про те, що удосконалена Замрієм М.А. сушильна установка проходила виробничу перевірку на базі ФГ «Бухнівське».

Експериментальні дослідження процесу сушіння насіннєвої маси люцерни проведено з застосуванням сушильної установки з метою виявлення закономірностей, які визначають функціональний характер зміни основних показників, які регламентують даний процес.

Експериментальні дослідження з визначення вологовмісту $W_{в.ш}$ (кг в./кг абс. сух. сум.) в шарі насіннєвої маси люцерни провели на основі реалізації планованих двофакторних експериментів на трьох рівнях варіювання вхідними факторами з трикратною повторністю кожного експерименту.

Найменування факторів і їх рівні варіювання наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Вхідні фактори та рівні їх варіювання

Найменування фактора	Інтервал варіювання	Рівні варіювання факторами		
		Нижній (-1)	Нульовий (0)	Верхній (+1)
Щільність шару насіннєвої маси люцерни $\rho_{ш}$, кг/м ³	140	140	280	420
Вологість шару насіннєвої маси люцерни $W_{ш}$, *кг в./кг абс. сух. сум.	0,7	0,2	0,9	1,6

На основі проведеного аналізу встановлено, що за зміни висоти шару насінневої маси люцерни в межах 0,3–1,5 м та тривалості сушіння в межах 2–12 год функціональні апроксимовані значення вологовмісту в шарі суміші (за умови відокремлення від неї листостеблової маси) знаходяться в діапазоні від 0,15 до 2,39 кг води/кг абсолютно сухої суміші. Отримані значення відповідають розрахованим та підтверджують адекватність використаної моделі.

Аналіз окремого впливу факторів показав, що домінантним чинником, який визначає зміну вологовмісту, є тривалість сушіння. При збільшенні часу сушіння від 2 до 12 год спостерігається суттєве зменшення вологовмісту:

- при висоті шару 0,3 м – з 1,53 до 0,15 кг/кг (у 10 разів);
- при висоті шару 0,9 м – з 1,86 до 0,26 кг/кг (у 7 разів);
- при висоті шару 1,5 м – з 2,39 до 0,61 кг/кг (у 4 рази).

У той же час збільшення висоти шару суміші від 0,3 до 1,5 м за сталого часу сушіння призводить до зростання вологовмісту. Зокрема:

- при тривалості сушіння 12 год показник підвищується з 0,15 до 0,71 кг/кг (у 4,7 рази);
- при тривалості сушіння 7 год – з 0,65 до 1,41 кг/кг (у 2,2 рази);
- при тривалості сушіння 2 год – з 1,45 до 2,39 кг/кг (у 1,7 рази).

Встановлено, що інтенсивність просушування нижніх шарів (0,3–0,9 м) є меншою, ніж у верхніх шарах (0,9–1,5 м). Наприклад, за часу сушіння 2 год при зменшенні висоти шару від 0,9 до 0,3 м вологовміст зменшується на 0,22 кг/кг, тоді як при зменшенні висоти шару від 1,5 до 0,9 м – на 0,34 кг/кг. Аналогічні закономірності підтверджуються й за часу сушіння 7 та 12 год, коли різниця зменшення вологовмісту між нижніми та верхніми шарами є ще більш відчутною.

Отримані результати дозволяють прогнозувати значення вологовмісту за будь-якого поєднання висоти шару та часу сушіння. Так, наприклад, при висоті шару 0,8 м та часу сушіння 7 год показник становить 1,07 кг води/кг абсолютно сухої суміші.

Таким чином, для насінневої маси люцерни, отриманої під час збирання без відокремлення листостеблової маси, доцільним є застосування

Продовження додатку Б.4.1

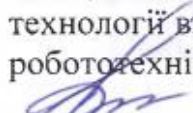
процесу сушіння в нерухомому шарі з використанням сушарок підлогового типу або установок активного вентилявання.

Впровадження результатів досліджень та методики розрахунку основних конструктивно-технологічних параметрів обладнання для сушіння дало змогу оптимізувати процес обробки насінневої маси люцерни. Це забезпечило зниження енергетичних витрат, зменшення нерівномірності сушіння та підвищення якості насіння. Розроблена конструкція обладнання та визначені режими його роботи підтвердили свою конкурентоспроможність і придатність до використання у виробничих умовах, зокрема у технологіях вирощування та переробки насіння багаторічних трав.

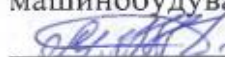
Таким чином, результати досліджень фізико-механічних властивостей насінневої маси люцерни та методика розрахунку обладнання для її сушіння успішно впроваджені у виробничий процес ФГ «Бухнівське», що підтверджує ефективність розроблених науково-практичних підходів.

Від ВНАУ

к.т.н., доцент, декан факультету
технології виробництва, переробки та
робототехніки у тваринництві ВНАУ

 Олена СОЛОНА

Здобувач третього освітньо-наукового
рівня вищої освіти ОНП «Галузеве
машинобудування»

 Михайло ЗАМРІЙ

«01» жовтня 2025 р.

Від ФГ «Бухнівське»

Заступник директора



 Микола ТИМОЩУК

«01» жовтня 2025 р.

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
Замрія Михайла Анатолійовича
за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування

№ п / п	Назва праці	Вихідні дані	Обсяг (у сторінках/ друк. арк.)	Співавтори
1	2	3	4	5
Статті у науковому фаховому виданні віднесеному до міжнародної наукометричної бази Scopus				
1	Determination of the dependence of the physico-mechanical properties of alfalfa seed pods on moisture content	<i>Technology Audit and Production Reserves</i> . 2025. 3/3 (83). DOI: 10.15587/2706-5448.2025.331286 URL: https://journals.urau.ua/tarp/article/view/331286/321220	P. 84–90. (1,26/1,1)	Solona O., Spirin A., Tverdokhlib I., Polievoda Y., Kovalova K.
2	Development and research of energy-efficient helio-air collectors for drying agricultural products	<i>Technology Audit and Production Reserves</i> . 2024. № 6/1(80). DOI: 10.15587/2706-5448.2024.318480 URL: https://journals.urau.ua/tarp/article/view/318480	P. 54-60. (0,88/0,62)	Kotov B., Kalinichenko R., Spirin A., Gudzenko N., Didyk A.
Статті у наукових фахових виданнях ВНАУ (Категорія Б)				
3	Дослідження процесу сушіння насінників трав	<i>Вібрації в техніці та технологіях</i> . 2022. № 3(106). DOI: 10.37128/2306-8744-2022-3-11 URL: http://vibrojournal.vsau.org/storage/articles/December2022/4xt26FTIEQ1X5X5VD6hh.pdf	C. 78–87 (0,76/0,69)	Солоня О.В.
4	Визначення швидкості сушіння насіннєвої маси люцерни в нерухомому шарі	<i>Вібрації в техніці та технологіях</i> . 2025. № 2(117). DOI: 10.37128/2306-8744-2025-2-5 URL: http://vibrojournal.vsau.org/storage/articles/October2025/rlu0Vz7wFdVJAkY5Q3i7.pdf	C. 46–50 (0,81)	-
Матеріали наукових конференцій				
5	Обґрунтування параметрів сушильної установки для насіннєвої маси люцерни	<i>Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу: збірник тез IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених</i> . 21 листопада 2025 р. Дніпро: ДДАЕУ, 2025.	C. 132-135 (0,2/0,1)	Солоня О.В.

1	2	3	4	5
6	Дослідження втрати тиску повітря в шарі насіннєвої маси люцерни	<i>Сучасні проблеми землеробської механіки: збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції. 17-18 жовтня 2025 р. Київ. 2025.</i>	<u>C.363-366</u> (0,15)	-
7	Дослідження оптимальної конструкції обладнання для сушіння поживної суміші насінників трав	<i>Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення: матеріали Міжнародної наукової інтернет-конференції. 6-7 лютого 2023 р. Тернопіль. 2023. ISSN 2522-932X</i> URL: http://www.konferenciaonline.org.ua/data/downloads/file_1671551587.pdf	<u>C. 186-190</u> (0,3/0,15)	Солоня О.В.
Патенти та авторські свідоцтва				
8	Ескізне креслення «Принципова схема пристрою для сушіння поживної суміші люцерни»	Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Свідоцтво № 141367 від 02.12.2025; заяв. № с202508622 від 07.10.2025.		Солоня О.В., Волинець Є.О.

Усього за темою дисертаційної роботи «Обґрунтування параметрів та режимів роботи обладнання для сушіння насіннєвої маси люцерни» опубліковано 8 наукових праць загальним обсягом 4,36 умовн. друк. арк. (власний доробок автора 3,62 умовн. друк. арк.) у тому числі 1,72 умовн. друк. арк. у наукових фахових виданнях включених до міжнародних наукометричних баз Scopus; 1,5 умовн. друк. арк. у наукових фахових виданнях України категорії «Б», 0,4 умовн. друк. арк. у інших виданнях.

Автор



Михайло ЗАМРІЙ




Тетяна КОРПАНИЮК

2025 р.